Кафедра комп'ютерної інженерії та електроніки

Назва дисципліни – Фізичні основи інформаційних технологій

Викладач: Котик Михайло Васильович

1. Магнітний запис, зберігання та читання інформації
2. Фізичні основи напівпровідникових пристроїв обчислювальної техніки.
3. Оптичні системи запису, зберігання та читання інформації.
4. Пристрої виведення та введення інформації.
5. Фізичні основи комп'ютерно-інтегрованих інформаційних систем.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Національний університет водного господарства
та природокористування

О.О. Лебедь, В.Ф. Орленко, О.Д. Кочергіна

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Навчальний посібник

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки,
молоді та спорту України як навчальний посібник
для студентів вищих навчальних закладів*

Рівне – 2013

Національний університет
водного господарства
та природокористування

УДК 681.518:53 (075.8)
ББК 32.98:22.3я7
Л33

Рекомендовано Міністерством освіти і науки,
молоді та спорту України.
(Лист № 1/11-1140 від 05.02.2013р.)

Рецензенти:
Власюк А.П., д-р техн. наук, професор Національного університету водного господарства та природокористування (м. Рівне);
Джунь Й.В., д-р фіз.-мат. наук, професор Міжнародного економіко-гуманітарного університету ім. акад. Степана Дем'янчука (м. Рівне);
Юхимчук В.О., д-р фіз.-мат. наук, зав. відділу ІФН ім. В.Є. Лашкарьова НАН України (м. Київ).

Лебедь О.О., Орленко В.Ф., Кочергіна О.Д.
Л33 Фізичні основи інформаційних систем. Навч. посібник. – Рівне: НУВГП, 2013. – 185 с.

ISBN 978-966-327-234-4

Навчальний посібник призначено для вивчення фізичних явищ, методик та технологій, які є основою роботи сучасних комп'ютерів. Детально розглянуто магнітні явища та фізику напівпровідників, їх роль в пристроях запису, відтворення та зберігання інформації. У посібнику викладено елементи теорії хвиль, оптика та оптичні методи, які використовуються в інформаційних системах. Значну увагу приділено перспективним технологіям комп'ютерної техніки – флуоресцентним, голографічним, квантовим тощо.

Для студентів технічних спеціальностей вищих навчальних закладів.

УДК 681.518:53 (075.8)
ББК 32.98:22.3я7

ISBN 978-966-327-234-4

© Лебедь О.О., Орленко В.Ф., Кочергіна О.Д., 2013
© НУВГП, 2013

Національний університет
водного господарства
та природокористування

ПЕРЕДМОВА

В основу навчального посібника покладено конспект лекцій спецкурсу „Фізичні основи інформаційних систем” для студентів напрямів підготовки „Прикладна математика”, „Геодезія картографія та землеустрій” Національного університету водного господарства та природокористування в межах навчального курсу „Інноваційні технології”. Цей односеместровий спецкурс впродовж декількох років читав співавтор підручника О.О. Лебедь.

Загалом інформаційну систему можна означити як взаємопов’язану сукупність засобів і методів, які використовуються для зберігання, обробки та видачі інформації. Залежно від галузі застосування інформаційні системи бувають різного призначення та масштабу. Однак, всі інформаційні системи (ІС) мають спільні властивості:

- ІС призначені для збору, зберігання та обробки інформації. Таким чином, в основі будь-якої інформаційної системи лежать засоби зберігання і доступу до даних;
- ІС призначені для користувача, який не є фахівцем в галузі обчислювальної техніки. ІС повинні забезпечувати простий та зручний інтерфейс.

Завданням навчального посібника є вивчення різних фізичних методів (магнітних, напівпровідникових, оптичних, механічних), які покладені в основу функціонування апаратного забезпечення інформаційних систем.

Відповідно до навчальної програми розглянуто магнітні та електричні явища в середовищі, елементи фізики напівпровідникових приладів, хвильова та квантова оптика. Саме ці фізичні явища широко застосовуються в сучасній обчислювальній техніці.

Особливу увагу приділено перспективам застосування нових магнітних, напівпровідникових, оптичних та інших фізичних методів. Відомо, що розвиток цих методів дозволить суттєво збільшити обсяг пам’яті, швидкодію комп’ютера та його периферії наступних поколінь. Нині поряд з широким фронтом пошукових робіт знаходять застосування методи здійснення математичних перетворень за допомогою оптичних систем, частіше використовуються голографічні методи обробки і зберігання

Національний університет
водного господарства
та природокористування

інформації, є суттєвий прогрес у створенні квантового комп'ютера, розробляються і застосовуються оптоелектронні перетворювачі, які дозволяють поєднати оптичну та електронну частини комп'ютера.

В навчальному посібнику відображено історичний розвиток застосування того чи іншого фізичного принципу в пристроях комп'ютерної техніки, а також еволюцію цих пристроїв.

Інженерні питання розглядаються на прикладі реалізації типових комп'ютерних схем, вузлів, пристроїв і логічних схем. Ці приклади сприяють кращому розумінню фізичних явищ, які лежать в основі роботи обчислювальної техніки.

Автори спільно розробляли план і обговорювали зміст усіх розділів навчального посібника. Розділи I, IV написані О.О. Лебедем та О.Д. Кочергіною, розділ II – В.Ф. Орленком, а розділ III – О.О. Лебедем.

Автори висловлюють подяку доцентам кафедри фізики НУВГП Є.С. Никонюку та А.В. Рибалку за цінні зауваження, які сприяли поліпшенню рукопису підручника.

Окрема подяка К.О. Віннік за якісні ілюстрації до підручника.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Національний університет
водного господарства
та природокористування

РОЗДІЛ 1
МАГНІТНИЙ ЗАПИС, ЗБЕРІГАННЯ ТА ЧИТАННЯ ІНФОРМАЦІЇ

В цьому розділі розглянуто основні фізичні явища, які лежать в основі запису, зберігання та читання інформації за допомогою магнітних систем. Передбачається, що читач знайомий з основами електромагнетизму в рамках курсу загальної фізики для студентів технічних спеціальностей вищих навчальних закладів [1,2].

Тривалий час в якості основного пристрою зберігання даних в обчислювальній техніці використовувались перфокарти та перфострічки. Вперше їх застосували у програмованих ткацьких верстатах (1725 р.). В обчислювальних машинах СРСР середини XX століття найбільшого поширення отримала 80-колонкова перфокарта (див. рис. 1.1). Кожна колонка кодувала 1 байт. 8 із 80 байтів були службовими. Стандартні розміри перфокарти становили 187,4x82,5 мм. Швидкість їх обробки – 2000 карт за 1 хв. Зчитування даних з перфокарт здійснювалось за допомогою фотоелементів.

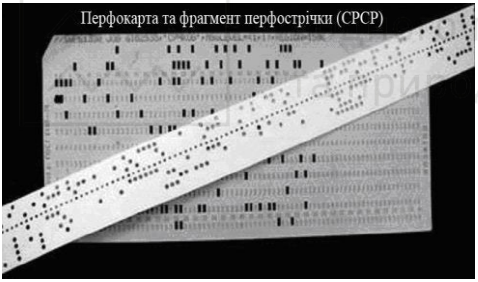


Рис. 1.1. 80-колонкова перфокарта та перфострічка

Лише у 1949 році група інженерів компанії IBM розпочала розробку нового пристрою зберігання даних – магнітного носія. В основу принципу запису, зберігання і читання інформації було покладено явище намагнічування шару феромагнітного матеріалу (робочого шару), нанесеного на немагнітну основу. Це явище використовувалось в ЕОМ першого покоління, широко воно застосовується й нині. Пояснюється це наступними *перевагами* магнітного запису у порівнянні з іншими:

1. малою вартістю зберігання 1 біта інформації;
2. простотою запису і зчитування;
3. великою щільністю зберігання інформації.

Національний університет водного господарства та природокористування

1.1. Магнетики

Речовини, які здатні змінювати індукцію магнітного поля називаються *магнетиками*. В магнітному полі магнетики намагнічуються, виникає власне магнітне поле, яке змінює сумарне поле. Процес намагнічування магнетика полягає у впорядкуванні просторової орієнтації атомів і молекул магнетика. В найпростішій моделі намагнічування рух електронів в атомі еквівалентний коловим струмам і тому кожен атом може розглядатись, як контур із результуючим електричним струмом.

Нагадаємо [1], що така рамка характеризується магнітним моментом

$$\vec{p} = i \cdot S \cdot \vec{n}\,, \tag{1.1}$$

де i – сила струму, S – площа рамки, $\vec{n}$ – вектор нормалі до площі контура.

В однорідному магнітному полі індукції $\vec{B}$ на контур зі струмом діє момент сили

$$\vec{M} = \left[\vec{p} \times \vec{B}\right], \tag{1.2}$$

який намагається повернути контур так, щоб напрями векторів $\vec{p}$ і $\vec{B}$ співпадали. Для більшості матеріалів при відсутності зовнішнього магнітного поля, магнітні моменти $\vec{p}$ атомів напрямлені хаотично, тому сумарний магнітний момент дорівнює нулю. В зовнішньому магнітному полі в результаті дії моментів сил відбувається орієнтація магнітних моментів окремих атомів за напрямом цього поля. В результаті сумарний магнітний момент магнетика стає відмінним від нуля – магнетик намагнічується. Такій орієнтації магнітних моментів атомів заважає хаотичний тепловий рух останніх. Тому в слабких магнітних полях ступінь орієнтації магнітних моментів $\vec{p}$ невелика, але вона зростає при збільшенні зовнішнього намагнічуючого поля.

Кількісною характеристикою намагнічення магнетика є вектор намагнічення

$$\vec{J} = \sum_i \vec{p}_i\,, \tag{1.3}$$

який дорівнює сумі магнітних моментів $\vec{p}$ одиниці об’єму магнетика.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Рис. 1.2. Залежність магнітної проникності феромагнетика μ від напруженості зовнішнього магнітного поля H

За характером залежності вектора $\vec{J}$ від напруженості $\vec{H}$ зовнішнього намагнічуючого поля магнетики поділяються на три класи: діамагнетики, парамагнетики та феромагнетики.

Діамагнетики, до яких відносяться, наприклад, мідь, свинець, срібло, вода тощо, намагнічуються так, що вектори $\vec{J}$ і $\vec{H}$ стають антипаралельними. Парамагнетики ж, до яких відносяться платина, алюміній, кисень тощо, намагнічуються так, що вектори $\vec{J}$ і $\vec{H}$ співпадають. Для діамагнетиків і парамагнетиків в широкому діапазоні практично застосовуваних $\vec{H}$ зберігається прямопропорційна залежність

$$\vec{J} = \chi \vec{H}, \tag{1.4}$$

де магнітна сприйнятливість χ <0 для діамагнетиків і χ >0 для парамагнетиків. На практиці частіше користуються величиною магнітної проникності

$$\mu = 1 + \chi. \tag{1.5}$$

Нарешті, третій клас магнетиків (феромагнетики) відрізняється складною нелінійною і неоднозначною залежністю вектора $\vec{J}$ від $\vec{H}$. Ці вектори в загальному випадку не колінеарні. Крім того магнітні властивості феромагнетиків часто залежать від взаємної орієнтації зовнішнього намагнічуючого поля і магнітного поля зразка – феромагнетики анізотропні.

Прикладами феромагнетиків є залізо, кобальт, нікель, магнетит, ферит тощо.

До основних властивостей феромагнетиків, що відрізняють їх від діа- і парамагнетиків можна віднести наступні:

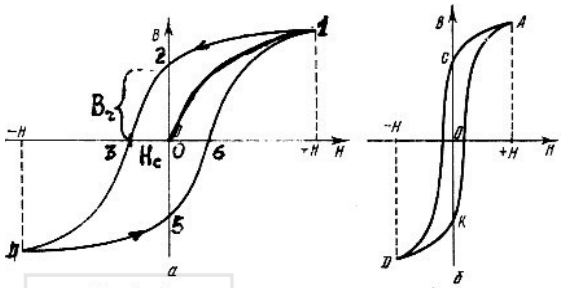
1. Величина коефіцієнта χ, а значить і μ, значно перевищує одиницю, досягаючи значень ~ 10^6. Крім того, ці коефіцієнти є тензорними величинами, напрями $\vec{J}$ і $\vec{H}$ в загальному випадку не співпадають.

Національний університет водного господарства та природокористування

2. На відміну від парамагнетиків, феромагнетики намагнічуються до насичення вже в слабких полях.

3. Магнітна проникність феромагнетика залежить від напруженості намагнічуючого поля (рис. 1.2).

4. Залежність індукції магнітного поля зразка *B* від напруженості зовнішнього магнітного поля *H* (рис. 1.3) має гістерезисний характер.



Криві гістерезису різних матеріалів: *а*) жорстка сталь; *б*) м'яка сталь.

Рис. 1.3. Залежність індукції магнітного поля зразка *B* від напруженості зовнішнього магнітного поля *H*

При внесенні розмагніченого феромагнетика в зовнішнє поле залежність *B(H)* описується спочатку кривою 0-1. При зменшенні *H* до нуля *B(H)* змінюється по кривій 1-2; тобто має місце відставання зміни індукції від зміни напруженості. Це явище називається магнітним гістерезисом. Магнітна індукція, що зберігається у феромагнетику після зникнення зовнішнього поля (при $H = 0$), називається залишковою магнітною індукцією B_r (постійні магніти). Щоб розмагнітити феромагнетик, потрібно прикласти зовнішнє поле протилежного напряму з напруженістю H_c, яка називається коерцитивною силою. При подальшому збільшенні напруженості відбувається намагнічування протилежного напрямку по кривій 3-4. Ділянка 4-5-6 знову відповідає розмагнічуванню. Надалі процес перемагнічування відбувається по замкненій кривій 6-1-2-3-4-5-6 (рис. 1.3), яка називається петлею гістерезису. В залежності від величини H_c усі феромагнітні матеріали поділяють на жорсткі (рис. 1.3,а) і м'які (рис. 1.3,б).

Властивості феромагнетиків пояснюються наявністю областей, які при відсутності зовнішнього поля спонтанно намагнічені до насичення. Ці області називаються *доменами.* Розміри доменів ~ $(10^{-4} \div 10^{-6})$ *м*. Розташування і намагніченість доменів такі, що у

Національний університет водного господарства та природокористування

відсутності зовнішнього поля сумарна намагніченість дорівнює нулю. В зовнішньому полі вектори намагніченості доменів частково орієнтуються в напрямі поля, феромагнетик намагнічується.

1.2. Фізичні основи принципу запису на магнітний носій та читання з нього

В основі магнітного запису лежить явище зберігання залишкової намагніченості феромагнітного робочого шару. Магнітний запис перетворює інформацію, закладену в якусь часову функцію $F_1(t)$, в інформацію зафіксовану на магнітному носієві у вигляді функції, залежної від координат, в найпростішому випадку від однієї координати $F_2(x)$. Зазвичай функція $F_1(t)$ задається у вигляді змінного в часі струму $i(t)$. Цей струм протікає через головку магнітного запису, а точніше через її обмотку. Найпростіша головка запису представлена на рис. 1.4. Осердя такої головки повинне бути виготовлено з феромагнетика з вузькою петлею гістерезису (наприклад, м'якого заліза). На осердя одягнена котушка. В обчислювальних машинах струм не є неперервний, а подається на котушку у вигляді коротких імпульсів. В котушці виникає магнітний потік $\Phi(t)$, який поширюється по осердю і попадає в його щілину – зазор між торцями осердя. Цієї частини осердя торкається рухомий робочий феромагнітний шар носія, що рухається з деякою швидкістю υ відносно головки. Струм $i(t)$, що протікає по обмотці, створює змінне магнітне поле з індукцією $B(t)$, яка, при умові вузькості петлі гістерезису матеріалу осердя, достатньо точно повторює закон зміни струму $i(t)$. Магнітне поле, розсіюючись в зазорі осердя, проникає всередину феромагнітного робочого шару, намагнічуючи його.

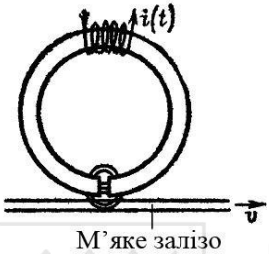


Рис. 1.4. Найпростіша головка запису

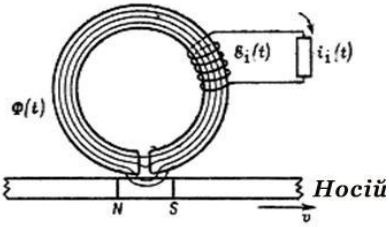


Рис. 1.5. Головка читання

Національний університет водного господарства та природокористування

Величина і напрямок вектора залишкової намагніченості J залежать від координати x і представляє функцію $F_2(x)$, що несе записану інформацію. Оскільки $x=\upsilon \cdot t$, то **умовою неспотвореної інформації** є

$$F_1(t) = \alpha \cdot i(t) = \beta \cdot J(\upsilon \cdot t) = \gamma \cdot F_2(\upsilon \cdot t), \qquad (1.6)$$

де α, β, γ – постійні коефіцієнти [3].

Очевидно, що внаслідок складного гістерезисного характеру кривої намагнічення робочого шару, умова (1.6) може бути виконана лише приблизно.

Для відтворення інформації магнітного запису служить головка читання, яка, якщо не вдаватися в деталі, аналогічна головці запису (див. рис.1.5).

Рис. 1.6. Графік залежності $i_i(t)$ для фронту і спаду сигналу

При проходженні феромагнітного робочого шару носія, намагніченого за законом $F_2(\upsilon \cdot t)$, біля зазору головки читання зі швидкістю υ потік магнітної індукції Φ, що пронизує обмотку котушки, змінюється в першому наближенні за законом $F_2(x) = k \cdot \Phi(\upsilon \cdot t)$, де k – постійний коефіцієнт пропорційності. Згідно з законом Фарадея в котушці головки виникає електрорушійна сила (е. р. с.) індукції:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}, \qquad (1.7)$$

причому кожному відтвореному імпульсу відповідає два імпульси $\varepsilon_i(t)$ різної полярності. Індукційний струм котушки $i_i(t)$, що відповідає прямокутним імпульсам $\varepsilon_i(t)$, визначається формулами:

1. За переднім фронтом імпульсу:

$$i_i = \frac{\varepsilon_{im}}{R}\left(1 - \exp\left(-\frac{R}{L}t\right)\right). \qquad (1.8)$$

2. За заднім фронтом (спадом) імпульсу:

$$i_i = C \exp\left(-\frac{R}{L}t\right). \qquad (1.9)$$

Тут ε_{im} – амплітудне значення $\varepsilon_i(t)$, R – опір котушки, L – її індуктивність, C – стала.

Національний університет водного господарства та природокористування

Залежність $i_i(t)$ для фронту і спаду сигналу показана на рис. 1.6.

Залежність магнітного потоку $\Phi(t)$ в осерді головки зчитування при проходженні магнітної стрічки з намагніченими ділянками, а також залежність е.р.с. $\varepsilon_i(t)$ і струму індукції $i_i(t)$ в котушці показано на рис. 1.7.

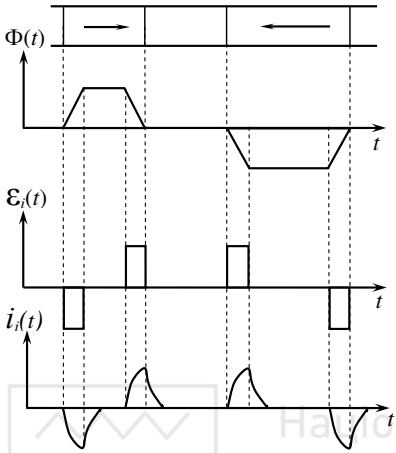


Рис. 1.7. Залежність Ф (t), $\varepsilon_i(t)$, $i_i(t)$

1.3. Пам’ять на магнітних носіях

За геометрією носія розрізняють:

1. Пам’ять на магнітній дротині.
2. Пам’ять на магнітній стрічці.
3. Феритову пам’ять.
4. Пам’ять на магнітних дисках.

Національний університет водного господарства та природокористування

1.3.1. Пам’ять на магнітній дротині

Пам’ять на магнітній дротині (англ.: plated wire memory) [4] використовувалась в магнітофонах до запровадження в якості носія магнітної стрічки. Вперше як носій інформації магнітна дротина була застосована у 1898 році в телеграфоні Паульсена (див. рис. 1.8). На циліндр, який міг обертатись з постійною швидкістю, щільно намотувався металевий дріт діаметром 0,5 мм. Вздовж циліндра по направляючій рухалась електромагнітна головка зі швидкістю 2,1 м/с, яка могла намагнічувати певні ділянки дроту. Для відтворення запису процеси відбувались у зворотному напрямку.

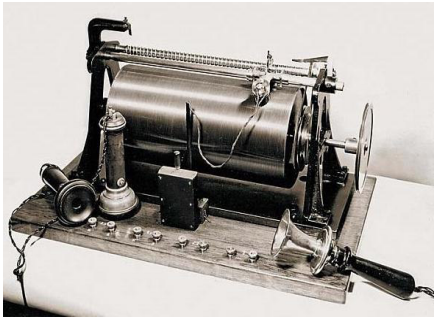


Рис. 1.8. Телеграфон Паульсена

Національний університет водного господарства та природокористування

Слід зазначити, що при використанні дроту в якості носія виникала проблема з'єднання окремих його відрізків.

Останнім часом пам'ять на магнітній дротині використовується в авіаційних „чорних скриньках", оскільки цей носій має високу стійкість до зовнішнього впливу екстремальних температур, тисків, дії агресивних середовищ тощо.

1.3.2. Пам'ять на магнітній стрічці

Пам'ять на магнітній стрічці (англ.: magnetic tape memory, стрімер) відноситься до економного засобу зберігання інформації. Вона застосовується для зберігання великого обсягу відповідальних даних, які використовуються досить рідко або не вимагають малого часу доступу [4].

Вперше приводи на магнітній стрічці були випущені корпорацією IBM у 1952 році. В цих пристроях з цифровим зберіганням інформації використовувалась перша комерційна комп'ютерна стрічка, розроблена компанією 3M. Мета 3M полягала в розробці магнітної стрічки із щільністю запису близько 100 біт/дюйм^2 (bpi) і загальної ємності до 2 МБ.

У 1957 році в якості основи магнітної стрічки почала використовуватись попередньо витягнута тонка поліефірна плівка. Перші магнітні стрічки містили від 7 до 9 доріжок (треків), а їх щільність досягала 488 доріжок на дюйм (lpi). Робочий шар стрічки покривався тонким шаром пластику для захисту стрічки від деформації головкою, а також – від впливу вологості. Крім того, вперше бобіни магнітної стрічки було вкладено в *картриджі*. Така конструкція зменшувала чутливість стрічки до умов навколишнього середовища і механічних впливів. Вона стала більш придатною для використання в автоматичному режимі, полегшуючи пошук та управління інформацією.

Параметри сучасних магнітних стрічок наступні:

1. Ширина стрічки – від 3,81 мм до 12,5 мм.
2. Ширина треку на магнітній стрічці – 1,5 мкм.
3. Щільність доріжок (lpi) – 488 доріжок на дюйм.
4. Лінійна щільність бітів інформації в найновіших зразках стрічок становить 150000 біт/дюйм.

Національний університет водного господарства та природокористування

5. Матеріал основи: ацетилцелюлоза, полівінілхлорид, поліефірна смола. Товщина основи – 20-45 мкм.

6. Загальна кількість інформації на одній стрічці – до 8 ТБ.

Матеріалом феромагнітного робочого шару служить сухий лак, в якому знаходиться феромагнітний матеріал (Fe_2O_3, сплав Co - Ni, CrO_2, металізоване покриття (МР)). Феромагнітний матеріал з лаком має назву – феролак. Товщина феролаку – 5-20 мкм. Частинки феромагнетику можуть мати кубічну або голкову форму при довжині голок – 0,1-1 мкм. Голки розміщуються вздовж стрічки. Феромагнетик робочого шару складає близько 30% від об'єму лаку.

Використовується також магнітні стрічки з подвійним барій-феритовим робочим шаром, що дозволяє в декілька разів підвищити щільність інформації на стрічці.

В якості головок читання використовуються GMR-головки.

В цілому запис і читання інформації на магнітну стрічку відбувається за фізичними принципами приведеними в параграфі 1.2, але існує низка обмежень до матеріалу робочого шару стрічки, її швидкості відносно головки читання, величини зазору головки та ін.

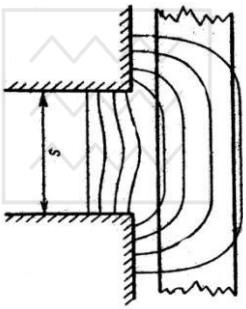


Рис. 1.9. Силові лінії магнітного поля біля зазору записуючої головки

Результати розрахунку магнітного поля біля зазору записуючої головки приведені на рис. 1.9, де зображені силові лінії магнітного поля. При імпульсній зміні струму *i(t)* в обмотці головки запису на стрічці утворюються ділянки, напрямок вектора намагнічення яких або співпадає з напрямком руху стрічки для імпульсів струму однієї полярності, або протилежний напрямку руху стрічки для імпульсів струму протилежної полярності. Орієнтовно можна вважати, що довжина ділянки l намагніченості доріжки стрічки становить

$$l \approx \upsilon \tau + s, \qquad (1.10)$$

де τ – час імпульсу струму в головці, s – величина зазору, υ – швидкість руху стрічки.

Для того, щоб вектор намагнічення ділянки треку стрічки мав однорідне значення, необхідно щоб на ньому була присутня

Національний університет водного господарства та природокористування

достатньо велика кількість голок феромагнетику. Тому необхідне виконання умови: $l >> l_г$, (1.11)

де $l_г$ – середня довжина однієї голки.

Для розділення намагнічених ділянок, що відповідають двом послідовним імпульсам в котушці головки необхідно, щоб за час паузи між імпульсами струму τ_n намагнічена ділянка встигла вийти із магнітного поля в зазорі осердя. Для цього повинна виконуватись умова:

$$\frac{s}{\upsilon} < \tau_n . \qquad (1.12)$$

Співвідношення (1.10) і (1.12) показують, що допустима щільність запису інформації на доріжці при заданій швидкості її руху збільшується при зменшенні ширини зазору осердя записуючої головки. Однак, довільно зменшувати ширину зазору s неможливо, оскільки при цьому буде зменшуватись розсіювання магнітного поля і глибина його проникнення в робочий шар стрічки. В результаті цього буде зменшуватись і величина вектора намагнічення. Крім того, створення вузьких і в той же час достатньо однорідних по товщині зазорів є технічно важкою задачею.

Всі ці фактори, а також умова (1.11) обмежують граничну щільність магнітного запису на стрічку та інші магнітні носії.

Технології запису даних на магнітну стрічку

Технології, що використовуються при створенні стрічкових накопичувачів, залежать від декількох обставин. Вони повинні оптимізувати ширину стрічки і метод розміщення запису на ній, забезпечити максимальну швидкість руху і мінімальне число перегинів при перемотуванні, знайти спосіб зниження тертя між стрічкою і головками запису/читання тощо. Інший комплекс проблем пов’язаний з вибором способу запису на плівку та визначенням методу зчитування інформації, в тому числі і компресії даних. Але найголовніше – знайти оптимальне поєднання, що забезпечує найшвидший доступ до даних, високу їх пропускну здатність та надійність зберігання. У пошуках оптимального рішення фірми-виробники розробляють власні системи. Проте, незважаючи на конструктивні відмінності, в усіх стрічкових пристроях використовується лише два базових методи запису:

1. **Лінійний магнітний запис** (DLT/SDLT, SLR, LTO);

Національний університет водного господарства та природокористування

2. **Похило-рядковий магнітний запис** (DAT/DDS, AIT, S-AIT, VXA).

Лінійна технологія (серпантинний запис) (див. рис. 1.10.*I*) передбачає рух магнітної стрічки вздовж нерухомих записуючої і читаючої головок. Операції запису/читання виконуються як при прямому, так і при зворотному русі стрічки. Таким чином, інформація записується по доріжках, розташованих вздовж магнітної стрічки. При записі/читанні стрічка рухається в обох

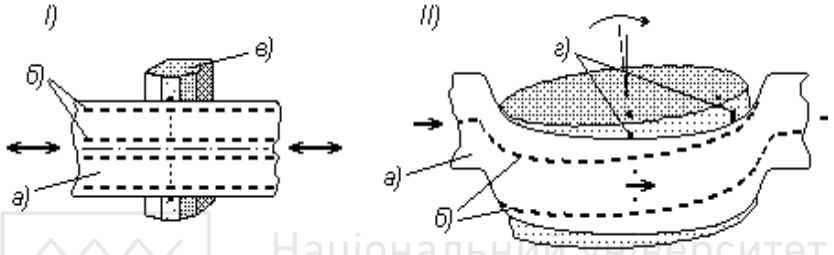


Рис. 1.10. Лінійний (*I*) і похило-рядковий (*II*) магнітний запис: *а)* магнітна стрічка, *б)* доріжки, *в)* фіксована магнітна головка, *г)* магнітні головки, що обертаються

Національний університет водного господарства та природокористування

напрямках вздовж нерухомої головки; по досягненні кінця стрічки головка зсувається на одну доріжку, а стрічка рухається в протилежному напрямку. Для збільшення швидкості запису/читання встановлюється декілька головок, які працюють з декількома доріжками одночасно.

***Переваги*:**

1. Можливість створення простого і надійного механізму протягування стрічки.
2. Незначне зношування магнітної стрічки.
3. Висока надійність зберігання даних.

***Недоліки*:**

1. Відносно низька щільність запису інформації.
2. Залежність швидкості запису/читання від швидкості руху магнітної стрічки.

У системах з *похило-рядковим записом (спіральний запис)* кілька записуючих/читаючих головок розміщують на барабані, що обертається (див. рис. 1.10.*II*). Цей барабан встановлюється під деяким кутом до вертикальної осі. Доріжки запису розміщуються

Національний університет водного господарства та природокористування

під кутом до напрямку швидкості магнітної стрічки, тобто вони мають невелику скінчену довжину. При обертанні барабану, головка описує спіраль відносно рухомої стрічки весь час попадаючи на нову доріжку. Оскільки абсолютна швидкість руху стрічки невелика, процеси старту і зупинки запису/читання займають менше часу і створюють менші механічні навантаження на стрічку.

***Переваги*:**

1. Можливе використання більш тонких стрічок.
2. Щільність розташування доріжок (lpi) в декілька разів вища ніж при лінійній технології.

***Недоліки*:**

1. Складна (а отже, ненадійна) конструкція протягування стрічки.
2. Сильне зношування магнітної стрічки при експлуатації.

В розглянутих технологіях реалізуються різні **способи запису даних на магнітну стрічку.**

Розглянемо два найпростіші з них:

1.**Запис з поверненням до нуля**

В цьому способі запису стрічка намагнічується до насичення лише під час проходження послідовності коротких імпульсів. В проміжку між імпульсами стрічка залишається ненамагніченою. Такий запис ще називають записом з проміжками.

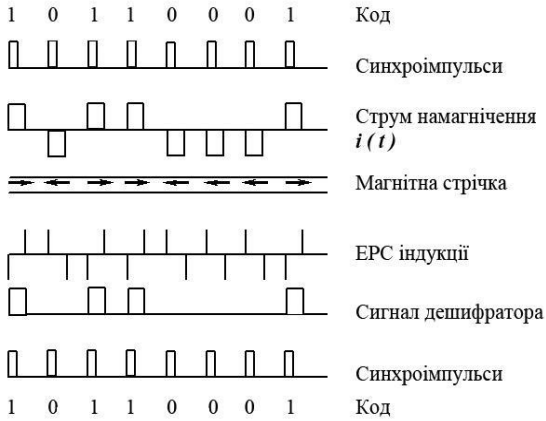


Рис. 1.11. Запис з поверненням до нуля

Для прикладу розглянемо запис і читання з поверненням до нуля коду 10110001 (див. рис. 1.11). На малюнку показані: 1) Заданий код, поданий разом з тактовими синхроімпульсами (рядок 2). 3) Форма

Національний університет водного господарства та природокористування

струму намагнічення *i(t)* в записуючій головці, що відповідає заданому коду. 4) Орієнтація намагнічених ділянок на стрічці *J(x)*, розділених не намагніченими ділянками. Наступні рядки показують процес відтворення запису. Їм відповідають:
5) Імпульси електрорушійної сили (ЕРС) $\varepsilon_i(t)$ в головці читання. 6) Імпульси на виході дешифратора запису. 7) Синхроімпульси, які разом з сигналами на виході дешифратора дозволяють відтворити записаний код (рядок 8).

На головку запису обов'язково попадають синхроімпульси. Це імпульси, які дозволяють дані на стрічці розміщувати рівномірно. При подачі синхроімпульсу на котушку головки запису одночасно з ними подаються струми намагнічення. З рис. 1.11 видно, що при запису з поверненням до нуля сигналу „1" відповідає струм намагнічення позитивної полярності, „0" – негативної. Відповідно до подачі струму намагнічення в магнітній стрічці будуть намагнічуватись відповідні її ділянки. При зчитуванні інформації в котушці головки зчитування виникають по два імпульси електрорушійної сили на одну ділянку намагнічення доріжки.

Для розшифрування такого запису потрібен дешифратор, який видає імпульси, при умові, що на початку синхроімпульсу має місце негативний викид струму відтворення і не видає імпульси, якщо на початку синхроімпульсу струм читання позитивний. В якості дешифраторів використовуються тригерні схеми, які будуть розглянуті в розділі 2.

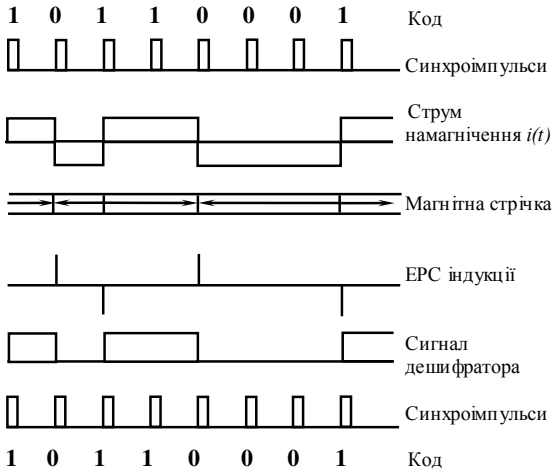


Рис. 1.12. Запис без повернення до нуля

***Недоліки*:**

Не економність. Та обставина, що кожному біту інформації відповідає два імпульси ЕРС (а отже, і струму читання) приводить до зношування головок. Крім того на магнітній доріжці є ділянки, на які не записується інформація, що

Національний університет водного господарства та природокористування

знижує загальну щільність запису і об’єм пам’яті.

2.**Запис без повернення до нуля (запис без проміжків)**

Такий вид запису на стрічку показаний на рис. 1.12. При ньому напрямок струму в котушці запису змінюється на протилежний лише при зміні „0” на „1” і навпаки. Струм в обмотці запису не зникає, а лише змінює напрямок на протилежний.

***Недоліки*:**

Великі вимоги до дешифратора. Якщо в записі є велика кількість логічних „1”, підряд, то дешифратор повинен працювати неперервно, що накладає обмеження на електричну схему тригера. Можливі помилкові включення тригера, а також пропуски тригером сигналів, що вносить суттєві помилки при відтворенні.

1.3.3. Пам’ять на магнітних осердях

Пам’ять на магнітних осердях (англ.: magnetic core memory) або **феритова пам’ять** (англ.: ferrite memory) – запам’ятовуючий пристрій, що зберігає інформацію у вигляді намагніченості невеликих феритових осердь [4].

Як пристрій зберігання інформації феритове осердя вперше було застосоване на початку 50-их років XX століття в цифрових обчислювальних машинах першого покоління. Пам’ять на таких осердях була основним типом комп’ютерної пам’яті до середини 1970-их років (див. рис. 1.13).

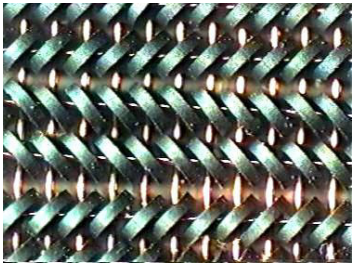


Рис. 1.13. Прямокутна матриця феритових осердь

Феритові осердя виготовлялись найчастіше у формі кілець з магнітожорсткого заліза з майже прямокутною петлею гістерезису і двома стійкими станами залишкової намагніченості. Ферит за хімічною структурою є окислом феромагнітного матеріалу, змішаного з магнітним залізняком. Основним елементом пристрою управління і арифметичного пристрою був тригер на електронних лампах.

Національний університет водного господарства та природокористування

Феритові кільця найчастіше розставляються в прямокутну матрицю, через кожне кільце якої проходить, в залежності від конструкції запам'ятовуючого пристрою, від двох до чотирьох провідників (див. рис. 1.14). Ці провідники відіграють роль котушок, намотаних на кільця для їх перемагнічування. Діаметр таких кілець (менше 1 мм) роблять якомога меншим для швидкого перемагнічування. Швидке перемагнічування осердь визначає швидкодію запам'ятовуючих пристроїв. Вона для кращих зразків таких пристроїв пам'яті становить 10^6 перемикань за секунду. Стан намагнічення кільця, тобто записаний код, визначається пробним імпульсом струму, який подається на тактову обмотку. Якщо цей імпульс не перемагнічує кільце, то на виході сигнал відсутній (логічний „0"), якщо струм перемагнічує кільце, то це означає, що в ньому була закладена логічна „1" [5].

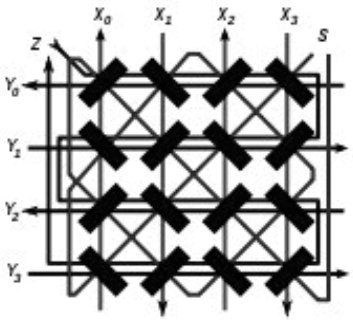


Рис. 1.14. Схема розміщення провідників в матриці феритових кілець

Схема передачі інформації між кільцями

Схема послідовного з'єднання двох магнітних осердь показана на рис 1.15. Кожне кільце має чотири обмотки. Робота схеми:

1. Імпульс струму, за допомогою якого записується інформація подається на **вхідну обмотку**. При цьому феритове кільце намагнічується певним чином. Воно може зберігати цей стан (логічні „1" або „0") практично нескінченно довгий час.

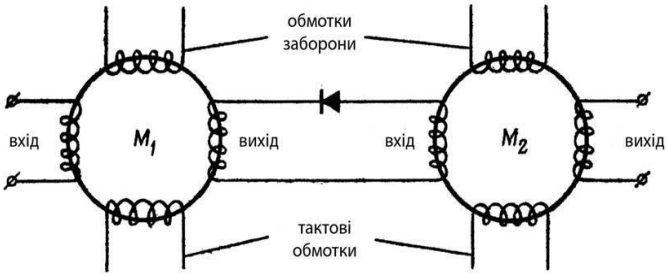


Рис. 1.15. Послідовне з'єднання двох магнітних осердь

Національний університет водного господарства та природокористування

2. При подачі сигналу на **обмотки заборони** будь який імпульс із вхідної котушки не може змінити стан феритового кільця.

3. **Тактові обмотки** служать для індикації стану феритового кільця. Якщо при подачі сигналу на них стан феритового кільця не змінюється, це означає, що в ньому закодований „0”, а якщо змінюється – то закодована „1”. Крім того, тактові обмотки синхронізують роботу всього лічильного пристрою.

4. **Вихідні обмотки** служать для передачі імпульсів струму між кільцями.

Приведемо приклад передачі біту інформації від одного феритового кільця до іншого (див. табл. 1). Нехай вихідний стан 2-х феритових кілець M_1 і M_2 – „0”. При подачі на вхід першого кільця імпульсу струму і відсутності сигналу в тактовій обмотці кільце M_1 перемагнітиться і перейде в стан „1” . Цей імпульс струму не може пройти на вхід другого кільця і перемагнітити його внаслідок включення діода, який знаходиться у вихідній обмотці, проти струму. Діод не пропускає цей імпульс у вхідну котушку другого кільця і воно залишиться в стані „0”. При відсутності імпульсу у вхідній котушці і подачі імпульсу на тактову обмотку він переводить стан першого кільця в „0” і має такий напрямок що проходить через діод і переводить друге кільце в стані „1”. Таким чином відбулася передача логічної „1” з кільця 1 в кільце 2. Сказане вище проілюстровано в таблиці, де стрілками, направленими в протилежні сторони умовно позначено два стани намагнічення кілець, що відповідають „0” і „1”.

Таблиця 1

Вхідний імпульс	Імпульс тактової обмотки	M_1	M_2
0	-	←0	←0
-	1	←0	←0
1	-	→1	←0
-	1	←0	→1
0	-	←0	→1
-	1	←0	←0*

* - інформація „1”передана в комірку, наступну за

Приклад логічної схеми на феритових кільцях

На рис. 1.16. показано схему, яка реалізує логічну операцію коньюнкції („ І ”). Цю схему можна назвати також схемою

Національний університет
водного господарства
та природокористування

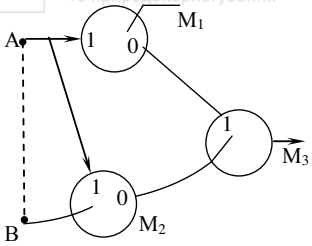


Рис. 1.16. Логічна операція кон'юнкції на трьох феритових кільцях

співпадань. Імпульс на виході кільця M_3 з'являється тільки при одночасній появі імпульсів на входах *A* і *B*. В цьому випадку кільце M_2 свого стану не змінює, оскільки сигнал *B* подано на обмотку заборони. Тому не з'являється сигнал і на обмотці заборони кільця M_3, і воно перекидається черговим тактовим імпульсом, даючи на виході імпульс, який відповідає логічній „1". Якщо ж сигнал *B* відсутній, то сигнал *A* перекидає кільце M_2, а вихідний сигнал з цього кільця забороняє перекидання кільця M_3. Якщо немає сигналу *A*, то поява сигналу *B* теж може визвати перекидання M_3.

Можливі варіанти станів схеми на рис. 1.16 зведені в таблицю 2.

Таблиця 2

Імпульс на вході	M_1	M_2	M_3
Тільки A	1	1	0
Тільки B	0	0	0
A і B	1	0	1

Національний університет
водного господарства
та природокористування

1.3.4. Пам'ять на магнітних дисках

Рис. 1.17. Перший жорсткий диск

В даний час така пам'ять реалізується в накопичувачах на жорстких магнітних дисках (жорсткий диск, вінчестер, хард, HDD, з англ.: Hard (Magnetic) Disk Drive) – енергонезалежний, комп'ютерний, перезаписуючий пристрій [6]. Вперше жорсткий диск було запропоновано в 1956 році корпорацією IBM під назвою IBM 350 Disk File. Він складався з 50 дисків діаметром

24 дюйми, які обертались зі швидкістю 1200 об/хв. Середній час доступу до довільної комірки складав 1 секунду, щільність – 2 кбіт/дюйм^2, загальна ємність – 5 МБ (див. рис. 1.17). В якості технології запису використовувався паралельний запис інформації. Еволюцію HDD показано в таблиці 3.

Таблиця 3

	IBM RAMAC	**Maxtor 7040A**	**Hitachi Deskstar 7K1000**
Рік випуску	1956	1991	2007
Об’єм	5 МБ	40 МБ	1 ТБ
Кількість пластин	50	3	5
Діаметр пластини	24 дюйма	3,5 дюйма	3,5 дюйма
Щільність запису	2кбіт/дюйм^2	10Мбіт/дюйм^2	150Гбіт/дюйм^2
Швидкість обертання	1200 об/хв	3500 об/хв	7200 об/хв
Середній час доступу	1 с	30 мс	4,17 мс
Максимальна швидкість інтерфейсу	9 кБ/с	800 кБ/с	300 МБ/с
Питома вартість	$10 000/МБ	$6/МБ	$0,4/ГБ

Основним критерієм оцінки накопичувачів на жорстких дисках є ***поверхнева щільність запису*** (див. рис. 1.18). Вона визначається як добуток лінійної щільності запису вздовж доріжки (біт на дюйм,

англ.: Bits Per Inch – BPI), і кількості доріжок на дюйм (англ.: Tracks Per Inch – TPI). В сучасних накопичувачах розміром 3,5 дюйма

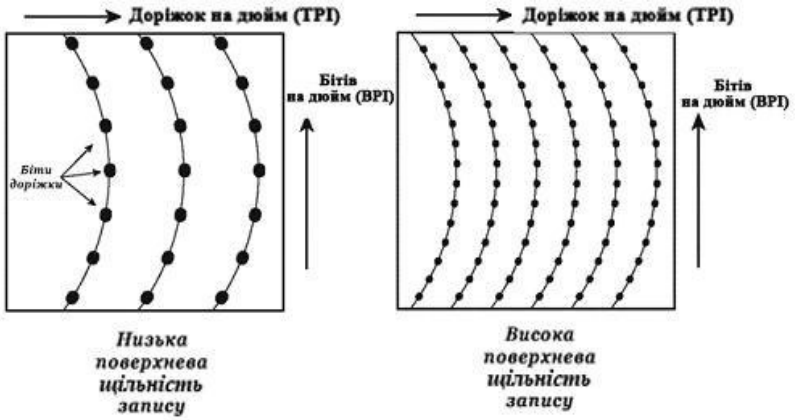


Рис. 1.18. Поверхнева щільність запису магнітних дисків

величина цього параметру складає 10-20 Гбіт/дюйм^2, а в експериментальних моделях досягає 100 Гбіт/дюйм^2.

Сучасний жорсткий диск складається з таких основних частин [6]:

1. Блок електроніки.
2. Електродвигун для обертання дисків.
3. Блок головок з пристроєм позиціювання.
4. Власне жорсткі диски з магнітним покриттям.
5. Корпус.

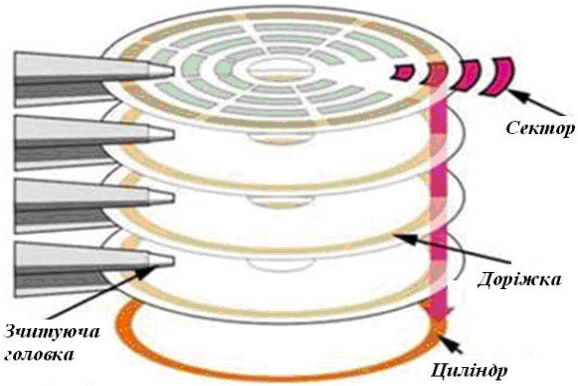


Рис. 1.19. Основні елементи накопичувача жорсткого диска

Основними елементами накопичувача є декілька алюмінієвих або скляних пластин, на які нанесено робочий феромагнітний шар і які знаходяться на одній осі (див. рис. 1.19). Дані

Національний університет водного господарства та природокористування

записуються і зчитуються універсальними головками читання/запису з поверхні дисків, розбитих на *доріжки і сектори* (512 байт даних в кожному). Доріжка – це одне „кільце” даних на одній стороні диску. В багатьох накопичувачах її ємність перевищує 100000 Байт. Відводити такий блок для зберігання одного файла недоцільно, тому доріжки на диску розбивають на нумеровані відрізки, які називають сектори. Кількість секторів може бути різною в залежності від щільності доріжок і типу накопичувача. В середніх накопичувачах доріжка вінчестера має від 380 до 700 секторів.

Принцип запису на магнітний диск практично не відрізняється від принципу запису на магнітну стрічку. В таких накопичувачах зазвичай встановлюється декілька дисків і дані записуються на обидві сторони кожного з них. Однотипні (однаково розміщені) доріжки на всіх сторонах дисків об’єднуються в *циліндр*. Всі головки змонтовані на загальному стержні і можуть рухатись тільки синхронно. Основні параметри типового магнітного диску приведені в таблиці 4.

Таблиця 4

Параметри накопичувача IBM Deskstar 75GXP з інтерфейсом ATA

Параметр	Значення	Одиниця вимірювання
Лінійна щільність запису	390000	BPI (бітів на дюйм)
Відстань між бітами на доріжці	2,56	10^{-6} дюйм
Щільність доріжок	28350	TPI (доріжок на дюйм)
Відстань між доріжками	35,27	10^{-6} дюйм
Кількість доріжок	27724	
Частота обертання	7200	об/хв
Середня лінійна швидкість руху диску відносно головки	85,68	км/год
Довжина повзунка головки	1,225	мм
Ширина повзунка головки	0,975	мм
Висота повзунка головки	0,8	мм
Висота повітряного прошарку	15	нм
Середньостатистичний час пошуку	8,5	мс

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Незалежно від того, який матеріал використовується в якості основи диску, він покривається тонким шаром феромагнітного матеріалу. Самими поширеними є два типи робочого шару:

1. Оксидний.
2. Тонкоплівковий.

Оксидний шар виготовляється з полімерного матеріалу, наповненого окислом заліза. Цей матеріал в якості робочого шару дисків використовувався з 1955 року, але внаслідок недостатньої

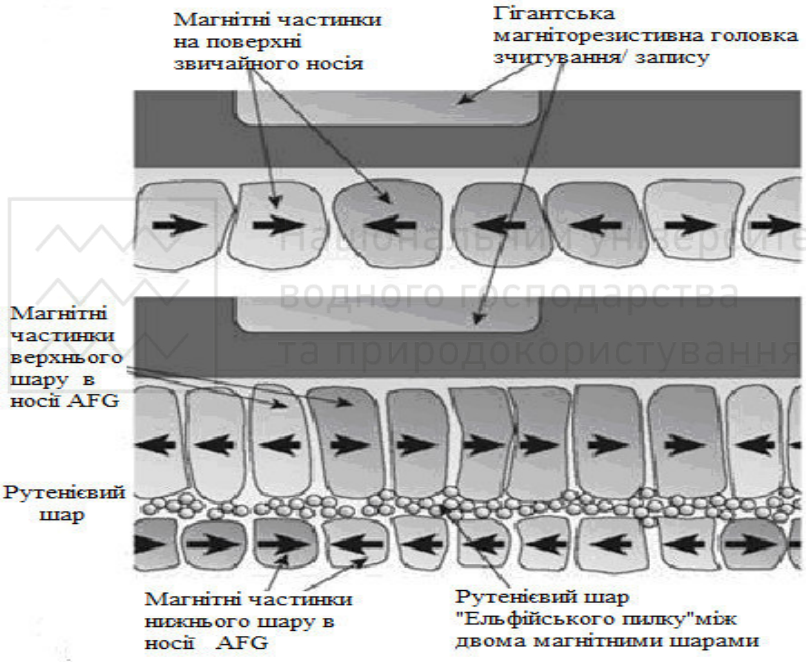


Рис. 1.20. Будова диску, виготовленого за технологією AFC

твердості зараз майже повністю замінений тонкоплівковим робочим шаром.

Тонкоплівковий робочий шар має меншу товщину, він твердіший, і якість його покриття набагато вища. Наносять його на основу шляхом електролізу сплаву кобальту товщиною близько 0,025 мкм або шляхом напилення на основу двох шарів: фосфориту нікелю і магнітного кобальтового сплаву (0,025-0,5 мкм). В обох

Національний університет водного господарства та природокористування

технологіях зверху робочий шар покривається захисною вуглецевою плівкою.

1.3.5. Підвищення щільності запису магнітних дисків за допомогою технології AFC

У 1990 році спеціалістами компанії IBM була розроблена технологія AFC англ.: antiferromagnetically coupled, система антиферомагнітного запису інформації). В 2001 році вийшли в продаж перші накопичувачі Deskstar GXP ємністю 80 і 120 ГБ, створені за цією технологією. Принцип роботи цієї системи базується на явищі GMR: між 2 шарами феромагнітного матеріалу з кожної сторони магнітного диску наноситься надзвичайно тонкий шар (товщиною 2-3 атоми) рутенію. Носії, в яких використовується шар металевого рутенію (носії з антиферомагнітними подвійними шарами) отримали назву *пилок ельфа* („pixie dust”). Тонкий шар рутенію, розміщений між двома магнітними робочими шарами, дозволяє зорієнтувати намагнічення доменів відповідних шарів в протилежних напрямках (див. рис. 1.20). Така тришарова структура робочого шару має дещо більшу товщину відносно традиційного, але протилежна магнітна орієнтація шарів дозволяє ущільнити інформацію на диску до 25 Гбіт/дюйм^2 і збільшити ємність жорстких дисків до 400 ТБ.

1.3.6. Накопичувач на гнучких магнітних дисках

Накопичувач на гнучких магнітних дисках (дискета, НГМД, англ.: Floppy Disk Drive - FDD). FDD був винайдений в кінці 60-их років А. Штудгартом. Перші FDD з’явились в продажу на початку 80-их років в форматі 5,25 дюйма і об’ємі 1,2 МБ. На

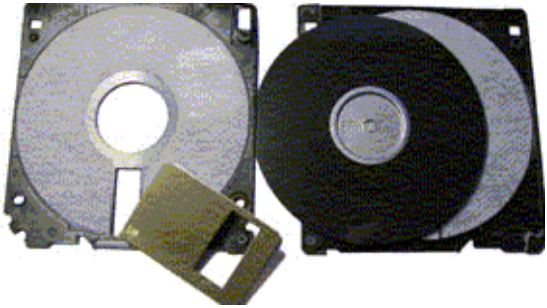


Рис. 1.21. FDD - гнучкий пластиковий диск

Національний університет водного господарства та природокористування

дискеті вкладалось 80 доріжок з 18 секторами. Сучасні FDD можуть зберігати до 3 ГБ інформації.

FDD – це носій невеликого об'єму інформації. Він представляє собою (див. рис. 1.21) гнучкий пластиковий диск на полімерній основі покритій з обох сторін магнітним окислом. Такий диск розміщується в захисній оболонці, на внутрішню поверхню якої нанесено очисне покриття. В упаковці зроблені з обох сторін радіальні щілини, через які головки запису/читання отримують доступ до диску. Дисками FDD можна переносити дані (програмне забезпечення) з одного комп'ютера на інший В сучасній в комп'ютерній техніці гнучкі магнітні диски майже не застосовується.

1.3.7. Накопичувач на змінних жорстких дисках

Змінні жорсткі магнітні диски (англ.: HDD Rack) були розроблені фірмою SyQuest. За своєю суттю – це переносний вінчестер. В накопичувачах цього типу жорсткі диски (одна або дві стандартні пластини) знаходяться в герметичному картриджі разом з головками запису/читання. Це дозволяє наблизити їх параметри до параметрів жорстких дисків.

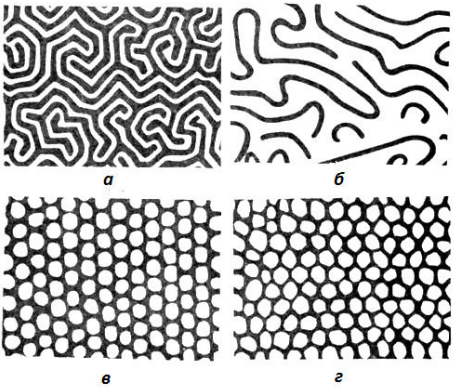


Рис. 1.22. Трансформація смугової доменної структури під дією зовнішнього магнітного поля:
а) смугова доменна структура; б) відокремлені ЦМД; в) решітка ЦМД; г) стільникова доменна структура

1.3.8. Пам'ять на циліндричних магнітних доменах (ЦМД)

Пам'ять на ЦМД використовує генерацію і кероване переміщення доменів в нерухомому магнітному матеріалі [7]. Вона має послідовний доступ і є енергонезалежною; довгий час зберігала лідерство в щільності зберігання інформації серед енергонезалежних пристроїв.

Магнітна сприйнятливість

Національний університет водного господарства та природокористування

феромагнетиків є тензорною величиною. Це означає, що вони характеризуються значною анізотропією намагнічення. Можна виділити такі напрями вздовж яких в процесі намагнічення досягається насичення при мінімальних напруженостях намагнічуючого поля. Ці напрями називаються осями легкого намагнічення. Феромагнетик, який має одну вісь легкого намагнічення називається одноосним. ЦМД виникають в тонких монокристалічних плівках одноосних феромагнітних матеріалів, осі легкого намагнічення яких перпендикулярні поверхні плівки. За відсутності магнітного поля у них самовільно утворюються домени, які мають форму стрічки, довжина якої набагато більша ширини. Такі домени отримали назву ***смугових доменів*** (див. рис. 1.22, а).

В ненамагніченому стані ширина смугових доменів з антипаралельною орієнтацією вектора намагнічення однакова, тому індукція магнітного поля, створеного плівкою, дорівнює нулю.

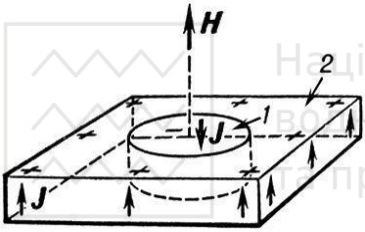


Рис. 1.23. Циліндричний магнітний домен (1) в феромагнетику (2)

У магнітному полі для тих доменів, у яких напрямок вектора намагнічення *J* співпадає з напрямком напруженості зовнішнього магнітного поля *H*, ширина домену збільшується. Якщо ж вони мають протилежний напрямок, то ширина зменшується. Так виникає рух доменних стінок, що приводить до збільшення розмірів одних доменів і зменшення інших [8]. При деяких значеннях магнітних полів відбувається руйнування смугових доменів на окремі ізольовані ділянки, форма яких швидко стає циліндричною (див. рис. 1.22 б, в, г та рис. 1.23). Ці утворення отримали назву ***циліндричних магнітних доменів.***

1.3.9. Застосування ЦМД

Властивості ЦМД (стійкість в деякому інтервалі полів зміщення, рухливість, можливість керування їх рухом, властивість знаходитись в різних станах тощо) визначають їх застосування в пристроях обробки інформації. Такий пристрій складається із низки

Національний університет водного господарства та природокористування

функціональних елементів, які забезпечують генерацію, рух, перемикання і детектування ЦМД [9]. *Ідея такого пристрою в наступному*: нехай в плівці якимось способом сформований канал, вздовж якого можуть рухатись з заданою швидкістю ЦМД (канал пересування ЦМД). Інформація кодується за принципом наявності або відсутності в даній точці плівки ЦМД (див. рис. 1.23, 1 - логічна „1”, 2 - логічний „0”). В певних місцях каналу формують генератор і детектор ЦМД, які виконують ті ж функції, що і головки запису/читання в пристроях з рухомими магнітними носіями інформації. Генератор перетворює сигнали, які поступають на його вхід, у ЦМД, детектор робить зворотне перетворення. Важливою відмінністю ЦМД - пристроїв є те, що в них не потрібний механічний рух магнітного носія або головки.

Найчастіше використовуються доменорухомі структури у вигляді аплікацій певної форми (наприклад, в вигляді ТІ; рис. 1.24) із магнітом’якого матеріалу (найчастіше – пермалою). При намагнічені пермалоєвих аплікацій управляючим магнітним полем, орієнтованим в площині плівки, на їх краях виникають магнітні полюси. ЦМД притягаються до від’ємних полюсів аплікацій, тобто створюється магнітостатична пастка. При обертанні управляючого магнітного поля в площині плівки потенціальні ями рухаються разом з ЦМД, а у вузькому зазорі між аплікаціями ЦМД переходить на сусідню аплікацію і продовжує рух по її периметру.

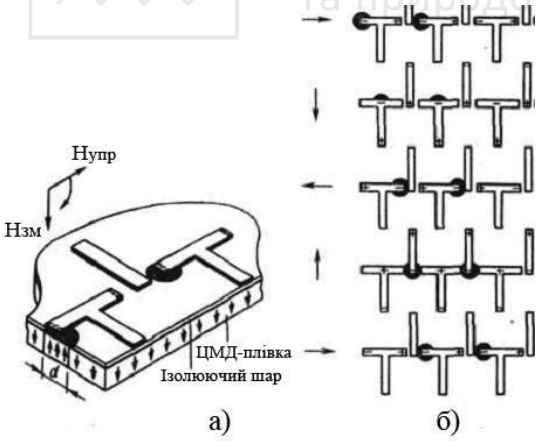


Рис. 1.24, *а* – Доменорухома ТІ-структура із пермалоєвих аплікацій ($H_{зм}$ і $H_{упр}$ - напруженість магнітного поля зміщення і управління, *d* – діаметр ЦМД),
б – Схема руху ЦМД вздовж ТІ-структури

За один повний поворот управляючого поля в площині плівки відбувається зміщення ЦМД на один період доменорухомої структури. Тактова частота обертання поля

Національний університет
біоресурсів і природокористування

(10^5-10^6 Гц) визначає швидкодію ЦМД - пристроїв. Величина періоду структури і відстань між каналами повинні бути більшими або порядку 4d, щоб виключити взаємодію доменів. Ця величина визначає щільність запису в ЦМД - пристроях (6000000 біт/см^2 при *d*=1 мкм). Доменорухома структура створюється літографічним способом.

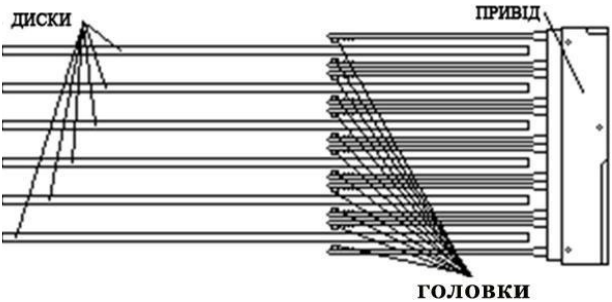


Рис. 1.25. Розміщення головок запису/читання в HDD

Читання інформації відбувається за допомогою магніторезистивної головки.

Пристрої збереження інформації, які базуються на використанні намагнічення циліндричних доменів в широкий вжиток плануються бути введеними в 2015-2020 роках.

Національний університет біоресурсів і природокористування

1.4. Види головок запису/читання

Розміщення головок запису/читання (англ.: read/write head) відносно дисків в HDD показане на рис. 1.25.

Над кожною поверхнею кожного диска знаходиться своя головка. Всі головки змонтовані на загальному рухомому каркасі і пересуваються одночасно. Кожна з них встановлена на кінці підпружиненого важеля. При виключеному комп’ютері вони лежать на зовнішньому краї дисків, у вільній від записування інформації зоні. При вмиканні комп’ютера головки піднімаються над поверхнею дисків в середньому на 0,1 мкм. Для підтримування головки на потрібній відстані від диску використовується повзунок.

Найбільш відомі 6 видів головок запису/читання:

1. Індукційні, або електромагнітні (ІГ).
2. Феритові (ФГ).
3. З металом в зазорі (MIG, англ.: **M**etal **I**n **G**ap).
4. Тонкоплівкові (TF).
5. Магніторезистивні (MR).

Національний університет водного господарства та природокористування

6. Гігантські магніторезистивні (GMR).

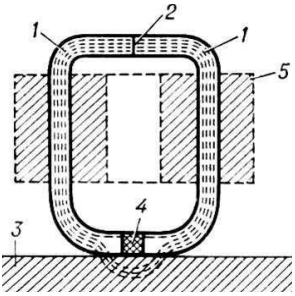


Рис. 1.26. Індукційна головка

1.4.1. Індукційні головки

Індукційні (електромагнітні) головки (ІГ) вперше були застосовані для магнітних стрічок, осердь і перших жорстких дисків [10]. Будова їх показана на рис. 1.26. В своєму складі вони містять:

1. Осердя з м'якого заліза.
2. Додатковий зазор.
3. Носій запису (не входить до складу головки).
4. Робочий зазор.
5. Котушка.

Додатковий зазор (2) носить технологічний характер. При виготовленні головки, її не вдається зробити монолітною, тому вона виготовляється з двох частин, які з'єднуються механічно.

1.4.2. Феритові головки

Феритові головки (ФГ) вперше були застосовані в накопичувачах фірми IBM (див. рис. 1.27). Осердя ФГ виготовлялись із пресованого фериту на основі окислу заліза, тому вага їх була відносно велика. ФГ використовувались як для запису так і для читання інформації. Пізніше як модифікація ФГ виникли склоферитові (композитні) головки. У них феритове осердя знаходилось в керамічному корпусі. За рахунок зменшення ваги цих головок вдалося дещо зменшити робочий зазор (4 на рис. 1.26), а це дозволило збільшити щільність розміщення доріжок. ФГ використовувались в накопичувачах до середини 80-их років, зараз не використовуються.

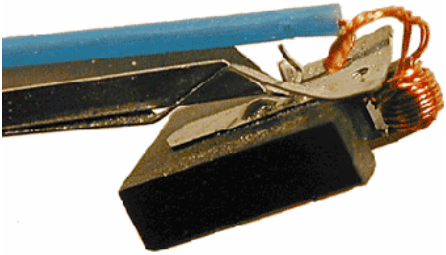


Рис. 1.27. Феритова головка

Національний університет водного господарства та природокористування

Недоліки ІГ і ФГ:

1. Не підходять для запису на носіях з великим коерцитивною силою.
2. Частотна характеристика обмежена.
3. Низька чутливість (погане співвідношення „сигнал – шум”).
4. Велика вага і, як наслідок, великий зазор між носієм і головкою.

***Перевага*:** мала вартість.

1.4.3. Головки MIG

Головки MIG (головки з металом в зазорі) були розроблені на основі композитних головок. У них додатковий зазор (2) (див. рис. 1.26) заповнювався металом, що знижувало схильність матеріалу осердя до насичення і дозволяло підвищити магнітну індукцію в робочому зазорі.

Ці головки дозволяють використовувати матеріали з більшою коерцитивною силою і тонкоплівковим робочим шаром. Вони формують на поверхні диска намагнічені ділянки з більш чіткими межами, що дозволяє використовувати тонший феромагнітний шар. До того ж, це дозволяє зменшити зони зміни знаку при намагнічені, а значить, і підвищити щільність запису. Пізніше з’явились двошарові MIG - головки, в яких метал нанесений в робочий і додатковий зазори. Це дозволило суттєво зменшити відстань між дисками і головками.

Переваги:

1. зменшена відносно ІГ маса;
2. менший відносно ІГ робочий зазор;
3. в MIG використовують головку з заповненим зазором металізованим сплавом, індукція насичення якого в 2 рази більша ніж у феритів.

1.4.4. Тонкоплівкові (TF) головки

Тонкоплівкові (TF) головки (англ.: Thin Film Heads) з’явилися в 1979 році (див. рис. 1.28). Вони виготовлялись фотолітграфічним методом, подібно до мікросхем. На основу наносяться тонкі плівки майбутніх фрагментів головки. На одну основу можна нанести

Національний університет
водного господарства
та природокористування

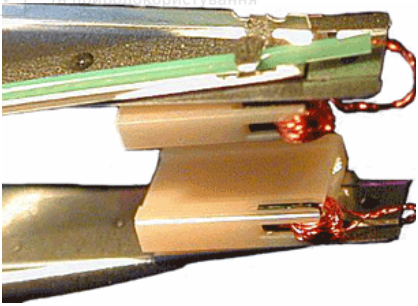


Рис. 1.28. Тонкоплівкові головки

декілька тисяч фрагментів осердя із залізо - нікелевого сплаву. Крім того, конструкція нового типу дозволила зменшити відстань (до 0,03 мкм) між головкою і диском шляхом нарощування шарів алюмінієвого сплаву на робочу поверхню головки. Це дозволило зменшити розмір і масу головок. Головки стали тонші, зменшились робочий і технологічні зазори

***Переваги*:**

1. Зменшення величини робочого зазору дозволяє підвищити залишкову намагніченість носія і щільність запису (індукція таких головок в робочому зазорі в 2-4 рази більша ніж індукція в ІГ і MIG - головці).
2. Підвищено відношення „сигнал – шум”, оскільки збільшується амплітуда сигналу.
3. Зменшено зону зміни знаку на робочій поверхні.
4. Алюмінієвий сплав захищає головку від пошкоджень.
5. Невеликі розміри головки дають змогу розмістити більшу кількість магнітних дисків.

1.4.5. Магніторезистивні (MR) головки

Магніторезистивні (MR) головки (англ.: Magneto – Resistive) вперше були застосовані фірмою IBM в 1991 році в накопичувачах ємністю 1 ГБ (див. рис. 1.29). Принцип роботи MR – головки базується на магніторезистивному ефекті зміни опору провідників в магнітному полі. При проходженні головки над ділянками робочого шару диску з різною залишковою намагніченістю електричний опір

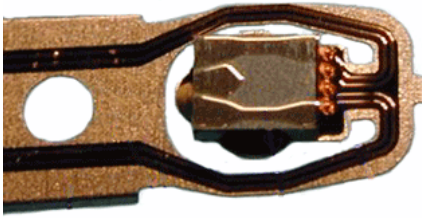


Рис. 1.29. Магніторезистивна головка

Національний університет водного господарства та природокористування

головки буде змінюватись. Цей ефект зміни опору матеріалів в магнітному полі був відкритий Кельвіном в 1857 році.

1.4.6. Явище зміни магнітоопору

Магнітоопір (у відносних одиницях) зручно характеризувати величиною ефекту магнітоопору (або гальваномагнітного ефекту) δH :

$$\delta H = \frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\rho - \rho_H}{\rho}, \qquad (1.13)$$

де ρ – питомий опір матеріалу без магнітного поля, ρ_H – питомий опір цього матеріалу у магнітному полі з індукцією *B*.

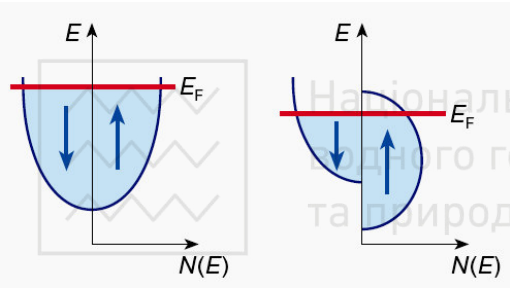


Рис. 1.30. Залежність енергії електронів від орієнтації спіну

Магнітоопір більшості досліджуваних речовин ніколи не перевищував декількох відсотків.

Звичайний електричний опір провідника виникає внаслідок того, що електрони при своєму русі наштовхуються на перешкоди в провіднику (дефекти кристалів, домішкові атоми, теплові коливання кристалічної решітки).

В результаті, при накладанні напруги, на швидкий безладний рух електронного газу всередині металу накладається повільне зміщення електронів. Цей повільний дрейф і є електричним струмом. У цьому русі приймають участь ті електрони, які володіють енергією, близькою до енергії Фермі. Якщо таких електронів багато, то струм великий, а опір малий і навпаки.

У явищі магніторезистивного ефекту визначальну роль відіграє орієнтація спіну електронів в зовнішньому магнітному полі. Магнітне поле всередині феромагнетика діє на електрони, збільшуючи або зменшуючи їх енергію в залежності від орієнтації їх спінів. Це приводить до зсуву енергії електронів і до зміни їх кількості біля енергії Фермі в залежності від орієнтації спіну (див. рис. 1.30).

Національний університет водного господарства та природокористування

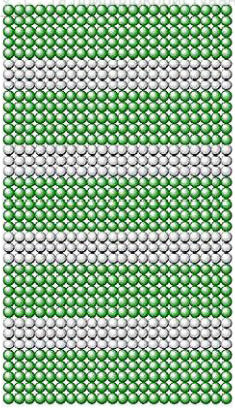


Рис. 1.31. Надрешітка

Електричний струм у феромагнетику складається *з двох різних потоків електронів,* із спінами, орієнтованими за напрямом вектора намагнічення і проти. Електричний опір для цих потоків різний. Для електронів зі спінами, орієнтованими проти поля, він менший, ніж для електронів зі спінами, орієнтованими за полем. Особливо слід наголосити, що така картина специфічна лише для феромагнетиків.

Такими властивостями електричного опору феромагнетиків вдалося скористатися в матеріалах, які характеризуються своїми ***надрешітками.*** Надрешітка – це кристал, який складається з декількох шарів магнітних і немагнітних речовин зі схожою кристалічною структурою, що чергуються. Товщина шарів становить 1-2 нм, що відповідає 2-5 періодам кристалічної решітки (див. рис. 1.31).

Виготовлення шарів надрешітки – технологічно дуже складне завдання. Їх вирощують в глибокому вакуумі, напилюючи на основу шар за шаром потрібні речовини. Обидві речовини, а також сама основа повинні мати схожі кристалічні решітки, інакше шарування буде різноплановим, а це негативно вплине на протікання електричного струму. Напилення повинно бути рівномірним, щоб шари різних речовин накладались один на одного не перемішуючись. Також суттєве значення має і контроль магнітних властивостей зростаючих шарів.

Якщо правильно підібрати матеріал для немагнітних шарів і його товщину, то магнітні шари будуть мати неспецифічну для феромагнетиків тенденцію чергування орієнтації намагніченості шарів. Це особливо яскраво проявляється в шарах залізо – хром.

Якщо шари феромагнетику (заліза, Fe) чергуються з тонкими шарами немагнітного металу (хрому, Cr) певної товщини, то в шарах феромагнетику напрям вектора намагнічення буде чергуватись за відсутності зовнішнього магнітного поля (H=0) (див. рис. 1.32, зліва).

Однак, якщо таку структуру помістити в сильне зовнішнє магнітне поле, то вектор намагнічення шарів феромагнетика

Національний університет
водного господарства
та природокористування

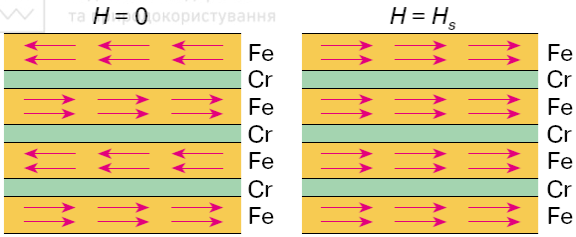


Рис. 1.32. Напрямок вектора намагнічення магнітних шарів надрешітки в магнітному полі і без нього

повернеться в одну сторону (див. рис. 1.32, справа). Якщо магнітне поле прибрати, то чергування намагнічення шарів відновиться.

Рухаючись упоперек шарування електрони з одним напрямком спіна відчувають великий опір всередині одних шарів (наприклад, парних), але малий – всередині інших шарів (непарних), а електрони з протилежним напрямком спіна відчувають малий опір всередині парних шарів і великий – всередині непарних. Оскільки і тих, і інших шарів однакова кількість, то обидва сорти електронів перебувають в однакових умовах. При накладанні зовнішнього магнітного поля і вирівнюванні напрямку намагнічення феромагнітних шарів електрони обох сортів опиняться в різних умовах. Електрони з одним напрямком спіна „відчують” великий опір у всіх шарах феромагнетика і їх внесок в струм зменшиться, а електрони з протилежним напрямком спіну „відчують” малий опір і будуть фактично рухатись в режимі короткого замикання. В результаті, струм суттєво збільшиться, а сумарний опір зменшиться (див. рис. 1.33).

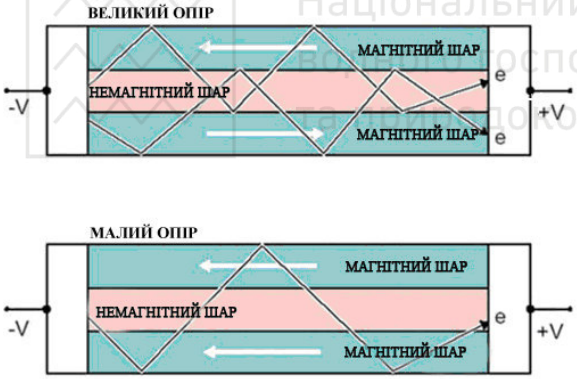


Рис. 1.33. Рух електронів в надрешітці

Еквівалентна схема процесу представлена на рис. 1.34. Тут R – великий опір одних феромагнітних шарів, а r – малий опір інших феромагнітних шарів.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

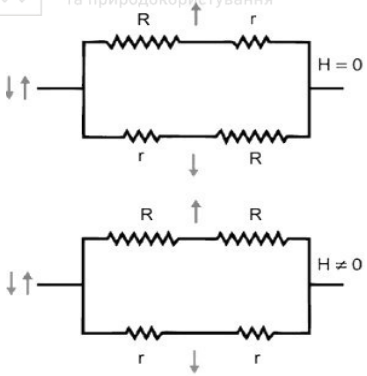


Рис. 1.34. Еквівалентна схема протікання струму через надрешітку

Початкові експерименти Ферта показали зменшення опору зразка майже в два рази. Цей результат вдалося досягти з використанням сильних магнітних полів при температурі 4,2 К. Дослідження Грюнберга дозволили досягти зменшення опору у два рази при кімнатній температурі і набагато слабших магнітних полях.

Використання MR - головок дозволило довести щільність інформації на диску до 3,09 Гбіт/дюйм^2.

Переваги:

1. Головка є резистивним датчиком магнітного поля.
2. Амплітуда вихідного сигналу в декілька разів більша ніж у TF-головки.

Недоліки:

1. Головка має додаткову обмотку для подачі високостабілізованого вимірного струму.
2. Головка дуже чутлива до зовнішніх магнітних полів, тобто вимагає екранування.
3. Використання в процесі виробництва додаткових 4-6 фотомасштабів (масок).

Оскільки на основі магніторезистивного ефекту можна створити тільки пристрій читання, то в сучасних магнітних головках здійснюється розділення запису і зчитування інформації різними головками. Так запис здійснюється за допомогою TF-головки, а зчитування за допомогою MR - головки. В розглянутих головках застосовувався один робочий зазор як для запису, так і для читання. У магнітної головки їх два – кожний для своєї операції. У вузла читання зазор повинен бути вузьким (для збільшення роздільної здатності), а у записуючого вузла – більш широким (для глибокого проникнення магнітного потоку в робочий шар носія). Крім того, записуюча TF - головка створює більш широкі доріжки, ніж це необхідно для читаючої MR - головки. Тому, при читанні головкою не захоплюються шуми сусідніх доріжок.

Національний університет водного господарства та природокористування

Хоча вартість таких головок вища порівняно вартістю MIG і TF - головок, цей недолік нівелюється надзвичайно високою щільністю запису і надійністю.

1.4.7. Гігантські магніторезистивні (GMR) головки

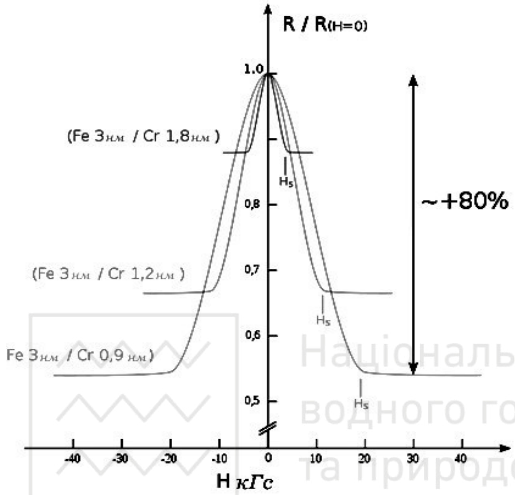


Рис. 1.35. Відносна зміна опору в GMR - матеріалах

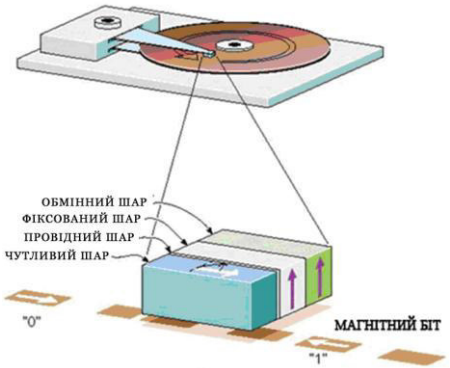


Рис. 1.36. Тонкоплівкові шари GMR - головки

Гігантські магніторезистивні (англ.: Giant Magneto – Resistive, GMR) головки носять таку назву не через їх геометричні розміри, а за величиною магніторезистивного ефекту, який в них виникає. Він досягається за рахунок введення додаткового шару в надрешітку.

GMR - ефект був відкритий у 1988 – 1989 рр. А. Фертом і П. Грюнбергом.

Експериментуючи з матеріалами надрешіток і їх товщиною вченим вдалося довести величину зміни опору до 80% (див. рис. 1.35).

Такий ефект досягається завдяки тому, що звичайна GMR - головка складається з чотирьох тонкоплівкових (1-5 нм) шарів (див. рис. 1.36):

1. чутливого (sensing layer), виготовленого із залізонікелевого сплаву;

Національний університет водного господарства та природокористування

2. провідного (conducting spacer), – із немагнітного матеріалу (найчастіше – міді);
3. фіксованого (pinned layer), – із кобальту, з зафіксованим напрямком намагнічення.
4. обмінного (exchange layer), сильного антиферомагнетика, – із сплавів (найчастіше, із FeMn або NiO).

Така структура отримала назву спінового затвору.

Магнітна орієнтація чутливого шару змінюється в залежності від напрямку намагнічення бітів доріжок диску. Напрямок намагнічення всередині фіксуючого шару завжди однаковий, це досягається завдяки функціонуванню обмінного шару. В результаті сумарний опір чутливого і фіксованого шарів змінюється при проходженні над бітами диску – спрацьовує GMR - ефект, який в середньому в два рази більший за MR - ефект.

Переваги:

1. Вища чутливість ніж у MR-головки до слабких сигналів.
2. Вища щільність інформації для дисків де використовуються GMR-головки (до 100 Гбіт/дюйм^2).
3. Менші розміри.
4. Завадостійкість.
5. Не схильні до інтерференції сигналів.

Національний університет водного господарства та природокористування

1.5. Технології магнітного запису інформації

1.5.1. Система паралельного (горизонтального) зберігання даних

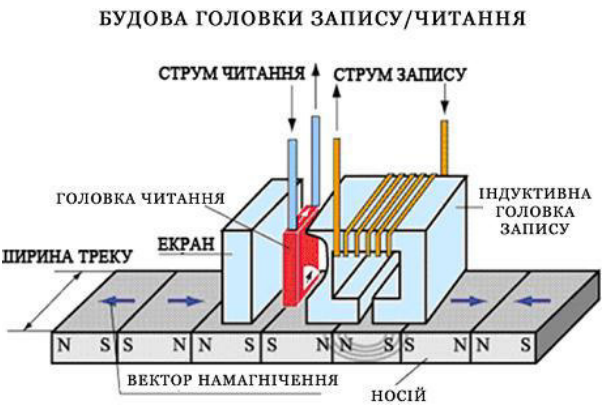


Рис. 1.37. Система паралельного зберігання даних

У цій системі намагнічування робочого шару диску відбувається вздовж його руху (див. рис. 1.37). Він дозволяє здійснити щільність запису до 23 Гбіт/см^2.

Національний університет водного господарства та природокористування

Дані записуються на диск, покритий феромагнітним записуючим шаром.

1.5.2. Система перпендикулярного (вертикального) зберігання даних (PMR)

У перпендикулярній системі запису даних орієнтація намагнічення доменів робочого шару перпендикулярна поверхні диску. Таке її розміщення вперше запропонував Ш. Івасакі у 1976 році.

Під робочим шаром диску чи стрічки знаходиться шар магнітом'якого заліза (див. рис.1.38).

Магнітна головка, як і при поздовжньому записі, знаходиться з однієї сторони носія, але має відмінну від головки поздовжнього запису конструкцію. Полюси такої головки різні за поперечним перерізом – „гострий" і „тупий". Густі силові лінії, які стікають з „гострого" полюса, записують дані на диск і, розтікаючись по магнітом'якій основі, в розрідженому стані повертаються до „тупого" полюса. При цьому розріджені вони настільки, що вже не в стані перемагнітити носій. Таким чином, якщо в поздовжньому запису магнітне поле запису генерується між полюсами головки, то в перпендикулярному – між зрізом полюсу головки і магнітом'якою основою диску. Тому домени записуючого шару орієнтуються верти-

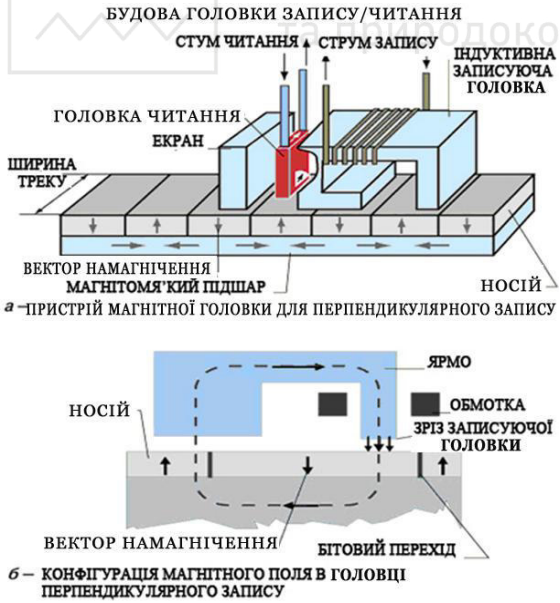


Рис. 1.38. Система перпендикулярного зберігання даних

Національний університет водного господарства та природокористування

кально, а основи – горизонтально. Це забезпечує додаткову стабільність положення доменів.

При перпендикулярному запису використовується набагато більш складний магнітний робочий шар. Під тонким захисним вуглецевим шаром знаходиться записуючий шар із окисленого сплаву кобальту, платини і хрому. Основа складається із двох антиферомагнітних шарів, які дозволяють зняти внутрішнє напруження магнітного поля.

Для зчитування інформації в системах з перпендикулярним магнітним записом потрібні принципово нові головки читання, які дозволяють значно збільшити співвідношення сигнал/шум і потужність самого сигналу. Тому деякі компанії вже починають застосовувати нове покоління головок на тунельному магніторезистивному ефекті (TMR Heads).

Система перпендикулярного магнітного запису дозволяє досягти щільність запису даних до 650 Гбіт/дюйм^2 (теоретична межа).

Національний університет водного господарства та природокористування

1.5.3. Система магнітного теплового зберігання даних

Таку систему запису ще називають **термоасистованою системою запису** (англ.: HAMR – Heat Assisted Magnetic Recording, запис з попереднім нагріванням за допомогою лазера). Цей метод передбачає короткочасний (1пс) нагрів ділянки, на яку проводиться запис, до температури 380-400 К. В HAMR - головку вбудований лазер (див. рис. 1.39). При проходженні такої головки над робочим шаром він нагрівається променем лазера, внаслідок чого зменшується магнітна сприйнятливість феромагнетика робочого шару. Відбувається зменшення площі петлі гістерезису. Це зменшення дає можливість

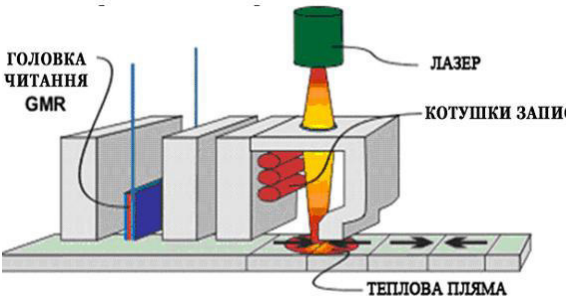


Рис. 1.39. Головка HAMR (лазер для підігріву носія інтегрований в головку запису)

Національний університет водного господарства та природокористування

переводити магнітний стан індукції зі стану ”0” в”1” і навпаки при менших значеннях індукції зовнішнього магнітного поля. Після проходження головки над нагрітою ділянкою її температура відновлюється до норми і петля гістерезису відновлює свою попередню форму. Такий спосіб зберігання інформації дозволяє досягнути її щільності до 20 Тбіт/дюйм^2. Впровадження цієї технології потребує використання в якості магнітного робочого шару принципово нових матеріалів з високим анізотропією. Це, перш за все, дорогі сплави $Fe_{14}Nd_2B$, CoPt, FePt і Co_5Sm.

1.5.4. Система структурованого (патернованого) зберігання даних

Система патернованого зберігання даних є перспективною технологію зберігання даних на магнітному носієві [11]. Вона використовує для запису даних масив однакових магнітних комірок, кожна з яких відповідає одному біту інформації, на відміну від сучасних технологій магнітного запису, в яких біт записується на декількох доменах.

Національний університет водного господарства та природокористування

Як відомо, для підвищення щільності інформації на магнітному носієві необхідно зменшувати геометричні розміри області запису одного біту даних. В записаному стані ця область повинна бути стійкою до зовнішніх чинників і зберігати цей стан достатньо довго. Якщо розмір такої магнітної області дуже малий, можливе виникнення *суперпарамагнітного ефекту*, тобто нестійкості намагніченого стану в результаті теплового руху доменів. Це означає, що розмір області одного біту даних має певну фізичну межу, зменшення якої переводить феромагнетик в парамагнетик.

В сучасних носіях один біт даних записується на 70-100 дрібних „зерен” - магнітних доменів (див. рис. 1.40, зліва). Але теоретично кожне з таких структурних „зерен” може виконувати функцію домену і вміщувати в себе 1 біт інформації. В результаті з’являється можливість зменшити суперпарамагнітну межу: збільшити розміри одного „зерна” і зберігати одну одиницю інформації в меншій їх кількості.

В технології патернованого запису сотні маленьких магнітних доменів замінені одним великим зерном. Для цього проводиться додаткова обробка поверхні методом літографії, в результаті якої кожне велике зерно розміщується на деякому магнітоізольованому

підвищенні (магнітний острівець на рис. 1.40, справа). Розміщення області одного біту даних на підвищенні дає можливість зменшити

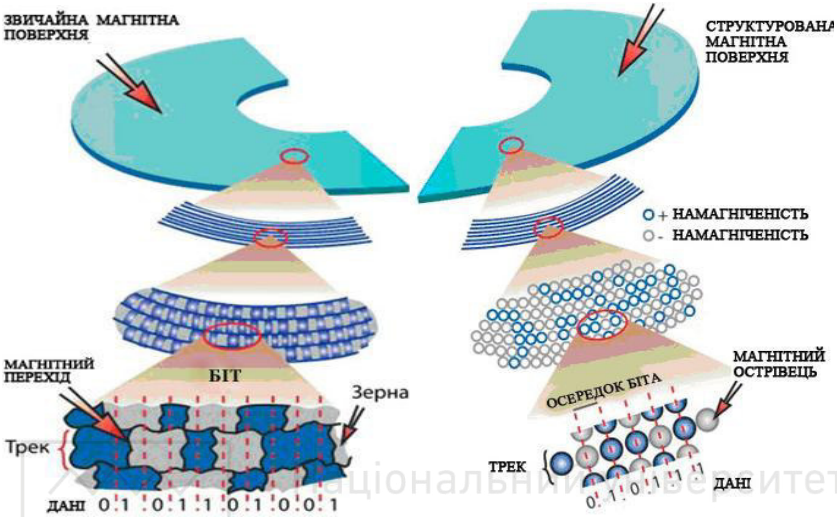


Рис. 1.40. Звичайна та патернована магнітні поверхні

вплив теплового руху на стійкість намагніченого стану.

Головна складність створення такої системи зберігання даних – виробництво необхідних для неї носіїв. Для отримання матеріалу,

Рис. 1.41. Перспективи розвитку магнітної пам'яті

який забезпечить щільність запису 1 Тбіт/дюйм^2, розмір однієї магнітної області має бути 12,5 нм. Методи літографії не можуть цього забезпечити, тому виробники пропонують використовувати

Національний університет водного господарства та природокористування

самоорганізовані матеріали (наприклад, залізо-платинові сплави).

Такий спосіб зберігання інформації дозволяє досягнути її щільності до 4 Тбіт/дюйм^2.

Перспективи розвитку нових методів запису і їх фізичні обмеження відображені на рис. 1.41. Видно, що фізичні обмеження перпендикулярного запису фактично досягнуті і на зміну йому повинні прийти термоасистована пам'ять та структуровані носії. На даному малюнку не відображені перспективи розвитку альтернативних методів зберігання даних (флеш, голографічних), які в досяжному майбутньому можуть скласти серйозну конкуренцію магнітним носіям.

Бібліографічний список до розділу 1

1. Загальна фізика. Частина ІІ. (за ред. Олексин Д. І., Орленко В. Ф.): Інтерактивний комплекс навчально-методичного забезпечення [Текст] / – Рівне: НУВГП, 2009. – 457 с.
2. Савельев И. В. Курс общей физики : В 3 т. [Текст] / И.В. Савельев. – М. : Наука, 1982. – Т. 2.
3. Капцов Л. Н. Физика элементов ЭВМ [Текст] / Л. Н. Капцов. – М. : Из-во МГУ, 1983. – 240 с.
4. Флорес А. Внешние устройства ЭВМ [Текст] / А. Флорес. – М. : Мир, 1977.
5. Розенблат М. А. Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники [Текст] / М. А. Розенблат. – М. : Наука, 1974.
6. Мюллер С. Модернизация и ремонт ПК, 17-е издание [Текст] / С. Мюллер. – М. : ООО «И. Д. Вильямс», 2008. – 1360 с.
7. О'делл Т. Магнитные домены высокой подвижности [Текст] / Т. О'делл. – М. : Мир, 1978.
8. Бобек Э. Цилиндрические магнитные домены [Текст]/ Э. Бобек, Э. Делла Торре. – М., 1977.
9. Элементы и устройства на цилиндрических магнитных доменах. Справочник, под ред. Н. Н. Евтихиева, Б. Н. Наумова [Текст] / – М., 1987.
10. Пучко А. Н. Электронные цифровые вычислительные машины [Текст]/ А. Н. Пучко, О. Д. Жуков-Емельянов, И. С. Ксенофонтов. – М. : Машиностроение, 1979. – 328 с.
11. Радаев А. HDD будущего [Текст]/ А. Радаев, Е. Пугач. – http://www.ferra.ru/online/storage

Національний університет
водного господарства
та природокористування

РОЗДІЛ 2
ФІЗИЧНІ ОСНОВИ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИСТРОЇВ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

Сучасна обчислювальна техніка неможлива без напівпровідникових приладів. В елементах комп'ютерів і аналогових пристроях знаходять широке застосування напівпровідникові інтегральні схеми, які по суті є багатофункціональними напівпровідниковими приладами.

Інтегральні схеми містять велику кількість взаємодіючих окремих напівпровідникових елементів: діодів і тріодів різних типів, резисторів, конденсаторів, ключових приладів. Ці елементи скомпоновані в одній матриці, в якості якої використовується окремий кристал або декілька кристалів, розміщених в одному корпусі з безліччю контактних виводів. За сімдесят років свого розвитку фізика напівпровідників та пов'язана із нею промисловість пройшли великий шлях від перших діодів до мікросхем. У мікросхемі 1965 року було 30 транзисторів, тоді як сьогодні чіп Radeon HD 3870 містить 660 мільйонів транзисторів. На сьогоднішній день створені великі інтегральні схеми, густина активних елементів на яких досягає 10^4 на мм^2.

Застосування інтегральних схем дозволяє суттєво зменшити розміри обчислювальних пристроїв, підвищити їх надійність та економічність.

Очевидно, що ознайомлення з інтегральними схемами необхідно розпочинати з вивчення фізичних основ дії та характеристик їх складових частин – напівпровідникових приладів, а це неможливо без знання основ теорії електропровідності напівпровідників (зонної теорії).

2.1. Елементи зонної теорії напівпровідників

Різні речовини по різному проводять електричний струм. Так, для багатьох металів (алюміній, мідь, залізо тощо) питомий опір ρ при кімнатній температурі не перевищує 10^{-7} Ом·м. Речовини з таким питомим опором називають *провідниками*. Діалектрики (скло, фарфор, парафін тощо) практично не проводять електричний струм. Їх питомий опір становить 10^{12} – 10^{14} Ом·м. Це – *ізолятори*.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

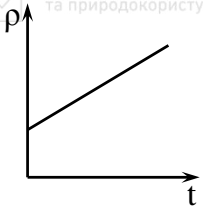


Рис. 2.1. Залежність питомого опору провідників від температури

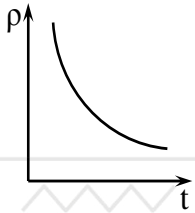


Рис. 2.2. Залежність питомого опору напівпровідників від температури

Поряд із провідниками та ізоляторами існує також цілий клас речовин, які називаються *напівпровідниками*. Їх питомий опір вищий, ніж у металів, але нижчий, ніж у ізоляторів, і перебуває в широких межах – від 10^{-5} до 10^{6} Ом·м.

Експериментальні дослідження показують [1,2], що в широкому діапазоні температур для провідників справедливе співвідношення для опору питомого опору ρ:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \cdot t)\,, \qquad (2.1)$$

де ρ_0 – питомий опір при температурі 0 °*C*, α – температурний коефіцієнт опору, *t* – температура по шкалі Цельсія.

Залежність питомого опору ρ від температури *t* приведена на рис. 2.1. З рисунку видно, що з ростом температури питомий опір чистих металів зростає.

Для напівпровідникових речовин питомий опір з ростом температури зменшується (див. рис. 2.2). Досліди показують, що в металах струм здійснюється електронами, тоді як в напівпровідниках струм створюється рухом як негативних зарядів (електронів), так і позитивних зарядів (дірок).

Побудова строгої теорії електропровідності металів і напівпровідників можлива лише в рамках квантової механіки. Згідно цієї теорії всередині кристалічних тіл, до яких відносяться метали і розглянуті нижче напівпровідники, нерухомі іони кристалічної решітки створюють періодичне, змінне в просторі електричне поле (див. рис. 2.3). Ця періодичність поля впливає на характер руху і стан електронів. В першому наближенні можна допустити, що електрони в твердому тілі перебувають всередині деякої „потенціальної ями” з плоским дном.

Розрахунки показують, що електрони в такій системі приймають дискретні значення енергії *E*, які визначаються за формулою:

$$E = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2\, m\, l^2} n^2\,, \; n = 1, 2 \ldots \qquad (2.2)$$

Національний університет
водного господарства
та природокористування

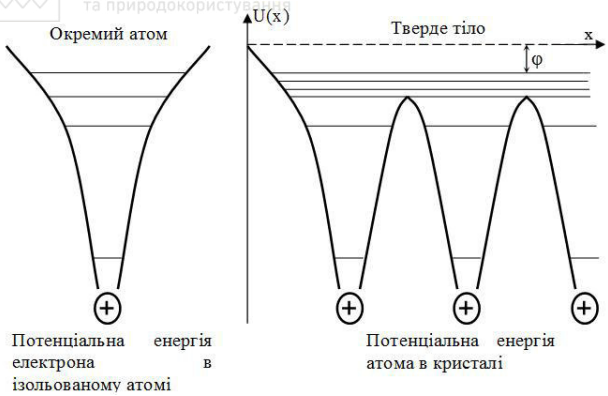


Рис. 2.3. Енергія електронів в атомі і кристалі

де $\hbar$ – стала Дірака, m – маса електрона, l – ширина потенціальної ями, n – квантове число дискретних станів .

При утворенні кристалічної решітки твердих тіл, тобто при зближенні окремих атомів до відстані $\sim 10^{-10} м$, атомні енергетичні рівні повинні розщеплюватись в зони рівнів, оскільки принцип Паулі тепер стосується не окремих атомів, а кристалічної решітки в цілому. Розщеплення тим сильніше, чим менша відстань між атомами і чим вищий енергетичний рівень (рис. 2.4а). Таким чином, шкала енергій електронів в кристалічній решітці розбивається на зони дозволених енергій і зони заборонених енергій (на рис. 2.4 б заштриховані зони дозволених енергій, які відповідають рівноважній відстані між атомами R_0).

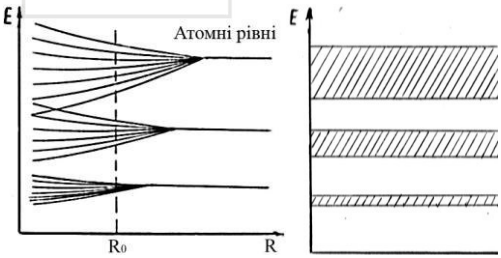


Рис. 2.4. Схема енергетичних рівнів кристалу

Кількість енергетичних рівнів в зонах співмірна з кількістю атомів речовини, тобто 10^{22}-10^{23}. Оскільки ширина зон 1-10 еВ, то відстань між окремими рівнями 10^{-22} еВ, що значно менше від енергії теплового руху $\boldsymbol{к \cdot T}$. І тому можна вважати розподіл енергій в зонах неперервним.

Згідно принципу Паулі на кожному енергетичному рівні в зонах може перебувати не більше двох електронів з протилежними спінами. Якщо зона утворена з повністю заповненого електронами

Національний університет водного господарства та природокористування

атомного рівня, то всі рівні такої зони також повністю заповнені. Зрозуміло, що це стосується зон, утворених з глибоких атомних рівнів. Електрони таких зон не можуть брати участь в електричних і теплових явищах, бо ні енергія електричного поля, ні теплова енергія не є достатніми для переходу електрона в сусідню вищу зону, а переходи в межах заповненої зони неможливі.

Інша ситуація в зонах, утворених з частково заповнених рівнів, тобто рівнів валентних електронів. Зрозуміло, що такі зони будуть заповнені також частково. Для прикладу розглянемо зону, утворену з атомного s-рівня, на якому перебуває лише один (валентний) електрон (Li, Na, K тощо). Якщо кристалічна решітка утворена з N атомів, то вказана зона має N рівнів, на яких може розміститись $2N$ електронів. Оскільки валентних електронів лише N, то заповниться лише половина зони. А це означає, що під впливом зовнішнього збудження (тепло, електричне поле) електрони можуть вільно переходити на вищі рівні в межах однієї зони, тим самим збільшувати свою енергію, тобто прискорюватися. Отже, електрони в частково заповненій зоні є носіями струму. Тому така зона, яку ми назвемо *валентною,* є одночасно *зоною провідності*. Приведена зонна модель дозволяє пояснити властивості металів, напівпровідників та ізоляторів. Перш за все, їх відмінність в значеннях питомих опорів пояснюється різною шириною заборонених зон (див. рис. 2.5) .

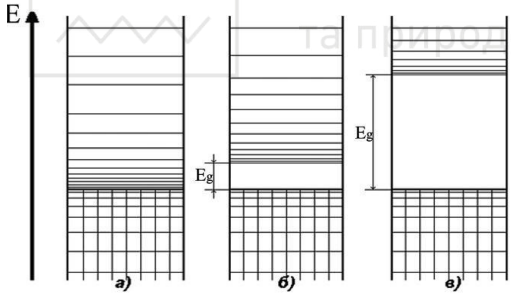


Рис. 2.5. Енергетичні діаграми при температурі, близькій до абсолютного нуля: а – провідників; б – напівпровідників; в – діелектриків

В металах валентна зона (V-зона) заповнена частково, всі вищі зони порожні, всі нижчі зони заповнені повністю. В напівпровідниках і діелектриках V-зона заповнена повністю
(при $T = 0$) і тому не може бути зоною провідності. Наступна вища зона при $T = 0$ порожня. Ця зона називається зоною провідності (C-зоною), бо при певних умовах ($T \neq 0$) в ній можуть з'явитися

електрони, які будуть носіями струму. Енергетична відстань між дном С-зони (E_c) і стелею V-зони (E_v) називається забороненою зоною $E_g = E_c - E_v$. Якщо $E_g < 2{,}5$ еВ, то речовина – напівпровідник, якщо $E_g > 2{,}5$ еВ, то речовина – діелектрик.

2.2. Власна провідність напівпровідників

Появу носіїв струму в напівпровідниках пояснимо, використавши плоску модель кристалічної решітки чистого (бездомішкового) напівпровідника, наприклад, Ge (рис. 2.6). Такий напівпровідник має тетраедричну кристалічну структуру, при якій кожен атом оточений чотирма сусідніми. Зв'язок між сусідніми атомами забезпечується двома валентними електронами з протилежними спінами (ковалентний зв'язок). При $T = 0$ всі валентні електрони перебувають на зв'язках, "зайвих" електронів немає, що відповідає повністю заповненій валентній зоні і порожній зоні провідності.

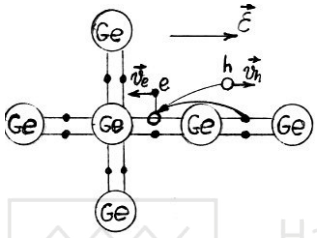


Рис. 2.6. Модель решітки чистого германію

При нагріванні кристалу деякі електрони за рахунок енергії теплового руху можуть вийти із зв'язків, стати вільними і в електричному полі напруженістю $\vec{\mathcal{E}}$ набути швидкості напрямленого руху $\vec{v}_e$. На звільнене вакантне місце може перейти електрон із сусіднього зв'язку, що рівнозначно рухові вакантного місця в протилежному напрямку зі швидкістю $\vec{v}_h$. Цей незаповнений ковалентний зв'язок отримав назву *дірки* (*hole*). Оскільки дірка рухається за полем (електрон – проти поля), то дірку слід розглядати як позитивний заряд $+e$. На енергетичній діаграмі теплова

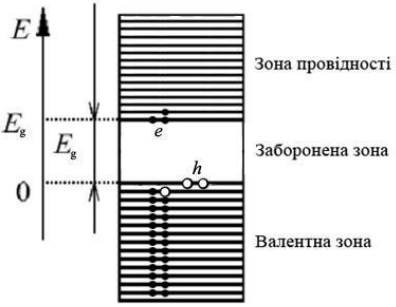


Рис. 2.7. Енергетична діаграма чистого напівпровідника

Національний університет водного господарства та природокористування

генерація вільних електронів і дірок зображується як перехід електрона з V-зони у С-зону (рис. 2.7). Зрозуміло, що чим вища інтенсивність теплового збудження (чим вища температура), тим вища концентрація електронів (n) і дірок (p) у відповідних зонах. Відмітимо, що ця концентрація не перевищує, як правило, 0,1% від кількості енергетичних рівнів в зонах і визначається за формулою:

$$n = n_0 \, e^{-\frac{E_g}{2\,k\cdot T}}. \qquad (2.3)$$

Точний розрахунок показує, що концентрація електронів в зоні провідності чистого германію при T=300 K дорівнює $2{,}5\cdot10^{13}$ $см^{-3}$, а кремнію – $6{,}8\cdot10^{10}$ $см^{-3}$. Отже, електрони є носіями струму в майже порожній зоні провідності, а дірки – в майже повністю заповненій валентній зоні.

Провідність бездомішкового напівпровідника називається *власною*. Очевидно, що у власному напівпровіднику концентрації електронів n_i і дірок p_i однакові.

Національний університет водного господарства та природокористування

2.3. Домішкова провідність напівпровідників

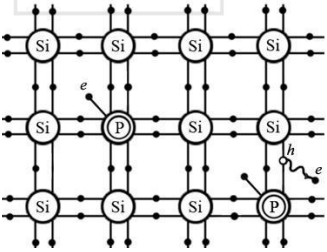


Рис. 2.8. Модель кристалу напівпровідника з донорними домішками

Чистий напівпровідник створити практично не можливо. В реальному напівпровіднику існує певна кількість домішок, тобто атомів іншої хімічної природи. Внесення навіть невеликої кількості домішок (порядку 0,001%) призводить до різкого збільшення електропровідності напівпровідника.

Нехай в чотиривалентний напівпровідник, наприклад, кремній (Si), введено домішку п’ятивалентної речовини фосфору (P). Такий домішковий іон заміщує в кристалічній решітці Si один із його власних іонів, як показано на рис. 2.8. Один електрон валентної оболонки п’ятивалентної речовини при цьому стає „зайвим” - він не потрібен для здійснення ковалентного зв’язку між іонами решітки. Такий слабо зв’язаний електрон за рахунок енергії теплового руху, легко відривається від іона, тобто переходить в зону провідності. Це

Національний університет
водного господарства
та природокористування

означає, що на моделі енергетичних зон поблизу дна зони провідності з'являються рівні енергії, з яких електрони переходять в зону провідності.

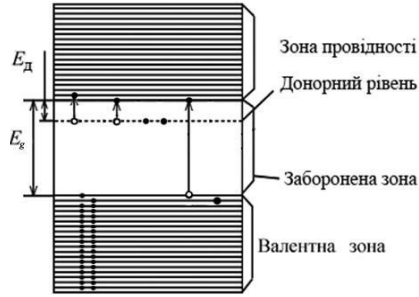


Рис. 2.9. Енергетична діаграма напівпровідника з донорними домішками

Такі рівні називають *донорними*. Вони показані на рис. 2.9.

Сама п'ятивалентна домішка також називається донорною. Очевидно, що в цьому випадку концентрація електронів провідності різко зростає. Електрони в зоні провідності в напівпровіднику з донорною домішкою називаються *основними носіями заряду*. Поряд з цим в такому напівпровіднику при достатньо високих температурах за рахунок власних переходів генеруються і дірки. Останні називаються *неосновними носіями*. Очевидно, що для напівпровідника з донорною домішкою концентрація електронів набагато більша концентрації дірок:

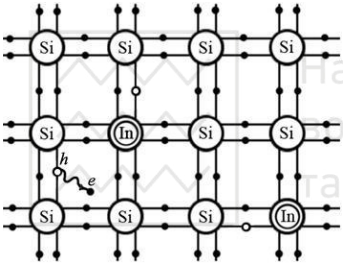


Рис. 2.10. Модель кристалу напівпровідника з акцепторними домішками

Якщо в чотиривалентний напівпровідник внести атоми тривалентної домішки, наприклад, індію (In), то атом такої домішки, заміщуючи власний атом чотиривалентного напівпровідника, не здатний заповнити всі ковалентні зв'язки, як показано на рис. 2.10.

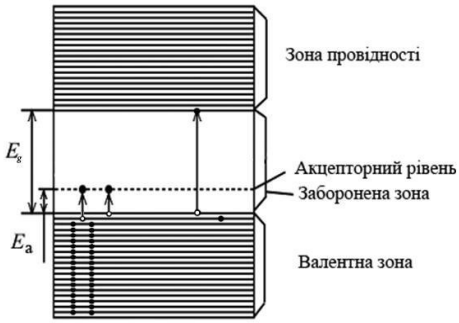


Рис. 2.11. Енергетична діаграма напівпровідника з акцепторними домішками

На енергетичній моделі це еквівалентно введенню рівнів енергії, які лежить біля

вершини валентної зони (див. рис. 2.11). На ці рівні легко переходять електрони із валентної зони, утворюючи певне число дірок.

Дірки у валентній зоні напівпровідника з тривалентною домішкою, яка називається *акцепторною*, є основними носіями заряду. При цьому завжди є певна кількість вільних електронів за рахунок власної генерації. Вони є неосновними носіями заряду. Для такого напівпровідника з акцепторною домішкою концентрація дірок набагато більша концентрації електронів.

Отже, струм в домішкових напівпровідниках здійснюється загалом основними носіями заряду. Вони з'являються в результаті введення в напівпровідник домішки. Така провідність називається домішковою: електронного (*n*-) або діркового (*p*-) типу.

2.4. Електронно-дірковий перехід

Електронно-дірковий перехід утворюється на границі двох напівпровідників з різним типом домішкової провідності (див. рис. 2.12). Важливо підкреслити, що електронно-дірковий перехід з потрібними для створення напівпровідникових приладів властивостями повинен бути отриманим в єдиній кристалічній структурі, в різні області якої вводяться акцепторні та донорні домішки. Для цього використовують технологію плавлення (технологія сплавного діода).

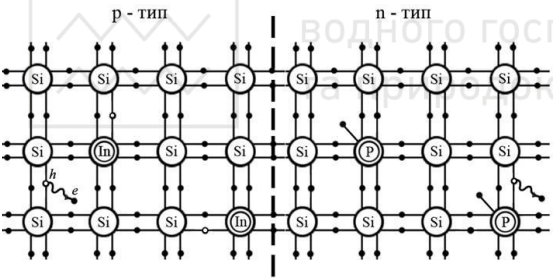


Рис. 2.12. Модель *p-n* переходу

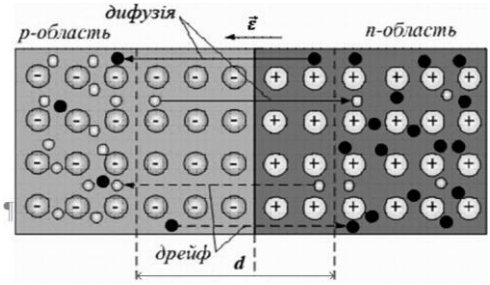


Рис. 2.13. Збіднений шар *p-n* переходу

На границі поділу

Національний університет водного господарства та природокористування

областей *p* і *n* навіть за відсутності зовнішніх джерел електрорушійної сили утворюється потенціальний бар'єр, який власне і є електронно-дірковим переходом (*p-n-перехід*). Це пояснюється тим, що в приграничній області дірки із *p*-області внаслідок дифузії рекомбінують з електронами із *n*-області, збільшуючи кількість зарядово не скомпенсованих іонів решітки (*збіднений* носіями заряду *шар*). Зменшення кількості носіїв заряду приводить до збільшення опору *p-n*-переходу. Електричне поле подвійного зарядженого приконтактного шару забезпечує дрейфовий струм неосновних носіїв. Рівновага настає, коли цей струм дорівнює дифузійному струму основних носіїв. Товщина збідненого шару – потенціального бар'єру *d* сягає декількох мікрон (див. рис. 2.13).

2.5. Принцип дії напівпровідникового діода

Електронно-дірковий перехід є основною складовою частиною напівпровідникового діода. Схематично такий діод показано на рис. 2.14, причому риска відповідає *n*-області, а трикутник *p*-області.

Рис. 2.14. Позначення напівпровідникового діода

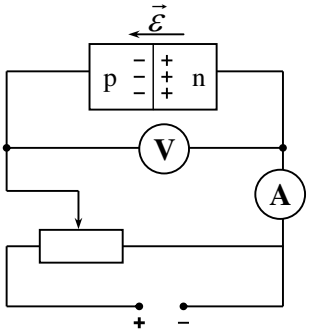


Рис. 2.15. Пряме включення напівпровідникового діода

Розглянемо процеси, які протікають в *p-n*-переході при внесені його в зовнішнє електричне поле. Пряма зовнішня напруга на *p-n*-переході (рис. 2.15) викликає збільшення дифузії основних носіїв як із *p*-області в *n*-область (дірок), так і в зворотному напрямку (електронів) і зменшення товщини збідненого шару. Проходячи через *p-n*-перехід в сусідні області надлишкові носії заряду рекомбінують. Оскільки прикладена зовнішня напруга порушує рівновагу, цей процес продовжується неперервно. Це означає,що пряме зміщення зумовлює протікання через *p-n*-перехід струму основних носіїв заряду. Цей струм (його називають *прямим*) збільшується з ростом прикладеної до діода напруги. При зворотній

напрузі струм основних носіїв через перехід неможливий, товщина збідненого шару збільшується. Однак для неосновних носіїв електричне поле збідненого шару є прискорюючим. Зростання цього прискорюючого поля викликає протікання через діод струму неосновних носіїв, який називається *зворотнім струмом*. Оскільки неосновних носіїв в *p*- і *n*-областях відносно мало, то збільшення зворотного струму з ростом зворотної напруги відбувається набагато повільніше, ніж у випадку основних носіїв.

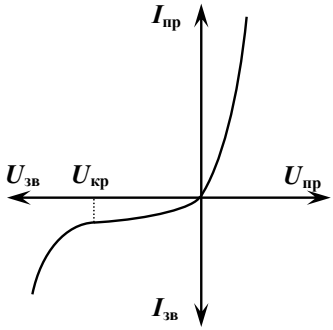


Рис. 2.16. Вольт-амперна характеристика напівпровідникового діода

Залежність сили струму в діоді від прикладеної до нього зовнішньої напруги називають вольт-амперною характеристикою діода. Якісна вольт-амперна характеристика діода приведена на рис. 2.16, де показані прямий $I_{пр}$ і зворотний $I_{зв}$ струми діода в залежності від прикладеної напруги U.

2.5.1. Використання напівпровідникового діода

В основі застосування діодів лежить нелінійність їх вольт-амперної характеристики [3]. При цьому в багатьох пристроях діод виконує роль елемента з односторонньою провідністю, своєрідного ключа для пропускання струму тільки в одному напрямку.

Діод як випрямляч змінного струму

Випрямлячі змінного струму використовуються як джерела живлення різноманітних пристроїв, в тому числі і комп'ютерів.

Найпростішою схемою випрямлення змінного струму є схема *однопівперіодного* випрямляча на одному діоді, показана на

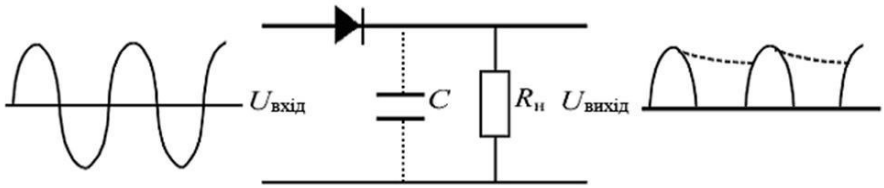


Рис. 2.17. Схема напівпровідникового випрямляча

Національний університет
водного господарства
та природокористування

рис. 2.17. В цій схемі вхідний струм на протязі однієї половини періоду тече через діод. При цьому на опорі $R_н$ спостерігались би додатні імпульси вихідної напруги $U_{вихід}$, якби в схемі не було конденсатора *C*. Його дія призводить до акумуляції заряду на обкладках в перший півперіод і розрядку через опір в другий півперіод. Це дозволяє згладжувати імпульси напруги на опорі, тобто випрямляти струм.

Стабілізатори напруги

Явище пробою *p-n*-переходу використовують для стабілізації напруги. Для цього до джерела нестабільної напруги $U_{вхід}$ під'єднують коло, що складається з резистора і стабілітрона – *p-n*-переходу, розрахованого на задану напругу пробою і ввімкненого у зворотному напрямі (див. рис. 2.18). Якщо напруга на стабілітроні починає перевищувати критичне значення, то стабілітрон відкривається, струм через резистор *R* збільшується і падіння напруги на опорі теж збільшується. Таким чином напруга на стабілітроні не зможе перевершити критичну напругу пробою. При цьому нестабільна напруга виявиться сумою двох: нестабільної на резисторі *R* і стабільної на навантаженні $R_н$.

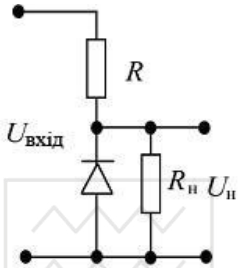


Рис. 2.18. Схема напівпровідникового стабілізатора напруги

Світловипромінювальні діоди

Принцип роботи світловипромінювальних діодів – пристроїв,

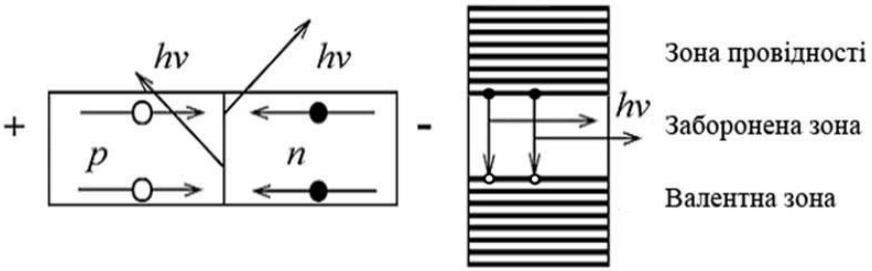


Рис. 2.19. Схема роботи світловипромінювального діода

Національний університет водного господарства та природокористування

що перетворюють енергію електричного струму в світлову енергію, можна зрозуміти, розглянувши рис. 2.19 зі схемою включення *p-n*-переходу в прямому напрямі. На границі розділу дірки з *p*-області рекомбінують з електронами з *n*-області. При цьому відбувається перехід електрона із зони провідності у валентну зону, який супроводжується квантом електромагнітного випромінювання. Можна підібрати таку ширину забороненої зони напівпровідника, яка відповідає заданій частоті електромагнітного випромінювання (від інфрачервоного до ультрафіолетового).

Світловипромінювальні діоди мають високий ККД, який може сягати 80%. Вони довговічні, оскільки на відміну від ламп розжарювання і газорозрядних ламп не містять ниток розжарення, та інших вузлів, що швидко зношуються.

Лазерні світловипромінювальні діоди

Дія лазерних світловипромінювальних діодів подібна до роботи світловипромінювальних діодів, з деякими відмінностями. Необхідно в області *p-n*-переходу створити інверсну заселеність (багато електронів у збудженому стані і мало – в основному стані). Велика концентрація електронів провідності (вони відповідають збудженому рівню лазера) зумовлена їх надходженням з *n*-області (див. рис. 2.20). Велика концентрація дірок, що надходять з *p*-області, відповідає малій кількості електронів в основному стані переходу (N_1), що використовується в лазері. У такому випадку можна забезпечувати умову інверсної заселеності (багато (N_2) електронів у збудженому стані і мало (N_1) - в основному стані) в області *p-n*-переходу. В якості дзеркал лазерного резонатора

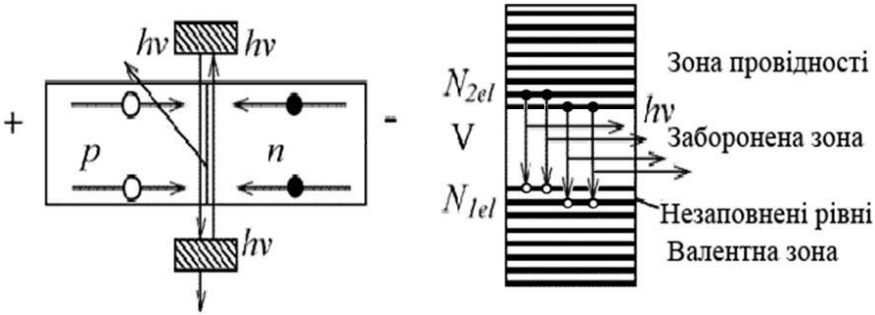


Рис. 2.20. Схема роботи лазерного діода

використовують відполіровані торці самого напівпровідникового кристала (див. рис. 2.20); одне з них роблять частково прозорим (нижнє на лівому рис. 2.20) для виходу випромінювання з резонатора.

Докладніше про принцип роботи лазера див. в третьому розділі.

Логічні схеми на діодах

Діоди можуть використовуватись для реалізації різноманітних схем, що виконують логічні операції. Зупинимось на одному прикладі такої схеми – логічної схеми співпадань „ І ”. Вона зображена на рис. 2.21.

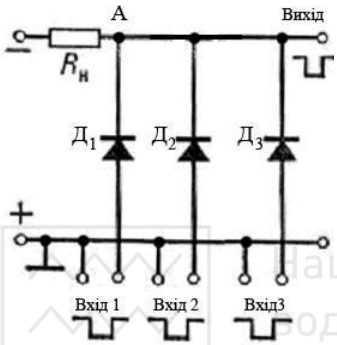


Рис. 2.21. Схема співпадань на напівпровідникових діодах

Схема співпадань – це електронний пристрій для виділення з сукупності сигналів (електричних імпульсів), що поступили на нього, лише таких, які повністю або частково збігаються в часі. Це пристрій дискретної дії з декількома входами і одним виходом, сигнал на якому з’являється лише тоді, коли є сигнали на всіх входах одночасно.

У початковому стані діоди ввімкненні в прямому напрямку, тобто *p-n* переходи мають дуже малий опір, через них тече струм (входи діодів замкнені на землю) і напруга в точці А, а значить і на виході схеми практично дорівнює напрузі джерела. При подачі на вхід першого діода сигналу від’ємної напруги, більшою за напругу джерела, і відсутності сигналів на входах другого і третього діодів, перший діод закривається, а через другий і третій продовжують проходити струми. Напруга в точці А, а значить і на виході схеми не змінюється. Те ж саме буде спостерігатися у випадку, коли сигнал буде надходити на будь-який інший діод, за умови відсутності сигналу на вході хоча б одного іншого діода. Лише при одночасній подачі сигналів на входи всіх трьох діодів, напруга в точці А впаде внаслідок закриття діодів.

Національний університет водного господарства та природокористування

Тунельні діоди

Тунельні діоди – це діоди, в яких використовуються напівпровідники з великою концентрацією домішок. ($10^{19} \div 10^{21}$ *см*$^{-3}$). Така концентрація домішок дозволяє зробити *p-n*-перехід надзвичайно вузьким (соті мікрона), що дає можливість проявитись в діоді квантово-механічним явищам тунельного переходу через *p-n-перехід*. Внаслідок малої товщини збідненого шару електрони із зони провідності *n*–області можуть безпосередньо тунелювати через збіднений шар в валентну зону *p*–області. Характерною особливістю тунельних діодів є *N* – подібна вольт-амперна характеристика (див. рис. 2.22). На ній при прямому включенні діода є ділянка від'ємної диференціальної провідності (між U_1 і U_2 на рис. 2.22). Наявність від'ємної провідності дає можливість використовувати тунельні діоди в якості підсилювачів або генераторів електричних сигналів, тригерів та швидкодіючих перемикачів.

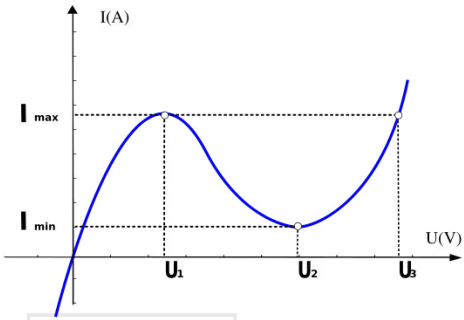


Рис. 2.22. Вольт-амперна характеристика тунельного діода

Фоторезистори та фотодіоди

Принцип роботи фоторезисторів та фотодіодів базується на явищі фотопровідності. Під фотопровідністю розуміють електропровідність,
яка виникає у напівпровіднику при його освітленні.

Енергія поглинутих напівпровідником квантів світла (фотонів) іде на утворення електронно-діркових пар (електронів в зоні провідності і дірок в валентній зоні). В результаті утворюється надлишкова концентрація носіїв заряду, яка пропорційна інтенсивності падаючого світла при малій освітленості напівпровідника. Прилади, які працюють на такому принципі називаються фотодіодами. Їх використовують для реєстрації інтенсивності світла і перетворення світлових сигналів в електричні.

Національний університет водного господарства та природокористування

Фоторезистор — напівпровідниковий прилад, який змінює величину свого опору під дією світла. Для виготовлення фоторезисторів використовують напівпровідникові матеріали з відповідною шириною забороненої зони. Так, для реєстрації видимого світла використовуються фоторезистори з селеніду і сульфіду кадмію. Для реєстрації інфрачервоного випромінювання використовуються напівпровідники Ge (чистий або легований домішками Au, Cu, Zn), Si, PbS, PbSe, PbTe, InSb, InAs, HgCdTe, часто охолоджувані до низьких температур. Напівпровідник наносять у вигляді тонкого шару на скляну або кварцову основу або вирізають у вигляді тонкої пластинки з монокристалу. До шару або пластинки напівпровідника під'єднують два електроди.

2.6. Транзистори

Транзистор (від англ.: transfer - переносити і резистор), напівпровідниковий прилад для посилення, генерування і перетворення електричних коливань, виконаний на основі монокристалічного напівпровідника (переважно Si або Ge), що містить не менше трьох областей з різною - електронною (n) і дірковою (p) – провідністю [4].

Електронна промисловість випускає широкий асортимент транзисторів, застосування яких дозволяє створити економну по живленню, малогабаритну і надійну апаратуру.

Класифікація транзисторів, що використовуються в

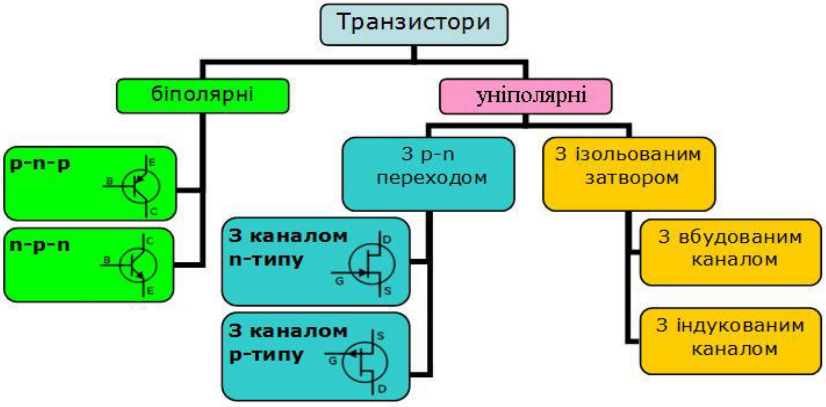


Рис. 2.23. Класифікація транзисторів, які використовуються в комп'ютерній техніці

Національний університет водного господарства та природокористування

комп'ютерній техніці представлена на рис. 2.23.

2.6.1. Біполярні транзистори

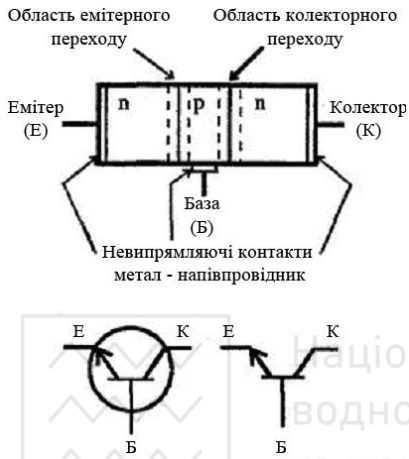


Рис. 2.24. Будова біполярного транзистора та його позначення

Схематичну будову плоского біполярного транзистора з двома *p-n*-переходами показано на верхньому рис. 2.24. Основним елементом транзистора є кристал германію або кремнію, в якому створені три області різної провідності. Дві крайні області завжди мають провідність одного типу, протилежну до провідності середньої області. Такі прилади називаються *транзисторами типу n-p-n* або *p-n-p* (див. нижній рис. 2.24). Середня область транзистора називається *базою*, одна крайня область – *колектором*, інша – *емітером*. Область бази в транзисторі є дуже тонкою – близько декількох *мкм*. Крім того, концентрація атомів домішки в базі незначна – в багато разів менша, ніж в емітері.

Отже, такий транзистор має два *p-n*-переходи, які називаються *колекторним* та *емітерним*.

2.6.1.1. Принцип дії біполярного транзистора

Для пояснення принципу роботи біполярного транзистора скористаємось рис. 2.25. З нього видно, що по суті транзистор є з'єднанням двох напівпровідникових діодів, з підключенням до них двох джерел напруги: між емітером і базою – в прямому (пропускному) напрямку; між базою і колектором – в зворотному.

Внаслідок такого підключення джерел живлення ширина *p-n* переходу між базою і емітером буде малою а між колектором і базою - великою і, відповідно, опір переходу „база-емітер" буде

Національний університет
водного господарства
та природокористування

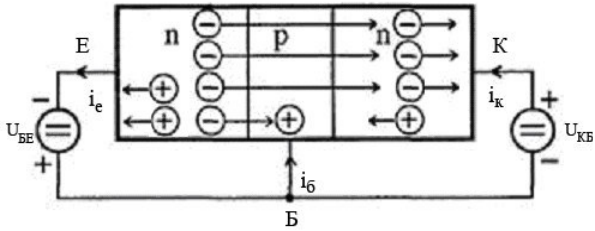


Рис. 2.25. Принцип дії біполярного транзистора

набагато меншим опору переходу „колектор-база” (від 100 до 10000 разів). Для отримання струму в емітерному переході достатньо напруги в декілька десятих вольта.

Вольт-амперна характеристика емітерного переходу є характеристикою напівпровідникового діода при прямому включенні, вольт-амперна характеристика колекторного переходу подібна характеристиці діода при зворотному включенні (див. рис. 2.16).

В емітері електрони є основними носіями заряду і при такому включенні джерела вони легко інжектуються в базу. База насичується електронами, оскільки концентрація в ній основних носіїв (дірок) невелика. Між колектором і базою підключена зворотна напруга, це означає, що основні носії бази (дірки) не можуть проходити в колектор. Електрони бази є неосновними носіями і вони легко дифундують в колектор. Ширина бази вибирається такою, щоб при її проходженні електрони не могли рекомбінувати з дірками бази.

Оскільки струм, що проходить через перехід „емітер-база” практично дорівнює струму переходу „база-колектор”, а опори переходів суттєво різні, то потужність, яка виділяється в колекторному колі, також суттєво більша потужності, що виділяється в емітерному колі. Дійсно, оскільки:

$$P_{БЕ} = I_e^2 \cdot R_{БЕ}, \text{ і } P_{БК} = I_к^2 \cdot R_{БК}, \qquad (2.4)$$

а $I_e \approx I_k$ і $R_{БК} \approx (100 \div 10000)\, R_{БЕ}$, то

$$P_{БК} = (100 \div 10000)\, P_{БЕ}. \qquad (2.5)$$

Тут $P_{БЕ}$ і $P_{БК}$ – потужності вхідного і вихідного струмів, I_e і $I_к$ – емітерний і колекторний струми, $R_{БЕ}$ і $R_{БК}$ – опори переходів „емітер-база” і „база-колектор”,відповідно.

Національний університет водного господарства та природокористування

2.6.2. Польові транзистори

Польові транзистори – це транзистори, в яких носіями струму є або електрони, або дірки (носії одного знаку). Тому такі транзистори називаються *уніполярними*.

В основу роботи польового транзистора покладена залежність опору деякого струмопровідного шару–каналу від прикладеної напруги, тобто від величини електричного поля, з чим і пов'язаний термін „польовий транзистор". Польові транзистори поділяються на польові транзистори з управляючим *p-n*-переходом і польові транзистори з ізольованим затвором.

2.6.2.1. Принцип дії польового транзистора з управляючим *p-n* переходом

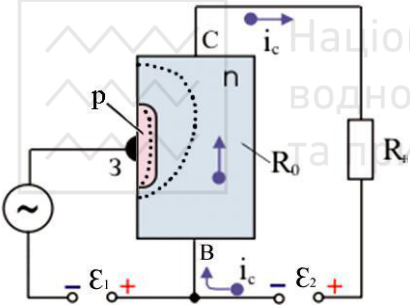


Рис. 2.26. Принцип дії польового транзистора

Схематично конструкція такого польового транзистора показана на рис. 2.26.

Основою приладу є кристал домішкового напівпровідника, наприклад *n*–типу, з двома омічними контактами, які називаються *витік* і *стік*. Між витоком і стоком розміщений *p-n* перехід, у якого зі сторони *p* - області знаходиться омічний контакт – *затвор*. При прикладенні до *p-n*-переходу, наприклад, між контактами затвор і витік зворотної напруги, збіднена область *p-n* переходу розширюється, в результаті чого переріз каналу зменшується.

Носії заряду (електрони) протікають по каналу між витоком і стоком, створюючи електричний струм i_c. Подаючи зворотну напругу на вхід затвор - витік ми можемо регулювати ширину *p-n*-переходу і регулювати ширину каналу, по якому протікає електричний струм, а отже і сам електричний струм через транзистор. Польові транзистори мають низку суттєвих переваг над біполярними, важливих для використання в обчислювальній техніці:

Національний університет водного господарства та природокористування

1. Вхідний опір польових транзисторів набагато більший від опору біполярних, що важливо для електричних схем, де потрібне економне споживання потужності для управління приладом (наприклад, у комп'ютерів). Крім того, великий вхідний опір транзистора спрощує узгодження послідовних каскадів електричних схем.

2. В каналі польового транзистора рух носіїв заряду відбувається під дією електричного поля на відміну від дифузійного руху носіїв в біполярному транзисторі. Цей факт суттєво підвищує швидкодію приладів, побудованих на основі польових транзисторів.

2.6.2.2. Принцип дії польового транзистора з ізольованим затвором

Окрім польових транзисторів з управляючим затвором існують так звані транзистори з ізольованим затвором. Такі транзистори часто називають МДН–транзистори (метал-діелектрик-напівпровідник) або МОН-транзистори (метал-оксид-напівпровідник). На рис. 2.27 і рис. 2.28 показані позначення на схемах такого транзистора і його будова.

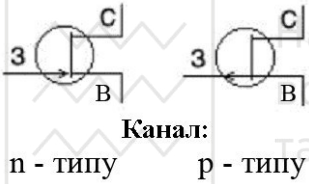


Рис. 2.27. Позначення польових транзисторів

Основою транзистора є кремнієва пластинка з електропровідністю *p*-типу. У ній створено дві області з електропровідністю *n*+-типу (з підвищеною провідністю). Ці

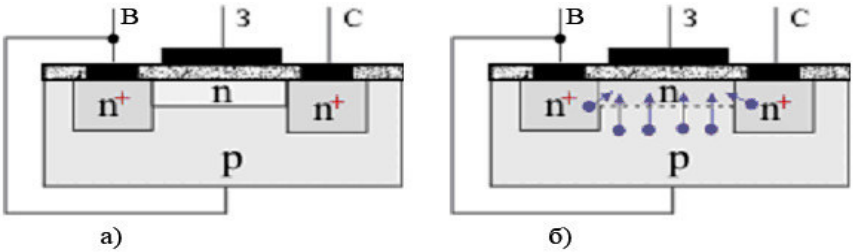


Рис. 2.28. Принцип дії польового транзистора з ізольованим затвором

області називаються витоком і стоком. Між стоком і витоком

Національний університет водного господарства та природокористування

розміщується приповерхневий канал з електропровідністю *n*-типу. Заштрихована область – діелектричний шар з діоксиду кремнію (його товщина зазвичай складає 0,1 - 0,2 мкм). Над діелектричним шаром розташований затвор у вигляді тонкої металевої плівки. База такого транзистора зазвичай сполучена з витоком і її потенціал береться за нульовий. Інколи до бази під'єднаний окремий контакт. Розглянутий транзистор називають транзистором з власним (вбудованим) каналом.

Принцип його дії наступний. Якщо до затвору не прикладена напруга, то при ненульовій напрузі між стоком і витоком, через канал потече струм (потік електронів). Через базу струм не піде, оскільки один з *p-n*-переходів перебуває під зворотною напругою. При подачі на затвор напруги негативної полярності відносно витоку (отже і бази) в каналі утворюється поперечне електричне поле, яке виштовхує електрони з каналу в області витоку, стоку і бази. Канал збіднюється електронами, його опір збільшується, струм зменшується. Чим більша напруга на затворі, тим меншим буде струм. Такий режим називається *режимом збіднення*. Якщо подати позитивну напругу на затвор, то під дією поля з областей стоку, витоку і кристалу в канал приходитимуть електрони. Опір каналу буде зменшуватись, а струм в каналі – збільшуватися. Такий режим називається *режимом збагачення*. Якщо база *n*-типу, то канал має бути *p*-типу і полярність напруги змінюється на протилежну.

Іншим типом є так званий транзистор з індукованим (інверсним) каналом (див. рис. 2.28, б).

За рахунок значної різниці між роботами виходу електронів з напівпровідника (база) і металу (затвор) виникає сильне контактне електричне поле. Це поле виштовхує дірки з приповерхневого шару (і притягує електрони). Ефект настільки сильний ,що в приповерхневому шарі основними носіями стають електрони має місце інверсія типу провідності. Зовнішня напруга, прикладеної до затвору, діє аналогічно випадку транзистора з власним каналом.

Слід зазначити, що польовий транзистор дозволяє отримати набагато більший коефіцієнт підсилення, ніж біполярний. Володіючи високим вхідним опором (і низьким вихідним) польові транзистори поступово витісняють біполярні. Слід пам'ятати, що польові транзистори потребують захисту від статичної електрики.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

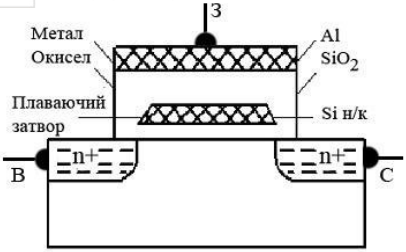


Рис. 2.29. Будова польового транзистора з плаваючим затвором

2.6.2.3. Польовий транзистор з плаваючим затвором

Транзистор з плаваючим затвором є одним з різновидів польового транзистора (див. рис. 2.29). В ньому крім основних складових частин – витоку, стоку і управляючого затвору, є додатковий шар, який називається *плаваючим затвором*. Плаваючий затвор транзистора розташований в глибині діелектрика на деякій відстані від усіх контактів транзистора, що не дає можливості малоенергетичним електронам каналу провідності потрапляти на нього. Над плаваючим затвором розташований управляючий затвор. Якщо до нього прикласти напругу, то багато електронів провідності набувають настільки високої енергії, що можуть внаслідок тунельного ефекту проходити крізь діелектрик і осідати на плаваючому затворі, в результаті чого заряд плаваючого затвору з нейтрального стає негативним. Електрони, що попали на плаваючий затвор, можуть залишатися там протягом десятків років, причому їх кількість не зменшуватиметься, якщо на транзистор не подається напруга. Якщо ж до управляючого затвору прикласти напругу протилежного знаку, то електрони починають з плаваючого затвору стікати, тим самим розряджаючи його. Властивість транзисторів з плаваючим затвором зберігати на ньому заряди широко використовується в напівпровідникових пристроях комп'ютерної пам'яті (докладніше в 2.7.1.6).

2.6.3. Інтегральні мікросхеми

Інтегральні мікросхеми складаються із з'єднаних провідним матеріалом груп функціонально пов'язаних схемних елементів (діодів, транзисторів, резисторів, конденсаторів) в єдиній напівпровідниковій матриці і розміщених в окремій капсулі [5].

Кожна інтегральна мікросхема, як єдиний прилад, замінює одну або декілька радіотехнічних схем: підсилювачів, генераторів,

Національний університет водного господарства та природокористування

логічних схем тощо. Необхідні з'єднання окремих елементів радіотехнічних схем здійснюються вже в технологічному процесі виготовлення інтегральної схеми. З'єднання між елементами схеми здійснюється не зовнішніми провідниками, а за допомогою плівкової або напівпровідникової технології на поверхні або в глибині напівпровідника.

Основою інтегральних мікросхем є напівпровідниковий кристал. Розрізняють три групи інтегральних мікросхем: *плівкові*, *напівпровідникові* і *гібридні*. В напівпровідникових інтегральних схемах всі елементи і між елементні з'єднання виконані в об'ємі і на поверхні напівпровідникової пластини. Кількість елементів може досягати декількох мільйонів. В якості активних елементів в напівпровідникових інтегральних схемах в основному використовуються біполярні транзистори та польові транзистори з ізольованим затвором.

Всі елементи і міжелементні з'єднання плівкових інтегральних схем виконані у вигляді плівок, як напівпровідникових, так і металічних, товщиною від десятих до декількох десятків мікрон.

В гібридних інтегральних схемах поєднуються плівкові та напівпровідникові компоненти. Зазвичай ці схеми містять основу, на якій розміщені плівкові пасивні елементи. Над основою знаходяся елементи напівпровідникової інтегральної схеми.

2.7. Оперативна пам'ять

Оперативна пам'ять (ОП) – це робоча область процесора комп'ютера. В ній під час роботи зберігаються програми і дані. Вона часто розглядається як тимчасове сховище, оскільки інформація в ОП зберігається тільки при ввімкненому комп'ютері [6].

Пристрої ОП інколи називають ***запам'ятовуючими пристроями з довільним доступом*** (англ.:RAM - Random Access Memory – пам'ять з довільним доступом). Це означає, що звернення до даних, які зберігаються в ОП, не залежать від порядку зберігання. Поняття RAM означає основний *робочий* простір пам'яті, який створюється мікросхемами динамічної оперативної пам'яті (Dinamic RAM – DRAM) і статичної оперативної пам'яті (Static RAM – SRAM). RAM є ***енергозалежною пам'яттю***. Це

означає, що після виключення ПК дані, які в ній зберігаються, будуть втрачені, якщо їх не зберегти на жорсткому диску або пристрої зовнішньої пам'яті.

Часто недосвідчені користувачі ПК не розуміють відмінності між поняттями ОП і пам'яті на диску. Якщо уявити собі вінчестер у вигляді бібліотеки, де інформація зберігається у файлах-книгах на дисках-стелажах, то ОП буде аналогічна робочому столу, на якому користувач працює з книгами. Його робота подібна роботі процесора. Він має прямий доступ до всіх документів, які знаходяться на столі. Якщо стіл достатньо великий, то можна одночасно працювати з декількома документами. Збільшення ємності жорсткого диску аналогічне встановленню нового стелажа в бібліотеці, а збільшення ємності ОП аналогічне встановленню більшого робочого столу.

Фізично ОП в системі є набором мікросхем або модулів, які підключені до системної плати.

В сучасних ПК використовуються запам'ятовуючі пристрої трьох основних типів:

1. ROM (англ.: Read Only Memory, ПЗП – постійний запам'ятовуючий пристрій);
2. DRAM;
3. SRAM.

2.7.1. Пам'ять типу ROM (енергонезалежна пам'ять)

ROM [7] поділяється на:

1. ROM(M).
2. PROM.
3. EPROM.
4. EEPROM.
5. Flash.

2.7.1.1. ROM(M)

ROM(M)**,** точніше Mask-ROM, не може виконувати операції запису і зміни даних, вона їх може лише зберігати. ROM(M) є енергонезалежною пам'яттю, тому використовується лише для читання. Дані на ROM(M) записуються під час виробництва

Національний університет водного господарства та природокористування

мікросхеми шляхом нанесення по масці (звідси назва) алюмінієвих з'єднувальних доріжок літографічним методом. Наявність або відсутність у відповідному місці такої доріжки кодує логічні „0" або „1".

В ROM(M) знаходяться команди запуску комп'ютера, тобто програмне забезпечення, яке завантажує систему.

Переваги:

1. Низька вартість при масовому виробництві.
2. Висока швидкість доступу до комірки пам'яті.
3. Висока надійність.
4. Стійкість до електромагнітних полів.

Недоліки:

1. Неможливість перезапису.
2. Складний виробничий цикл (до 8 тижнів).

В сучасних комп'ютерах такий тип пам'яті вже не використовують.

Національний університет водного господарства та природокористування

2.7.1.2. PROM

В PROM (англ.: Programmable ROM - програмована пам'ять тільки для читання) як і в ROM інформація може бути записана один раз. Виготовлялась у вигляді мікросхем. Відмінність мікросхем пам'яті PROM від ROM в тому, що PROM випускались чистими, а в ROM інформація закладалась вже при виготовленні. Для запису інформації в PROM використовують програматор. Еквівалентна схема PROM показана на

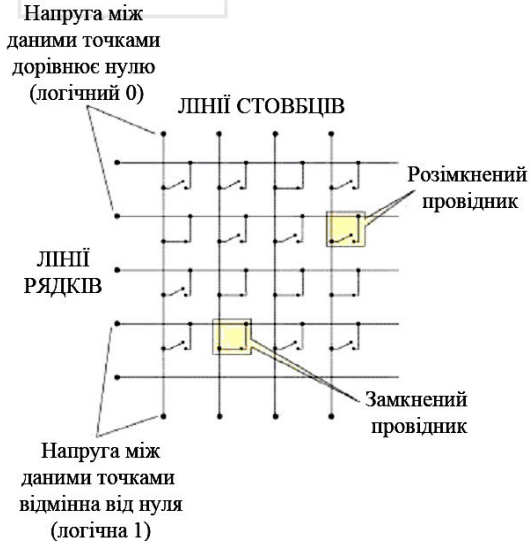


Рис. 2.30. Еквівалентна схема PROM

Національний університет водного господарства та природокористування

рис. 2.30. В такій пам'яті масив комірок пам'яті можна представити набором плавких перемичок. Деякі з цього набору під час запису плавляться при пропусканні через них великого струму від програматора, а деякі залишаються цілими. Вони відіграють роль логічних „0" і „1". Замкнутому стану провідника можна присвоїти значення логічного нуля, а розімкнутому – логічної одиниці.

Пам'ять PROM практично вийшла з ужитку наприкінці 1980-их років.

Переваги:

1. Висока надійність;
2. Стійкість до електромагнітних полів;
3. Можливість програмувати готову мікросхему, це зручно для штучного виробництва;
4. Висока швидкість доступу до комірки пам'яті.

Недоліки:

1. Неможливість перезапису;
2. Необхідність у спеціальному тривалому термічному тренуванні, без якого надійність зберігання даних невисока.

Національний університет водного господарства та природокористування

2.7.1.3. EPROM

EPROM (англ.: Erasable PROM – програмована пам'ять тільки для читання з можливістю стирання) – це спеціальний вид PROM з можливістю стирання даних ультрафіолетовим випромінюванням через кварцове вікно в корпусі мікросхеми. Після стирання EPROM може бути перепрограмована. Електронна схема EPROM ідентична PROM. Дані зберігаються в вигляді заряду на плаваючих затворах МОН-транзисторів з лавинною інжекцією заряду (фактично, на обкладках конденсатора з дуже низьким стіканням заряду).

Стирання приводить всі біти області в один стан (частіше у одиниці, рідше – нулі). Запис також здійснюється на програматорах, але вони відрізняються від програматорів PROM. В даний час EPROM майже повністю витіснені EEPROM і Flash.

Переваги:

1. Можливість перезапису інформації.

Недоліки:

1. Невелика кількість циклів перезапису;
2. Неможливість модифікації частини даних на мікросхемі;

Національний університет водного господарства та природокористування

3. Велика імовірність перетримати або недотримати мікросхему в ультрафіолетовому випромінюванні, що приводить до „перепалювання” мікросхеми або до збоїв в роботі.

2.7.1.4. EEPROM

EEPROM (англ.: Electrically EPROM – програмована пам’ять тільки для читання з можливістю стирання електричним розрядом) – спеціальний тип PROM з можливістю стирання даних електричним розрядом. Перший зразок (16Кбіт) на основі транзистора з „плаваючим” затвором і тунелюванням через окисел був випущений в 1983 році. Головна відмінність від попередніх видів ROM полягала в можливості перепрограмування її процесором ПК. Стирання кожної комірки відбувалось автоматично електричним струмом при запису в неї нової інформації, тобто можна було змінити дані в комірці не знищуючи їх в інших комірках. Час стирання тут суттєво більший часу запису.

Переваги:

1. Збільшений ресурс роботи;
2. Простіша в експлуатації.

Недоліки:

1. Відносно висока вартість.

Національний університет водного господарства та природокористування

2.7.1.5. Flash

Flash (FlashROM, Flash-memory, Flash-пам’ять, флеш-пам’ять). Цей вид мікросхем можна вважати схематичним варіантом EEPROM. Таку мікросхему також можна перепрограмовувати процесором, але перед цим необхідно виконати стирання (повне або поблочне). Існують мікросхеми Flash-пам’яті з автоматичним посторінковим автостиранням і дуже дрібною розбивкою на сторінки, що наближає їх по можливостях до EEPROM. Слід розрізняти ОП на основі Flash і зовнішню флеш-пам’ять. Перша схемно вбудована в процесор, а друга є незалежним пристроєм зберігання даних і лише має подібну до FlashROM організацію (див. 2.4).

Переваги:

1. Висока швидкість перезапису за рахунок того, що стирання

Національний університет водного господарства та природокористування

інформації відбувається блоками;

2. Собівартість виробництва невисока.

Недоліки:

1. Повільний запис в довільні ділянки пам'яті.

2.7.1.6. Будова і принцип дії ROM з можливістю перезапису

У всіх перепрограмованих ПЗП кількість перезаписів складає від 10 до 10000 разів завдяки використанню елементів пам'яті на МДН-транзисторах зі структурою МНОН (**М**етал Al – **Н**ітрид кремнію Si_3N_4 – **О**ксид кремнію SiO – **Н**апівпровідник Si) або зі структурою ЛІЗМОН (**М**етал – **О**ксид кремнію – **Н**апівпровідник з **Л**авинною **І**нжекцією **З**аряду). Як говорилось вище, ці ПЗП можна розділити на мікросхеми, що стираються електричним сигналом і ультрафіолетовим випромінюванням.

2.7.1.7. Будова і принцип дії МНОН і ЛІЗМОН

МНОН є, найчастіше, МОН-транзисторами (Метал – Оксид кремнію – Напівпровідник) з провідним каналом n- або p- типу, що має двошаровий діелектрик під затвором (див. рис. 2.31, а). Верхній шар сформований з нітриду кремнію, нижній (набагато тонший) – з оксиду кремнію. Якщо до затвора прикласти напругу близько 40 В, то електрони каналу отримають достатню енергію для проходження за

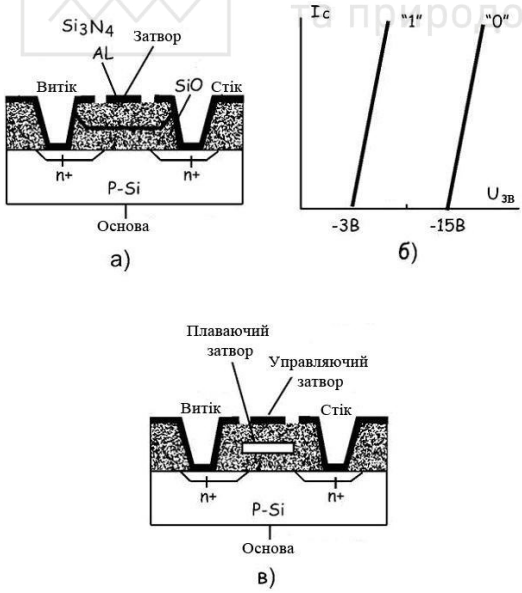


Рис. 2.31. Будова МНОН - і ЛІЗМОН - транзисторів

рахунок тунельного ефекту в область границі двох діелектриків. Оскільки верхній шар діелектрика достатньо товстий для проходження електронів, всі вони накопичуються між двома шарами діелектрика. Їх накопичення зміщує робочі характеристики транзистора (див. рис. 2.31, б) і, відповідно, змінює струм через нього. Стан транзистора з зарядом під затвором відповідає логічній одиниці, без – логічному нулю.

Процес програмування такої мікросхеми відбувається в два етапи:

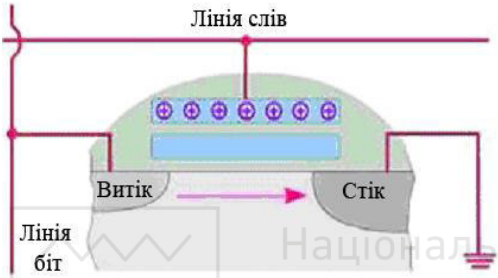


Рис. 2.32. Елемент пам'яті на транзисторі ЛІЗМОН з подвійним затвором

1. Стирається інформація шляхом подачі імпульсу напруги негативної полярності близько 40 В на затвор. Електрони витісняються із підзатворного діелектрика в основу напівпровідника (елемент пам'яті переходить в стан „0”);

2. Подається імпульс напруги позитивної полярності на затвор. Електрони переходять в міждіелектричний шар, що, відповідно, еквівалентне стану „1”.

Елемент пам'яті на транзисторі ЛІЗМОН з подвійним затвором показаний на рис. 2.31, в. Це польовий транзистор n- типу з плаваючим затвором. При читанні, за відсутності заряду на плаваючому затворі, під дією позитивного потенціалу, утворюється n- канал між витоком і стоком, і проходить струм (див. рис. 2.32).

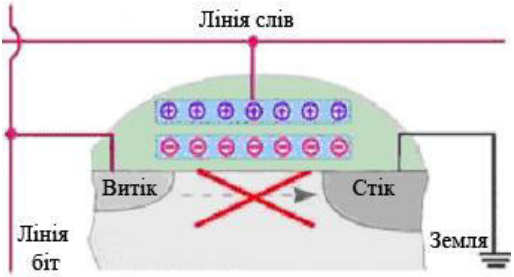


Рис. 2.33. Закритий ЛІЗМОН - транзистор

Наявність заряду на плаваючому затворі змінює вольт-амперні характеристики транзистора. Це відбувається тому, що електрони каналу провідності витісняються електричним полем,

Національний університет водного господарства та природокористування

яке створене зарядом плаваючого затвору, в основу напівпровідника і не попадають в стік (див. рис. 2.33).

В режимі програмування на управляючий затвор і витік подається напруга близько 25 В(див. рис. 2.34).

Електрони в провідному каналі отримують високе дрейфове прискорення і при напруженості електричного поля вищій 100 кВ/см їх кінетична енергія не встигає розсіятись на атомах кристалічної решітки. Це приводить до їх „розігріву”, що дає можливість більшій частині електронів здолати потенціальний бар’єр діелектрика і інжектуватись в плаваючий затвор (див. рис. 2.34). Цей процес називається інжекцією „гарячих” електронів.

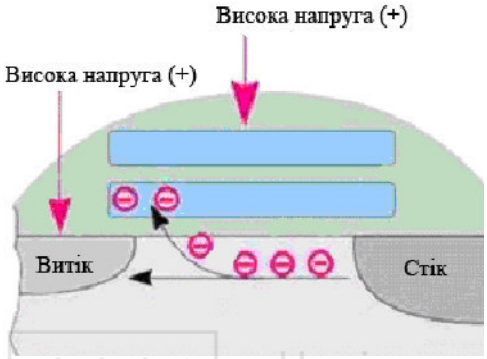


Рис. 2.34. Запис даних на ЛІЗМОН – транзистор

Національний університет водного господарства та природокористування

На рис. 2.35. показана функція розподілу концентрації електронів з різними середніми енергіями (ε_1 і ε_2) в місці інжекції з координатами (x_1, y_1) в залежності від напруженості електричного поля E. E_s – величина потенціального бар’єру переходу Si/SiO_2. Електрони заштрихованої області мають достатню енергію для інжекції в плаваючий затвор.

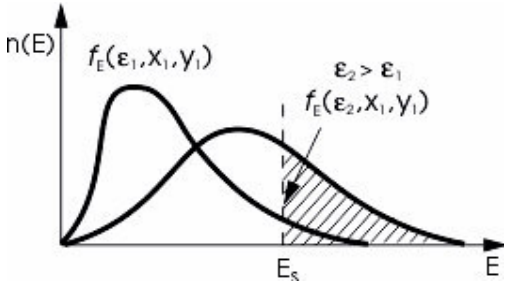


Рис. 2.35. Функція розподілу концентрації електронів в залежності від напруженості електричного поля E

Накопичення електронів в плаваючому затворі зміщує робочі характеристики транзистора і такий його стан відповідає елементу пам’яті з логічним „0”. Стирання інформації здійснюється витісненням заряду з

Національний університет водного господарства та природокористування

плаваючого затвора.

Ця процедура виконується двома способами. В EEPROM і Flash подається імпульс негативного потенціалу на управляючий затвор і позитивного на витік (див. рис. 2.36). Під дією такої різниці потенціалів відбувається тунельний перехід електронів з плаваючого затвора у витік (тунелювання Фаулера - Нордхейма) і плаваючий затвор звільняється від електронів.

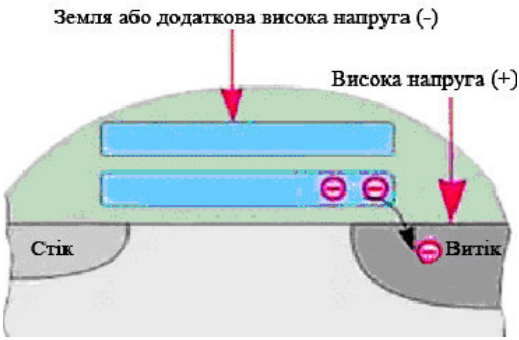


Рис. 2.36. Стирання даних з ЛІЗМОН - транзистора

Ефект тунелювання Фаулера - Нордхейма (автоелектронна емісія, польова емісія) полягає в інжекції електронів провідними або напівпровідними твердими і рідкими тілами під дією зовнішнього електричного поля в вакуум або діелектрик. Для звичайних провідників напруженість електричного поля, яка необхідна для цього, становить близько 10 В/см. Зовнішнє електричне поле звужує і понижує потенціальний бар'єр на границі металу або напівпровідника і вакууму або діелектрика. Відповідно, збільшується кількість електронів, які проникають через цей бар'єр (збільшується прозорість бар'єру).

Автоелектронна емісія найбільш повно вивчена для переходу електрона з металу у вакуум. В цьому випадку густина струму тунелювання J дорівнює:

$$J = C_1 E^2 \exp(-C_2 / E), \qquad (2.6)$$

де C_1 і C_2 – константи, E – напруженість електричного поля.

Для переходу із напівпровідника в діелектрик залежність подібна.

Залежність струму Фаулер - Нордхейм – тунелювання від напруженості електричного поля показано на рис. 2.37.

З рис. 2.37. видно, що залежність струму через діелектрик при операціях програмування транзисторів має експоненціальний характер. Це є причиною великих проблем при керуванні цими

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Рис. 2.37. Залежність струму Фаулер-Нордхейм – тунелювання від напруженості електричного поля

операціями, оскільки незначні коливання товщини діелектрика в матриці транзисторів призводять до значного розкиду величин струмів програмування і стирання (часу запису і стирання).

У EPROM за допомогою ультрафіолетового опромінення кристал напівпровідника розігрівається. Внаслідок підсилення теплового руху електрони „розсмоктуються” з плаваючого затвора, переходячи в основу кристала. Стан елемента пам’яті без заряду на плаваючому затворі відповідає логічній „1”.

Як видно з приведених рисунків, струми зарядки і розрядки плаваючого затвора сконцентровані в локальних, рознесених між собою областях діелектрика, що забезпечує збільшення циклів перезарядки плаваючого затвора.

Флуктуації товщини діелектрика у EPROM і Flash призводять до локальної неоднорідності напруженості електричного поля, яке викликає „перевантаження” ділянок діелектрика. Циклічне навантаження на діелектрик на цих ділянках викликає прискорення процесів його деградації – порушення структури і зміни опору. Причиною деградації може бути як поява і ріст дефектів кристалічної решітки діелектрика (дислокацій і розривів Si-O зв’язків), так і дифузія іонів, викликана локальним перегрівом в областях підвищеного струму. Ці процеси призводять до появи „пасток” для заряду в шарі діелектрика і в результаті з’являється так званий „викликаний перевантаженням паразитний струм витікання” (SILC). Він суттєво впливає на час зберігання заряду в ізольованих місцях транзисторів і на швидкість програмування та стирання. В граничному випадку деградації може наступити пробиття діелектрика – шар SiO_2 перестає виконувати свої ізолюючі функції, оскільки велика кількість дефектів у ньому не дає можливості зберігати заряд в ізольованих місцях.

Національний університет водного господарства та природокористування

2.7.1.8. Будова і принцип дії SST

Описаними вище комірками пам'яті на основі транзисторів із плаваючим затвором не обмежується різноманіттям можливих конструкцій. Широкого вжитку набула комірка SST. Будовою вона нагадує комірку на основі ЛІЗМОН, але в ній змінені форми плаваючого і управляючого затворів (див. рис. 2.38).

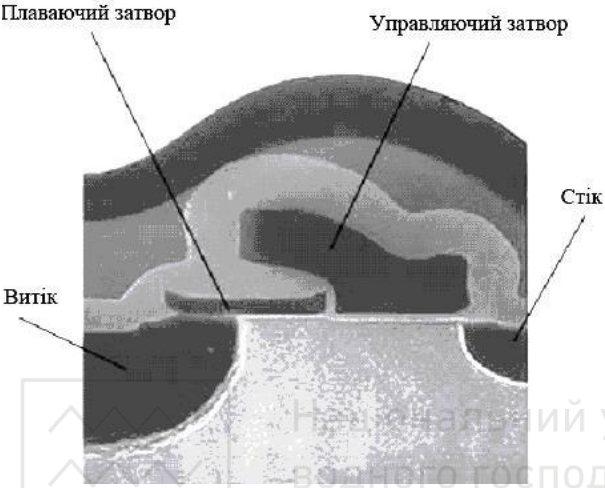


Рис. 2.38. Фото комірки SST на електронному мікроскопі

Управляючий затвор має вигнуту форму. Він одночасно знаходиться над витоком і краєм стоку. Плаваючий затвор при такій конструкції управляючого може знаходитись між ним і витоком. Це суттєво спрощує процеси інжекції „гарячих" електронів і тунелювання Фаулера - Нордхейма, яке відбувається не в область витоку, а в область управляючого затвору. Така будова транзистора значно підвищує його довговічність за рахунок довшого збереження структури діелектрика.

2.7.1.9. Будова і принцип дії MLC

Комірка MLC відноситься до так званих багаторівневих комірок. В ній одночасно може зберігатись декілька біт інформації. Принцип роботи такого транзистора полягає в наступному. Як видно з рис. 2.33 при наявності заряду на плаваючому затворі, провідний канал перекривається і струм через транзистор припиняється. Транзистор можна відкрити подаючи деякий більший потенціал

Національний університет водного господарства та природокористування

(пороговий потенціал) на управляючий затвор. Таким чином, по значенню порогового потенціалу на управляючому затворі можна судити про кількість заряду на плаваючому затворі. В MLC є можливість розрізняти за допомогою порогового потенціалу різну кількість заряду на плаваючому затворі: немає заряду – відповідає логічному „11”, одна третина заряду – відповідає логічному „10”, дві третини – логічному „01”, повністю заряджений плаваючий затвор – логічному „00”. Це означає, що в одній комірці пам’яті можна зберігати два біта інформації. В сучасних розробках є можливість розрізняти 16 рівнів порогового потенціалу, що відповідає 4 бітам.

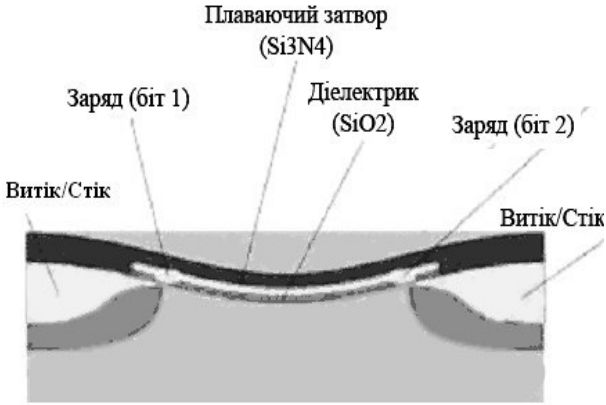


Рис. 2.39. Комірка NROM

2.7.1.10. Будова і принцип дії NROM (Nitrid ROM)

Комірка NROM за своєю структурою є також транзистором з плаваючим затвором. Управляючий затвор підключається до лінії слів, а витік і стік до двох незалежних ліній біт (про архітектуру пам’яті в наступних параграфах). Плаваючий затвор виконаний не з металу, а з нітриду кремнію Si_3N_4 (див. рис. 2.39)

Нітрид кремнію локалізує заряд в обмеженому просторі плаваючого затвору, не дозволяючи електронам „розтікатись” по всьому його об’єму. Фактично це дозволяє зберігати два інформаційних біта в одному транзисторі. Запис бітів проводиться за допомогою інжекції „гарячих” електронів за допомогою двох стоків/витоків. Електрони, інжектуючись в плаваючий затвор, локалізуються там в області близькій до відповідного стоку/витоку. Видалення заряду з плаваючого затвору відбувається шляхом

Національний університет водного господарства та природокористування

інжекції дірок, для чого на стік/витік подається позитивна напруга. Дірки тунелюють в плаваючий затвор, рекомбінуючи там з електронами.

2.7.2. Пам’ять типу RAM

Пам’ять типу RAM (енергозалежна пам’ять). RAM поділяється на DRAM і SRAM.

2.7.2.1. DRAM

DRAM (динамічна оперативна пам’ять) використовується в більшості систем оперативної пам’яті сучасних ПК. Основна перевага пам’яті такого типу полягає в великій щільності інформації, яка може в ній зберігатись.

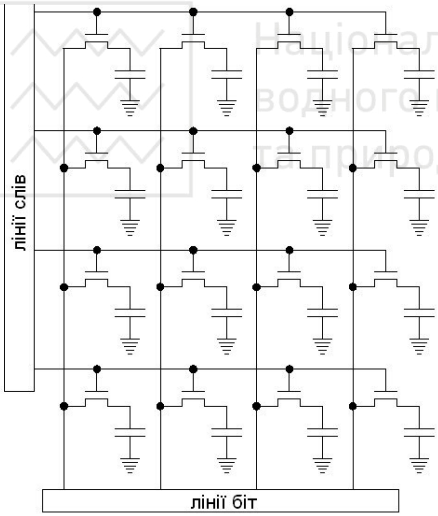


Рис. 2.40. Сторінка пам’яті DRAM

Комірки пам’яті в мікросхемах DRAM – це маленькі конденсатори, які утримують заряд. Саме так (наявністю або відсутністю заряду) і кодуються біти. Фізично для зберігання одного біта інформації в комірці DRAM використовується один транзистор і один (рідше – декілька) конденсатор. Сукупність таких комірок утворюють умовний „прямокутник”, який складається із певної кількості *рядків* і *стовпців* (див. рис. 2.40). Один такий „прямокутник” називається *сторінкою*, а сукупність сторінок – *банком*.

Проблеми, пов’язані з пам’яттю цього типу, викликані тим, що вона динамічна, тобто повинна постійно регенеруватися. Конденсатори комірок не можуть довго утримувати заряди, вони „стікають” на корпус і дані комірки втрачаються. Регенерація

Національний університет водного господарства та природокористування

відбувається, коли контролер пам'яті робить перерву (15 мс) і звертається до всіх рядків пам'яті. Вони прочитуються кожні 1,92 мс для забезпечення регенерації даних. Це відбувається, шляхом подачі потенціалів з ліній слів на затвори транзисторів, вони відкриваються і по лініях біт відбувається зарядка конденсаторів, там де це необхідно.

На жаль, регенерація DRAM забирає час у процесора: кожен цикл регенерації за тривалістю займає декілька циклів центрального процесора. В старих ПК цикли регенерації займали до 10% процесорного часу, у сучасних – менше 1%.

Зчитування інформації відбувається за допомогою спеціального чутливого підсилювача, який під'єднаний до кожного стовпця „прямокутника". Він реагує на струм, що йде через відкриті транзистори із обкладок конденсаторів і зчитує цілком всю сторінку. Саме сторінки і є мінімальною порцією обміну із динамічною пам'яттю.

Ще одним недоліком DRAM є низька швидкодія, зазвичай DRAM набагато „повільніша" процесора. Тому існує велика кількість різних типів організації DRAM, що дозволяють покращити цю характеристику: SDRAM, DDR SDRAM (англ.: Double Data Rate three Synchronous Dynamic Random Access Memory), DDR2 SDRAM, DDR3 SDRAM, RDRAM та інші.

На даний час велику популярність у користувачів здобула ОП на основі DDR2 (подвійна швидкість передачі даних) з робочою частотою 400, 533, 667, 800, 900 і 1000 МГц для різних модифікацій. Ця частота узгоджується з тактовою частотою процесора, який працює на частоті 400 МГц і вище. Мікросхема DDR2 передає дані процесору з подвійною швидкістю. Це досягається не за рахунок подвоєння тактової частоти, а за рахунок передачі даних двічі за один цикл: перший раз на початку циклу, а другий – в кінці. Крім того, в ній використовуються диференціальні пари сигнальних контактів, що забезпечує покращення передачі даних. Робоча напруга DDR2 менша ніж у інших DRAM (1,8 замість 2,5 В), завдяки чому модулі пам'яті DDR2 споживають менше енергії і виділяють менше тепла.

У DDR3 (третє покоління ОП) зменшена напруга живлення до 1,5 В за рахунок використання нового покоління транзисторів зі

Національний університет
водного господарства
та природокористування

зменшенням паразитного струму стікання з плаваючого затвору. Робоча частота в модифікаціях DDR3 доводиться до 2500 МГц.

Пам’ять типу DDR4 SDRAM імовірно з’явиться у найближчому майбутньому. Вона буде відрізнятись від попередніх поколінь більш високими частотними характеристиками і меншою напругою живлення. За оцінками вона має підтримувати робочу частоту від 2133 до 4266 МГц при напрузі живлення в 1,2 В.

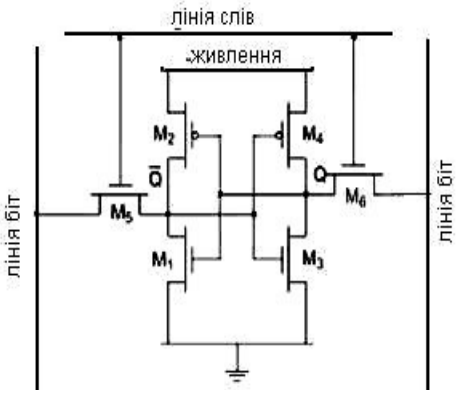


Рис. 2.41. Комірка SRAM

Схеми всіх приведених вище поколінь DDR і їх фізичні принципи роботи практично не відрізняються, а удосконалення визначаються лише покращеною організацією роботи з ними.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

2.7.2.2. SRAM

SRAM – це статична оперативна пам’ять. На відміну від DRAM, для зберігання в ній інформації не потрібна періодична регенерація. Крім того, SRAM має більш високу швидкодію ніж DRAM і може працювати на тій же частоті, що і сучасні процесори.

Суттєвим недоліком SRAM є набагато менша в порівнянні із DRAM щільність інформації, яка може в ній зберігатись. Для збереження біта інформації використовується комірка із шести транзисторів (див. рис. 2.41). Завдяки цьому габарити мікросхеми SRAM такої ж ємності як і DRAM приблизно в 30 разів більші. Приблизно у стільки ж разів вища і її вартість.

В SRAM комірки пам’яті побудовані на різних варіантах тригерів – транзисторних схемах з двома стійкими станами. Після запису біта в таку комірку тригер може знаходитись в одному з цих станів і зберігати записаний біт як завгодно довго за умови електричного живлення.

Національний університет водного господарства та природокористування

Транзистори M_1 і M_3 відповідають за збереження інформації, M_2 і M_4 – транзистори навантаження, M_5 і M_6 – вхідні транзистори. Нехай у початковий момент часу транзистори M_1 і M_2 закриті, а M_3 і M_4 – відкриті. Тоді на лівій лінії біт є потенціал („1”), а на правій нема („0”). При подачі напруги по лінії слів на затвори M_5 і M_6, вони відкриваються і відкривають транзистори M_1 і M_2. Це приводить до зменшення струму через M_3 і M_4 і ще більшого збільшення струму через M_1 і M_2. В результаті, M_1 і M_2 відкриються (перейдуть в стан „0”), а M_3 і M_4 закриються (перейдуть в стан „1”). Ці стани будуть зберігатись, до приходу нового імпульсу на затвори M_5 і M_6.

2.8. Твердотільні накопичувачі

Твердотільний накопичувач (англ.: SSD (Solid State Drive)) — це напівпровідниковий накопичувач, що складається з мікросхем пам’яті і контролера (подібно до флеш-пам’яті). Існують два види SSD - накопичувачів, які базуються на використанні енергозалежної (RAM SSD) і незалежної (NAND або Flash SSD) пам’яті. Перші характеризуються швидким читанням, записом і пошуком інформації в пристрої пам’яті і використовуються в основному для прискорення роботи великих систем управління базами даних і потужних графічних станцій. Основним їх недоліком є надзвичайно висока вартість. Інші ж мають набагато нижчу вартість і характеризуються відносно невеликими розмірами і низьким енергоспоживанням, саме вони є найбільш перспективними.

Використовується дві технології для виробництва твердотільної пам’яті:

1. NAND SSD (SLC).
2. MLC.

SLC (англ.: Single Level Cell) — технологія, при якій кожна комірка пам’яті використовується для зберігання одного біта даних. У свою чергу MLC (англ.: Multi Layer Cell) дозволяє зберігати у комірці 4 біта даних. Зрозуміло, що на основі MLC можна створювати більш місткі SSD - диски. Недоліком є те, що вони при цьому програють в швидкості читання/запису в порівнянні з технологією SLC (приблизно у півтора рази).

Національний університет водного господарства та природокористування

Велика різниця і в вартості пам’яті, оскільки MLC - мікросхеми у двічі дешевші за SLC - мікросхеми при однаковій ємності. Варто відзначити, що MLC SSD також поступаються SLC в тривалості роботи - кількість циклів перезапису комірок у них приблизно вдесятеро менша.

Найочевидніша перевага SSD перед звичними жорсткими дисками полягає в його монолітності. Якщо HDD мають рухомі частини (в більшості вінчестерів диски обертаються зі швидкістю 7200 об/с), то в SSD рухомих частин немає. Це гарантує вищу надійність роботи пам’яті — адже чим менше рухомих деталей, тим надійніший пристрій. Це також гарантує повну безшумність флеш-дисків.

Окрім очевидних, SSD має також ряд інших переваг. Зокрема, варто відзначити, що твердотільні накопичувачі мають в 2-3 рази меншу вагу ніж вінчестери. Але більше значення має мале енергоспоживання SSD - дисків в порівнянні з HDD - дисками.

Окрім переваг, на зразок низької шумності і надійності, в SSD - накопичувачів є свої переваги при читанні/запису даних. Твердотільні накопичувачі працюють на однакових фізичних елементах - елементах пам’яті. При читанні файлу, що займає декілька блоків, весь процес фактично займає час, потрібний для доступу до одного блоку, оскільки SSD може працювати паралельно з декількома елементами пам’яті. Магнітна головка HDD працює послідовно з кожною коміркою пам’яті, тому вона буде послідовно проходити блоки і зчитувати з них інформацію. Швидкість зчитування при цьому досить суттєво падає, оскільки потрібна інформація знаходиться в різних секторах диску. І тому HDD витрачає в середньому 12-13 мс на позиціювання головки і дообертання диску до потрібного місця. В SSD на цей процес витрачається близько 0,01 мс.

Серед недоліків SSD слід зазначити малий життєвий цикл. Так, життя комірки пам’яті SSD в середньому складає близько 10 тис. перезаписів. Крім того, у SSD неможливо записати нову інформацію поверх старої без попередніх дій. Щоб записати дані у комірки пам’яті SSD, необхідно спочатку стерти те, що в них знаходиться. У сучасних носіїв при заповненні 50-60% ємності носія особливих проблем з цим не виникає, а надалі доводиться вдаватися до вимушеної процедури стирання блоків, що призводить

Національний університет водного господарства та природокористування

до зношення елементів пам’яті. У сучасних SSD - накопичувачах за ці процеси відповідає контролер, який контролює рівномірність розподілу даних по об’єму носія. Це призводить до вирівнювання зношеності всіх комірок пам’яті SSD.

Інший суттєвий недолік, який і є визначальним для користувача, — висока ціна SSD - накопичувачів. Потрібно також враховувати, що ціна на SSD - диски зростає прямо пропорційно їх об’єму. В той же час при збільшенні об’єму HDD - дисків співвідношення вартості за гігабайт об’єму істотно знижується.

Очевидно, що на даний момент SSD – накопичувачі не зможуть вважатися повноцінною заміною „класичним” HDD. В той же час, вже зараз вони використовуються в нових ноутбуках, а також деяких інших портативних пристроях. Також дуже цікавими виглядають гібридні системи зберігання даних, коли швидкий SSD комбінується з жорстким диском. У таких накопичувачах масив незалежної флеш-пам’яті використовується як проміжна ланка між ОЗП і магнітним вінчестером, що входить в „гібрид”. Гібридні накопичувачі демонструють підвищену швидкодію при певних типах операцій читання/запису, дозволяють прискорити процес первинного завантаження і зменшити енергоспоживання.

Національний університет водного господарства та природокористування

2.9. Флеш-пам’ять

Найновішим типом змінного накопичувача є флеш-пам’ять (англ.: **Flash-memory**). Флеш-пам’ять можна означити як особливий вид енергонезалежної, напівпровідникової пам’яті з можливістю перезапису. Вона:

1. **Енергонезалежна**, оскільки не вимагає додаткової енергії для зберігання даних. Енергія потрібна тільки для запису.
2. **Має можливість перезапису** даних як окремих блоків пам’яті, так і пам’яті цілком.
3. **Напівпровідникова** (твердотільна), оскільки побудована на основі інтегральних мікросхем і не має рухомих механічних частин (як жорсткі диски або CD).

Історично флеш-пам’ять походить від ROM - пам’яті і функціонує подібно RAM - пам’яті. Принципова відмінність флеш-пам’яті від RAM полягає в її енергонезалежності. Ця пам’ять може на протязі необмеженого часу (десятки років) зберігати інформацію

Національний університет водного господарства та природокористування

при відсутності зовнішнього живлення. Взагалі кажучи, існує декілька типів енергонезалежної пам'яті (наприклад, ROM, про яку розповідалось в параграфі 2.7), флеш-пам'ять лише одна із їх різновидів.

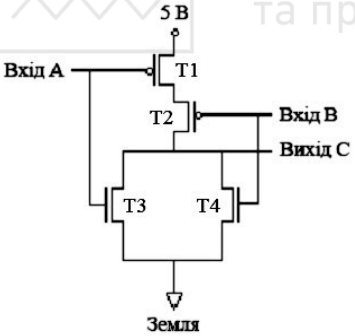
Основною структурною одиницею, яка використовується для зберігання біта інформації, у флеш-пам'яті є МДН транзистор з плаваючим затвором. Заміни пам'яті DRAM і SRAM флеш-пам'яттю не відбувається через наступні причини:

1. Суттєво повільніша робота.
2. Обмеження по кількості циклів перезапису (10^4 – 10^6).

2.9.1.Архітектура флеш-пам'яті

Комірка флеш-пам'яті на основі транзистора з плаваючим затвором може використовуватись для створення масивів енергонезалежної пам'яті. Для цього потрібно певним чином об'єднати в один масив множину таких комірок, тобто створити архітектуру пам'яті. Існують два основних види архітектур флеш-пам'яті: **NOR** і **NAND**

Національний університет водного господарства та природокористування



A	B	C(or)	C(nor)
0	0	0	1
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	1	0

Рис. 2.42. Схема NOR – елемента

Архітектура NOR

Дана архітектура була розроблена для флеш-пам'яті фірмою Intel в 1988 році. Схема логічного елемента, який отримав назву (NOR (Not OR) – в булевій математиці означає логічну функцію Пірса „або – не"), показана на рис. 2.42. За допомогою такої схеми здійснюється перетворення вхідної напруги у вихідну, яка відповідає логічним „0" і „1". Пояснимо принцип дії такої схеми. Для цього умовно припустимо, що опір відкритого транзистора дорівнює нулю, а опір

Національний університет
водного господарства
та природокористування

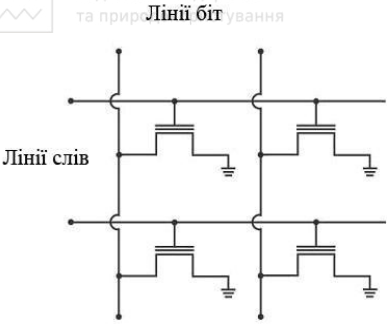


Рис. 2.43. Комірка NOR – пам’яті

закритого - якомусь дуже великому значенню (що є недалеким від істини). Нехай в початковому стані на вході всіх транзисторів схеми немає сигналу („0”), вони закриті, відповідно на виході С є потенціал, оскільки вся схема є подільником напруги. Потенціал на виході відповідає логічній „1”. Якщо на вході А є сигнал, а на вході В – нема, то транзистори Т3 відкривається, його опір стає рівним нулю, і, значить, потенціал на виході теж стає рівним нулю (логічний „0”). Те ж саме спостерігається при відсутності сигналу на вході А, і присутності – на В. Тепер транзистор Т4 відкривається і закорочує вихід С на корпус. При подачі напруги на обидва входи А і В схеми всі транзистори відкриються і знову потенціал на виході С дорівнює нулю.

Логічна схема NOR у пристроях флеш-пам’яті реалізується на польових транзисторах з плаваючим затвором. Матриця 2х2 такої пам’яті показана на рис. 2.43. Тут вхідні сигнали ідуть по керуючих лініях (лініях слів) на управляючі затвори транзисторів, а вихідні сигнали, за якими визначається вміст комірок, знімаються по лініях аналізу (лініях біт). Як видно з рис. 2.43 при подачі сигналу на будь-який транзистор стовпця на виході буде завжди „0”, оскільки лінія біт закорочується через відкритий транзистор. Лише при відсутності вхідного сигналу на управляючих затворах транзисторів стовпця („0”), на виході буде „1” (транзистори закриті). Наявність заряду на плаваючих затворах відповідно корегує відкривання і закривання транзисторів згідно рис. 2.32 і рис. 2.33 (параграф 2.7. „Оперативна пам’ять”).

Як недолік комірки NOR-пам’яті слід відзначити незадовільне масштабування . Як видно з рис. 2.43 комірка пам’яті покрита сіткою провідників ліній слів і біт. Оскільки запис інформації в комірку відбувається методом інжекції „гарячих” електронів, що вимагає високої напруги, всі лінії слів, біт і витоків потрібно розміщувати на достатньо великій відстані одна від одної для

Національний університет водного господарства та природокористування

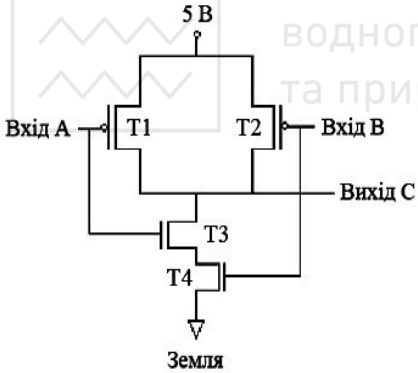
забезпечення необхідної ізоляції. Це унеможливлює зменшення площі мікросхем шляхом мінімізації розмірів транзисторів.

Іншим недоліком такої комірки є ефект видалення надлишкового заряду з плаваючого затвору, який не може компенсуватись процесом запису. На плаваючому затворі утворюється позитивний заряд і транзистор завжди залишається у відкритому стані.

Архітектура NOR найчастіше застосовується в мобільних телефонах, фото -, відеокамерах та для збереження програмного коду (BIOS, RAM кишенькових комп'ютерів тощо).

Архітектура NAND

Дану архітектуру флеш-пам'яті розробила фірма Toshiba в 1989 році. Схема логічного елемента, який отримав назву (NAND (Not AND) – в булевій математиці означає логічну функцію Шеффера „і – не"), показана на рис. 2.44. Фактично це та ж схема, що і на рис. 2.42, тільки підключення джерела живлення і землі змінено місцями. При відсутності сигналів на входах A і B („0") всі транзистори знаходяться в закритому стані, мають великий опір і на виході C є потенціал („1"). При відсутності сигналу на вході A („0") і подачі його на вхід B („1"), транзистори T1 і T3 будуть мати великий опір, а T2 і T4 практично нульовий. Наявність великого опору у T4 означає, що на виході C буде потенціал („1"). Така ж картина буде при подачі сигналу на вхід A і відсутності його на вході B. В цьому випадку наявність потенціалу на виході забезпечить великий опір T3. І лише одночасна подача „1" на обидва входи приведе до закорочування



A	B	C(and)	C(nand)
0	0	0	1
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0

Рис. 2.44. Схема NAND – елемента

Національний університет
водного господарства
та природокористування

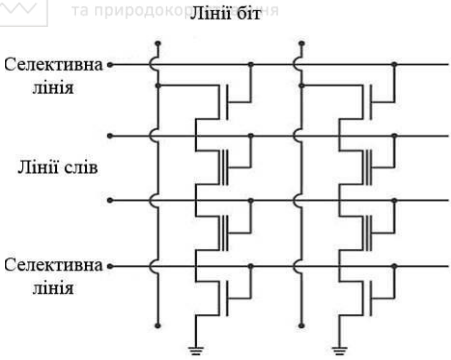


Рис. 2.45. Комірка NAND – пам’яті

виходу С на корпус, а, значить до „0” на виході.

Архітектура NAND у флеш-пам’яті застосовується найчастіше у матриці, елемент якої показано на рис. 2.45. Тут, як і в архітектурі NOR, вхідні сигнали ідуть по лініях слів на управляючі затвори, а вихідні сигнали знімаються по лініях біт. При проходженні одночасно сигналів на два сусідні транзистори з плаваючими затворами („1”) і на два транзистори з селективних ліній вони відкриваються, їх опори стають близькими до нуля і на лінії біт потенціал стає рівний нулю („0”). Будь які інші варіанти з відкриттям лише одного транзистора будуть давати на виході „1”. Селективні лінії необхідні для керування записом і зчитуванням необхідних комірок.

З рис. 2.45 видно, що в схемі реалізована двотранзисторна комірка пам’яті, яка складається із звичайного МДН транзистора і транзистора з плаваючим затвором (див. рис. 2.46). Така схема дозволяє ефективно масштабувати комірку пам’яті (зменшувати розміри), оскільки транзистор з плаваючим затвором ізолюється від бітової лінії. Крім того, в даній флеш-архітектурі в якості і методу запису і методу зчитування використовується метод тунелювання Фаулера - Нордхейма, що дозволяє суттєво зменшити напругу, необхідну для операції запису.

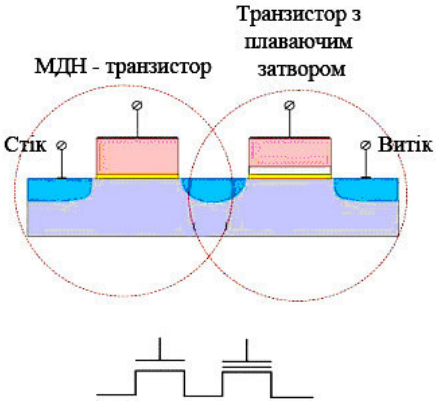


Рис. 2.46. Двотранзисторна комірка пам’яті

Якщо порівнювати архітектури NOR і NAND, то можна відзначити більшу швидкість читання у першої і

Національний університет водного господарства та природокористування

запису (причому, набагато) у другої архітектури.

Архітектура NAND найчастіше застосовується в картах пам'яті.

Існують альтернативні архітектури NOR і NAND. Серед них можна виділити DiNOR, розробки Міцубісі, і superAND – Хітачі. Схематично вони комбінують кращі якості NOR і NAND.

2.10. Карти пам'яті

В даний час на ринку присутні карти флеш-пам'яті різних форматів, найновіші з яких – це Secure Digital (SD), Memory Stick (MS), MultiMediaCard (MMC), CompactFlash (CF), xD-Picture Card (XD) та інші. Вони є високоякісними універсальними перезаписуючими носіями інформації, орієнтованими на побутову електроніку і комп'ютерне обладнання нового покоління. Перша серійна карта пам'яті (CF) була випущена в 1994 році. На схемному рівні карти пам'яті побудовані на транзисторах з плаваючим затвором в архітектурах NOR і NAND.

Національний університет водного господарства та природокористування

2.11. Перспективні технології флеш-пам'яті

MRAM

MRAM (англ.: Magnetoresistive Random Access Memory – магніторезистивна пам'ять з довільним доступом) базується на використанні магніторезистивного ефекту.

Електронна схема MRAM відрізняється від DRAM (див. рис. 2.40) присутністю замість конденсатора елемента, що складається з двох розділених діамагнетиком (оксид алюмінію) магнітних шарів.

Один із феромагнітних шарів (нижній) є постійним магнітом з визначеним напрямком магнітного моменту. Намагнічення іншого шару може змінюватись на 180^0 шляхом прикладання зовнішнього магнітного поля. Це можливо завдяки використанню матеріалу над-решіток і переходу з магнітним тунелюванням MTJ (Magnetic Tunnel Junction). Якщо магнітні моменти обох шарів паралельні, електричний опір всього елементу малий, це відповідає стану логічної „1". Якщо „антипаралельні" – опір великий, це відповідає стану „0" (див. рис. 2.47). Напрямок магнітних моментів шарів можна змінювати пропускаючи струм великого значення по шинах

Національний університет
водного господарства
та природокористування

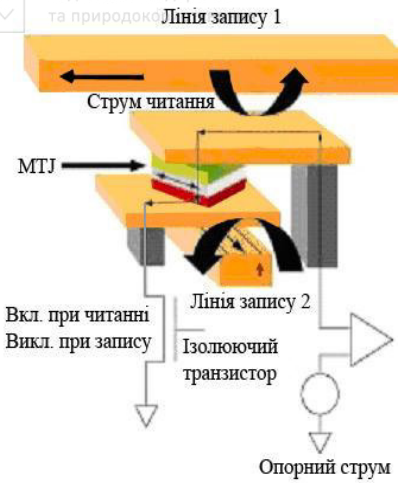


Рис. 2.47. Електронна схема MRAM

з якими контактують магнітні шари. Як відомо, навколо таких провідників із струмом виникає магнітне поле, яке і перемагнічує відповідний феромагнітний шар.

Переваги:

1. Енергонезалежність.
2. Простота контролю намагнічення.
3. Висока швидкість доступу (декілька нс).

Недоліки:

1. Необхідність великого струму перемагнічування.
2. Вплив перезапису біта на сусідні комірки.

Саме ці недоліки поки що гальмують широке впровадження MRAM.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

FeRAM

Комірка пам'яті FeRAM (англ.: Ferroelectric Random Access Memory – сегнетоелектрична пам'ять з довільним доступом) може випускатись в чотирьох модифікаціях:

1. Комірка має структуру DRAM, лише замість конденсатора з діелектриком між пластинами використовується сегнетоконденсатор (конденсатор з сегнетоелектриком між пластинами, позначається 1T-1C FeRAM).

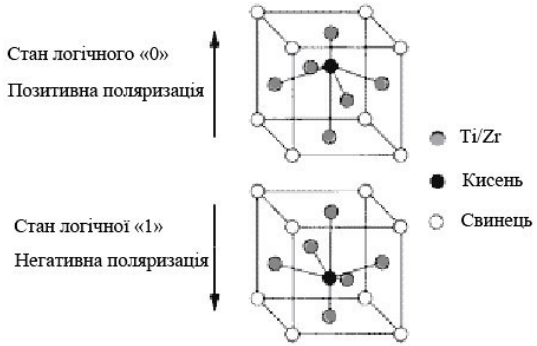


Рис. 2.48. Молекула PZT

2. Комірка є МДН транзистором, з тією різницею, що замість діелектрика між управляючим затвором і

Національний університет водного господарства та природокористування

напівпровідником знаходиться сегнетоелектрик і лінії біт підводяться до витоку і стоку (1T FeRAM).

3. Комірка є сегнетоконденсатором (1C FeRAM).
4. Комірка складається з двох транзисторів і двох сегнетоконденсаторів (2T-2C FeRAM).

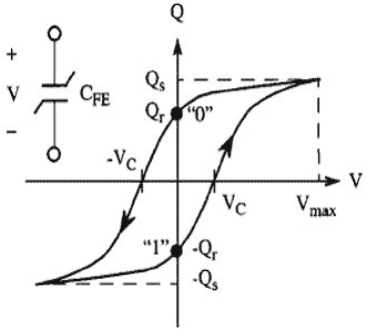


Рис. 2.49. Петля гістерезису для сегнетоелектриків

В якості матеріалу сегнетоелектрика беруться змішані поліметалічні оксиди, що спікаються в сегнетоактивні кераміки. Найбільш поширеними є PZT (Perovskite lead Zirconate Titanate) з загальною формулою $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$ (рис. 2.48), або SBT – $SrBi_2Ta_2O_9$. До цієї основи додається деяка кількість легуючих добавок з платини, золота, срібла або гафнію.

При подачі напруги на пластини такого конденсатора дипольні моменти атомів сегнетоелектрика орієнтуються в одному із двох стійких напрямів. Для сегнетоелектриків, як і для феромагнетиків, характерна гістерезисна залежність поляризації Q сегнетоелектрика від прикладеної напруги V (див. рис. 2.49).

Сегнетоелектрик поляризується і в залежності від напрямку цієї поляризації стан комірки пам'яті можна інтерпретувати як логічні „0" або „1".

Час процесу переполяризації дуже малий (менше 1 нс) і сам процес вимагає незначного енергоспоживання. Кількість циклів перезапису досягає декількох мільярдів.

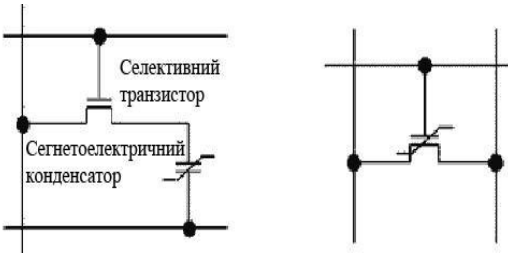


Рис. 2.50. Комірки пам'яті 1T-1C FeRAM і 1T FeRAM

Комірки типу 1T-1C FeRAM і 1T FeRAM показані на рис. 2.50.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

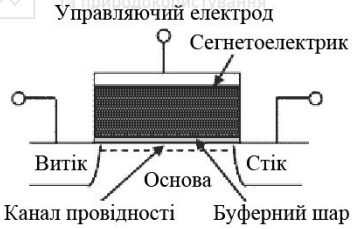


Рис. 2.51. Внутрішня будова транзистора з сегнетоелектриком

Внутрішня будова транзистора із сегнетоелектриком показана на рис. 2.51. В якості сегнетоелектрика у ньому використовується $SrBi_2Ta_2O_9$. Розглянемо принцип дії 1T FeRAM. При подачі на управляючий електрод позитивного потенціалу, а на електроди стоку/витоку негативного – сегнетоелектрик поляризується. В такому стані транзистор закритий, струм через нього не йде, це інтерпретується як логічна „1”. Якщо змінити полярність напруги на електродах, то можна змінити напрямок поляризації сегнетоелектрика і закодувати логічний „0”.

Принцип читання відрізняється від реалізації в DRAM. Між стоком і витоком подається позитивна напруга (+6 В). Якщо в транзисторі був закодований „0”, він не відкривається і струму на виході немає. Якщо була закодована „1”, то сегнетоелектрик переполяризовується і виштовхує в канал провідності з буферного шару електрони. На короткий час виникає імпульс струму, який і інтерпретується як „1”. Слід відмітити, що процес читання перезаписує вміст комірки пам’яті і тому необхідно після нього відновлювати дані.

Основною особливістю 1T FeRAM є надійність зберігання заряду. В кращих зразках вона становить 50-60 діб.

Пам’ять 1C FeRAM нагадує пам’ять на магнітних осердях (див. рис. 2.52).

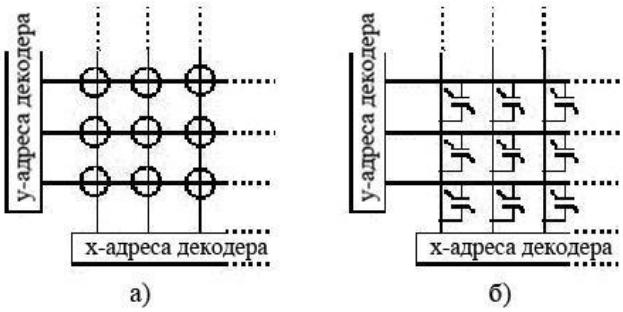


Рис. 2.52. Пам’ять 1C FeRAM

Як видно з малюнка, для запису „0” або „1” необхідно прикласти напругу відповідної полярності до кожної комірки між ними лініями X і Y.

1C FeRAM (зараз називають SFRAM) в майбутньому замінить SRAM. Вважається, що це відбудеться в найближчі декілька років.

Принцип запису біта в комірку 1T-1C FeRAM наступний. На лінію слів подається потенціал, який відкриває транзистор. Підключаючи напругу різної полярності до сегнетоконденсатора по лініях біт, можна по різному поляризувати сегнетоелектрик, що відповідає логічним „0” і „1”.

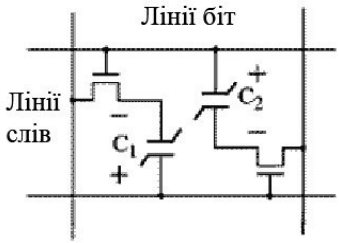


Рис. 2.53. Схема пам’яті 2T-2C FeRAM

Схема 2T-2C FeRAM показана на рис. 2.53 є експериментальною. Фактично це є два 1T-1C FeRAM, об’єднаних в одну групу для підвищення інтеграції компонентів в чіпі.

PCRAM

PCRAM (англ.: phase-change random access memory – оперативна пам’ять зі зміною фазових станів) базується на властивості халькогенідів (сплав GeSbTe із стехіометричним складом 2:2:5) змінювати під дією нагрівання або електричного струму свій фазовий стан від кристалічного до аморфного.

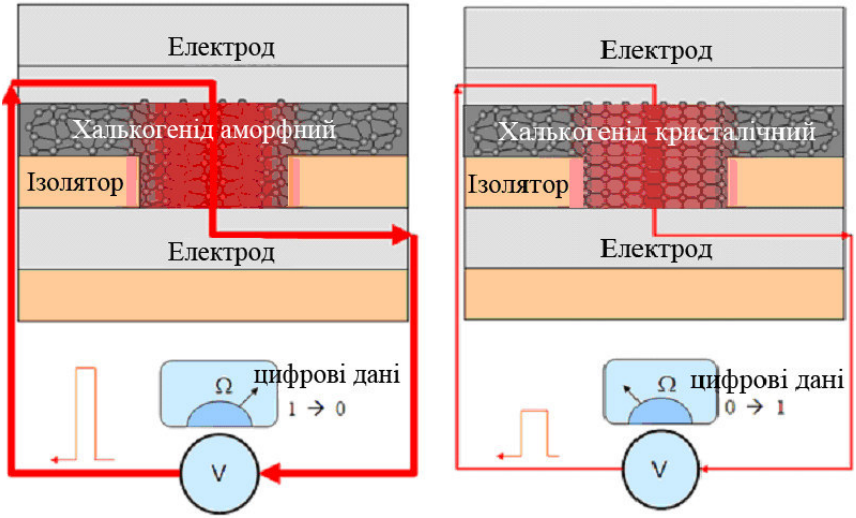


Рис. 2.54. PCRAM – пам’ять

Національний університет водного господарства та природокористування

В кристалічному стані цей матеріал є електропровідним і прозорим для широкого діапазону світлових хвиль, в аморфному стані – непровідним і непрозорим. До цього часу використовувались лише оптичні властивості халькогенідів в технологіях запису і стирання інформації на CD-RW і DVD-RW диски.

В пам’яті PCRAM використовуються його електропровідні властивості. Двом фазовим станам речовини можна поставити і відповідність логічні „0” і „1”. Дана речовина знаходиться між двома твердими металічними електродами. При подачі короткочасного імпульсу струму великої потужності для випадку ОП (див. рис. 2.54) халькогенід плавиться. Швидке охолодження внаслідок вентиляції не призводить до відновлення його кристалічної структури. В результаті халькогенід закріплює аморфну структуру і, відповідно, великий опір (логічний „0”).

Для запису „1” використовується довгий по часу імпульс струму невеликої потужності. Під дією цього струму матеріал розігрівається, молекули халькогеніду перебудовуються в кристалічну структуру (процес „відпалення”) і відновлюють свої електропровідні і оптичні властивості.

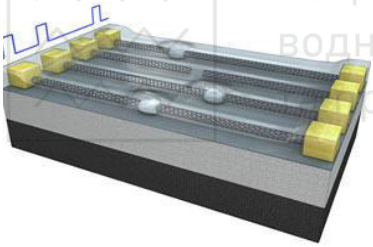


Рис. 2.55. Модель пам’яті на нанотрубках з халькогенідними вставками

В практичному застосуванні пам’ять PCRAM подібна до PROM, в яку поміщені халькогенідні вставки (див. рис. 2.55).

Переваги:

1. Висока щільність зберігання інформації (декілька атомів необхідно для створення комірки зберігання інформації. Реально можна розміри комірки довести до 5 нм);
2. Малий час перепрограмування (1 нс).

Недоліки:

1. Необхідність нагріву халькогеніду до декількох сотень градусів за Цельсієм (значне енергоспоживання);
2. Відносно невисока швидкодія.

Національний університет водного господарства та природокористування

ReRAM

Інколи пам’ять ReRAM (англ.: resistive random access memory – резистивна пам’ять з довільним доступом) називають пам’яттю організованою на мемрісторі (англ.: memristor, від memory – "пам’ять", і resistor – "електричний опір") Схематичне позначення приведене на рис. 2.56.

Рис. 2.56. Мемрістор

За принципом дії ReRAM подібна до PCRAM, однак замість зміни фазового стану під дією нагрівання тут використовується електрохімічна реакція. Матеріалом для резистивної пам’яті є непровідний для електричного струму оксид-діелектрик, наприклад, $SrTiO_3$ (позначається - STO), $SrZrO_3$ (SZO) або сполука Ta_2O_{5-x}–TaO_{2-x}. Він знаходиться у вигляді тонкої (5 нм) двошарової плівки між двома платиновими електродами, до яких може прикладатись напруга різної полярності (див. рис. 2.57). Один із шарів збіднений киснем. Завдяки прикладеній високій напрузі певної полярності, у кристалі кисневі вакансії можуть мігрувати між шарами. Ці вакансії (дірки) формують вузькі електропровідні канали, які приводять до зменшення опору кристалу між електродами. Зворотна напруга повертає в шар кисень, знову перетворюючи матеріал в діелектрик з великим опором. Такі переходи створюють стійкі стани пам’яті, які змінюються тільки під дією високих значень напруги певної полярності. Перемикання станів відбувається за декілька наносекунд, а потрібна для цього енергія вимірюється пікоджоулями, що становить соту частину від необхідної для флеш-пам’яті. Розміри комірки біта пам’яті становлять близько 1нм. Проблемою застосування ReRAM сьогодні є нестабільність її роботи. Поки що не вдається зафіксувати біт

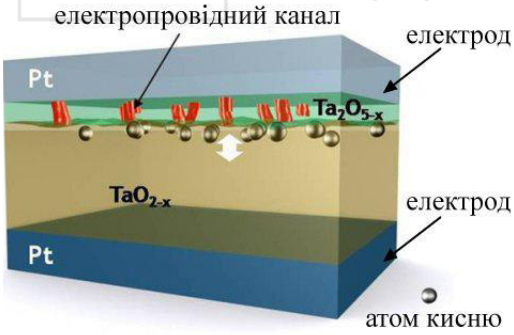


Рис. 2.57. Будова мемрістора на основі Ta_2O_{5-x}–TaO_{2-x}

Національний університет
водного господарства
та природокористування

інформації в пам'яті. Якщо біт з високим опором знаходиться зразу за бітом з низьким опором, то електричний струм може вплинути на нього і змінити його стан. За оцінками експертів ReRAM ввійде в широкий вжиток близько 2020 року.

Бібліографічний список до розділу 2

1. Загальна фізика. Частина II. (за ред. Олексин Д. І., Орленко В. Ф.): Інтерактивний комплекс навчально-методичного забезпечення [Текст] / – Рівне: НУВГП, 2009. – 457 с.
2. Савельев И. В. Курс общей физики : В 3 т. [Текст] / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1982. – Т. 2.
3. Викулин И. М. Физика полупроводниковых приборов [Текст]/ И. М. Викулин, В. И. Стафеев. – М. : Советское радио, 1980.
4. Степаненко И. П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем [Текст] / И. П. Степаненко. – М. : Энергия, 1977.
5. Капцов Л. Н. Физика элементов ЭВМ [Текст] / Л. Н. Капцов. – М. : Из-во МГУ, 1983. – 240 с.
6. Мюллер С. Модернизация и ремонт ПК, 17-е издание [Текст] / С. Мюллер. – М. : ООО «И. Д. Вильямс», 2008. – 1360 с.
7. Угрюмов Е. П. Цифровая схемотехника [Текст] / Е. П. Угрюмов. – Петербург, 2004. – 528 с. : ил.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

РОЗДІЛ 3
ОПТИЧНІ СИСТЕМИ ЗАПИСУ, ЗБЕРІГАННЯ ТА ЧИТАННЯ ІНФОРМАЦІЇ

В даному розділі представлено короткий огляд вибраних питань курсу оптики без яких неможливе розуміння оптичних методів що застосовуються в комп'ютерній техніці. Увага зосереджена на таких явищах як інтерференція, дифракція, поляризація світла, голографія та фотоефект та основи фізики лазерів.

Показано можливі перспективи подальшого використання оптичних методів для покращення характеристик ПК, таких як швидкодія, об'єм пам'яті, габарити тощо [1,2].

3.1. Елементи оптики

3.1.1. Хвильові процеси

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Хвиля це процес поширення коливань у середовищі. Електромагнітні хвилі можуть поширюватись як у середовищі, так і у вакуумі. Частинки середовища, в якій поширюється хвиля, не переносяться хвилею, вони лише здійснюють коливання відносно положень рівноваги. Хвилі, в яких частинки коливаються перпендикулярно до напрямку поширення хвилі, називаються *поперечними*. Хвилі, в яких частинки коливаються вздовж напрямку поширення хвилі, називаються *поздовжніми*. Геометричне місце точок, до яких доходять коливання в момент часу t, називається фронтом хвилі. Геометричне місце точок, які коливаються в однаковій фазі, називається хвильовою поверхнею. Фронт хвилі переміщується, а хвильові поверхні залишаються нерухомими (хвильових поверхонь існує безліч).

Рівняння плоскої хвилі, що поширюється вздовж осі x (див. рис. 3.1) з фазовою швидкістю v, описується рівнянням:

$$\xi(x,t) = A\cos\left(\omega t - \frac{2\pi x}{T\mathrm{v}}\right) = A\cos\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda}\right) = A\cos(\omega t - kx), \quad (3.1)$$

де $k = \dfrac{2\pi}{\lambda}$ – хвильове число, $\lambda = \mathrm{v}T$ – довжина хвилі,

Національний університет
водного господарства
та природокористування

$\omega = \dfrac{2\pi}{T}$ – циклічна частота, T – період коливань.

Довжина хвилі λ – це відстань, яку проходить хвиля за час, рівний періоду коливань, або відстань між найближчими точками, що коливаються синхронно. Фаза коливання – це аргумент при функції косинуса в рівнянні (3.1).

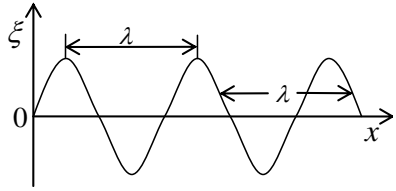


Рис. 3.1. Графік коливання точок хвилі

Серед великої кількості хвиль слід виділити електромагнітні хвилі. Електромагнітні хвилі – це процес поширення електромагнітних коливань у просторі. Джерелом електромагнітних хвиль може бути відкритий коливальний контур. Рівняння плоскої електромагнітної хвилі мають вигляд:

$$\left.\begin{aligned} E &= E_{\max}\cos(\omega t - kx), \\ H &= H_{\max}\cos(\omega t - kx). \end{aligned}\right\}, \qquad (3.2)$$

де E і H – напруженості електричного і магнітного полів, $E_{\max}$ і $H_{\max}$ – їх амплітудні значення. Електромагнітна хвиля – поперечна, при цьому напрямки коливань $\vec{E}$ та $\vec{H}$ – взаємноперпендикулярні (див. рис. 3.2).

Електромагнітні хвилі мають широкий діапазон довжин хвиль або частот, які залежать від способу їх генерації; зокрема, радіохвилі мають довжини $\lambda = 10^4 \div 10^{-4}\,м$, а для інфрачервоних, світлових, ультрафіолетових довжина хвилі становить $\lambda = 10^{-4} \div 10^{-6}\,м$. Радіохвилі генеруються вібраторами; світлові хвилі – молекулами і атомами.

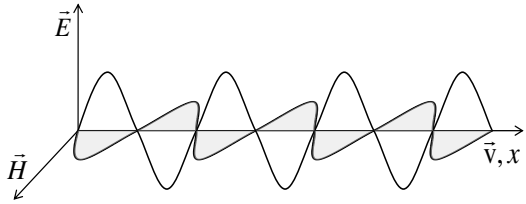


Рис. 3.2. Коливання $\vec{E}$ та $\vec{H}$ електромагнітної хвилі

В більшості оптичних явищ дія світла на речовину визначається електричним вектором $\vec{E}$ електромагнітного поля. Світлове випромінювання ($\nu \sim 10^{15}\,Гц$) не призводить до намагнічування

Національний університет
водного господарства
та природокористування

середовища. Тому, саме вектор $\vec{E}$ називають світловим вектором. Світлова хвиля називається монохроматичною, якщо амплітуда $E_{\max} = const$, частота $\omega = const$, а початок і кінець хвилі жодним чином не обмежені, тобто $-\infty < r < +\infty$. Однак, оскільки тривалість процесу випромінювання електромагнітних хвиль окремими атомами є скінченною $\left(\tau \approx 10^{-8} c\right)$, то світло є сукупністю просторово обмежених хвиль (цугів).

Нехай плоска світлова хвиля, поширюється вздовж напрямку $\vec{r}$. Тоді її можна описати системою рівнянь для електричної та магнітної складових хвилі:

$$\left.\begin{aligned} \vec{E} &= \vec{E}_0 \cos\left(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \alpha_0\right) \\ \vec{H} &= \vec{H}_0 \cos\left(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \alpha_0\right) \end{aligned}\right\}, \tag{3.3}$$

де $\vec{E}_0, \vec{H}_0$ – відповідні амплітуди, α_0 – початкова фаза.

Якщо дві такі монохроматичні хвилі однакової частоти накладаються в певній точці простору, то їх різниця фаз

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \left(\vec{k}_1\vec{r}_1 - \vec{k}_2\vec{r}_2\right) + \left(\alpha_{02} - \alpha_{01}\right)$$

за рахунок випадковості і непередбачуваності початкових фаз α_0 не буде залишатись постійною в часі. Якщо ж обидві хвилі мають спільне походження $\left(\alpha_{01} = \alpha_{02}\right)$, то $\Delta\varphi = const$. Хвилі однакової частоти, що мають постійну в часі різницю фаз, називають *когерентними*. Якщо врахувати, що хвильове число

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{\nu T} = \frac{2\pi n}{cT} = \frac{2\pi n}{\lambda_0}, \tag{3.4}$$

де n – показник заломлення середовища, в якому поширюється хвиля, а λ_0 – довжина світлової хвилі у вакуумі, то

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0}\left(n_1 r_1 - n_2 r_2\right) = \frac{2\pi}{\lambda_0}\Delta\ . \tag{3.5}$$

Тут Δ – оптична різниця ходу когерентних світлових хвиль (променів), оскільки добуток nr називається оптичним шляхом променя. Зрозуміло, що для когерентних світлових хвиль оптична різниця ходу не залежить від часу.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

3.1.2. Інтерференція світла

Інтерференція світла – це явище накладання когерентних світлових хвиль, в результаті якого відбувається перерозподіл світлової енергії в просторі. В точках простору, куди когерентні хвилі приходять у фазі, вони підсилюють одна одну; в точках, куди вони попадають у протифазі, відбувається послаблення світла. На екрані спостерігається характерна інтерференційна картина у вигляді чергування темних і світлих смуг – максимумів і мінімумів освітленості.

У випадку максимуму інтенсивності інтерференційної картини в оптичній різниці ходу двох когерентних хвиль вкладається ціле число довжин хвиль (у вакуумі) λ_0, тобто

$$\Delta = \pm m\lambda_0,\ (m = 0,1,2,\ldots). \tag{3.6}$$

Мінімум інтерференції спостерігається, коли в оптичній різниці ходу вкладається непарне число півхвиль, тобто

$$\Delta = \pm(2m+1)\frac{\lambda_0}{2},\ (m = 0,1,2,\ldots). \tag{3.7}$$

Так, якщо при накладанні двох когерентних хвиль однакової амплітуди, одна з них пройшла в тому ж середовищі шлях на $\frac{\lambda_0}{2}$ більший ніж інша, то згідно (3.7) вони взаємно погасять одна одну.

На основі інтерференційних умов (3.6), (3.7) працюють інтерферометри. Ці прилади використовуються для вимірювання довжин хвиль спектральних ліній, показників заломлення прозорих середовищ, довжин і кутових величин. На явищі інтерференції оснований запис і зчитування інформації з компакт-дисків.

3.1.3. Дифракція світла

Дифракція світла – це сукупність явищ, які зумовлені хвильовою природою світла і спостерігаються в середовищах з різкими неоднорідностями (наприклад, при проходженні світла через отвори, поблизу границь непрозорих тіл і т.п.). Дифракція, зокрема, приводить до огинання світловими хвилями перешкод і проникання світла в область геометричної тіні. Для спостереження дифракції

Національний університет водного господарства та природокористування

необхідно, щоб розміри перешкод були співмірні з довжиною хвилі світла.

Проникнення світла в область геометричної тіні пояснює принцип Гюйгенса: кожна точка фронту хвилі є джерелом вторинної сферичної хвилі; положення фронту хвилі в наступний момент визначається огинаючою фронтів усіх вторинних хвиль.

Френель доповнив принцип Гюйгенса уявленням про інтерференцію вторинних хвиль. Розрізняють дифракцію сферичних хвиль (за Френелем) і дифракцію плоских хвиль (за Фраунгофером). Саме дифракція Фраунгофера має велике практичне застосування. Прикладом може служити дифракційна решітка як диспергуючий елемент спектрометра. Явища дифракції і інтерференції використовуються в голографії.

3.1.4. Поляризація світла

Світлова хвиля складається з багатьох цугів електромагнітних хвиль, що випромінюються окремими атомами. Площина коливань (площина коливань світлового вектора $\vec{E}$) для кожного цугу орієнтована випадково (див. рис. 3.3). Тому в природному світлі коливання різних напрямків швидко і хаотично змінюють одне одного. Світло, в якому напрямки коливань якимось чином впорядковані, називається поляризованим.

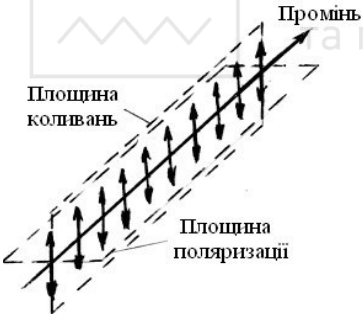


Рис. 3.3. Плоскополяризований промінь

Якщо коливання світлового вектора відбувається в одній площині, світло називають плоско- (або лінійно-) поляризованим. Площину, перпендикулярну до площини коливань, називають площиною поляризації. Якщо кінець світлового вектора описує еліпс, то світло називається еліптично-поляризованим.

3.1.5. Фотоефект

Фотоефектом називається процес взаємодії світла з речовиною, в

результаті якого енергія фотонів передається електронам речовини. Для твердих і рідких тіл розрізняють *зовнішній* фотоефект, при якому поглинання фотонів супроводжується вилітанням електронів за межі тіла, і *внутрішнім* фотоефектом при якому електрони залишаються в тілі (напівпровіднику), змінюють свій енергетичний стан (змінюється провідність напівпровідника). В газах фотоефект проявляється в іонізації атомів або молекул під дією світла (фотоіонізація).

Усі закономірності зовнішнього фотоефекту пояснюються рівнянням Ейнштейна (закон збереження енергії для фотоефекту):

$$h\nu = A + W_к, \tag{3.8}$$

де A – робота виходу електрона, $h\nu$ – енергія фотона, $W_к$ – максимальна кінетична енергія електрона.

На явищі зовнішнього фотоефекту працюють вакуумні фотоелементи та фотоелектронні помножувачі (ФЕП). Саме ці фотоприймачі тривалий час переважно використовувались у фотометрії та спектрометрії видимої та ультрафіолетової ділянок спектру. Перевагою цих приймачів є те, що їх фотострум пропорційний інтенсивності падаючого світла. Крім того фотострум не залежить від величини опору навантаження. Це дозволяє реєструвати малі світлові сигнали.

В інфрачервоній ділянці спектру використовують фотоелементи, які діють на основі явища внутрішнього фотоефекту. Це явище спостерігається у напівпровідниках. Під дією світла зростає концентрація носіїв струму (електронів провідності та дірок). Таким чином, збільшується електропровідність напівпровідника. При енергії фотона $h\nu_o \geq E_g$, де E_g – енергія активації провідності в чистому провіднику (ширина забороненої зони), можуть відбуватись переходи електронів із заповненої валентної зони в зону провідності. ν_o називається червоною межею фотопровідності.

Якщо в напівпровіднику є домішки, то під дією світла електрони можуть переходити із домішкових донорних рівнів в зону провідності, або із валентної зони на акцепторні домішкові рівні. У першому випадку виникає електронна фотопровідність, у другому – діркова.

Національний університет водного господарства та природокористування

На внутрішньому фотоефекті основна дія фоторезиторів. Кількість виникаючих носіїв струму пропорційна інтенсивності падаючого світла. Тому фоторезитори застосовуються у фотометрії.

На межі металу і напівпровідників або напівпровідників p - типу і n – типу (p-n перехід) спостерігається вентильний фотоефект. Він проявляється у тому, що під дією світла, внаслідок внутрішнього фотоефекту в p-n переході виникає електрорушійна сила (фото-е.р.с.). Величина фото-е.р.с. пропорційна інтенсивності падаючого світла.

Вентильний фотоефект в p-n переході це безпосереднє перетворення світлової енергії в енергію електричного струму. Це явище використовують у фотоелектричних джерелах струму, приймачах світла (напівпровідникові фотоелементи).

Напівпровідникові фотоелементи маючи малі габарити, низькі напруги живлення і ряд інших конструктивних переваг, широко застосовують для автоматичних систем, систем управління, перетворення сонячної енергії, а також в обчислювальній техніці.

3.1.6. Лазер і принцип його роботи

Лазер (оптичний квантовий генератор, англ.: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (LASER)) – підсилення світла за допомогою вимушеного випромінювання) - це джерело оптичного когерентного випромінювання, що характеризується високою спрямованістю і великою густиною енергії.

Основний фізичний процес, що визначає дію лазера, – це вимушене випромінювання електромагнітної хвилі. Воно відбувається при взаємодії фотона із збудженим атомом при точному збігу енергії фотона з енергією збудження атома (або молекули). В результаті цієї взаємодії атом переходить в незбуджений (основний) стан, а надлишок енергії випромінюється у вигляді нового фотона з такою ж енергією, напрямом поширення і поляризацією, як і в первинного фотона. Таким чином, наслідком даного процесу є наявність вже двох абсолютно ідентичних фотонів. При подальшій взаємодії цих фотонів із збудженими атомами, аналогічними першому атому, може виникнути “ланцюгова реакція” розмноження однакових фотонів, що “летять” в одному напрямі. Це приведе до появи вузьконаправленого

Національний університет водного господарства та природокористування

світлового променя. Для виникнення лавини ідентичних фотонів необхідне *активне середовище*, в якому збуджених атомів було б більше, ніж незбуджених, оскільки при взаємодії фотонів з незбудженими атомами відбувалося б поглинання фотонів. Таке середовище називається середовищем з *інверсною населеністю рівнів енергії*.

Отже, крім вимушеного випромінювання фотонів збудженими атомами відбуваються також процес спонтанного випромінювання фотонів при переході збуджених атомів в незбуджений стан і процес поглинання фотонів під час переходу атомів з незбудженого стану в збуджений.

Якщо кількість збуджених атомів велика і існує інверсна населеність рівнів (у верхньому, збудженому стані атомів більше, ніж в нижньому, основному), то перший же фотон, що народився в результаті спонтанного випромінювання, викличе зростаючу лавину появи ідентичних фотонів. Відбудеться підсилення спонтанного випромінювання.

Національний університет водного господарства та природокористування

На практиці для генерації лазерного випромінювання реалізується трирівнева схема (наприклад, в рубінових лазерах), за якою атом з основного стану переходить у один із двох збуджених станів. В цьому стані він знаходиться короткий проміжок часу і майже відразу переходить у другий збуджений стан з меншою енергією, де знаходиться тривалий час. Саме з цього стану атом переходить в основний стан випромінюючи фотон.

Головний елемент лазера – активне середовище, для утворення якого використовують дію світла не лазерних джерел – електричний розряд в газах, хімічні реакції, бомбардування електричним пучком та інші методи, які називаються „накачкою”. Активне середовище знаходиться між двома паралельними дзеркалами (рис. 3.4).

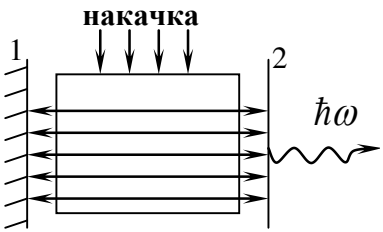


Рис. 3.4. Оптичний квантовий генератор (лазер)

Фотони, утворені накачкою, напрям поширення яких не перпендикулярний площині дзеркал, створюють лавини фотонів, які виходять за межі активного середовища. В той же час фотони, напрям поширення яких

Національний університет водного господарства та природокористування

перпендикулярний площині дзеркал, створюють лавину, яка багатократно підсилюється внаслідок відбиття від дзеркал.

Оскільки одне з дзеркал напівпрозоре, то через нього виходить направлений потік фотонів перпендикулярно площині дзеркал. При правильно підібраному коефіцієнті пропускання дзеркал, точному їх налаштуванню одне відносно одного і відносно поздовжньої осі активного середовища зворотний зв'язок може виявитися настільки ефективним, що випромінюванням "вбік" можна повністю нехтувати в порівнянні з випромінюванням, що виходить через дзеркало. Таку схему зворотного зв'язку називають оптичним резонатором, і саме такого типу резонатори використовують в більшості існуючих лазерів.

Схематичне зображення лазера представлене на рис. 3.4. Тут: 1- відбивне дзеркало; 2- напівпрозоре дзеркало; А- активне середовище; $\hbar\omega$ - випромінювання, що генерується лазером.

Між двома дзеркалами, одне з яких напівпрозоре (2), рухається потік фотонів, що випромінюються атомами. Більша частина цього потоку проходить через напівпрозоре дзеркало в навколишнє середовище у вигляді когерентного випромінювання. Невелика частина потоку світа відбивається від дзеркала 2, рухається підсилюючись до дзеркала 1 і т.д.

Існують газові лазери ,рідинні та твердотільні (на діелектричних кристалах, напівпровідниках, склі).

В якості активного середовища можна використовувати:

1 Газ (гелій+неон, вуглекислий газ та ін.)
2 Кристал (напівпровідник).
3 Рідину.
4 Скло.

3.1.7. Поняття про голографію

Голографія є особливим методом реєстрації на фотопластинці (або фотоплівці) хвильового фронту випромінювання, який іде від предмета, і потім відновлення цього фронту для отримання уявного або дійсного зображення предмета [3]. Голографія базується на фотографуванні результату інтерференції двох частин хвилі (плоскої або сферичної), яка випромінюється когерентним джерелом (наприклад, лазером): одна частина попадає на

фотопластинку безпосередньо (називається – опорна хвиля, англ.: reference beam), а інша направляється для освітлення досліджуваного об’єкту і після відбивання від нього поступає на ту ж пластинку (об’єктна хвиля, англ.: signal beam). На фотоплівці фіксується складна інтерференційна картина, яка називається *голограмою* (див. рис. 3.5). В кожній точці голограми результат інтерференції об’єктної та опорної хвиль залежить не тільки від амплітуд світлових векторів, а і від їх різниці фаз.

Для відновлення хвильового поля предмета, тобто для отримання його об’ємного зображення, голограму розміщують в тому ж місці, де була розташована фотопластина при записі, а потім освітлюють її опорною хвилею лазера під тим самим кутом, під яким був здійснений запис. При цьому внаслідок дифракція опорної хвилі на голограмі виникає “уявне” об’ємне зображення об’єкта. В ньому зберігається вся інформація про амплітуду і фазу об’єктної хвилі.

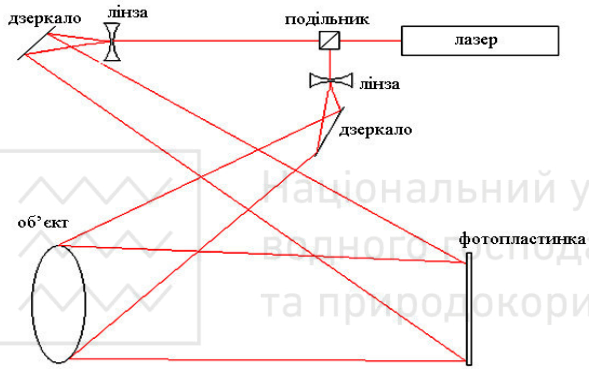


Рис. 3.5. Створення голографічного зображення

3.2. Оптичні технології в комп’ютерній техніці

Оптичні методи є найбільш перспективними для розвитку інформаційних технологій, оскільки традиційні електронні методи мають низку суттєвих недоліків і обмежень, перш за все, у швидкодії і щільності запису.

Серед переваг оптичних методів реєстрації, обробки і збереження інформації над іншими методами можна відзначити:

1. Високу щільність запису інформації (10^5біт/мм^2 і вище).

Національний університет водного господарства та природокористування

2. Відсутність (у більшості випадках) безпосереднього контакту між носієм і системою запису/читання.

3. Швидкодія.

4. Завадостійкість.

5. Різноманітність способів практичної реалізації, яка базується на великій кількості механізмів взаємодії світла з реєструючими середовищами.

В пристроях оптичного зберігання даних запис (читання) здійснюється за допомогою лазерного променя який направленний на диск, що обертається. Історична назва такого диску – **компакт-диск** (англ.: Compact Disk, CD, КД).

Перші оптичні лазерні диски з'явились у 1972 році і продемонстрували великі можливості для зберігання інформації. Висока щільність запису інформації на дисках дозволяла використовувати їх для зберігання баз даних, енциклопедій, колекцій відео та ін. Вони мали високу надійність і довговічність, що дозволяло використовувати їх для архівного зберігання інформації. Тогочасні лазерні диски дуже відрізнялись від сучасних компакт-дисків, що застосовуються в комп'ютерній техніці

Компакт-диск – це полікарбонатна, прозора для широкого діапазону світлових хвиль, пластина діаметром 120 мм (4,75 дюйма) або 80 мм (3,1 дюйма) і товщиною 1,2 мм, в центрі якої розміщений отвір діаметром 15 мм. На цій штампованій або литій основі розміщена одна спіральна доріжка, яка починається на внутрішній і закінчується на зовнішній частині диску. Крок цієї спіралі становить 1,6 мкм. Вся інформація записується на доріжку у вигляді виступів на ній (штрихи, піти, pits) і плоских поверхонь між ними (площадки, ленди, lands) (див. рис. 3.6) . Висота піта, його ширина і довжина, довжина ленда, а також відстань між витками доріжки визначаються стандартом компакт-диску. Зазвичай компакт-диск має від трьох до шести різних

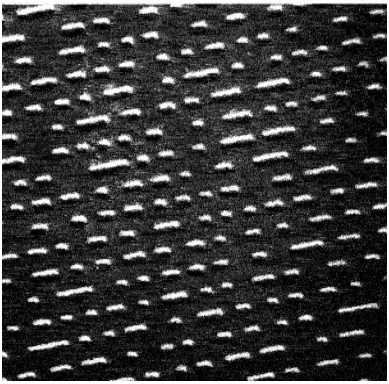


Рис. 3.6. Вигляд доріжок оптичного компакт-диску при збільшенні

Національний університет водного господарства та природокористування

шарів. Для відбиття лазерного променя тильна сторона диску покривається світловідбиваючим шаром речовини, найчастіше – алюмінієм.

3.3. Принцип зчитування інформації з компакт-диску

Принцип зчитування інформації з компакт-диску базується на явищі інтерференції світлових променів [3]. При зчитуванні інформації з компакт-диску лазерний промінь проходить крізь прозору полікарбонатну основу і сканується вздовж доріжки диску. Відбитий від доріжки промінь вловлюється фотоприймачем і перетворюється в електричний сигнал. Глибина ленда доріжки по відношенню до піта має важливе значення для зчитування інформації. Вона повинна дорівнює 1/4 довжини хвилі лазерного променя. Відбитий від ленда промінь накладається на падаючий промінь у фото-електричному елементі (фотоприймач, рис.3.17.). В результаті інтерференції ці промені взаємно гасять один одного (згідно формули 3.7), фотоприймач не отримує світлової енергії і не перетворює її в електричний сигнал. В результаті такого сканування доріжки в фотоприймач буде надходити світло, відбите від пітів, яке буде уриватися на час проходження лазера над лендом (ленд стає „чорним”, тобто не відбиваючим світло). Фотоприймач сприймає систему таких спалахів, перетворючи їх в логічні „1”. Перехід від піта до ленда (кінець спалаху світла) і від ленда до піта (поява світла) відповідає логічній „1”. Той час, який лазер

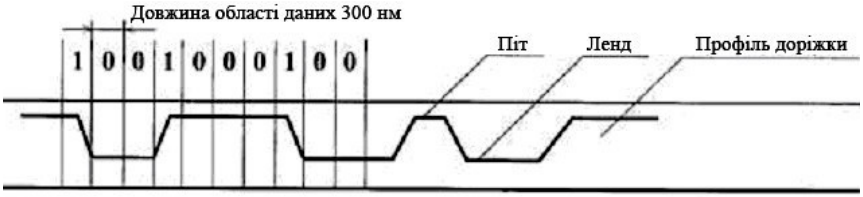


Рис. 3.7. Перехід від піта до ленда

проходить над пітом чи лендом (без переходу між ними), при зчитуванні заповнюється логічними „0” (див. рис. 3.7).

Для прикладу визначимо висоту піта CD. Довжина хвилі лазера в вакуумі для зчитування даних з цього диску становить λ_0=780 нм.

Національний університет водного господарства та природокористування

Оскільки промінь проходить через полікарбонатну основу диску з показником заломлення $n = 1{,}55$, то висота піта повинна становити:

$$d = \frac{\lambda_0}{4n} = \frac{780}{4 \cdot 1{,}55} = 125 нм\ . \qquad (3.9)$$

На даний час найбільш поширеними стандартами оптичних технологій запису інформації є:

1. CD (CD-ROM, CD-R, CD-RW);
2. DVD (DVD-ROM, DVD-RAM, DVD-R, DVD-RW, DVD+R, DVD+RW);
3. BD (BD-ROM, BD-R, BD-RE).

Формати оптичних дисків описані в так званих „райдужних книгах” (англ.: Rainbow books).

3.3.1. CD-ROM та технологія їх виготовлення

CD-ROM (англ.: Compact Disk Read Only Memory - пам’ять тільки для читання на компакт-дисках). Він є найбільш поширеним оптичним накопичувачем. Термін CD-ROM відноситься як до самих компакт-дисків, так і до пристроїв , в яких інформація зчитується з компакт-диска. Фізичні параметри CD-ROM, а також його доріжок, пітів і лендів показані на рис. 3.8. Довжина пітів і лендів визначається системою кодування інформації. В прийнятій на даний час системі кодування Ріда - Соломона прийнято, що між двома логічними „1” на диску може бути від двох до десяти „0”.

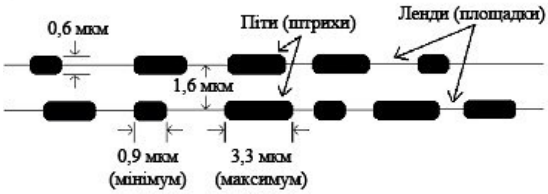


Рис. 3.8. Фізичні параметри CD-ROM

Розглянемо принцип запису інформації на CD-ROM (часто в побуті користуються назвою – ліцензійний диск).

В таких дисках система пітів і лендів на доріжці диску створюється методом заводського штампування [3].

Цей процес відбувається в наступних стадіях (див. рис. 3.9):

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Рис. 3.9. Принцип запису на CD-ROM

1. На скляний диск наноситься шар світлочутливої речовини – фоторезистивний шар товщиною 150 мкм і відпалюється при температурі 80 °С протягом 30 хв.

2. За допомогою лазера на поверхні фоторезистивного шару формують ділянки, які внаслідок фоточутливості змінюють кристалічну будову матеріалу.

3. Скляна пластинка обробляється 10% розчином NaOH, який розчиняє експоновані лазером ділянки, формуючи на поверхні фоторезистивного шару впадини.

4. За допомогою гальванопластики диск покривається шаром нікелевого сплаву. В результаті утворюється металевий майстер-диск. Такий диск називається *батьківським диском (father)*.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

5. Металевий майстер-диск відділяється від скляної основи. Його можна використовувати для виготовлення невеликих партій дисків, оскільки він дуже швидко зношується. Тому з нього методом гальванопластики створюють ще декілька негативних копій, які називаються *материнськими дисками (mother)*. Вони використовуються для тиражування позитивних металевих копій (синівських дисків). Це дозволяє штампувати велику кількість дисків без повторення процесу формування скляного майстер-диску.

6. Один із синівських дисків розміщується в основі, в якій знаходиться полікарбонатна маса в розплавленому вигляді об'ємом близько 18 грам і температурі 350 °С. В результаті такого штампування утворюється пластиковий диск з системою виступів і западин.

7. На цей диск шляхом напилення наноситься шар алюмінію товщиною 0,05-0,1 мкм для створення відбивної для світла поверхні.

8. Для захисту алюмінієвої плівки від окислення зверху наноситься шар акрилового лаку (6-7 мкм) і етикетка. Одного майстер-диска вистачає на виготовлення 1-3000 CD–ROM дисків.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

3.3.2. CD-R – диски та технологія їх виготовлення

CD-R (англ.: Compact Disk Recordable – компакт-диск з можливістю одноразового запису). Початок випуску – 1988 рік. Принцип запису даних на ці диски базується не на заводському штампуванні пітів і лендів на доріжці диску, а на зміні оптичних властивостей робочого шару, що наноситься на полікарбонатну основу. В якості такого робочого фоточутливого шару використовують органічні сполуки – цианіни (cyanine) або фталоцианіни (phtalocyanine). Колір диска визначається кольором цианіну (блакитний) або фталоцианіну (золотистий). Відбивна здатність цих сполук складає 70% (близько до відбивної здатності золота). Властивість цих матеріалів змінювати коефіцієнт відбивання світла лежить в основі запису на CD. Під дією лазерного променя (відносно великої потужності) вони темніють і перестають пропускати крізь себе лазерний промінь. На доріжці диску утворюється система темних і світлих ділянок, які є тими ж самими

Національний університет
водного господарства
та природокористування

псевдопітами і псевдолендами для лазерного променя. В якості відбиваючих світло матеріалів використовують золото та срібло, рідше – алюміній і сплави. На даний час експлуатуються диски CD-R наступних ємностей (див. табл. 1).

Таблиця 1

Тип	Тривалість, хвилини	Секторів	Макс. розмір даних	
			байти	МіБ
650 MB	74	333 000	681 984 000	650,3
700 MB	80	360 000	737 280 000	703,1
800 MB	90	405 000	829 440 000	791,0
900 MB	99	445 500	912 384 000	870,1

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Безумовною ***перевагою CD-R над CD-ROM*** є матеріал світловідбивного шару. Оскільки він, в основному, виготовляється із золота і срібла, менш здатних до окислення, ніж алюміній, який застосовується у більшості штампованих дисків, CD-R тьмяніють повільніше. Однак, ***основним недоліком дисків CD-R*** є чутливість робочого шару до світла. Від дії світла наступає деструкція і окислення цианіну і фталоцианіну, хоча останній менш схильний до цих процесів. Найбільш оптимістичні оцінки часу життя дисків на основі фталоцианінів – близько 100 років. Статистика використання CD-R показує, що час експлуатації таких дисків становить: 2-3 роки – при акуратній роботі з ними і 1 рік – при інтенсивній роботі з неакуратним поводженням (удари, згини, дія тепла, яскравого світла тощо).

3.3.3. CD-RW та технологія запису і перезаписування даних на них

CD-RW (англ.: Compact Disc ReWritable – компакт-диск, з можливістю перезаписування).

Основою запису і зберігання даних на дисках CD-RW є технологія зміни фазового стану речовини (phase-change). При

Національний університет водного господарства та природокористування

запису і читанні з дисків використовуються різні оптичні властивості деяких речовин, в залежності від того, знаходяться вони в кристалічному стані чи аморфному. Як було зазначено в розділі 2, халькогеніди (сплав Ge-Sb-Te із стехіометричним складом 2:2:5) прозорі для червоного та інфрачервоного світла в кристалічному стані і не прозорі – в аморфному. Крім того, вони характеризуються великою оптичною контрастністю кристалічного і аморфного станів. Зміну фазового стану такої речовини можна здій-снювати шляхом нагрівання відповідної ділянки на диску відносно потужним променем лазера. Оскільки для запису даних на сучасні CD-RW необхідна дуже швидка кристалізація, то найкраще для цього підходять саме сплави Ge, Sb і Te, у яких $t_{крист}$<100 нс. Також такі халькогеніди мають прийнятні для технології температури кристалізації і плавлення ($T_{крист}$=150-200 °C, $T_{плавл}$=600 °C). Будова CD-RW показана на рис 3.10. На CD-RW диску робочий шар Ge-Sb-Te знаходиться між двома шарами буферного матеріалу ZnS-SiO_2. Цей матеріал характеризується високою тугоплавкістю і прозорістю в заданому діапазоні довжин хвиль.

Національний університет водного господарства та природокористування

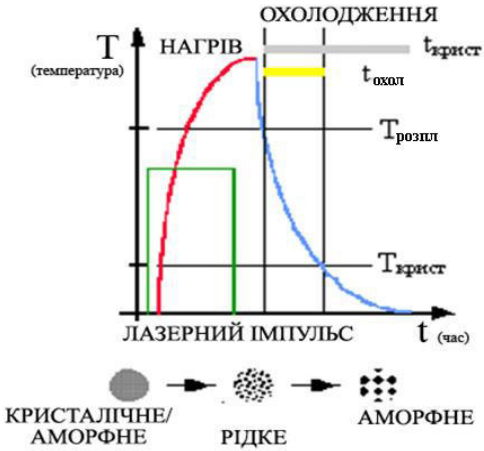


Рис. 3.11 Графік залежності температури робочого шару від часу нагрівання і охолодження диску при запису

Національний університет
водного господарства
та природокористування

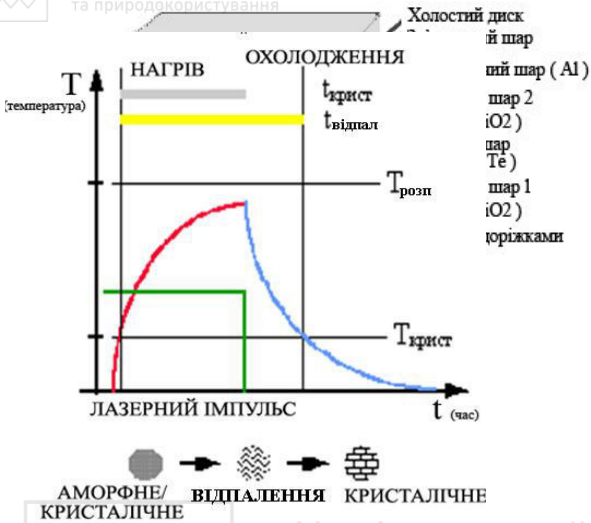


Рис. 3.12. Графік залежності температури робочого шару від часу нагрівання і охолодження диску при стиранні

Для запису даних на диск використовується багатоімпульсна стратегія запису. Розглянемо технологію запису на CD-RW (див. рис. 3.11). На графіку зображена залежність температури робочого шару (Ge-Sb-Te) від часу нагрівання і охолодження диску.

При подачі короткочасного імпульсу лазера високої потужності (P=10÷15 мВт) на певну ділянку доріжки, температура її зростає і робочий шар в цьому місці переходить в рідкий стан. При закінченні дії імпульсу лазера і швидкому охолодженні диска температура цієї точки робочого шару різко падає і стає меншою температури кристалізації ($T<T_{крист}$). Таке різке охолодження призводить до того, що структура кристалічної решітки робочого шару у цьому місці доріжки не може відновитись і він залишається в аморфному стані.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Національний університет водного господарства та природокористування

Таким чином, при записі на CD-RW диск, на ньому формуються ділянки, на яких робочий шар є в кристалічному, прозорому для світла стані, і аморфні ділянки, які є непрозорими для інфрачервоного світла.

Так формуються на поверхні піти і ленди.

При стиранні інформації з CD-RW диску імпульс лазерного променя подається меншої потужності (0,5-1 мВт), такої, щоб він розігрівав робочий шар до температури, яка була б більшою за $T_{крист}$, але меншою $T_{плавл}$ ($T_{крист}<T<T_{плавл}$) (див. рис. 3.12, рис. 3.13). При розігріві, атоми робочого шару відновлюють кристалічну структуру речовини. Така відбудова кристалічної решітки носить назву „відпалення”. В результаті, речовина робочого шару відновлює свої оптичні властивості.

Завдяки коротким та потужним імпульсам запису і довгим та слабким імпульсам стирання перезапис на CD-RW можна проводити прямо поверх старого запису (див. рис. 3.13).

Національний університет водного господарства та природокористування

3.4. Принцип запису на DVD

Перші DVD (англ.: Digital Versatile Disk – цифровий багатоцільовий диск) з’явились у 1996 році в Японії. Вони називались MMCi або MMCD і розроблялися фірмами Philips і Sony. Паралельно фірмою Toshiba розроблявся диск „Super Disk”. Для уникнення боротьби між різними форматами фірма IBM викупила патенти на ці диски і на їх основі розробила версію DVD диску. За структурою даних DVD бувають трьох типів:

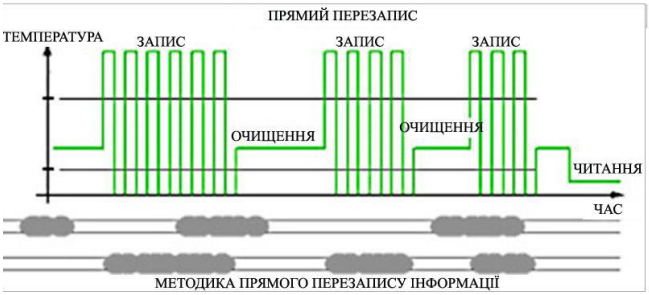


Рис. 3.13. Перезапис на диск

1. DVD-Video, на які записуються високоякісне зображення та звук не дуже високої якості.
2. DVD-Audio, на які записуються звук дуже високої якості.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

3. DVD-Data, на які записуються текстові дані та відео і аудіо середньої якості.

DVD як носії бувають чотирьох типів:

1. DVD-ROM – диски, виготовлені в заводських умовах методом штампування полікарбонатної основи.
2. DVD-RAM – диски багаторазового запису з довільним доступом.
3. DVD-R/RW – диски одноразового і багаторазового запису.
4. DVD+R/RW – диски одноразового і багаторазового запису.

DVD-ROM виготовляються за тією ж технологією, що і CD-ROM.

DVD-RAM – відноситься до DVD, які перезаписуються, і є розробкою фірми Panasonic. Вони можуть перезаписуватись до 100000 разів, на відміну від DVD-RW і DVD+RW, які можуть перезаписуватись всього до 1000 разів (лазерне опромінення призводить до деформації диска). За цим показником DVD-RAM можна порівняти з жорсткими дисками ПК. Перші DVD-RAM з'явились в 1998 році ємністю 2,6 ГБ в захисних картриджах. Нині вони випускаються без захисної оболонки ємністю 9,4 ГБ для двосторонніх дисків. DVD-RAM дисководи читають DVD-відео, DVD-ROM і всі види CD. Головним ***недоліком*** DVD-RAM є те, що в цьому форматі більшість побутових DVD-програвачів не працює.

DVD+R/RW. Цей формат виник внаслідок монополізації ринку DVD-дисків консорціумом компаній "DVD-Forum", який почав одноосібно розробляти диски формату DVD-R і DVD-RW і встановив високу ціну ліцензії на виготовлення дисків цих форматів. Низка фірм об'єднались між собою у компанію „DVD+RW Alians", яка почала розробляти свій стандарт DVD. Диски DVD+R/RW з'явилися в у 2002 році. Принцип запису, стирання і перезаписування інформації у них подібний до DVD-R і DVD-RW. Єдина відмінність полягає у використанні більш досконалого контролю помилок і більш точному позиціюванні лазера. Практично всі приводи для DVD можуть читати обидва формати дисків.

DVD-R/RW. За принципом запису даних DVD-R/RW не відрізняється від CD-R/RW, крім довжини хвилі лазера,

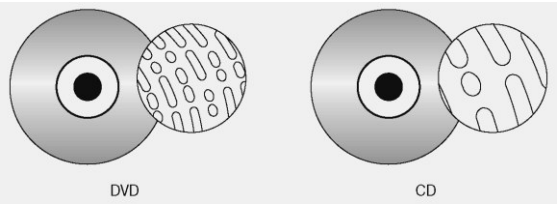


Рис. 3.14. DVD та CD-диски

Національний університет
водного господарства
та природокористування

геометричних параметрів пітів, лендів і доріжки (див. рис. 3.14).

Оскільки довжина хвилі лазера для читання інформації з DVD становить 650нм, то висота піта для диска дорівнює 105нм.

На дисках DVD на відміну від CD можливий дворівневий запис інформації. Це реалізовано у наступних форматах: **DVD-5, DVD-9, DVD-10, DVD-18.**

3.4.1. DVD-5

DVD-5 – це перша ринкова версія DVD: одношаровий односторонній диск ємністю 4,7 ГБ. Він складається з двох з'єднаних між собою основ. Одна з них містить записаний шар (називається шаром 0), інший шар – порожній. Нульовий шар покритий алюмінієвою відбивною плівкою товщиною 55 нм, як і для CD-ROM. Структура DVD-5 показана на рис. 3.15.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

3.4.2. DVD-9

Національний університет водного господарства та природокористування

DVD-9 являє собою односторонній диск ємністю 8,5 ГБ з двома робочими шарами(шар запису 0 і шар запису 1). Робочі шари знаходяться з однієї сторони диску, з іншої сторони – пуста основа (див. рис.3.15). Зовнішній шар 0 покритий напівпрозорою плівкою золота або його сполуками (альтернатива золоту – кремнієві або срібні сплави). Відбивна здатність такої плівки близько 30%. Зовнішня сторона шару 1(сторона 0) має алюмінієве покриття.

Для зчитування інформації з обох робочих шарів використовують один лазер зі замінимим фокусуванням променя. Фокусуючи промінь лазера на шар 0 (сторона 0), або на шар1 (сторона 0), зчитують інформацію з одного, або іншого робочого шару.

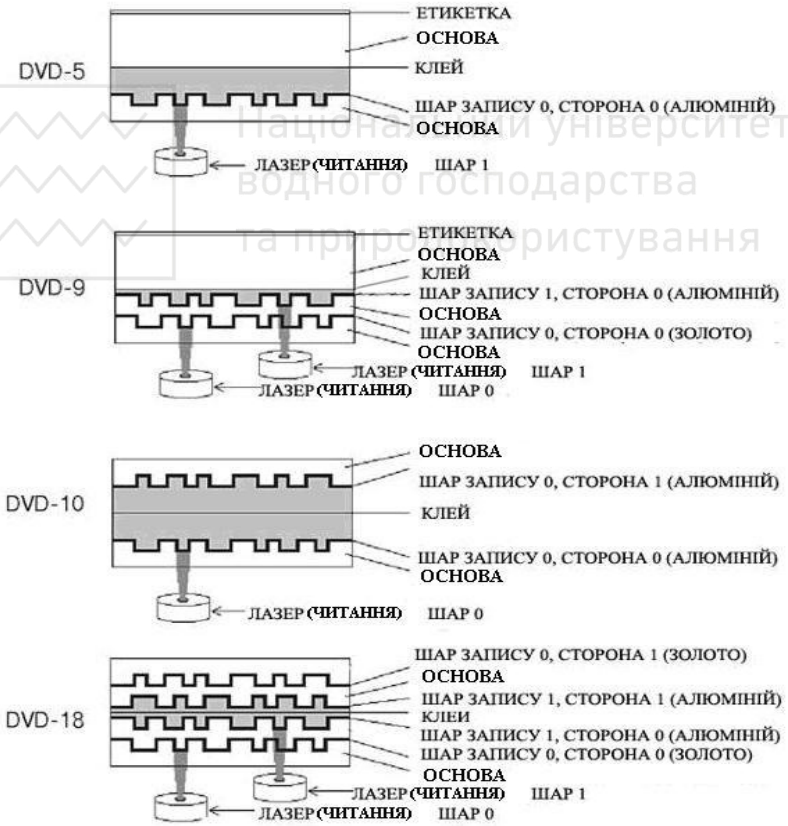


Рис. 3.15. Структура дисків DVD різних форматів

Національний університет
водного господарства
та природокористування

3.4.3. DVD-10

DVD-10 – це одношаровий двосторонній диск ємністю 9,4 ГБ. За принципом запису, це подвійний DVD-5. Два диски, покритих металевими плівками, склеєні між собою неробочими поверхнями. Записаний шар (нульовий шар на кожній стороні) зазвичай має алюмінієве покриття. Для зчитування інформації з обох сторін використовується один лазер. Структура цього диску показана на рис. 3.15.

3.4.4. DVD-18

DVD-18 – це двошаровий двосторонній диск ємністю 17,1 ГБ. Структура його така ж, як у DVD-9. Це фактично два DVD-9 склеєних неробочими поверхнями. Принципова структура показана на рис. 3.10.

Відбивна здатність одношарового диску становить 45-85%, двошарового – 18-30%. Різні відбивні здатності шарів компенсуються схемою автоматичного регулювання підсилення (АРП).

Крім цих найбільш поширених форматів DVD зустрічаються DVD-14 (один шар на одній стороні диску, два – на іншій), який має ємність 13,2 ГБ і диски, діаметром 80 мм форматів DVD-1, DVD-2, DVD-3 і DVD-4.

3.4.5. Принцип запису на BD

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Національний університет водного господарства та природокористування

BD (англ.: Blu-ray Disk – диск з використанням синього променя) поступив у продаж в 2002 році. У дисках BD в якості записуючого і зчитуючого променя використовується лазерний промінь з довжиною хвилі 405 нм. При такій довжині хвилі висота піта становить 0,065 мкм, що висуває високі вимоги до якості поверхні диску. Для збереження її від ушкоджень сучасні BD випускаються в захисних картриджах. За принципом запису і читання інформації BD не відрізняються від CD та DVD. У сучасних розробках BD, які ще не поступили у продаж, ємність 10-шарових дисків сягає 320 ГБ.

BD бувають трьох типів:

1 BD-ROM – диски, виготовлені в заводських умовах методом штампування полікарбонатної основи;

2 BD-R – диски одноразового запису;

3 BD-RE – диски багаторазового запису.

Порівняльна характеристика CD, DVD та BD показана на рис. 3.16 і приведені в таблиці 1.

Національний університет водного господарства та природокористування

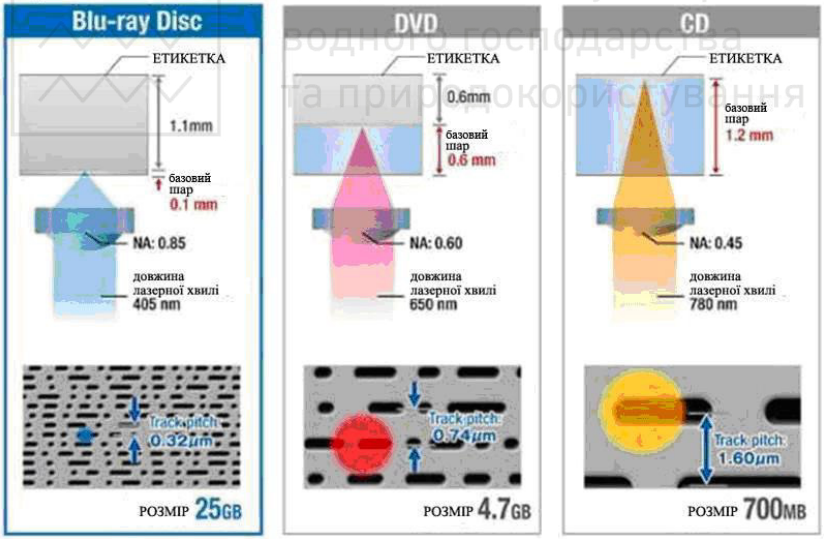


Рис.3.16. Порівняльна характеристика CD, DVD та BD

Таблиця 1

Національний університет водного господарства та природокористування

Параметр	CD-ROM (650MiB)	CD-ROM (700MiB)	DVD-ROM	BD-ROM
Діаметр, мм	120	120	120	120
Товщина, мм	1,2	1,2	1,2 (по 0,6 мм на шар)	1,2
Кіл-сть робочих шарів	1	1	1, 2, 4	1, 2, 3, 4 , 8, 10
Крок доріжки, мкм	1,6	1,48	0,74	0,32
Довжина хвилі лазера, нм	780, Інфра-червоний	780, Інфра-червоний	650, червоний	405, синьо-фіолетовий
Ємність, ГБ	0,65	0,7	4,7	25
Кількість витків на 1 мм	625	676	1351	Немає даних
Загальна довжина доріжки, м	5772	6240	11836	Немає даних
Ширина піта, мкм	0,6	0,6	0,4	0,16
Висота піта, мкм	0,125	0,125	0,105	0,065
Мінімальна довжина піта, мкм	0,9	0,9	0,4 (одношаровий диск)	0,149
Максимальна довжина піта, мкм	3,31	3,31	1,87 (одношаровий диск)	Немає даних
Кількість секторів	333000	360000	2292897 (одношаровий диск)	Немає даних
Довжина біта, мкм	0,67	0,67	0,1333 (середня довжина для одношарового диску)	Немає даних

Продовження табл. 1

Числова апертура лінзи лазера	0,45	0,45	0,60	0,85
Розмір плями лазера, мкм	2,11	2,11	1,32	0,58

* – 1 МіВ дорівнює 1048576 байт.

3.5. HD DVD

Формат HD DVD (англ.: Hight-Definition DVD – DVD високої щільності) є розробкою компаній Toshiba, NEC і Sanyo. Для запису використовується лазер з довжиною хвилі, як і для BD, але ці формати несумісні. Планується випуск наступних різновидів дисків HD DVD: HD DVD-ROM, HD DVD-R, HD DVD-RW і HD DVD-RAM. За принципом запису цей формат аналогічний дискам BD, поступаючись ємністю. Одношаровий HD DVD вміщує 15 ГБ, двошаровий – 30 ГБ, тришаровий – 45 ГБ інформації. На сьогодні формат BD знаходить більше застосування ніж HD DVD.

3.6. Головка читання-запису оптичних компакт-дисків

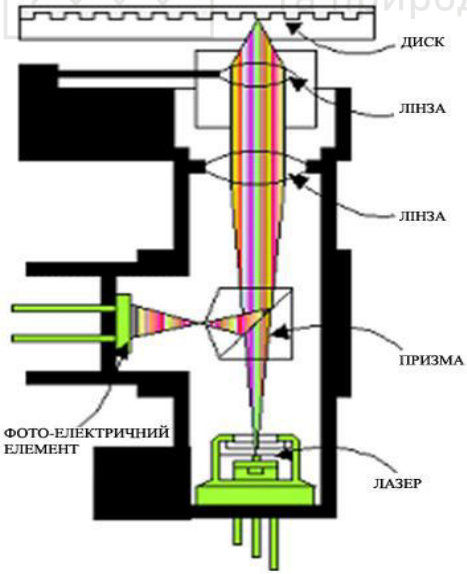


Рис. 3.17. Будова оптичної головки читання/запису

Головним елементом головки читання/запису оптичних компакт-дисків є лазер.

Принцип роботи головки читання/запису: лазерний промінь пройшовши через призму (див. рис. 3.17) і дві фокусуючі лінзи попадає на диск, що обертається, і після відбиття повертається на спеціальний фотоприймач [4]. При попаданні променя на піти і ленди інтенсивність відбитого променя змінюється. В

Національний університет водного господарства та природокористування

результаті на виході фотоприймача формується електричний сигнал, що по формі повторює інформаційний малюнок на поверхні CD. Дуже важливе значення для головки має числова апертура об'єктива. Вона визначає параметри освітлення і дорівнює:

$$A = n \sin \varphi_{\max}, \tag{3.10}$$

де $\varphi_{\max}$ – максимальний кут заломлення променів в лінзі; n – показник заломлення лінзи. Наприклад, лінза, що використовується в накопичувачах CD-ROM, збирає пучок світла під кутом 26,7°, тому A для неї дорівнює 0,45. Для лінзи накопичувача DVD збирає пучок світла під кутом 36,9°, при цьому апертура становить 0,60, в накопичувачах BD світлові промені виходять з лінзи під кутом 58,2° і апертура дорівнює 0,85 (див. рис. 3.17). Лінзи з більш високою числовою апертурою дають можливість створювати зображення з більшою роздільною здатністю. Апертура також визначає обмеження інформаційної ємності оптичних дисків. Інформаційний

Національний університет водного господарства та природокористування

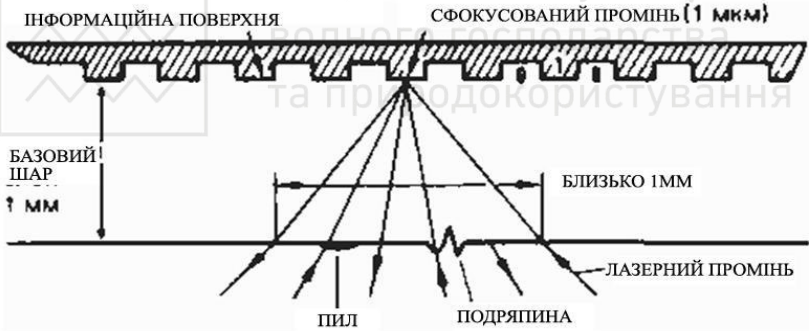


Рис. 3.18. Фокусування променя на робочу поверхню

елемент, що записується (зчитується) не може бути меншим половини діаметра d дифракційної плями (кружка Ері):

$$d = 1{,}22\lambda / A, \tag{3.11}$$

де λ – довжина хвилі світла.

Об'єктив лазера фокусує промінь на робочій поверхні диску. Глибина різкості складає не більше 2 мкм. На поверхні прозорої основи CD лазерний промінь розфокусований. Діаметр плями променя складає близько 1 мм, а це приводить до того, що частинки

Національний університет водного господарства та природокористування

пилу, відбитки пальців або подряпини на поверхні CD не можуть бути „прочитаними” лазерним променем (див. рис. 3.18.).

Особливості оптичного способу зчитування даних:

1. Успішне зчитування залежить від стану поверхні компакт-дисків. Подряпини, пил і забруднення ускладнюють, а інколи і роблять неможливим зчитування з них інформації.
2. Застосування лазера ІЧ-діапазону для формату CD дозволяє виготовляти „темні” диски. Вони прозорі для ІЧ – діапазону випромінювання.

3.7. Магнітооптичні (МО) технології в комп’ютерній техніці

Перші МО диски з’явились у 1988 році. Вони об’єднали в собі компактність гнучких дисків і дискет, швидкість середнього жорсткого диску, надійність компакт-диску і достатню, на той час ємність. Але широкому поширенню МО заважає відносно висока вартість і конкуренція сучасних жорстких дисків. В порівнянні з сучасними жорсткими дисками, вони більш повільні і поступаються їм максимальною місткістю. Це робить неможливим застосування МО в якості вінчестерів. Проте МО диски мають великі перспективи як вторинні накопичувачі для резервного зберігання інформації.

3.7.1. Принцип роботи МО-дисків

Принцип роботи МО накопичувача базується на суміщенні магнітного і оптичного принципів зберігання інформації [5]. *Запис даних* відбувається на магнітний робочий шар диску *магнітним полем* головки *за допомогою променя лазера* відносно великої потужності. Цей метод теплового магнітного запису (англ.: Heat Assisted Magnetic Recording – HAMR) докладно був описаний в розділі 1. В сучасних МО накопичувачах для запису використовується два цикли: цикл стирання і цикл запису. За цикл стирання диску, або його ділянки, лазер нагріває послідовно всю ділянку. Магнітне поле головки намагнічує доріжку вибраної ділянки в одному певному напрямку, що відповідає логічному „0”. Таким чином, вся вибрана ділянка диску переводиться в стан послідовності „0”. В циклі запису для запису „1” в необхідних

Національний університет водного господарства та природокористування

місцях диску вмикається лазер і це місце перемагнічується в зворотному напрямку. Такий подвійний цикл запису суттєво знижує його швидкість. Але розігрів робочої поверхні диску променем лазера підвищує надійність зберігання даних, завдяки малої імовірності перемагнічення ділянки.

Принцип читання інформації з МО-диску базується *на магнітооптичному ефекті.* Він полягає у впливі намагнічення середовища на інтенсивність і поляризацію світла, відбитого від його поверхні. Цей ефект досить помітний для речовин зі здатністю до значного намагнічення і з високим коефіцієнтом поглинання, тобто для металічних феромагнетиків. Якщо плоскополяризований промінь відбивається від поверхні намагніченого феромагнетика, то він стає еліптично поляризованим, при цьому велика вісь еліпса поляризації повертається на деякий кут по відношенню до площини поляризації падаючого світла (див. рис. 3.19).

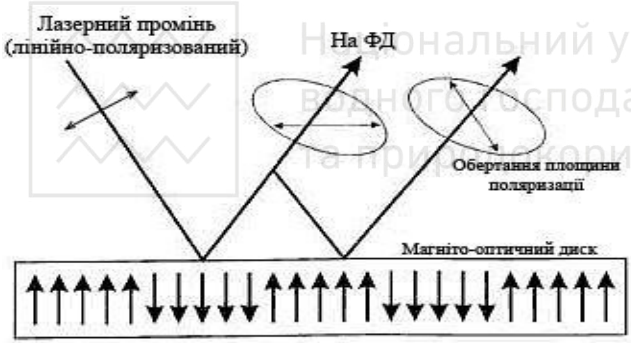


Рис. 3.19. Повертання площини поляризації променя головки зчитування після відбиття від поверхні МО-диска

Відбиваючим елементом для лазерного променя, що повертає площину його поляризації, в випадку МО-диску є намагнічена при запису точка поверхні робочого шару. Фотоприймач (ФП) оптичної головки зчитування сприймає відбитий промінь і аналізує величину повороту площини поляризації променя. Таким чином, визначається напрямок намагнічення ділянки диску і значення біта інформації на цій ділянці.

При читанні використову-ється лазерний промінь невеликої інтенсивності, що не приводить до нагріву поверхні і її деформації.

В таблиці 2 порівнюються основні властивості магнітооптичного запису і запису за рахунок зміни фазового стану (phase-change).

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Таблиця 2

	Магнітооптика	Phase-change
Механізм запису	Зміна вектора намагнічення	Перехід між аморфним і кристалічним станами
Роль світла	Локальний розігрів	Локальний розігрів
Механізм читання	Зміна поляризації відбитого світла за рахунок магнітооптичного ефекту	Зміна інтенсивності відбитого світла із-за відмінності коефіцієнтів пропускання робочого шару в кристалічному і аморфному станах
Характерні температури	Точка Кюрі (200-300) °C	≈600 °C плавлення ≈200 °C кристалізація
Число циклів	10^6	10^3 (CD-RW) 10^5 (DVD-RAM)

Національний університет
водного господарства
та природокористування

3.7.2. Перспективи МО- технологій

Основні перспективи МО-технологій пов’язані зі збільшенням швидкості запису даних. Це може бути реалізовано технологією зміни фазового стану (подібно до реалізованої у CD-RW та DVD-RW). У найновіших розробках напрямок намагнічення ділянки робочої поверхні можна змінювати за декілька наносекунд.

3.8. Перспективні оптичні технології в комп’ютерній техніці

3.8.1. Флуоресцентні диски

Використання флуоресценції для зчитування інформації з цифрових оптичних дисків дозволяє виключити з їх конструкції відбиваючі шари. Під флуоресценцією тут розуміємо поглинання речовиною світла певної довжини хвилі і випромінювання його вже іншої (більшої) довжини хвилі. На фотоприймач (оптична система читання) попадає не відбитий зондуючий промінь, а світло, що випромінюється розміщеними в товщі диску скупченнями флуоресцентного барвника (пітами). Флуоресцентні піти можуть

Національний університет водного господарства та природокористування

бути як внесені в задані місця диску при заводському виготовленні (подібно до CD-ROM), так і утворені при фотохімічній трансформації речовини при падінні на неї лазерного променя під час запису.

Переваги флуоресцентних дисків:

1. прозорість, яка дає можливість реалізувати багатошарову систему (10-ки шарів);
2. некогерентність випромінювання, звідси відсутність інтерференційних завад;
3. зсув флуоресцентного відклику по довжині хвилі від оптичного випромінювання і мінімалізації впливу розсіяного світла;
4. можливість використання форматів сумісних з DVD.

Розроблені варіанти флуоресцентних багатошарових дисків відомі під назвами **HyperCDROM** (10-100 ТБ), **FMD** (англ.: Fluorescent Multilayer Disk), **DMD** (англ.: Digital Multilayer Disk) (22-32, потенційно – до 100 ГБ). Характеристики 12-ти шарового FMD наведені в таблиці 3 в порівнянні з характеристиками DVD.

Таблиця 3

	DVD-ROM	FMD-ROM
Інформаційна ємність, ГБ	5/9/17	50
Швидкість читання, Мб/с	10	1000
Число шарів	1/2/4	12
Крок доріжки, мкм	0,74	0,8
Довжина хвилі, мкм	0,65	0,53

Вже проходять тестування 300-шарові диски FMD з інформаційною ємністю 1 ТБ.

3.8.2. Голографічна система запису та зберігання інформації

Оптичне випромінювання може бути сфокусоване в пляму діаметром $\lambda/2$, де λ – довжина хвилі випромінювання. Це означає, що максимальна щільність інформації, записаної оптичним методом може бути порядку $4/\lambda^2$, тобто досягати 10^9 біт/см^2, що далеке від реалізації в сучасних носіях. Пошук нових можливостей збільшення

Національний університет
водного господарства
та природокористування

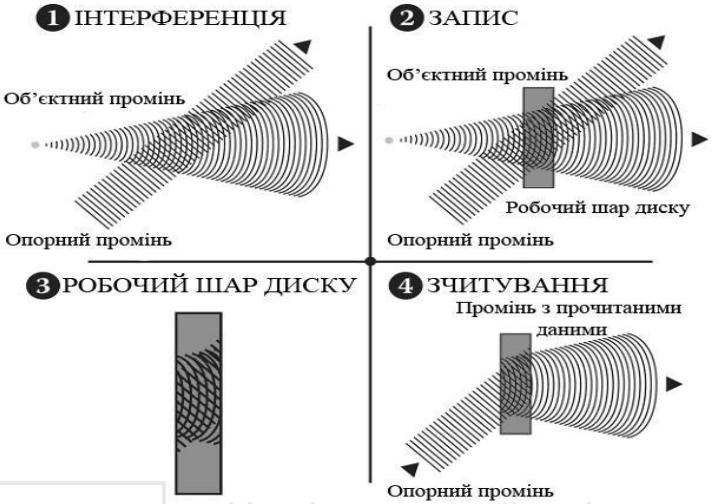


Рис. 3.20. Принцип роботи голографічної системи запису/читання

інформаційної щільності запису і швидкості вибірки інформації ведеться в багатьох напрямках, в тому числі і в області голографії, яка є найперспективнішою в плані створення високоефективних систем запису та зберігання інформації [6,7].

Голографічний принцип запису полягає в реєстрації одночасно об'єктної (яка несе інформацію про об'єкт) і опорної хвиль (див. параграф 3.1.6). При цьому в результаті накладання цих двох когерентних хвиль відбувається перетворення фазових співвідношень в амплітудну структуру інтерференційної картини. Реєстрація цієї інтерференційної картини в об'ємі фоточутливого шару голографічного оптичного диску і приводить до запису голограми (див. рис. 3.20). Зміни в матеріалі такого диску можуть бути у вигляді модуляції поглинання, показника заломлення або товщини.

Голографічна система запису та зберігання інформації на даний час реалізується в **HVD** (англ.: Holographic Versatile Disk – багатоцільовий голографічний диск). Технічні характеристики таких дисків приведені в таблиці 4.

Запис даних у HVD відбувається за наступною технологією (див. рис. 3.21).

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Таблиця 4

Об'єм, ТБ	до 1
Щільність запису, Гбіт/дюйм^2	до 515
Швидкість запису та зчитування, Мбіт/с	до 960 (сторінкою, ємність якої до 10^6 біт)
Діаметр диска, мм (дюйм)	130 (5,25)
Товщина диска, мм	3,5
в т. ч.: основи, мм	1
робочого шару, мм	1,5
захисного шару, мм	1
Довжина хвилі лазера, нм	405
Вартість диска, доларів	100 (на даний час)
Вартість привода, доларів	3000
Додаткове обладнання	захисний пластмасовий картридж

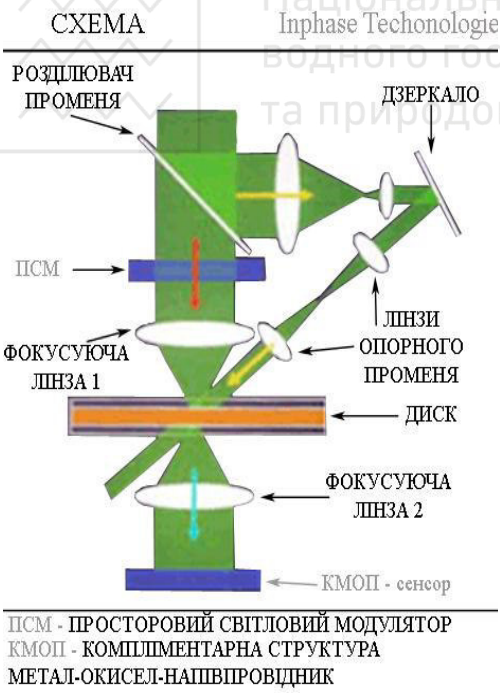


Рис. 3.21.Технологія запису на HVD

Лазерний промінь поділяється на два когерентні промені однакової поляризації за допомогою напівпрозорого дзеркала. Один із променів (об'єктний) проходить через просторовий світловий модулятор (ПСМ). В ролі ПСМ використовують цифрові мікродзеркальні модулятори, які застосовуються в відеопроекторах (див. розділ 4). ПСМ за допомогою мікродзеркал формує просторову матрицю пікселів. Ця матриця

Національний університет водного господарства та природокористування

складається з світлих (відповідають логічній „1”) і темних („0”) точок. Об’єктний промінь фокусується лінзою 1 на фоточутливому робочому шарі HVD. Другий (опорний) промінь під деяким кутом направляється в ту ж область диску, так щоб обидва промені перетнулись в товщині фоточутливого шару. Внаслідок інтерференції променів в об’ємі фоточутливого шару утворюються точки максимумів і мінімумів інтерференції. В точках максимумів амплітуди і інтенсивності променів нагрів фоточутливого шару приводить до його деструкції і зміни коефіцієнта відбивання та показника заломлення. Змінюючи довжину хвилі променя, кут його падіння і положення диску можна записувати інформацію на одну і ту ж ділянку HVD. Такий спосіб, який дозволяє зберігати багато голограм в одному і тому ж місці отримав назву *мультиплексування*. Він дозволяє значно підвищити щільність запису даних.

В якості матеріалу для робочого шару диску використовується двокомпонентна полімерна система. Один із її компонентів формує сітку, де розчинений другий світлочутливий компонент. Під дією світла він полімеризується, внаслідок чого виникає градієнт концентрації неполімеризованого компонента. Результатом його дифузії є утворення структури зі змінним коефіцієнтом відбивання, коливання якого якраз і несуть в собі записану інформацію.

Зчитування даних з голограми відбувається наступним чином:

1. Опорний промінь тієї ж довжини хвилі і спрямування, що і при запису, падає на голограму.

2. Відбиваючись від точок деструкції фоточутливого шару, промінь створює з тильної сторони диску світловий фронт, формуючи зображення трафарету, який був записаний на диск раніше.

3. Цей розсіяний фронт хвилі трафарету фокусується лінзою на масиві датчиків всією картинкою пікселів і переводиться в цифровий код.

Особливості голографічного методу запису:

1. Створення об’ємного зображення об’єкта, що не може бути реалізованим іншими методами;

2. Використання для зберігання інформації не тільки поверхні диску, а і всього об’єму, що суттєво збільшує щільність інформації;

Національний університет водного господарства та природокористування

3. Реєстрація прозорих об’єктів, в яких окремі частини відрізняються показниками заломлення або товщиною, що впливає на зміну довжини оптичного ходу;

4. Можливість отримати максимальну роздільну здатність при зчитуванні інформації з диску не тільки в поперечному напрямі, а і в поздовжньому;

5. Запис голограм об’єктів, що змінюється в часі;

6. Реалізація так званого розподіленого запису інформації, що підвищує надійність запису та зчитування.

Переваги голографічної пам’яті перед іншими видами пам’яті (в тому числі і оптичними) полягають в наступному:

1. Висока щільність запису (теоретично до 10^{12} біт/см^2). На даний час в лабораторіях отримані значення до 40 Гбіт/см^2.

2. Висока швидкість запису та зчитування (на даний час - до 10 Гбіт/с, а з врахуванням переведення інформації в електронний вигляд – до 1 Гбіт/с);

3. Паралельний запис інформації (не послідовно по одному біту, а цілими сторінками (див. рис. 3.22);

4. Висока точність відтворення сторінки;

5. Низький рівень шуму при відновленні даних;

6. Неруйнуюче читання;

Національний університет водного господарства та природокористування

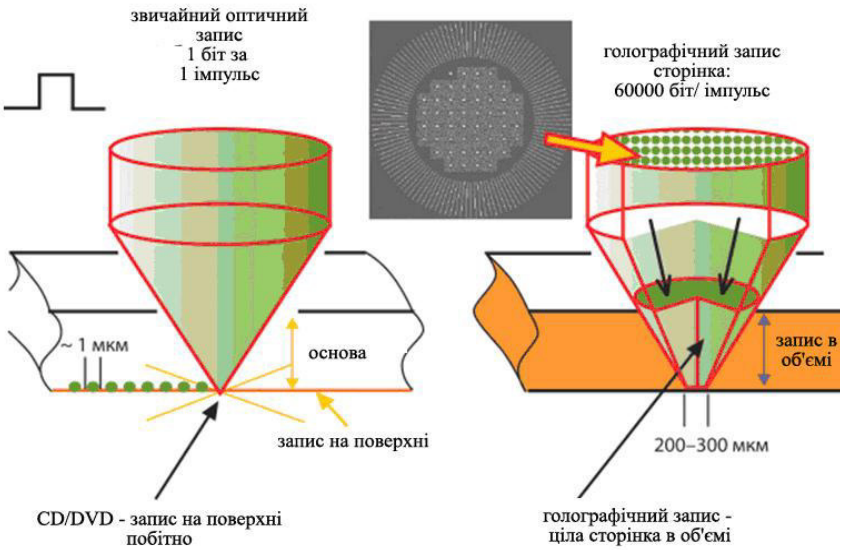


Рис. 3.22. Структура зберігання даних на CD/DVD і HVD

Національний університет
водного господарства
та природокористування

7. Довгий термін зберігання (50 років і більше).

3.9. Квантовий комп'ютер

Принцип роботи квантового комп'ютера базується на теорії сплетених станів [8].

Сплетеність (англ.: entanglement) – це особлива властивість квантових систем, яка проявляється в тому, що вони певним чином пов'язані між собою, навіть знаходячись на значній відстані одна від одної. Якщо стан однієї з систем змінюється, то одночасно змінюється і стан інших. Ця особливість дозволяє спостерігачеві визначати стан всіх сплетених систем, проводячи виміри лише для однієї з них. Вважається, що сплетеність може виявитися корисною при створенні квантових комп'ютерів - обчислювальних пристроїв, які можуть проводити набагато більше обчислень за одиницю часу, ніж звичайні комп'ютери.

На відміну від звичайних квантові комп'ютери оперують так званими **кубітами** (англ.: quantum bit або qubit) – квантовими аналогами бітів, які можуть набувати більше двох значень. Роль кубіта може виконувати атом або будь-який інший квантовий об'єкт [9].

Як у класичних, так і в квантових комп'ютерах біти або кубіти об'єднані в послідовності – регістри. Звичайний двобітовий регістр може зберігати 4 значення – логічні 00, 01, 10 або 11, але лише одне з них в даний конкретний момент часу. А в двокубітовому регістрі одночасно знаходяться всі 4 можливих значення. (Взагалі в регістрі розміром N кубітів одночасно „живуть" всі можливі 2^N значень.)

Якщо потрібно провести якусь дію над кожним з 4 можливих чисел в регістрі з 2 бітів на звичайному комп'ютері, то потрібно виконати 4 кроки послідовно, оскільки в 2 звичайних бітах в кожний момент часу записано лише 1 з 4 можливих чисел. Потрібно їх послідовно перебрати і над кожним виконати певну операцію. У квантовому комп'ютері з регістром з 2 кубітів завдання буде вирішено за один крок, адже операція проводиться відразу над всіма числами, які одночасно зберігаються в регістрі. Це називається „квантовим паралелізмом". Саме квантовий паралелізм дозволяє зробити деякі обчислення набагато ефективнішими в порівнянні з обчисленнями на класичному комп'ютері [10,11].

Національний університет
водного господарства
та природокористування

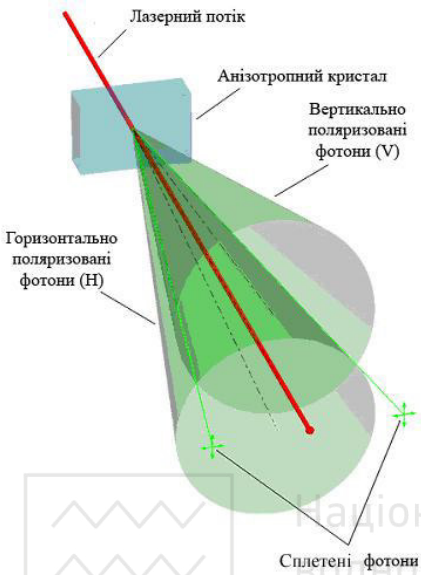


Рис. 3.23. Створення сплетених фотонів

Між кубітами квантового комп'ютера можна створити сплутаність.

Співробітники Університету Рочестера (США) продемонстрували простий експериментальний метод створення сплетених кубітів (див. рис. 3.23). У цьому експерименті ультрафіолетовий лазерний промінь падає на кристал з нелінійними оптичними властивостями (β-борат барію), який ділить ультрафіолетовий фотон на пару сплетених інфрачервоних фотонів. Кожен фотон попадає на 6 пікселів. Кожен піксел представляв один рівень стану кубіта. Рочестерськая команда фактично сплітає імпульси фотонів, це означає, що їх положення в реальному місці (координати), як показує детектор, також сплетені.

Основні роботи над апаратним забезпеченням квантового комп'ютера просуваються в наступних напрямах:

1. Створення квантового процесора;
2. Створення пристроїв для зберігання квантової інформації (квантова пам'ять);
3. Розробка квантової шини для обміну інформацією.

Слід відзначити, що це лише аналоги відповідних пристроїв класичного комп'ютера, які істотно від них відрізнятимуться.

3.9.1. Квантовий процесор

Найбільші зусилля і засоби в даний час направлені на створення квантового процесора. При його розробці необхідно, перш за все,

Національний університет водного господарства та природокористування

вибрати фізичну систему. тобто основу процесора, яка б відповідала наступним вимогам:

1. Фізична система, що є квантовим процесором, повинна містити значне число ($N > 100$) добре розпізнаваних кубітів для виконання відповідних квантових операцій;

2. Необхідно забезпечити умову для приготування вхідної комірки пам'яті (регістра) у вихідному основному базисному стані. Тобто повинна існувати можливість ініціалізації (обнуління) регістра і переведення кубітів, що реалізовуються, в початковий стан;

3. Необхідно обмежити процес спонтанної зміни квантових станів, зумовлений взаємодією системи кубітів з навколишнім середовищем, що призводить до руйнування суперпозицій квантових станів і робить неможливим виконання квантових алгоритмів. Час спонтанної зміни квантових станів повинен, принаймні, в 10^4 раз перевищувати час виконання основних квантових операцій (час такту). Для цього система кубітів повинна слабо взаємодіяти з оточенням;

4. Необхідно забезпечити за час такту виконання необхідної сукупності квантових логічних операцій, що визначає унітарне перетворення. Річ у тому, що будь-яку математичну операцію, як арифметичну (додавання, віднімання, множення, ділення тощо), так і логічну („і", „або" тощо), можна звести до обмеженого числа логічних операцій. З них основними є всього лише три: операція CNOT (контрольоване НЕ, Controlled NOT, аналог логічній функції Пірса в класичних комп'ютерах) — це двокубітна операція, а також дві однокубітні операції — операція НЕ і перетворення Адамара. Ці операції над кубітами, дозволяють реалізувати будь-яку програму для квантового комп'ютера;

5. Необхідно впливати на кожен кубіт окремо, а також мати можливість вимірювати стан квантової системи на виході, тобто при отриманні результату. Отже, вибір фізичної основи квантового процесора має бути узгоджений з досить простим пристроєм введення-виведення інформації.

В даний час ведуться роботи над наступними основними варіантами фізичної основи квантового процесора:

1. ***Використання*** в якості квантового процесора ***посудини з органічною рідиною***, де кубітами є ядра окремих атомів із спінами

Національний університет водного господарства та природокористування

1/2, пов'язаних непрямими спін-спіновими взаємодіями (розчин хлороформу $^{13}CHCl_3$ в дейтерієвому ацетоні $(CD_3)_2CO$ або 2,3-дибромотиофен $SCH:(CBr)_2:CH$). Органічна рідина в пробірці поводиться як одна молекула цієї речовини, точніше, всі молекули поводяться однаково. Таким чином, з'являється можливість застосувати до макроскопічних об'ємів рідини відпрацьованих методик і техніки ядерного магнітного резонансу (ЯМР). Індивідуальне звернення до окремих кубітів замінюється зверненням до відповідних кубітів одночасно у всіх молекулах. Логічні операції над кубітами (за допомогою радіочастотних імпульсів) і виведення результату здійснюється стандартними методами ЯМР. Комп'ютер такого роду отримав назву *ансамблевого квантового комп'ютера (*англ.: *bulk-ensemble quantum computer)*. Він може працювати при кімнатній температурі. Час самовільної зміни квантових станів ядер внаслідок взаємодії з навколишнім середовищем у такої системи складає декілька секунд, цього достатньо для проведення обчислювальних операцій. Вже реалізовано семикубітний процесор на основі органічних рідин.

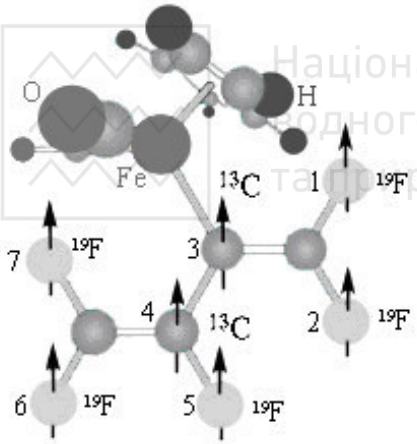


Рис. 3.24. Молекула квантового комп'ютера, синтезована на фірмі IBM

Проте, не дивлячись на всі переваги квантового процесора в „пробірці", його потенціал практично вичерпаний, оскільки вимірюваний на виході сигнал експоненціально зменшується із зростанням числа кубітів (гранична кількість10–13 кубітів). Крім такого технічного, існують і чисто фізичні обмеження. Річ у тому, що непряма спін-спінова взаємодія, яка необхідна для організації основних логічних операцій, сама по собі дуже слабка. В результаті час виконання логічних операцій виявляється надзвичайно великим, а створюваний комп'ютер має невелику швидкодію. В цьому випадку перспективнішими

Національний університет водного господарства та природокористування

виявляються твердотільні квантові комп'ютери на основі ядерного магнітного резонансу (ЯМР). Молекула такого комп'ютера (5 атомів фтору і 2 атомів вуглецю) показана на рис. 3.24. Вона створена фірмою IBM і працює як 7 - кубітний регістр. Атоми можуть знаходитись в станах „спін вверх" і „спін вниз". Управління спінами здійснюється за допомогою радіочастотних імпульсів.

Твердотільний ЯМР квантовий комп'ютер має ряд важливих переваг:

1. Ядерні спіни самі по собі є кубітами.
2. При низьких температурах вони характеризуються дуже великими часом релаксації в порівнянні з електронними спінами.
3. Технологічні структури нанометрового масштабу в напівпровідникових ЯМР квантових комп'ютерах призначені не для створення самих кубітів, як у випадку надпровідникових пристроїв, а лише для завдань управління кубітами і вимірювання їх станів.
4. Диполь-дипольна взаємодія ядерних спінів в декілька тисяч разів більша за непряму спін-спінову взаємодію.

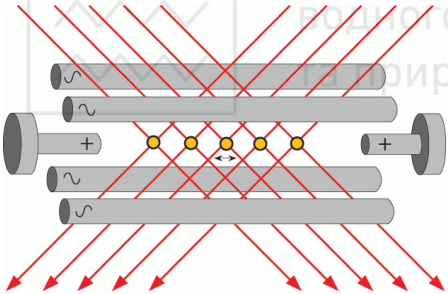


Рис. 3.25. Іонна пастка як квантовий процесор

2. ***Використання*** в якості кубітів рівнів енергії ***іонів, захоплених іонними пастками***, що створюються у вакуумі змінним електричним полем певної конфігурації в умовах лазерного охолоджування пасток до температур в декілька мікрокельвінів (див. рис. 3.25). Взаємодія між зарядженими іонами в одновимірному ланцюжку цих пасток здійснюється за допомогою збудження їх колективного руху, а індивідуальне управління ними — за допомогою лазерів інфрачервоного діапазону.

У лінійній структурі завдяки взаємному відштовхуванню іони знаходяться на відстані ~20 мкм. Кожен іон (кубіт) адресується парою лазерних променів.

Основними недоліками цього типу квантових комп'ютерів є необхідність створення наднизьких температур, забезпечення стійкості станів іонів в ланцюжку, а також обмеженість можливого

Національний університет водного господарства та природокористування

числа кубітів значенням $N < 40$. На сьогоднішній день встановлений практично повний контроль над квантовим станом одиничного іона в пастці, проводься експерименти над системи, що складаються з декількох іонів з контрольованими взаємодіями між ними.

Дія квантових логічних схем базується в даному випадку на квантовій сплутаності внутрішніх ступенів свободи іонів (електронні збудження) і колективного руху (коливального збудження) замкнутих у пастці іонів.

3. ***Використання*** в якості кубітів ***зарядових станів куперівських пар в квантових точках***. Одним з головних кандидатів на роль кубіта вважається квантова точка – обмежений фрагмент напівпровідникового матеріалу, який настільки малий, що в ньому можуть існувати квантові ефекти. Ці елементи містять єдиний додатковий електрон, що і дає можливість зберігати цілі лінійні послідовності з логічного „0” або „1”. Історично першими квантовими точками були мікрокристали селеніду кадмію CdSe. Електрон в такому мікрокристалі поводить себе як електрон в тривимірній потенціальній ямі.

Подібні квантові точки дуже нестабільні – щонайменші коливання магнітного поля, що випромінюється атомним ядром, можуть змусити кубіт втратити збережені дані. Це пов’язано з тим, що в більшості відповідних напівпровідникових матеріалів (наприклад, арсеніті іридію) відбувається сильна взаємодія вільних електронів з атомами речовини. Час життя інформації в кубіті не перевищував декількох мільярдних часток секунди. Такої нестабільності можна уникнути використовуючи лазерне випромінювання. Лазерним променем можна заблокувати вплив зовнішніх магнітних полів на квантову точку. Його дія змушує електрон підніматися на вищий енергетичний рівень, залишаючи після себе позитивно заряджену „дірку”.

„Дірка” володіє власним магнітним полем, яке врівноважує дію ядра атома і дозволяє зберігати систему надалі без зовнішнього впливу лазерного випромінювання. Лазерна стабілізація магнітного поля кубіта значно продовжує час його стабільного стану (до тисячі разів).

Передбачається, що перспективність цього напряму полягає в можливості створювати електронні квантові пристрої високого

Національний університет
водного господарства
та природокористування

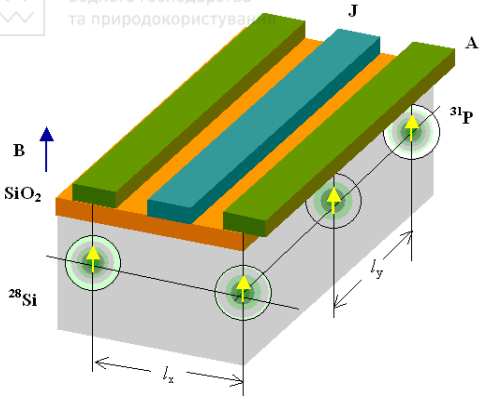


Рис. 3.26. Схематичне зображення чотирьох комірок Кейна

ступеню інтеграції на одному кристалі, при цьому для управління кубітами не будуть потрібні громіздкі лазерні або ЯМР - установки.

4. ***У напівпровідникових кристалах*** безспінового моноізотопного кристалу кремнію ^{28}Si, в якому атоми фосфору ^{31}P (кубіти) розташовані в лінійному ланцюжку (модель Кейна) на деякій відстані (близько 20 нм) від ізолятора SiO_2. На рис. 3.26 схематично зображено чотири комірки Кейна в кремнієвій матриці з ядерними спінами-кубітами донорних атомів фосфору. При температурах менших 1 К ядерні спіни мають дуже великий час (години і дні) збереження вихідних квантових станів.

Автори дослідження використовували кремній з домішками атомів фосфору. Спіни ядер домішкових атомів фосфору сплутувались із спінами електронів. Значення спінів ядер атомів і електронів виступали в ролі кубітів.

Кожнен донорний атом з ядерним спіном – кубіт в напівпровідниковій структурі розміщувався регулярним чином з достатньою точністю під “своїм” управляючим металевим затвором (затвор А), відокремленим від поверхні кремнію тонким діелектриком (наприклад, окислом кремнію завтовшки порядку декількох нанометрів). Ці затвори утворюють лінійні решітки довільної довжини з періодом l_x (l_x =20 нм).

За допомогою електричного поля, що створюється потенціалом затворів А, можна змінювати розподіл електронної густини поблизу ядра в основному стані, змінюючи резонансну частоту кожного ядерного спіну. Ця частота визначається надтонкою взаємодією ядерного спіну з електронним спіном. Таким чином, здійснюється індивідуальне управління квантовими операціями шляхом

Національний університет водного господарства та природокористування

селективної дії резонансних радіочастотних імпульсів на ядерні спіни певних донорів.

Затворами J, який розташований між затворами A, керують величиною непрямої взаємодії між ядерними спінами сусідніх донорів, яка забезпечує виконання двокубітних операцій. Це можливо, якщо характерні розміри напівпровідникової структури знаходяться в нанометровій області.

При охолоджені кремнію з домішками фосфору до температури 3 К і опроміненні радіохвилями, було досягнуто сплутування 10 мільярдів кубітів.

Розвиток цього напряму, що визнається надзвичайно перспективним, визначається швидкістю розвитку нанотехнологічних розробок, необхідних для створення структур з потрібними параметрами.

Крім вище означених і реалізованих існує також низка перспективних ідей:

1. Двомірний електронний кристал в потенціальній пастці (ямі) поблизу поверхні рідкого гелію.
2. Двомірна атомна решітка в оптичній пастці, утвореній стоячою хвилею інтерферуючих лазерних пучків.
3. Аніони в двомірному електронному газі в напівпровідниках в умовах дробового квантового ефекту Холла.
4. Квантові клітинні автомати у феромагнітних (антиферомагнітних) структурах в кристалах.

3.9.2. Квантова пам’ять

Квантові комп’ютери не можуть працювати без засобів зберігання інформації – квантової пам’яті. Вона використовується для зберігання інформації при проведенні квантових обчислень. Щоб передавати кубіти на значну відстань, можна використовувати, наприклад, окремі одиничні фотони, які відносно слабо взаємодіють з навколишнім середовищем. Фотони, як носії інформації, використовуються наприклад, в квантовій криптографії.

Зберігання світлових імпульсів у визначеному місці принципово важливе для майбутніх квантових комп’ютерів. Воно може бути реалізованим, наприклад, при пропусканні лазерних імпульсів через середовище, що ставало непрозорим під дією випромінювання

Національний університет водного господарства та природокористування

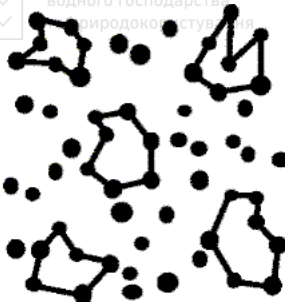


Рис. 3.27. Поширення світла, проходячи через середовище з неоднорідним показником заломлення

іншого лазера. Це дозволило значно знизити швидкість поширення у середовищі. В деяких випадках світло залишалося на місці, чекаючи відновлення відповідних умов для продовження руху. Було розроблено методику зупинки світла в газовому середовищі а також в твердому тілі — кристалі силікату ітрію, збагаченому атомами рідкоземельного елементу празеодиму.

Оскільки більшість електронних компонентів комп'ютера є твердотільними пристроями, цей метод може використовуватись при створенні квантових пристроїв зберігання інформації.

Слід зауважити, що при тривалій подорожі фотонів у середовищі, їх „правильний" стан, в якому закодований стан кубіта, може поступово деградувати. Щоб уникнути втрат інформації застосують квантові ретранслятори, які „ловлять" згасаючий сигнал, розшифровують його і знову випускають. Короткочасне зберігання і повторне випускання фотона якраз і відбувається в квантовій пам'яті.

Конструкції квантової пам'яті, що існували донедавна, передбачали роботу при дуже низьких температурах. Крім того, вони були придатні лише для вузького інтервалу довжин хвиль фотонів і утримували їх нетривалий час. У 2004 році була створена квантова пам'ять, яка функціонує при температурі близькій до кімнатної. Основним компонентом приладу є скляна посудина з парами спінполяризованих атомів цезію.

Ці атоми опромінювались певним лазером (інформація, закодована у фотонах) у результаті чого стани кубіта зберігалися в спінах електронів і ядер атомів При потребі повторне лазерне опромінювання (з іншими характеристиками) дозволяє витягти інформацію у вигляді фотонів, що генерувалися атомами цезію і передати за призначення.

Німецьким вченим нещодавно вдалося продемонструвати дивний ефект, коли світло, що йде крізь оптично неоднорідне

Національний університет водного господарства та природокористування

середовище, надовго „застряє” в ньому, потрапляючи на замкнуті орбіти руху (див. рис. 3.27.).

Для спостереження описаного ефекту потрібно приготувати таке середовище, в якому розподіл коефіцієнта заломлення був би максимально хаотичним (іншими словами, довжина вільного пробігу молекул не перевищує довжини хвилі світла). і відсутнє поглинання світла. Таким середовищем може бути, наприклад, суспензія TiO_2 (діоксид титану).Затримані фотони довго кружляли усередині зразка TiO_2 по замкнутих орбітах, перш ніж вийти з середовища. Якщо виготовити речовину з дрібнішими зернами діоксиду титану, то, можливий ефект повної локалізації світла.

3.9.3. Квантова шина

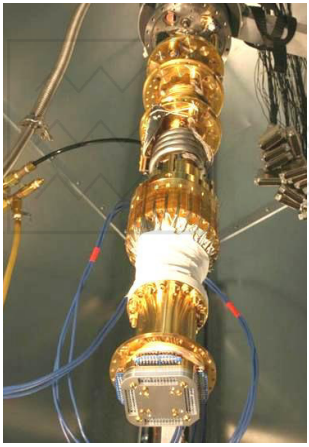


Рис. 3.28. Квантовий комп’ютер Orion компанії D-Wave на кремнієвому квантовому чіпі з 16 кубітами

Ще один необхідний пристрій для квантового комп’ютера — квантова шина для обміну інформацією. „Віртуальна шина“, по якій курсують біти інформації, може стати наріжним каменем в архітектурі квантових комп’ютерів. У працюючому комп’ютері жоден кубіт не відокремлений. Кубіти пам’яті повинні взаємодіяти один з одним, а також з блоками логіки, управління і вводу/виведення. Для полегшення зв'язку пропонують замість квантової шини „літаючі” кубіти, що курсують всередині комп’ютера і зближуються для обміну інформацією. Модель перетворення матеріальних кубітів в „літаючі”, (скоріше всього – це фотони) може бути ще одним можливим вирішенням проблеми. Проте розробка необхідного з’єднання між речовиною і фотонами, або стаціонарними і „літаючими” кубітами пов’язана з багатьма труднощами.

На думку багатьох учених, що працюють в області розробки квантового комп’ютера, результати наукових розробок наблизяться

Національний університет водного господарства та природокористування

до стадії комерційного використання приблизно у 2020 року. До цього ж часу буде досягнута межа в існуючій напівпровідниковій технології, оскільки вже зараз доріжки, по яких в процесорі поширюється електричний сигнал, мають ширину близько сотні атомів. Подальше їх звуження можливе лише до певної межі. Починають з'являтися фірми (наприклад, D-Wave), які, орієнтуючись на перспективу, планують пов'язати свою основну діяльність з квантовими комп'ютерами (див. рис. 3.28).

Бібліографічний список до розділу 3

1. Загальна фізика. Частина II. (за ред. Олексин Д. І., Орленко В. Ф.): Інтерактивний комплекс навчально-методичного забезпечення [Текст] / – Рівне: НУВГП, 2009. – 457 с.
2. Савельев И. В. Курс общей физики : В 3 т. [Текст] / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1982. – Т. 2.
3. Мюллер С. Модернизация и ремонт ПК, 17-е издание [Текст] / С. Мюллер. – М. : ООО «И. Д. Вильямс», 2008. – 1360 с.
4. Вениаминов А.В. Оптические системы записи, хранения и отображения информации. Учебное пособие. Изд.1 [Текст] / А. В. Вениаминов, В. Н. Михайлов. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2009. – 94 с.
5. Капцов Л. Н. Физика элементов ЭВМ [Текст] / Л. Н. Капцов. – М. : Из-во МГУ, 1983. – 240 с.
6. Сороко Л. М. Основы голографии и когерентной оптики [Текст] / Л. М. Сороко. – М. : Наука, 1971.
7. Новиков М.Г. Голографические диски HVD http://novikovmaxim.narod.ru/statyi/comptech/golograph/hvd.htm
8. Баргатин И. В. Запутанные квантовые состояния атомных систем [Текст] / И. В. Баргатин, Б. А. Гришанин, В. Н. Задков // УФН. – №171 (625).
9. Шимони А. Реальность квантового мира [Текст] / А. Шимони // В мире науки (Scientific American). – 1988. – № 3.
10. Бауместер Д. Физика квантовой информации [Текст]/ Д. Бауместер, А. Экерт, А. Цайлингер. – М. : Постмаркет, 2002.
11. Валиев К. А. Квантовые компьютеры и квантовые вычисления [Текст] / К. А. Валиев // УФН. – 2005. – №175 (3).

Національний університет
водного господарства
та природокористування

РОЗДІЛ 4
ПРИСТРОЇ ВИВЕДЕННЯ ТА ВВЕДЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ

Інформаційний зв'язок між користувачем і комп'ютером забезпечують пристрої виведення та введення інформації. В якості перших найчастіше використовуються монітор та принтер, в якості других – клавіатура та різноманітні маніпулятори. У перших комп'ютерів практично не було засобів індикації. Користувач мав у своєму розпорядженні набір ламп, які могли світитися, або роздруківку результатів роботи на принтері. Все змінилося з появою моніторів. **Монітор (дисплей)** – це пристрій для перетворення цифрової і (або) аналогової інформації у відеозображення. Спорідненим пристроєм монітора є **проектор** – оптико-механічний, або оптико-цифровий прилад, який за допомогою джерела світла проектує зображення об'єктів на екран [1].

Перші монітори були дуже примітивні, текст у них відображався тільки в одному, зеленому кольорі. Все ж їх поява стала важливим технологічним проривом, оскільки дала можливість вводити і виводити дані в пам'ять комп'ютера в режимі реального часу. Пізніше з'явились кольорові монітори, збільшився розмір екрану, виникли різноманітні технології їх виготовлення. Технічні характеристики сучасних моніторів можуть задовольнити найвибагливішого користувача.

Серед великої кількості технічних параметрів моніторів, мабуть, найголовнішим є ***роздільна здатність*** монітора [2]. Це лінійний розмір мінімальної деталі, яку можна розрізнити на екрані. Даний параметр характеризується кількістю елементів розкладу – ***пікселів*** (англ.: *pixel, PICture'S Element*) – по горизонталі і вертикалі екрана. Чим більша кількість пікселів, тим більш детальне зображення формується на екрані.

Розглянемо основні технології виготовлення сучасних пристроїв виведення та введення інформації, а також принцип дії, особливості, переваги і недоліки.

Національний університет водного господарства та природокористування

4.1. Пристрої виведення інформації

4.1.1. Електронно-променевий монітор, кінескоп

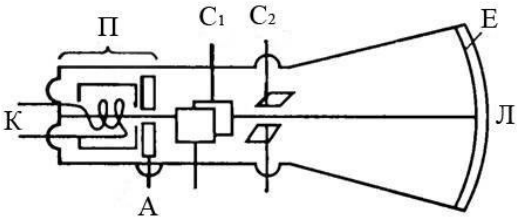


Рис. 4.1. Електронно-променевий монітор

Електронно-променевий монітор, кінескоп (англ.: CRT – Cathode Ray Tube, ЕПТ – електронно-променева трубка). Принцип роботи цього монітора базується на *технології емісії електронів*. Отримуючи сигнал від керуючих систем комп'ютера (див. рис. 4.1), монітор електронно-променевою гарматою **П** випускає потік електронів з катода **К** через отвір в аноді **А** на екран **Е**, який складається з „тіньової маски" (для кольорових моніторів) і скляної пластини з люмінесцентним покриттям (люмінофор) **Л**. На екрані створюється зображення. Керує потоком електронів система відхилення $\mathbf{C_1}$ і $\mathbf{C_2}$, яка за допомогою електромагнітного поля змінює напрямок руху потоку електронів. Цей потік, проходячи через тіньову маску, попадає на люмінофор. Люмінофор – речовина, атоми якої випромінюють світлові промені видимого діапазону при бомбардуванні її зарядженими частинками.

Отже, ЕПТ мають наступні основні елементи:

1. Електронна гармата (для чорно-білих моніторів – одна, для кольорових – три);
2. Система відхилення, тобто набір електронних „лінз" для формування пучка електронів;
3. Тіньова маска, яка забезпечує точне попадання електронів від певної гармати в необхідну точку екрану;
4. Шар люмінофору, який формує зображення при попаданні електронів на екран.

В свою чергу електронна гармата складається із підігрівача, катода, що емітує потік електронів, і модулятора, що прискорює і фокусує пучок електронів.

Переваги: висока швидкодія оновлення зображення.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

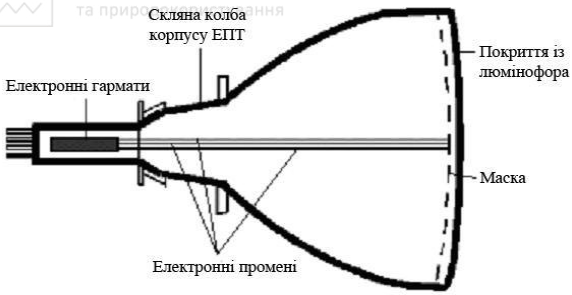


Рис. 4.2. Кольоровий електронно-променевий монітор

Недоліки: високе енергоспоживання і тепловиділення, складність отримання „ідеальної” геометрії картинки.

До недавнього часу CRT були найпоширенішими серед моніторів. Зараз їх майже витіснили рідкокристалічні монітори, крім сфери дизайну і поліграфії, де вони здали ще не всі позиції.

У **кольорових CRT** основним елементом є три електронні гармати, які формують зображення, кожна з яких відповідає за одну із складових кольору – червону, синю, або зелену (див. рис. 4.2).

Переваги: можливість якісної передачі кольору, висока роздільна здатність, достатня контрастність.

Недоліки: велика вага, складність монтажу і настроювання.

4.1.2. Монітори електростатичної емісії

Монітори електростатичної емісії (англ.: FED - Field Emission Display – дисплей на основі ефекту польової емісії електронів, з

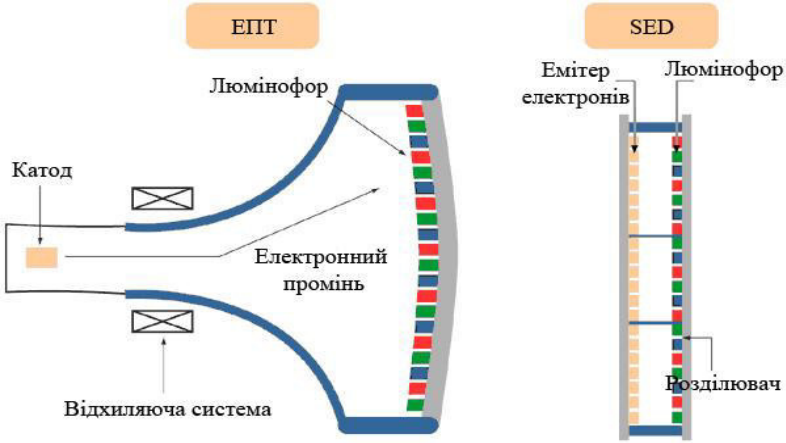


Рис. 4.3. SED - монітор

Національний університет водного господарства та природокористування

люмінофором). Технологія FED подібна до CRT, тому що в обох випадках застосовується люмінофор. Відмінність полягає у тому, що у FED - екранах не застосовуються електронні гармати. Натомість використовується велика кількість маленьких джерел електронів, розміщених за кожним елементом екрану. Кожне джерело електронів керується окремим електронним пристроєм і кожний піксел може світитися завдяки дії електронів на люмінофор.

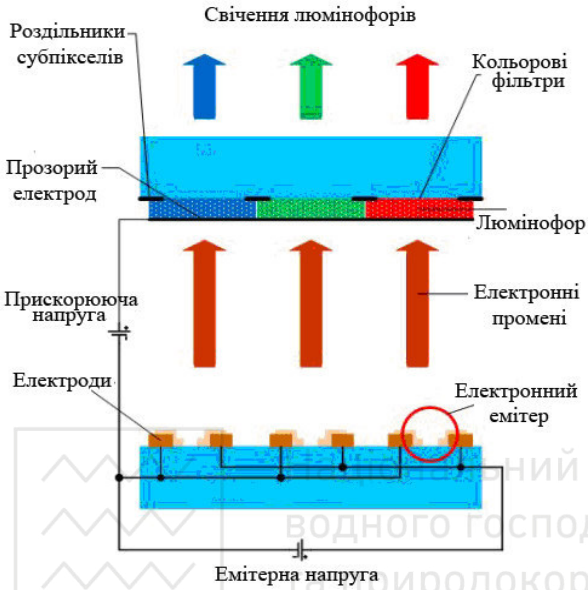


Рис. 4.4. Принцип роботи піксела SED - панелі

Один із варіантів FED – **технологія SED** (англ.: Surface-conduction Emission Display – дисплей з люмінофором на основі ефекту емісії електронів з поверхневою провідністю).

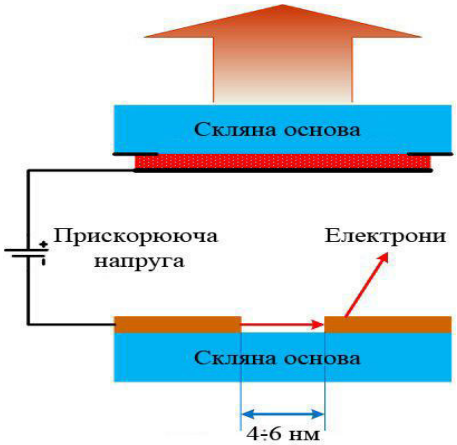


Рис. 4.5. Принцип роботи субпіксела SED - панелі

В основу технології SED покладено дві

Національний університет водного господарства та природокористування

базові ідеї:

1. Замість трьох катодів CRT для трьох кольорів використовується індивідуальний катод для кожного субпіксела. При цьому не використовується схема розгортки – найбільш енергоспоживаючий вузол CRT;
2. Замість теплової емісії електронів використовується емісія за рахунок тунельного ефекту.

Джерелом електронів в SED – панелі на відміну від ЕПТ є плоскі мікроскопічні точки оксиду паладію, нанесені на електродну матрицю на задній скляній стінці (див. рис. 4.3).

Дисплей утворюють дві скляні панелі, між якими знаходиться вакуум. На переднє скло нанесені розділені між собою точки люмінофора трьох основних кольорів. Невелика керуюча постійна напруга прикладається між половинками електронного емітера, відстань між якими складає 4-6 нм. Внаслідок тунельного ефекту відбувається емісія електронів з емітера. Прискорююча напруга забезпечує попадання електронів на люмінофор. Принцип роботи піксела SED - панелі показаний на рис. 4.4, а субпіксела – на рис. 4.5.

Переваги: невелике енергоспоживання, висока контрастність, широкий кут спостереження, висока швидкодія, хороша передача кольору.

4.1.3. Монітори на основі вуглецевих нанотрубок

Вуглецеві нанотрубки (англ.: CNT – Carbon NanoTubes (CNT-FED), BHT).

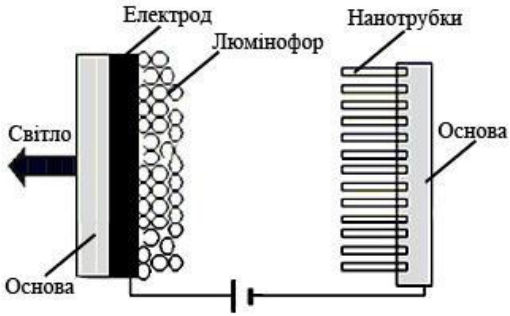


Рис. 4.6. Монітор на основі нанотрубок

Принцип дії: в якості катодів використовуються вуглецеві нанотрубки. Відомо, що вони є ефективними джерелами холодної польової емісії електронів. На рис 4.6 показана принципова схема монітора з катодом на

основі ВНТ і аноду з люмінофором на основі оксиду цинку. Міжелектродна відстань складає близько 0,6 мм. Під дією прикладеної напруги з кінців ВНТ випускаються електрони, які рухаються в напрямку люмінофора і викликають свічення піксела. Отримане таким чином зерно зображення становить близько 1 мкм. При напрузі 1,7 кВ струм емісії складає 10 мА.

Переваги: можливість розміщувати нанотрубки безпосередньо на основі при контрольованих відстанях, розмірах і довжині гарантує високу якість зображення при оптимальному рівні емісії електронів; малий час відгуку; широкий кут спостереження; високоякісна передача кольору; тривалий час функціонування дисплеїв.

4.1.4. Електролюмінісцентні екрани

Принцип дії електролюмінісцентних екранів (англ.: EL – ElectroLuminescent) базується на прикладанні електричного поля до багатошарової структури з двох електродів (напівпрозорого і алюмінієвого), двох шарів діелектрика, між якими знаходиться порошковий люмінофор (ZnS:Mn). На такий конденсатор подається змінна напруга звукової частоти, яка за величиною близька до напруги пробою. На поверхні частинок люмінофора під дією змінної напруги концентрується сильне електричне поле, яке прискорює вільні електрони, здатні іонізувати атоми. Утворені дірки захоплюються центрами люмінесценції, на яких при зміні напрямку поля рекомбінують електрони. Цей процес

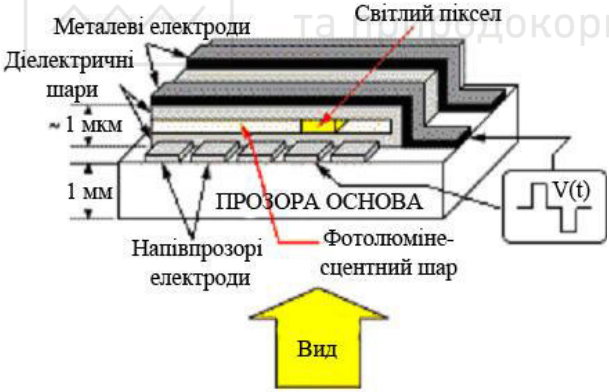


Рис. 4.7. Будова EL – панелі

Національний університет водного господарства та природокористування

супроводжується випромінюванням світла. Принципова схема EL - панелі показана на рис. 4.7.

Переваги: хороша роздільна здатність, контрастність, великі кути спостереження (більше 160 градусів), невелике енергоспоживання, малий час відгуку пікселів (1 мс).

Недоліки: кольори не такі чисті як у рідкокристалічних (РК) - моніторів, зображення на яскравому світлі тьмяніє.

4.1.5. Плазмові монітори

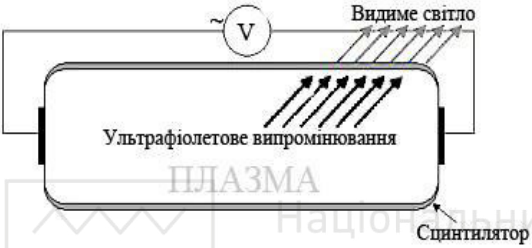


Рис. 4.8. Будова субпіксела плазмової панелі

Принцип дії плазмових моніторів (англ.: PDP – Plasma Display Panel, ПМ) базується на свіченні люмінофора під дією ультрафіолетового випромінювання, яке виникає після плазмового розряду. Кожний субпіксел PDP – панелі є флуоресцентною мініампулою (200 мкм х 200 мкм х 100 мкм), яка може випромінювати світло тільки однієї довжини хвилі (див. рис. 4.8). Це забезпечується покриттям поверхонь ламп трьома видами люмінофора. На таку лампу з інертним газом (ксеноном або

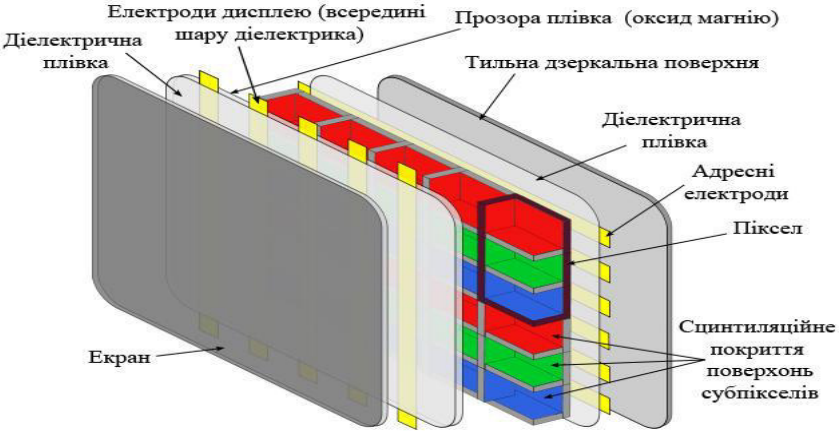


Рис. 4.9. Принципова схема PDP-екрана

Національний університет водного господарства та природокористування

неоном), що знаходиться між прозорими хромо-мідними електродами, подається висока напруга, яка викликає плазмовий розряд. Відбувається розпад інертного газу на позитивнозаряджені іони і електрони, які під дією прикладеної напруги рухаються до катода і анода відповідно. Під час руху електрони збуджують нейтральні атоми газу, які випромінюють хвилі ультрафіолетового діапазону. Ультрафіолетове випромінювання, попадаючи на основу піксела, покриту люмінофором, викликає свічення останнього у видимому діапазоні хвиль. На поверхню кожного піксела нанесений свій люмінофор для отримання світла певного кольору. Величиною керуючої напруги регулюється яскравість свічення піксела. Принципова схема PDP - екрана представлена на рис. 4.9.

Переваги: великі кути спостереження, висока яскравість і контрастність, мала товщина.

Недоліки: велике енергоспоживання, відносно великий розмір піксела не дає можливості добитись високої роздільної здатності, високі вимоги до якості матеріалів.

Національний університет водного господарства та природокористування

4.1.6. Рідкокристалічні монітори

Головним елементом рідкокристалічних моніторів (англ.: LCD – Liquid Crystal Display, РК) є молекули цианофенілу – речовини, яка знаходиться в рідкому стані, але має властивості кристалічних тіл. Зокрема вона має властивість поляризувати світло [3,4].

LCD - екран має декілька шарів, серед яких важливу роль відіграють дві панелі, виготовлені з вільного від натрію і дуже чистого скляного матеріалу (називають субстратом або основою), між якими власне і знаходиться тонкий шар рідких кристалів (див. рис. 4.10).

Рідкі кристали складаються із видовжених молекул. Міжмолекулярна взаємодія забезпечує в певному інтервалі температур паралельну орієнтацію молекул, наслідок чого в рідині утворюється виділений напрямок. Впорядкування орієнтації молекул поширюється на далекі віддалі. Здебільшого орієнтація молекул в рідкому кристалі задається їхнім напрямком на поверхні. Оскільки, на панелях основи є борозни, то вони направляють молекули рідкого кристалу, надаючи їм певної орієнтації. Борозни двох панелей основи перпендикулярні між собою. Неполяризоване

Національний університет
водного господарства
та природокористування

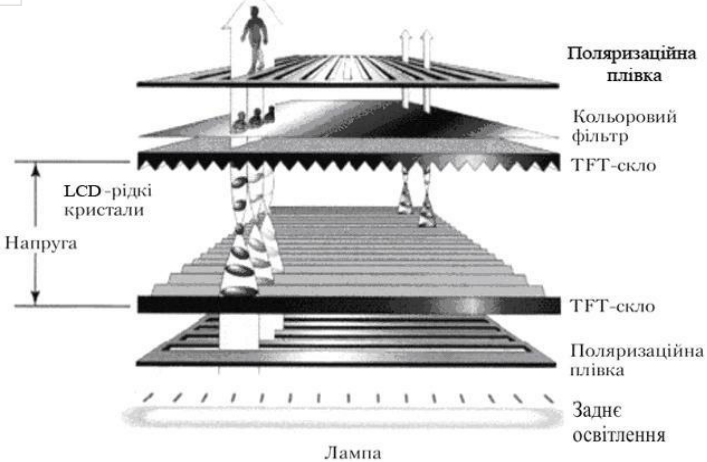


Рис. 4.10. Будова LCD – екрана

світло від неонової лампи підсвічення заднього (або бокового) освітлення, проходячи через поляризатор (плівку) потрапляє на перше скло основи поляризованим. За відсутності напруги між двома прозорими електродами (знаходяться на поверхнях пластин субпіксела) рідкі кристали повертають площину поляризації світла на 90 градусів, внаслідок чого воно проходить через скло другої основи, кольоровий фільтр і вихідний поляризаційний фільтр не послаблюючись. Подача напруги між електродами приводить до повороту осей РК. Відбувається так званий **перехід Фредерікса** — явище переорієнтації молекул рідкого кристалу під дією електричного поля. У матеріалах із позитивною діелектричною анізотропією молекули намагатимуться повернутись вздовж напрямку електричного поля. У матеріалі з негативною діелектричною анізотропією — впоперек напрямку поля. Кут повороту при цьому залежатиме від напруги. Характерною особливістю рідких кристалів є те, що молекули переорієнтуються при дуже малому полі - достатньо напруги в декілька мілівольтів.

Отже, напруга, в залежності від величини, може змінювати орієнтацію головних осей РК - молекул, регулюючи інтенсивність світла на виході з другого поляризатора завдяки повороту площини поляризації світла. Регулювання електричної напруги між електродами субпіксела здійснює управляючий транзистор,

Національний університет водного господарства та природокористування

найчастіше це – тонкоплівковий польовий транзистор TFT (англ.: Thin Film Transistor), на базі напівкристалічного кремнію.

Переваги: мале енергоспоживання, малі маса і товщина.

Недоліки: не дуже великий кут спостереження, великий час відгуку, низька контрастність.

Порівняльні характеристики LCD, PDP і CRT представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Параметр	РК (LCD)	Плазма (PDP)	Кінескоп (CRT)
Принцип роботи	Управління світлом лампи підсвічування, яке проходить через шар рідких кристалів за рахунок зміни ними площини поляризації	Свічення люмінофора екрану під дією ультрафіолетових променів при розряді в плазмі	Свічення люмінофора екрану під дією електронного променя, який формується електронною гарматою
Ресурс роботи	60000 год. – лампа підсвічування; 250000 год. – робота екрану	25000 год.	25000 год.
Яскравість	від 170 до 500 cd/m^2 (кандела/м^2)	від 300 до 1000 cd/m^2	від 80 до 300 cd/m^2
Контрастність	від 150:1 до 600:1	від 200:1 до 3000:1	від 350:1 до 750:1
Кут огляду	від 10° до 170°	близький до 180°	близький до 180°
Час реакції піксела	від 15 до 50 мс	не помітно оку	не помітно оку

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Продовження табл. 1

Дефекти екрану	допускаються	допускаються	ні
Якість фокусування	ідеальна	ідеальна	від задовільного до дуже доброго
Геометричні викривлення	ні	ні	можливі
Можливі роздільні здатності	встановлені	встановлені	різні
Однорідність свічення	незначно яскравіше по краям	рівномірне	незначно яскравіше в центрі
Вплив магнітних полів	ні	ні	Так
Температура корпусу під час роботи	незначна	висока	середня
Потужність, яка використовується	мала	велика	середня
Ціна для великих розмірів екрану	найбільша	висока, але менша РК	дешевша РК та плазми
Вага та габарити	менші плазми та кінескопа	більші РК та менші кінескопа	найбільші

Національний університет
водного господарства
та природокористування

4.1.7. LCD – проектори

Як варіант РК - монітора використовують **LCD - проектори**, які використовують LCD - матриці на просвітлення, як плівку в

кіноапараті і **LCOS - проектори,** що використовують LCD - матриці на непрозорій кремнієвій основі на відбиття світла.

4.1.8. Світлодіодні екрани

Принцип дії світлодіодних екранів (англ.: LED – Light Emitted Diod): екран є матрицею пікселів, зібраних із трьох напівпровідникових світлодіодів, що формують три світлових потоки (червоний, зелений, синій). Як правило, кристали світлодіодів знаходяться в одному корпусі з лінзою, яка фокусує світловий потік.

Переваги: низьке і ефективне енергоспоживання, механічна міцність, надійність, великий кут спостереження (до 160 градусів), висока швидкодія, волого - і пилостійкість.

4.1.9. Дисплеї на органічних світлодіодах

Принцип роботи дисплеїв на органічних світлодіодах (англ.: OLED – Organic Light Emitting Diode/Organic Light Emitting Display) базується на властивостях світловипромінювальних полімерів, які складаються з декількох шарів наноплівок. Основою для провідних електролюмінісцентних полімерів цих матеріалів є високомолекулярні сполуки, в яких чергуються подвійні зв'язки. Для звільнення електронів застосовуються різноманітні суміші, що створюють можливість переміщення електронів і дірок вздовж молекулярного ланцюга. Такі матеріали мають всі властивості неорганічних напівпровідників, тобто утворювати p-n - перехід і, за певних умов, випромінювати світло. Перевагою над неорганічними напівпровідникам и технології OLED є можливість в

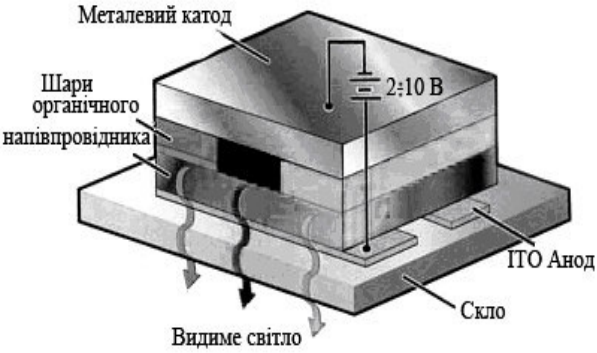


Рис. 4.11. Будова OLED - екрана

Національний університет водного господарства та природокористування

широких межах змінювати спектр випромінювання (видимий діапазон) шляхом зміни структури органічних молекул. OLED - екран – це матриця трикоміркових пікселів. В залежності від того, який колір потрібно отримати, регулюється напруга на кожному із субпікселів, і в результаті змішування кольорів отримується необхідний колір. Структура OLED - екрана багатошарова (див. рис. 4.11). Позаду панелі знаходиться металевий катод, попереду – анод (сітка із прозорого провідного матеріалу індій-оксид олова – ITO). Між ними знаходиться декілька органічних шарів світлодіода. Один шар – p- типу (див. рис. 4.12), другий є напівпровідниковим каналом дірок, у третьому відбувається заміщення дірок електронами, яке в даних полімерах супроводжується світловим випромінюваннях, четвертий є напівпровідниковим каналом електронів, п'ятий – n- типу. Катод виготовлений з тонкого

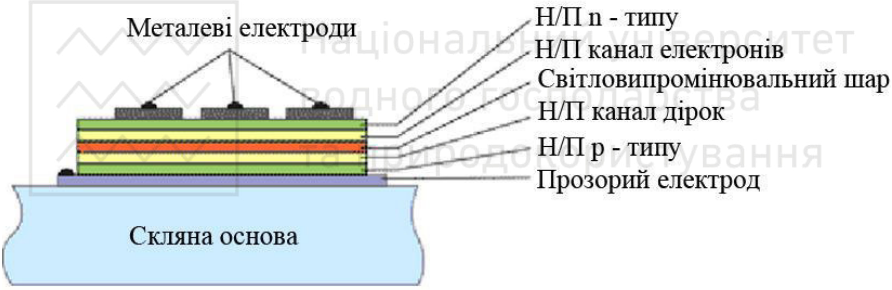


Рис. 4.12. Структура OLED - екрана

металевого сплаву з малою роботою виходу (алюміній покритий фторидом літію).

Управління OLED - матрицею відбувається аналогічно LCD - матриці за допомогою TFT - транзистора.

В якості основи екрану можна використовувати гнучкий прозорий пластик, що дозволяє створювати гнучкі екрани. При створенні OLED - екранів застосовуються два види органічних сполук: макромолекули і полімери. Першими з'явились OLED - дисплеї на основі макромолекул, проте технологія виготовлення була занадто дорогою (застосовувалось вакуумне напилювання).

Перші полімерні дисплеї були створені у 1989 році на основі синтезованого полімера – поліфеніленвінілена. Дисплеї цього типу можуть бути отримані шляхом нанесення полімерного матеріалу на

Національний університет водного господарства та природокористування

основу спеціальним струменевим принтером. Основа може бути гнучкою з радіусом вигину менше 1 см.

Переваги: низьке енергоспоживання, відсутність додаткової підсвітки екрану, висока контрастність і частота регенерації зображення, великі кути спостереження, малий час відгуку, робоча напруга – всього декілька вольт, малі маса і товщина, можливість створення гнучких екранів, невисока вартість при масовому виробництві.

4.2. Проектори

4.2.1. Мікроелектромеханічні системи

Мікроелектромеханічні системи (англ.: MEMS Micro Electromechanical System).

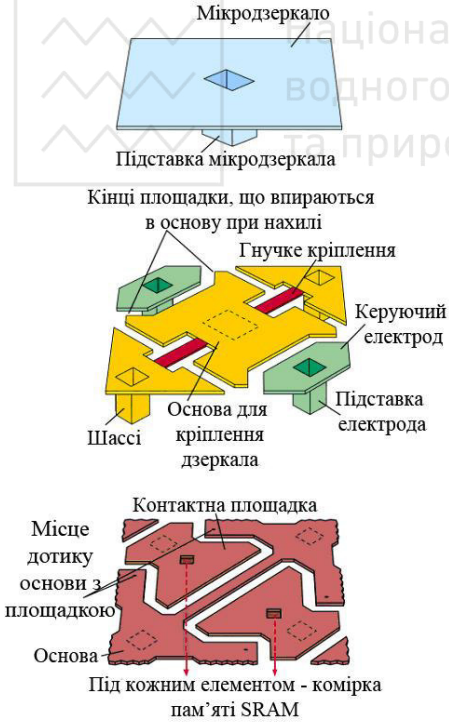


Рис. 4.13. DMD – матриця проектора

4.2.1.1. Мікродзеркальні проектори

Мікродзеркальний проектор (англ.: DLP - Digital Light Processing – цифрова обробка світла). Основою даних відеопроекторів є DMD - матриця (англ.: Digital Micromirror Device), яка складається з мікродзеркал, Матриця послідовно освітлюється трьома основними кольорами і працює на відбивання світла. DMD - матриця – це кремнієва пластина, розміром близько 1см^2, з розміщеними на поверхні елементами для відбивання світла. Кожен такий елемент (алюмінієве дзеркало

розміром приблизно 10 мкм^2) під управлінням електронної схеми може займати два фіксованих положення. В одному – світло направляється на екран для створення зображення, в іншому – на світлопоглинач. Дзеркало знаходиться на відносно масивній основі, яка, в свою чергу, знаходиться на гнучкій, натягнутій між опорами, смужці-підвісі. В двох інших кутах основи (не зайнятих опорами) знаходяться електроди, які за рахунок кулонівських сил можуть притягувати один край дзеркала, нахиляючи його на кут до 12 градусів (див. рис. 4.13).

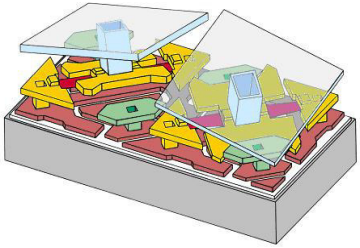


Рис. 4.14. Коливання мікродзеркал проектора

Положення дзеркал відповідає темному і світлому пікселам. На рис. 4.14 показано положення одного дзеркала в „темному”, а іншого в „світлому” станах. Щоб добавити відтінки сірого кольору, дзеркала примушують коливатись з різними частотами. Це дозволяє досягти 1024 градації сірого кольору .

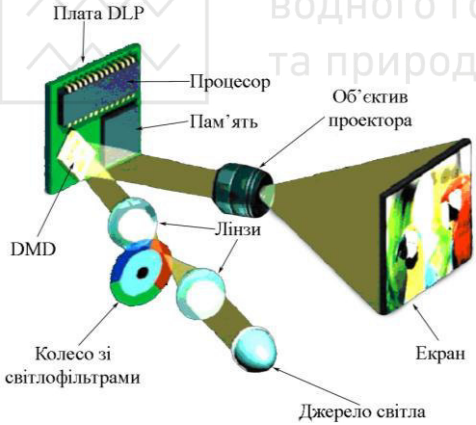


Рис. 4.15. Схема створення зображення проектором

Для забезпечення кольорового зображення на DMD - матрицю направляється біле світло через колесо кольорових світлофільтрів, яке обертається (див. рис. 4.15).

Переваги: компактність, якісне відтворення чорних відтінків.

Недоліки: мала насиченість кольорового зображення.

Національний університет водного господарства та природокористування

4.2.1.2. Проектори на основі технології ТМА

Як модифікація мікродзеркальних проекторів існують проектори, в яких застосовується **технологія ТМА** (англ.: Thin film Micromirror Array – масив тонкоплівкових мікродзеркал). У ній відхилення дзеркал здійснюється не електростатичним, а п’єзоелектричним способом.

4.2.1.3. Проектори на основі GLV - технології

GLV - технологія (англ.: Grating Light Valve – мікромеханічна фазова решітка).

Головним елементом оптичного шляху GLV - технології є кремнієвий чіп, з закріпленими на ньому паралельними стрічками з нітриду кремнію, які покриті світловідбиваючим шаром алюмінію. Кожна стрічка має довжину 100 мм, ширину – 3 мм і товщину 3 фм. Стрічки знаходяться над чіпом на висоті 650 нм. У вимкненому стані всі стрічки одного чіпа знаходяться в одній площині, утворюючи одну суцільну дзеркальну поверхню. Вони відбивають направлений на них плоский пучок когерентного світла на екран у вигляді однієї білої смужки. Отримуючи заряд від керуючого пристрою стрічки з парними номерами деформуються і притягуються до протилежно зарядженої основи, а стрічки з непарними номерами не деформуються, оскільки електрично з’єднані з основою (див. рис. 4.16). При деформації парних стрічок на чверть довжини хвилі, відбите від поверхонь когерентне випромінювання буде зазнавати інтерференції, причому буде виконуватись умова мінімуму

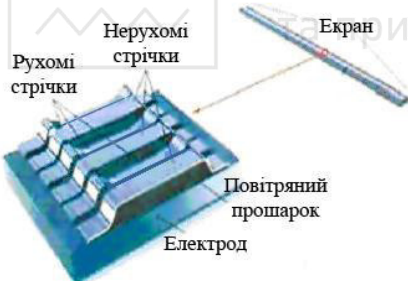


Рис. 4.16. Мікромеханічна фазова решітка

Рис. 4.17. Чіп GLV – технології

Національний університет водного господарства та природокористування

для інтерференції у відбитому світлі. На екрані буде спостерігатись темна смужка. На рис. 4.17 показаний чіп, який формує один темний піксел. Вибіркове керування зарядами стрічок дає можливість встановлювати бажану яскравість кожного окремого піксела.

Переваги: довговічність, висока швидкість, відсутність зернистості зображення.

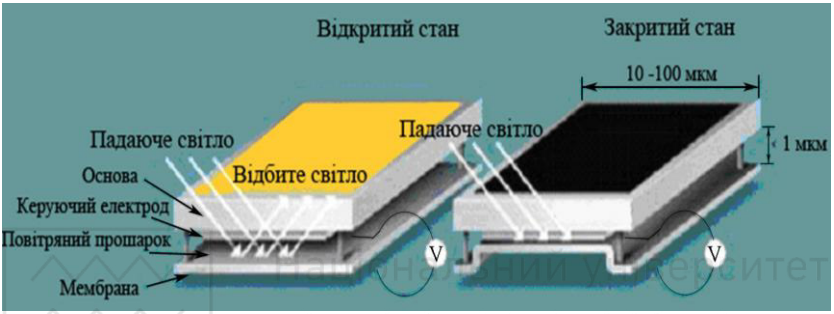


Рис. 4.18. Піксел IMOD – матриці

Національний університет водного господарства та природокористування

4.2.1.4. Проектори на основі технології IMOD

Технологія IMOD (англ.: Reflective Interferometric Modulation – відбиваючий інтерференційної модулятор). Кожний піксел IMOD - матриці є інтерференційним модулятором. Він складається з двох елементів: напівпрозорої плівки на скляній основі і розміщеній під нею відбиваючої мембрани, яка може знаходитись в двох станах: відкритому і закритому. В вимкненому стані мембрана дотикаючись до плівки повністю закриває піксел. При подачі напруги мембрана зміщується на задану відстань від основи і між плівкою і мембраною утворюється невеликий прошарок повітря. Світло, відбите від мембрани проходить назад через плівку, інтерферуючи з падаючим. Змінюючи товщину повітряного прошарку можна формувати будь-який колір піксела. Чорний колір формується при закритому стані елемента (див. рис. 4.18).

Переваги: довговічність, мале енергоспоживання, висока швидкість, відсутність зернистості зображення.

Національний університет водного господарства та природокористування

4.3. Електронний папір

Електронний папір (англ.: electronic ink display, EID, електронне чорнило) на відміну від моніторів не випромінює світло, а формує зображення у відбитому світлі (так само як у друкованих виданнях).

Вперше таку технологію (**технологія E-Ink**) було застосовано у 1997 році в Масачусетському технологічному інституті. Головним

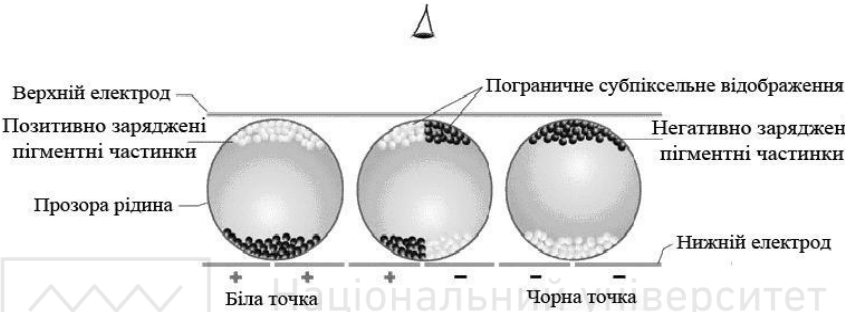


Рис. 4.19. Піксели електронного паперу

елементом електронного паперу є мікрокапсули розміром до 0,1 мм, в яких знаходиться деяка кількість частинок пігменту двох кольорів (див. рис. 4.19). Білі частинки (двоокис титану) заряджені позитивно, а чорні (фарба) – негативно. Частинки пігменту вільно плавають в рідині. Такі мікрогранули знаходяться між двома електродами, прозорим верхнім і непрозорим нижнім. При прикладенні до електродів відповідної напруги, одні частинки пігменту можуть підніматись всередині мікрокапсули, а інші опускатись і навпаки. Керуючи зміною полярності можна формувати написи і малюнки чорного кольору на поверхні електронного паперу (див рис.4.20.). Завдяки силам міжмолекулярної взаємодії, а

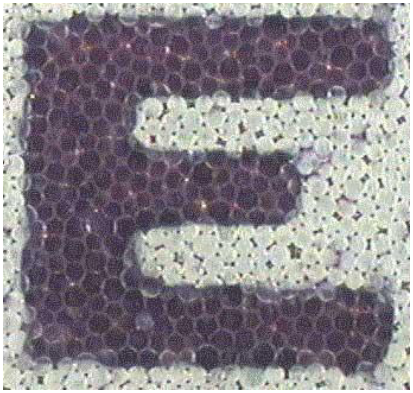


Рис. 4.20. Зображення на електронному папері

Національний університет водного господарства та природокористування

також силам електростатичного притягання і відштовхування часточки суспензії не можуть змінити своє положення в мікрокапсулах. Це означає, що сформовані на поверхні паперу зображення зберігаються і при відсутності електроживлення.

Переваги:

1. Велика стабільність частинок пігменту в мікрокапсулах (зображення може зберігатись декілька тижнів);
2. Мале енергоспоживання;
3. Мала вага;
4. Мала товщина (частини міліметра);
5. Велика ударостійкість;
6. Гнучкість (в робочому стані може бути скрученим в трубку діаметром до 1,5 см без втрати якості зображення);
7. Великий кут огляду (близько 180 градусів);
8. Довговічність;
9. Дешевизна при масовому виробництві.

Недоліки:

1. Інерційність (близько 250 мс, що відповідає зміні приблизно 4 кадрів в секунду);
2. Неможливість зображення великої кількості відтінків сірого кольору (до восьми).

3. Якщо використовувати EID в якості дисплея, то його яскравість, контраст і світлопередача дуже залежить від умов зовнішнього освітлення (як і у звичайного паперу).

4.3.1. Електронний папір на основі технології Gyricon

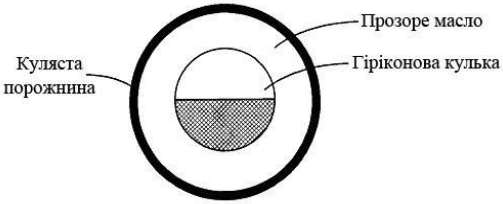


Рис. 4.21. Кулька зображення в технології Gyricon

Як різновид технології E-Ink можна виділити **технологію Gyricon** розроблену ще у 1970 році Н. Шеридоном (США).

Сторінкою „паперу” Gyricon є прозорий лист пластика, запаяного зі всіх сторін, з масивом декількох мільйонів

Національний університет водного господарства та природокористування

кулястих порожнин всередині. Кожна порожнина заповнена рідиною з консистенцією рідкого масла, в якій вільно плаває, на відміну від технології E-Ink, лише одна двокольорова кулька діаметром від 20 до 100 мкм. Одна сторона кульки темна, інша – світла (колір не важливий, головне – досягти контрастності) (див. рис. 4.21). Кожна із половинок кулі заряджена різнополярним зарядом. Керуючи потенціалами на електродах, кульку можна повернути до поверхні екрана світлою, або темною стороною і сформувати контрастну картинку (див. рис. 4.22).

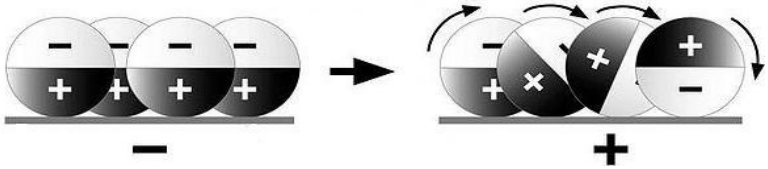


Рис. 4.22. Формування зображення за допомогою технології Gyricon

Національний університет водного господарства та природокористування

4.3.2. Електронний папір на основі технології електрозмочування

Ще одна технологія електронного паперу – технологія електрозмочування (англ.: electrowetting). Інша назва – **технологія HEOS.** Вона з'явилася у 2003 році. Ефект „електричного змочування" базується на керуванні краплиною масляної фарби, яка знаходиться в мікрокапсулі, заповненій водою (див. рис. 4.23). Кожна з мікрокапсул є одним пікселем електронного паперу. В звичайних умовах краплина масла розтікається по всій поверхні комірки, утворюючи під дією сил поверхневого натягу плівку на воді. Якщо створити між електродами
електричне поле достатньої величини, масло почне збиратись в краплину, звільняючи при цьому більшу частину поверхні. Основа-електрод виготовляється з водовідштовхуючого матеріалу, тому масло прилипає до неї, а після зникнення напруги, знову розтікається по поверхні. Мікрокапсули розділені перегородками товщиною близько 5 мкм, а зверху вся конструкція герметично закрита шаром скла з напиленим на нього електродом (поки що це одна з причин жорсткості дисплея).

Національний університет водного господарства та природокористування

Малий розмір піксела дозволяє отримати високі контрастність і яскравість елементів, які перемикаються. Час перемикання між білим і кольоровим пікселами (швидкодія) становить приблизно 12 мс, тому такий „папір” можна застосовувати для відеозображень. Товщина і енерго-споживання таких дисплеїв також невеликі. Таким чином, технологія електрозмочування дозволяє створювати повноцінні дисплеї високої яскравості (у чотири рази вищої ніж у РК - дисплеїв відбивного типу і в два рази – ніж у нових дисплеїв на застосуванні інших фізичних принципів).

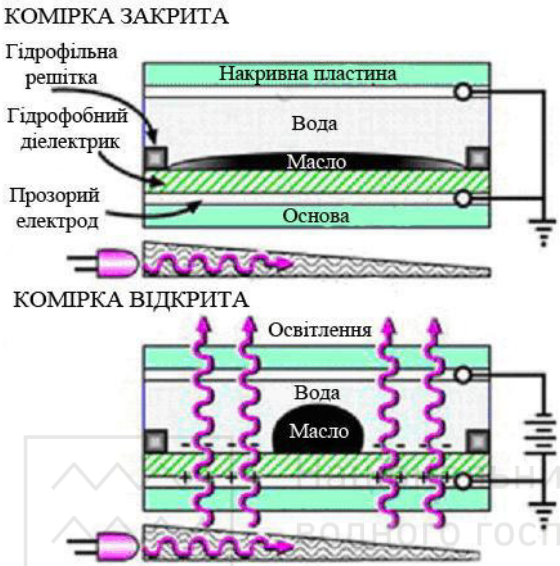


Рис. 4.23. Електронний папір на основі технології HEOS

Існує декілька модифікацій реалізації мікрокапсули. Одна з них зображена на рис. 4.23 – з підсвіченою прозорою основою.

Такі дисплеї використовуються в mp-3 плеєрах, телефонах, DVD- плеєрах, GPS - приймачах та інших подібних пристроях.

4.3.3. Електронний папір на основі нанотехнологій

Ця технологія запропонована ірландською компанією Ntera, яка представляє свій продукт під назвою NanoChromics Display (NCD). Зображення, яке формується на дисплеї, подібне малюнку чорнилом на папері. Кут огляду для даного екрану складає 180 градусів, а швидкість відгуку може забезпечити частоту 60 кадрів за секунду. Енергоживлення NCD - екрана складає лише 10% від живлення РК - дисплея такого ж розміру. Робоча напруга NCD не перевищує 1В.

Для відображення висококонтрастної картинки на дисплеї використовують властивість електрохромних провідних полімерних з'єднань змінювати свої оптичні характеристики (в тому числі і колір) при зміні рівня окислення. Якщо цей рівень регулюється потенціалом електрода, на який нанесений цей полімер, то оптичними характеристиками полімеру можна керувати за допомогою електричного сигналу (електрохромний ефект). В NCD - екранах на тонкий шар наночастинок діоксиду титану (хімічна сполука, яка надає паперу білого кольору) наноситься прозорий полімер – віологен з нанопористою структурою, який при зміні

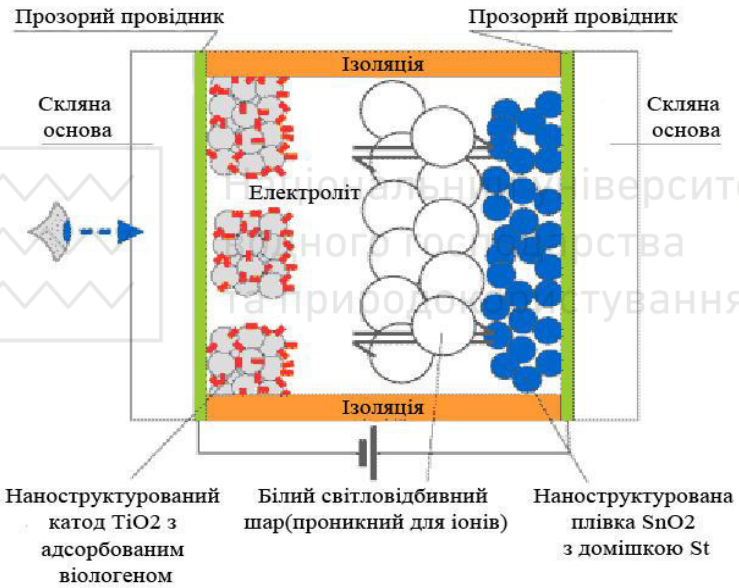


Рис. 4.24. Принцип роботи NCD – екрана

прикладеного до нього потенціалу може втрачати прозорість, досягаючи при цьому рівня насиченого чорного кольору. Простір між діоксидом титану і віологеном заповнений спеціальним електролітом.

Принцип роботи дисплея NanoChromics представлений на рис. 4.24.

Екран складається із декількох шарів, два із яких формують зображення: зовнішній – із наночастинок діоксиду титану і електро-

Національний університет водного господарства та природокористування

хромного шару віологену. При відсутності потенціалу між прозорими електродами екран виглядає абсолютно білим, оскільки світло відбивається від наночастинок діоксиду титану. При подачі напруги на електроди віологен зміщується ближче до діоксиду титану, адсорбується ним і зафарбовується в близький до чорного колір. Це дає можливість змінювати колір екрану.

На сьогодні випускаються тільки монохромні дисплеї, але ведуться інтенсивні роботи по створенню кольорових дисплеїв. Ще однією перевагою даної технології є незалежність від температури. Пристрої можуть ефективно працювати в температурному діапазоні від -35 до +80 градусів за Цельсієм.

4.3.4. Електронний папір на основі електрофлюїдної технології

Електрофлюїдна технологія (англ.: ElectroFluidic Display, EFD). Для формування зображення використовуються мініконтейнери з електрочутливою водною дисперсією кольорового пігменту. При

Рис. 4.25. Електронний папір на основі електрофлюїдної технології

прикладенні напруги між двома електродами пігмент виливається з контейнера і прилипає до поверхні піксела. При зміні полярності напруги фарба ховається назад. Оскільки видима площа контейнера не перевищує 5% площі піксела, то в ньому вона майже не помітна (див. рис. 4.25).

Діаметр такого піксела становить 300 мкм, при товщині 15 мкм.

4.4. Інші пристрої виведення інформації на екран

Існує багато інших пристроїв виведення інформації на екран:

Національний університет водного господарства та природокористування

1. **Оверхед-проектори:** (кодоскопи, графопроектори);
2. **Документ-камери**;
3. **Інтерактивні дошки;**
4. **Лазерні проектори**.

Одні з них втратили актуальність, а вивчення інших не передбачено програмою даного курсу.

4.5. Принтери

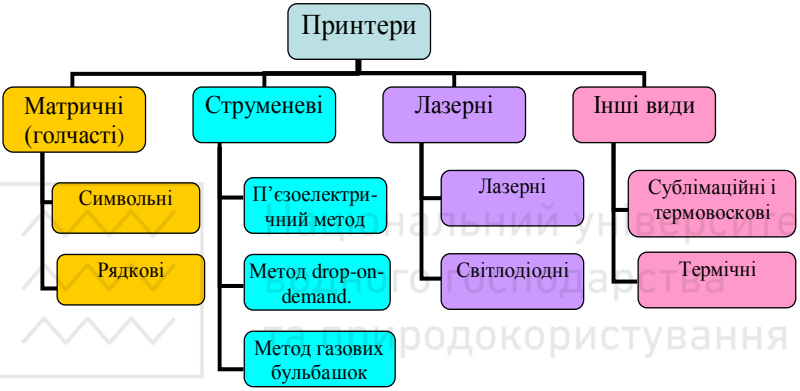


Рис.4.26. Класифікація принтерів

Завдання виведення інформації, представленої в графічній формі, виникло одночасно з появою обчислювальних систем. Пристрої, що виконують функції виведення графічної інформації на паперовий та деякі інші носії, називаються **принтерами** (англ.: print - друк) [5]. Розглянемо основні технології принтерів, переваги та недоліки різних типів принтерів та деякі їх характеристики. Характеристиками, які визначають переваги одних принтерів над іншими є:

1. *Швидкість друку*. Одиницею виміру швидкості друку є число знаків, які принтер переносить на папір за одну секунду, - cps (з англ. characters per second).
2. *Об'єм пам'яті*. Визначається внутрішньою пам'яттю принтера (буфером), в якій зберігаються дані, отримані від комп'ютера.
3. *Рівень шуму* в режимі друку.

Національний університет водного господарства та природокористування

4. *Роздільна здатність*, яка визначається кількістю точок, які друкуються на одному дюймі довжини (з англ. dots per inch, dpi).

Крім того, для матричних принтерів істотну роль відіграють і інші чинники: точність позиціювання головки принтера, частота ударів голок, якість фарбувальної стрічки тощо.

За фізичним принципом роботи (див. рис. 4.26) принтери поділяються на різні типи.

4.5.1. Матричні (голчасті) принтери

Голчасті (матричні) принтери (англ.: Dot Matrix Printer) довгий час використовувалися як стандартні пристрої виведення даних з комп'ютера. Вони часто застосовуються і сьогодні. Переваги цих принтерів визначаються, в першу чергу, їх невибагливістю до якості паперу, а також низькою вартістю друку і можливістю одночасного друку декількох копій [6].

На відміну від типового або „головкового" принтера, в якому встановлюються різні типи знаків (букви, цифри, розділові знаки – як у типографських машинах), голчастий принтер формує знаки декількома голками, розташованими в головці принтера. Механіка подачі паперу загалом мало змінилася - папір втягується за допомогою валу; між папером і головкою принтера розташовується фарбувальна стрічка. При ударі голки по цій стрічці на папері залишається слід фарби. Голки, які розташовані всередині головки, приводяться в дію електромагнітами. Головка переміщується по горизонтальним направляючим за допомогою крокового двигуна.

В перших голчастих принтерах в головці принтера знаходилося 9 голок, потім з'явилися 18-голкові принтери. Нині більшість фірм-виробників перейшли на виробництво 24-голкових принтерів, де використовується технологія послідовного розташування голок в два ряди по 12 голок.

Завдяки горизонтальному руху головки принтера і. активізації окремих голок надрукований знак утворює матрицю, причому окремі букви, цифри і знаки записані в пам'ять принтера (ПЗП) у вигляді бінарних кодів. Тому головка принтера „знає", які голки і в яких комбінаціях необхідно активізувати, щоб, наприклад, створити за 10 кроків головки букву „К" (див. рис. 4.27).

Національний університет
водного господарства
та природокористування

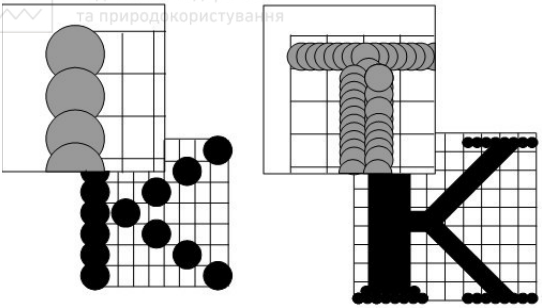


Рис. 4.27. Матриця для букви „К” в залежності від кількості голок в головці принтера і режиму

Оскільки надруковані знаки зовні є матрицею, а відтворює цю матрицю голчастий принтер, то часто його називають матричним принтером.

***Переваги*:** невибагливість до якості паперу; друк на нестандартному папері; можливість друку під копірку; простота та надійність; дешевизна витратних матеріалів.

***Недоліки*:** не друкують графіку; високий рівень шуму; низька швидкість друку; низька якість друку (150 dpi); монохромний друк.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

4.5.2. Рядкові принтери

Як варіант голчастого принтера було запропоновано рядковий принтер. У нього відсутня головка, але є друкуюча планка, яка по всій довжині забезпечена голками. Під час друку зображення, матриця, яка відповідає рядку, повністю переноситься на папір.

Істотно зростає швидкість друку, оскільки головка принтера не рухатися і рядок друкується одночасно. Такі принтери випускаються фірмами Genicom і Dataproducts. Швидкість друку досягає 1500 рядків за хвилину (приблизно 20 сторінок формату А4 за хвилину).

4.5.3. Кольорові голчасті принтери

Порівняно невелика кількість голчастих принтерів має можливість кольорового друку. Це пояснюється тим, що до моменту появи на ринку перших моделей 24-голкових принтерів, здатних друкувати кольорові зображення, ціна на кольорові струменеві принтери вже істотно знизилася. А якість друку 24-голкового принтера за допомогою багатокольорової фарбувальної

Національний університет водного господарства та природокористування

стрічки суттєво гірша в порівнянні з якістю друку на струменевому принтері.

4.5.4. Струменеві принтери

Якість друку струменевого принтера (англ.: Ink Jet) не поступається якості друку лазерних принтерів. Ці принтери прості в обслуговуванні, мають низький рівень шуму, тому вони широко використовуються в домашніх умовах.

У струменевих принтерах для формування зображення використовуються спеціальні сопла, через які на папір подається фарба. Тонкі сопла знаходяться на головці принтера, де встановлений резервуар з рідкою фарбою, яка у вигляді мікрокрапель переноситься через сопла на матеріал носія. Число сопел залежить від моделі принтера та його виробника і складає від 16 до 64 сопел. Деякі моделі мають набагато більше число сопел, наприклад, головка принтера Deskjet 1600 має 300 сопел для чорної фарби і 416 – для кольорових.

Зберігання фарби в принтері здійснюється двома способами:

1. головка принтера є складовою частиною патрона з фарбою, заміна патрона з фарбою є одночасною із заміною головки;
2. використовується окремий змінний резервуар, який через систему капілярів забезпечує фарбою головку принтера.

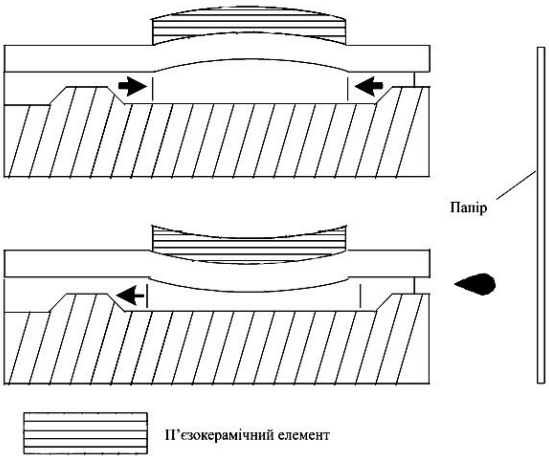


Рис. 4.28. Подача фарби через сопло з п'єзоелементом

Фірми-виробники реалізують різні способи нанесення фарби на папір:

1. **П'єзоелектричний метод;**
2. **Метод газових бульбашок;**
3. **Метод drop-on-demand.**

П'єзоелектричний метод. Для реалізації цього

Національний університет водного господарства та природокористування

методу в кожне сопло встановлюється плоский п’єзокристал, який приклеюється до діафрагми (див. рис. 4.28). Під дією електричного поля п’єзоелемент деформується. Стискаючи і розтягуючи трубку він наповнює капілярну систему фарбою. Фарба, яка відтискається назад, перетікає в резервуар, а фарба, яка „витіснилася” назовні, залишає на папері крапку. Подібні пристрої випускають компанії Epson, Brother та ін.

Метод газових бульбашок. Цей спосіб базується на термічному методі і більше відомий під назвою Bubblejet (інжектовані бульбашки). При використанні методу кожне сопло принтера обладнане нагрівальним елементом, який при пропусканні через нього струму за декілька мікросекунд нагрівається до температури близько 500 °С (див. рис. 4.29). Газові бульбашки (bubbles), що виникають при різкому нагріванні, виштовхують через вихідний отвір сопла порцію (краплю) рідкої фарби, яка переноситься на папір. При відключенні струму нагрівальний елемент охолоджується, бульбашка пари зменшується і через вхідний отвір в сопло поступає нова порція фарби. Подібну технологію використовує фірма Canon.

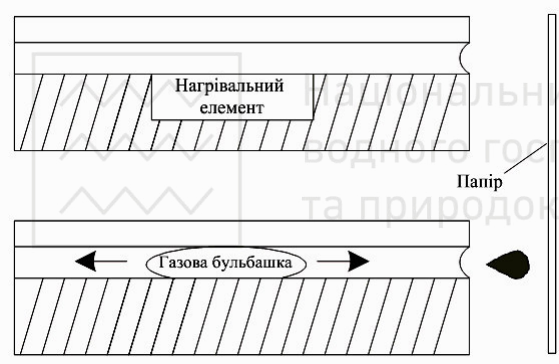


Рис. 4.29. Подача фарби за допомогою газових бульбашок

Завдяки тому, що в механізмах друку, реалізованих з використанням методу газових бульбашок, менше конструктивних елементів, такі принтери надійніші в роботі і термін їх експлуатації триваліший. Крім того, використання цієї технології дозволяє добитися високої роздільної здатності принтерів. Хоча даний метод забезпечує високу якість, він має недоліки при друці областей суцільного заповнення: вони виходять дещо розпливчастими.

Застосування методу газових бульбашок доцільне при друці графіків, гістограм і т. п., тоді як друк напівтонових графічних

Національний університет водного господарства та природокористування

зображень виходить якіснішим при використанні методу drop-on-demand.

Метод drop-on-demand. Цей метод розроблений фірмою Hewlett-Packard. Подібно до методу газових бульбашок, при подачі фарби із резервуару на папір використовується нагрівальний елемент. При цьому додатково використовується спеціальний механізм (див. рис. 4.30).

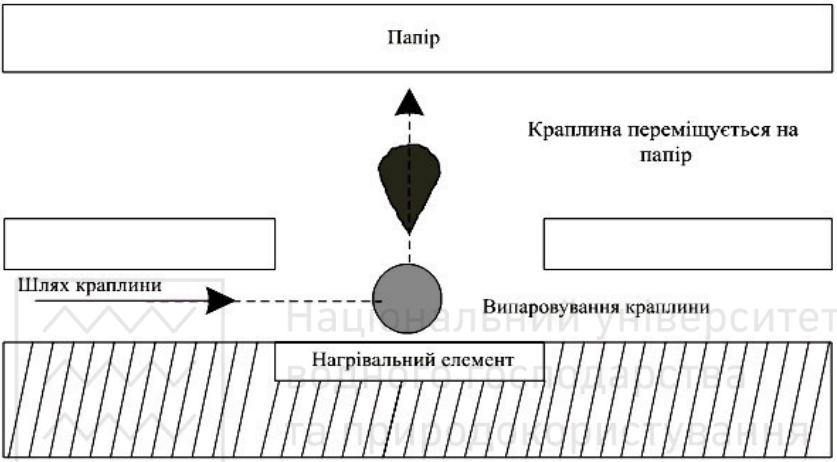


Рис. 4.30. Подача фарби за методом drop-on-demand

4.5.6. Кольорові струменеві принтери

Здатність струменевих принтерів створювати кольорове зображення сприяла їх широкому застосуванню. Кольоровий друк за допомогою голчастих принтерів не забезпечує бажаної якості. Використання для цієї мети інших типів принтерів, лазерних або термічних, обмежене для загалу користувачів через відносно високу вартість. Тому застосування кольорових струменевих принтерів є недорогою, але все ж якісною альтернативою.

При друці звичайне кольорове зображення формується накладанням трьох основних друкарських кольорів: *блакитного, пурпурного і жовтого*. Теоретично, накладання цих кольорів повинне створювати зображення чорного кольору. На практиці в більшості випадків отримують зображення сірого або коричневого

Національний університет водного господарства та природокористування

кольору. Тому четвертим основним кольором використовують чорний. Таку колірну модель називають CMYK.

З цієї причини в нових моделях струменевих принтерів застосовується не три, а чотири кольорові патрони для створення кольору (додають додатковий патрон з чорнилом чорного кольору). Завдяки цьому з'явилася можливість широкого використання таких принтерів для звичайного друку текстів і чорно-білих графічних зображень з одночасною економією кольорової фарби.

Переваги:

1. Рівень шуму складає близько 40 дБ, що на 15 дБ менше ніж у голкових принтерів;
2. При чорновому друці (англ.: Draft Mode) струменевий принтер має значно більшу швидкодію ніж голковий;
3. Вирішальна перевага струменевого принтера, в порівнянні з матричним полягає в зображенні шрифту. Для моделей з великим числом сопел характерне досягнення параметрів якості лазерного принтера.

Недоліки:

1. На відміну від голчастого принтера не може використовувати рулонний папір;
2. При друці з підвищеною якістю (L) швидкість друку значно менша ніж у голкового принтера;
3. Важливим недоліком струменевого принтера є небезпека засихання фарби всередині сопла;
4. Низька економічність, витрати на фарбу при тривалому використанні перевищують вартість пристрою;
5. Низька ємність картриджів;
6. Вимогливість до паперу;
7. Низька стійкість відбитків (швидко вицвітають та змиваються);
8. Відносно низька надійність.

4.5.7. Термічні принтери

Технологія термічних принтерів базується на використанні механізму друку факсимільних апаратів. Фактично більшість термічних принтерів працюють як факсимільні апарати. Головка друку термічного принтера конструктивно подібна аналогічному

Національний університет водного господарства та природокористування

вузлу матричного принтера. Для таких принтерів необхідний папір із спеціальним термочутливим покриттям. Керовані електричним струмом голки нагрівають папір, залишаючи на ньому відмітки.

Завдяки чіткості графіки і тонових зображень при оформленні проектно-конструкторської документації технологія прямого перенесення знайшла широке застосування в проектно-конструкторських і науково-дослідних роботах. Ця технологія також застосовується в широкоформатних графопобудівниках (англ.: plotter, плотер), що дозволяють друкувати зображення шириною 36 дюймів.

4.5.8. Сублімаційні та термовоскові принтери

Для отримання кольорового зображення з якістю, близькою до фотографічного, або для виготовлення допечатних кольорових проб використовують сублімаційні і термовоскові принтери (кольорові принтери високого класу). Є принтери, які поєднують в собі технологію сублімаційного і термовоскового друку. Такі принтери дозволяють друкувати на одному пристрої як чорнові, так і чистові відтиски.

Загальним для сублімаційної і термовоскової технологій є нагрів барвника і перенесення його на папір (плівку) в рідкій або газоподібній фазі. Багатоколірний барвник, як правило, нанесений на тонку лавсанову плівку товщиною 5 мкм. Плівка переміщується за допомогою стрічкопротяжного механізму, який конструктивно схожий на аналогічний вузол голкового принтера. Матриця нагрівних елементів за 3 - 4 проходи формує кольорове зображення.

Відмінність термовоскового друку від сублімаційного полягає в тому, що в першому випадку плівка покривається воскоподібною мастикою, а в другому - спеціальним барвником. Термовоскові принтери, нагріваючи стрічку з кольоровим воском, переносять розчинений у воску барвник на папір. Як правило, для подібних принтерів необхідний папір із спеціальним покриттям. Термовоскові принтери зазвичай використовуються для друку ділової графіки.

При сублімаційному друці здійснюється переведення фарбника в газоподібний стан шляхом нагрівання стрічки. Цей газ потім поглинається полістирольним покриттям спеціального паперу.

Національний університет водного господарства та природокористування

Дифузійне перенесення фарбника забезпечує отримання високоякісного кольорового зображення без видимих тональних переходів. Будучи однією з найпрогресивніших технологій кольорового друку, кольорова сублімаційна технологія є ідеальним засобом забезпечення фотографічної якості зображення.

4.5.9. Лазерні технології друку

Домінуючими для лазерних принтерів є електрофотографічна та світлодіодна (англ.: LED, Light Emitting Diode) технології [7,8]. Електрофотографічна технологія подібна до технології, яка використовується в копіювальних апаратах. У світлодіодній технології в якості оптичного пристрою, що формує зображення, використовуються світлодіоди (історично світлодіодні принтери відносяться до класу лазерних). Світлодіодна технологія, як правило, застосовується в широкоформатних принтерах (до 36 дюймів). Електрофотографічна технологія використовується в настільних і офісних лазерних принтерах. Лазерні принтери (англ.:

Національний університет водного господарства та природокористування

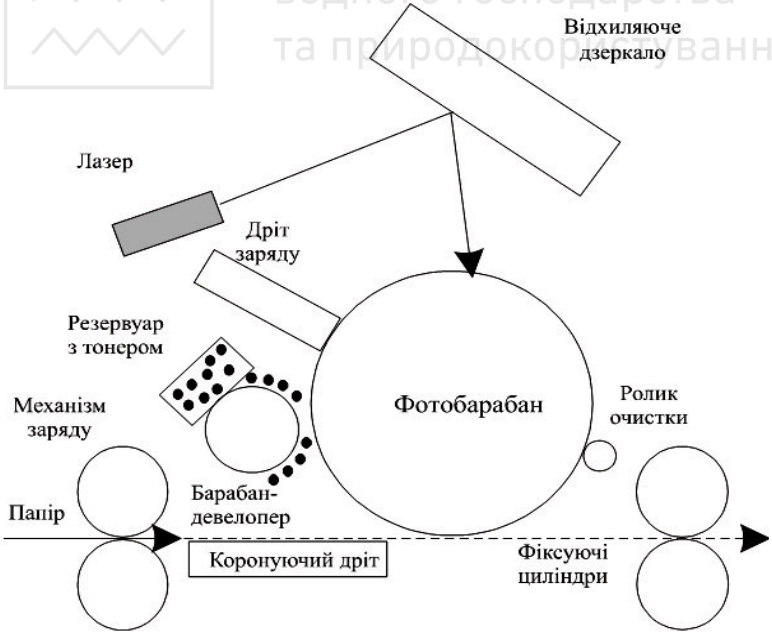


Рис. 4.31. Функціональна схема лазерного принтера

Національний університет водного господарства та природокористування

Laser Jet) формують зображення шляхом позиціювання точок на папері (растровий метод). Спочатку сторінка формується в пам'яті принтера і лише потім передається в механізм друку. Растрове представлення символів і графічних образів здійснюється під управлінням контролера принтера. Кожний образ формується шляхом відповідного розташування точок у комірках матриці.

Найпоширеніші лазерні принтери використовують технологію фотокопіювання, яку називають ще електрофотографічною. Вона полягає в точному позиціюванні точки на сторінці за допомогою зміни електричного заряду на спеціальній плівці з фотопровідного напівпровідника. Подібна технологія друку застосовується в ксероксах. Принтери фірм HP і MS, наприклад, використовують механізм друку ксероксів фірми Canon. Найважливішим конструктивним елементом лазерного принтера є обертовий фотобарабан, за допомогою якого відбувається перенесення зображення на папір. Фотобарабаном є металевий циліндр, на якому закріплена тонка плівка з фотопровідного напівпровідника. По поверхні барабана рівномірно розподіляється статичний заряд. На тонкий дріт (сітку), який називається коронуючим дротом (коронуючою сіткою), подається висока напруга, яка створює іонізовану область (корону).

Лазер, керований мікроконтролером, генерує тонкий світловий промінь, який відбивається від рухомого дзеркала. Цей промінь, потрапляючи на фотобарабан, засвічує на ньому елементарні площадки (точки), і в результаті фотоефекту в цих точках змінюється електричний потенціал. Для деяких типів принтерів потенціал поверхні барабана зменшується від -900 до -200 В. Таким чином, на фотобарабані виникає копія зображення у вигляді потенціального рельєфу (див. рис. 4.31).

За допомогою іншого барабана, який називається девелопером (англ.: developer), на фотобарабан наноситься тонер - найдрібніший фарбувальний пил. Під дією статичного заряду дрібні частинки тонера легко притягуються до поверхні барабана в точках, що піддалися дії променя, і формують на ньому зображення (див. рис. 4.32).

Аркуш з лотка подачі паперу за допомогою системи валиків переміщується до барабана. Йому надається статичний заряд, протилежний по знаку заряду засвічених точок на барабані. При

Національний університет
водного господарства
та природокористування

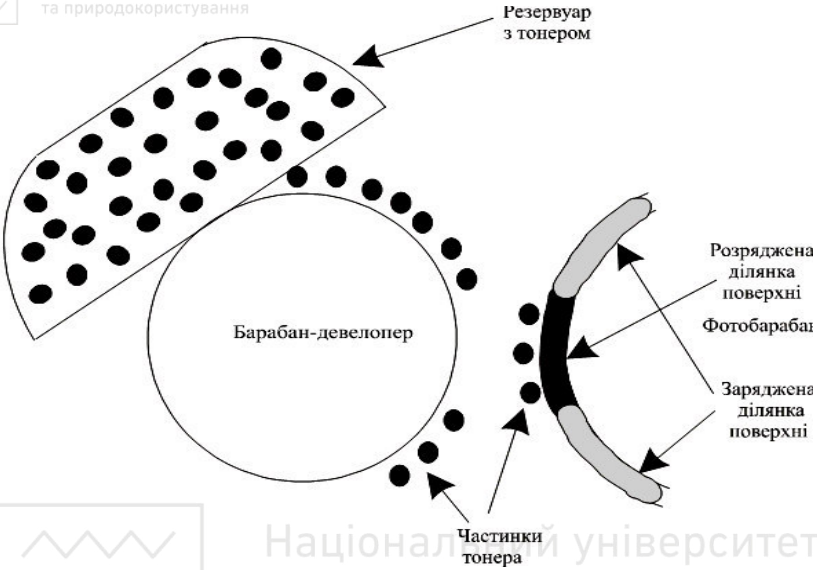


Рис. 4.32. Створення копії зображення на фотобарабані

Національний університет
водного господарства
та природокористування

дотику паперу до барабана частинки тонера з барабана переносяться (притягуються) до паперу.

Для фіксації тонера на папері аркуш пропускається між двома роликами, які нагрівають його до температури близько 180°-200°С. Нагрівання забезпечує закріплення фарби тонера на папері. Після процесу друку барабан повністю розряджається, очищається від частинок тонера і готується до нового циклу друку. Описана послідовність дій відбувається дуже швидко і забезпечує високу якість друку.

4.5.10. Лазерні кольорові принтери

При друці на кольоровому лазерному принтері використовуються дві технології. Відповідно до першої, яка широко використовувалась до недавнього часу, револьверний барабан (див. рис. 4.33) повертає по черзі кожен кольоровий картридж (Cyan, Magenta, Yellow, Krimson) до фотовалу. На ньому формується однокольорове зображення, після чого кожен колір збирається

Національний університет
водного господарства
та природокористування

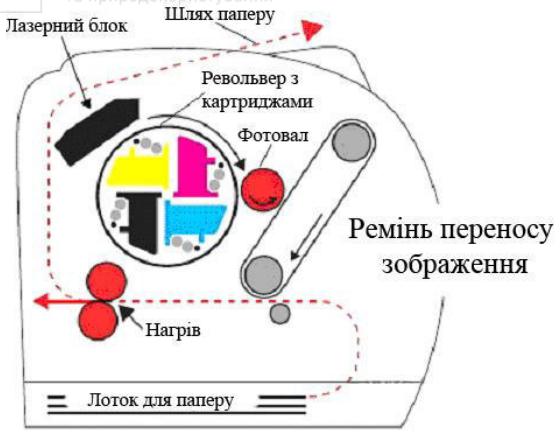


Рис. 4.33. Схема реалізації методу отримання зображень в лазерному принтері

транспортною стрічкою, а з неї вже повнокольорове зображення переноситься на папір.

Аркуш друкувався за чотири проходи, що, природно, позначалося на швидкості і якості друку.

У сучасних моделях в результаті 4-х послідовних прогонів на фотобарабан наноситься тонер кожного з 4-х кольорів. Потім при дотику паперу до барабану на нього наносяться всі 4 фарби одночасно, утворюючи потрібні поєднання кольорів на відбитку. В результаті досягається передача відтінків кольорів майже така, як і при друці на кольорових принтерах з термопресом фарбника.

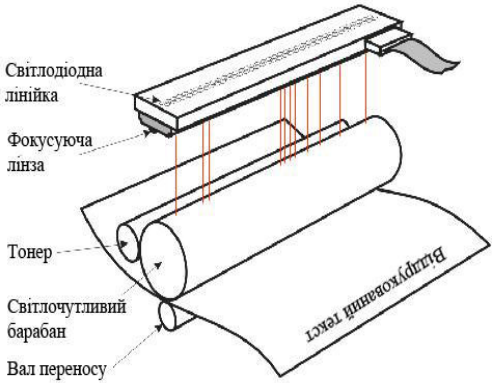


Рис. 4.34. Формування зображення за допомогою LED - технології

***Переваги*:**

1. висока надійність;
2. відносно невисока вартість копії;
3. висока швидкість друку (до 19 стор./хв.);
4. висока якість друку (300-1200 dpi).

Недоліки:

Монохромний друк (висока вартість принтера та копії для якісної кольорової копії).

Національний університет водного господарства та природокористування

4.5.11. Світлодіодні принтери

У світлодіодному принтері для засвічування барабана замість лазерного променя, керованого за допомогою системи дзеркал, використовується нерухомий світлодіодний рядок (лінійка), який складається з 2500 світлодіодів. Ним формується не кожна точка зображення, а цілий рядок (див. рис. 4.34). Подібно працюють лазерні принтери фірми OKI.

4.6. Пристрої введення інформації

Класифікація основних пристроїв введення інформації показана на рис. 4.35.

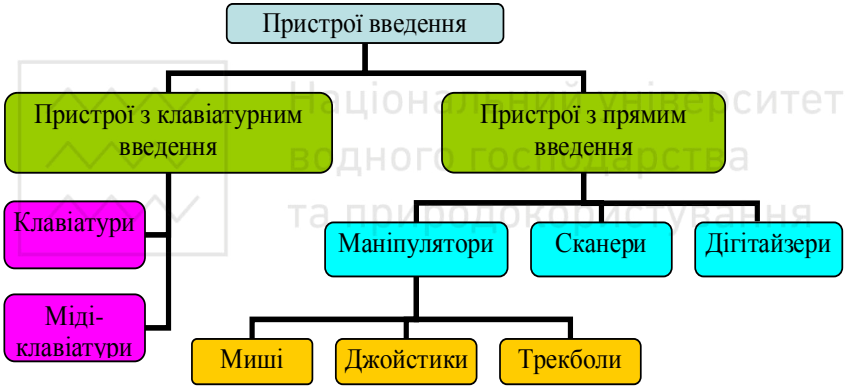


Рис. 4.35. Пристрої введення інформації

4.6.1. Клавіатура

Клавіатура (англ.: keyboard) до цього часу залишається основним засобом введення інформації в ПК. Вона призначена для введення алфавітно-цифрових символів та управління курсором.

На рис. 4.36. зображено вигляд клавіатури: **1**. Алфавітно-цифрова; **2**. Спеціальні клавіші (<Alt> <Ctrl> <Shift> <Cups Lock> <Enter> <Delete> <←> <Insert> <Print Screen>); **3.** Управління курсором; **4**. Клавіші для переключення режимів ((цифрові/ управління курсором) <Num Lock>); **5.** Функціональна (<F1>-

Національний університет водного господарства та природокористування

<F12>); **6**. Індикатори.

Розглянемо принцип роботи клавіатури. Клавіші клавіатури

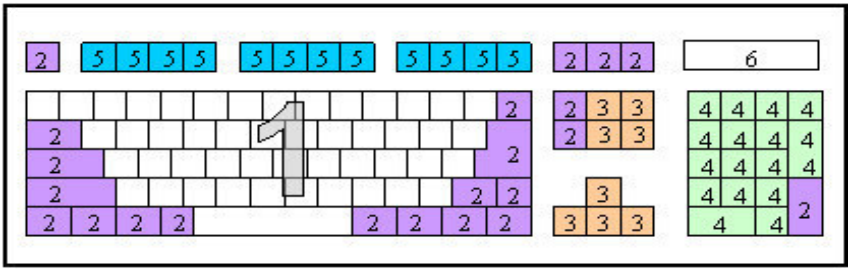


Рис. 4.36. Вигляд клавіатури

підключаються до матриці контактів. Кожній клавіші або комбінації клавіш присвоєний певний код. Усередині клавіатури знаходиться окремий мікропроцесор. Кожне натиснення на клавішу замикає контакт. При цьому відповідно до матриці контактів мікропроцесор генерує код клавіші, що натиснута. Цей код запам'ятовується в спеціальної області (буфері мікропроцесора) і стає доступним для обробки програмними засобами.

Клавіатури бувають механічні, напівмеханічні та мембранні (див. табл. 2).

Таблиця 2

Тип клавіатури	Максимальна кількість натискань клавіші	Переваги, застосування
Мембранна	$20 \cdot 10^6$	Практично безшумна, для звичайного користувача
Напівмеханічна	$50 \cdot 10^6$	Для інтенсивного введення текстової інформації
Механічна	$100 \cdot 10^6$	Для довготривалого введення текстової інформації

Як різновид клавіатури можна згадати **міді – клавіатуру**. Це клавіатура фортепіанного типу і використовується в електронних музичних інструментах.

Національний університет водного господарства та природокористування

4.6.2. Маніпулятор типу „миша”

Цей маніпулятор призначений для управління курсором, введення управляючої інформації.

Принцип роботи маніпулятора. „Миша” — невелика коробочка з кнопками. Історично у перших маніпуляторів всередині знаходились два взаємноперпендикулярних коліщатка або кулька, яка може котитись по поверхні столу при русі маніпулятора. До кульки (див. рис. 4.37, 4) притиснуті два взаємно перпендикулярних ролики (2), які вона обертає. Ролики під’єднані до двох кілець з отворами (3), які повертаючись перекривають інфрачервоне світло між двома парами (5) світлодіодів та фотодіодів (оптопари). Сигнали з оптопар передаються в комп’ютер, процесор якого переводить рух маніпулятора в рух курсора на екрані. Кульку можна рухати не рухаючи мишу так званим „скролом” (1) – кільцем яке виступає над поверхнею миші. Миші бувають одно-, дво-, трьохкнопкові. Вони можуть з’єднуватися з комп’ютером провідником або за допомогою радіопередавачів (безпровідні).

Рис. 4.37. Маніпулятор типу „миша”

У 1999 році були запропоновані перші **оптичні миші**. Оптична миша містить мініатюрну кінокамеру, яка робить 1500 знімків за секунду. Вона здатна працювати практично на будь-якій поверхні і містить чотири елементи: оптичного сенсора, лінзи, червоного світлодіода і затискача для світлодіода. Світло від фотодіода, відбившись від поверхні, на якій знаходиться миша, потрапляє на сенсор. Цей датчик послідовно прочитує зображення поверхні (кадри), а потім за допомогою свого процесора математично визначає напрям і величину переміщення. За зміною малюнка у низці послідовних зображень цей процесор визначає, наскільки далеко просунулася миша і відправляє відповідні координати в комп’ютер. Комп’ютер переміщує курсор на екрані відповідно до

координат, отриманих від миші. Така процедура відбувається сотні разів за секунду, тому створюється враження, що курсор переміщується дуже плавно.

Останніми часом була розроблено новий, досконаліший різновид оптичного датчика миші, який використовує для підсвічування напівпровідниковий лазер. За використанням головного елемента такий вид маніпулятора дістав назву **лазерної миші**. Принцип її роботи не відрізняється від принципу роботи оптичної миші.

Різновидом миші можна також вважати **трекбол** (англ.: trackball) та **джойстик** (англ.: joystick). **Трекбол** це фактично перевернута миша, у якої повертання кульки здійснюється пальцем. **Джойстик** - це важель на підставці, який можна відхиляти у двох площинах. На важелі можуть бути різного роду гашетки і перемикачі.

4.6.3. Сканер

Сканер (англ.: scanner) призначений для переведення графічної інформації в цифрову. Отримане зображення може бути збережене як графічний файл, або як текстовий файл.

Сканери бувають ручні, портативно-сторінкові, планшетно-офісні, мережеві (швидкісні), широкоформатні; вони можуть бути чорно-білі (до 64 відтінків сірого) і кольорові (256 - 16 млн. кольорів).

Розглянемо принцип дії планшетних сканерів, як найбільш

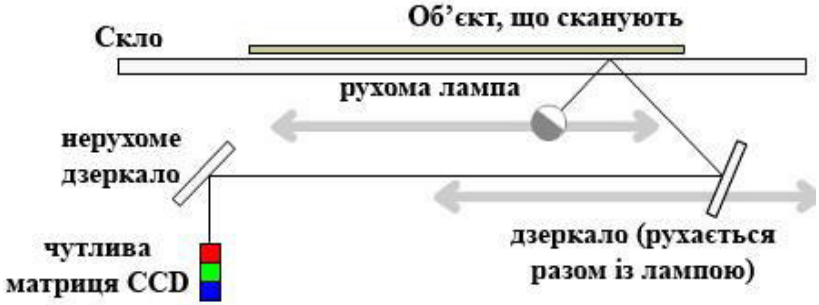


Рис. 4.38. Принцип роботи планшетного сканера

поширених моделей сканерів. Сканований об'єкт розміщується на склі планшета сканованою поверхнею вниз (див рис. 4.38). Під

Національний університет водного господарства та природокористування

склом розташовується рухома лампа, рух якої регулюється кроковим двигуном.

Світло лампи відбивається від оригіналу і через систему дзеркал і фокусуючих лінз потрапляє на так звану матрицю, що складається із датчиків, які створюють електричні сигнали, величина яких визначається інтенсивністю падаючого на них світла. Робота цих датчиків базуються на використанні світлочутливих елементів, які називаються приладами із зарядовим зв'язком (ПЗС, англ.: Couple Charged Device — CCD). Точніше кажучи, на поверхні ПЗС утворюється електричний заряд, пропорційний інтенсивності падаючого світла. Декілька ПЗС розташовуються в ряд на одній лінійці. Сигнал з ПЗС через аналогово-цифровий перетворювач поступає в комп'ютер. За кожен крок двигуна сканується смужка об'єкту, потім всі смужки об'єднуються програмним забезпеченням в загальне зображення.

В портативно-сторінкових сканерів папір рухається відносно головки сканера, яка є нерухомою.

Ручні сканери зовні нагадують „мишу" великого розміру, яку користувач рухає по сканованому зображенню.

Однією з основних характеристик сканера є оптична роздільна здатність, тобто кількість розпізнаних точок (пікселів) на дюйм, (вимірюється в ppi — pixels per inch) та швидкість сканування — показник швидкодії, який визначає час, що витрачається на обробку одного рядка зображення. Порівняльні характеристики різних типів сканерів показані в таблиці 3.

Таблиця 3

Характеристики	Ручні сканери	Портативно-сторінкові сканери	Планшетні сканери
Роздільна здатність	400-800 ppi	600 ppi	600-1200 ppi
Кількість кольорів	2 (чорно – білі)	2 (чорно – білі)	2 (чорно – білі)
Число градацій сірого	64-256	256	256
Швидкість сканування, арк./хв.	3 - 8	до 15	до 30

Національний університет водного господарства та природокористування

4.6.4. Дігітайзер

Дігітайзер (англ.: digitizer, зі світловим пером) — графічний планшет, пристрій для введення графічних даних (креслення, схеми, плани) від руки безпосередньо в комп'ютер. Він складається з пера і плоского планшета, який чутливий до натиснення. Переміщуючи перо по планшету, користувач малює зображення, яке виводиться на екран.

Бібліографічний список до розділу 4

1. Флорес А. Внешние устройства ЭВМ М [Текст] / А. Флорес – М. : Мир, 1977.
2. Мюллер С. Модернизация и ремонт ПК, 17-е издание [Текст] / С. Мюллер. – М. : ООО «И. Д. Вильямс», 2008. – 1360 с.
3. Мухин И. А. Развитие жидкокристаллических мониторов [Текст] / И. А. Мухин // Журнал «BROADCASTING Телевидение и радиовещание». – 2005. – №2(46). – С. 55-56, – №4(48). – С. 71-73.
4. Мирошниченко С. П. Методическое пособие по курсу «Персональная электроника». Жидкокристаллические мониторы [Текст]/ С. П. Мирошниченко, П. В. Серба. – Таганрог : Изд-во ТРТУ, 2005. – 24 с.
5. Холидей К. М. Секреты ПК [Текст] / К. М. Холидей. – Киев : Диалектика, 1995. – 413 с.
6. Платонов Ю.М. Ремонт зарубежных принтеров [Текст]/ Ю. М. Платонов, А. А. Гапеенков. – М. : Солон - Р, 2000. – 272 с.
7. Синдеев Ю.Г. Принтеры: ремонт, обслуживание [Текст]/ Ю. Г. Синдеев. – Ростов на Дону : Феникс, 2001. – 224 с. – (сер. Техномир).
8. Кичак В. М. Засоби оргтехніки та зв'язку. Навчальний посібник [Текст]/ В. М. Кичак, Г. Г. Бортник, О. А. Семенюк. – Вінниця : ВДТУ, 2001.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1 МАГНІТНИЙ ЗАПИС, ЗБЕРІГАННЯ ТА ЧИТАННЯ ІНФОРМАЦІЇ 5
1.2. Фізичні основи принципу запису на магнітний носій та читання з нього 9
1.3. Пам'ять на магнітних носіях....11
1.3.1.Пам'ять на магнітній дротині 11
1.3.2. Пам'ять на магнітній стрічці 12
Технології запису даних на магнітну стрічку 14
1.3.3. Пам'ять на магнітних осердях 18
Схема передачі інформації між кільцями 19
Приклад логічної схеми на феритових кільцях 20
1.3.4 Пам'ять на магнітних дисках....21
1.3.5 Підвищення щільності запису магнітних дисків за допомогою технології AFC 26
1.3.6. Накопичувач на гнучких магнітних дисках 26
1.3.7. Накопичувач на змінних жорстких дисках 27
1.3.8. Пам'ять на циліндричних магнітних доменах (ЦМД) 27
1.3.9. Застосування ЦМД 28
1.4. Види головок запису/читання 30
1.4.1. Індукційні головки 31
1.4.2. Феритові головки 31
1.4.3. Головки MIG 32
1.4.4. Тонкоплівкові (TF) головки 32
1.4.5. Магніторезистивні (MR) головки....33
1.4.6. Явище зміни магнітоопору 34
1.4.7. Гігантські магніторезистивні (GMR) головки....38
1.5. Технології магнітного запису інформації....39
1.5.1. Система паралельного зберігання даних 39
1.5.2. Система перпендикулярного зберігання даних (PMR) 40
1.5.3. Система магнітного теплового зберігання даних....41
1.5.4. Система структурованого зберігання даних 42
Бібліографічний список до розділу 1 44
РОЗДІЛ 2 ФІЗИЧНІ ОСНОВИ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИСТРОЇВ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ 45
2.1. Елементи зонної теорії напівпровідників 45
2.2. Власна провідність напівпровідників 49

Національний університет водного господарства та природокористування

2.3. Домішкова провідність напівпровідників 50
2.4. Електронно-дірковий перехід 52
2.5. Принцип дії напівпровідникового діода 53
2.5.1. Використання напівпровідникового діода 54
2.6. Транзистори.....59
2.6.1. Біполярні транзистори 60
2.6.1.1. Принцип дії біполярного транзистора 60
2.6.2. Польові транзистори.....62
2.6.2.1. Принцип дії польового транзистора з управляючим *p-n* переходом.....62
2.6.2.2. Принцип дії польового транзистора з ізольованим затвором 63
2.6.2.3. Польовий транзистор з плаваючим затвором.....65
2.6.3. Інтегральні мікросхеми.....65
2.7. Оперативна пам'ять 66
2.7.1. Пам'ять типу ROM (енергонезалежна пам'ять).....67
2.7.1.1. ROM(M) 67
2.7.1.2. PROM.....68
2.7.1.3. EPROM.....69
2.7.1.4. EEPROM.....70
2.7.1.5. Flash.....70
2.7.1.6. Будова і принцип дії ROM з можливістю перезапису.....71
2.7.1.7. Будова і принцип дії МНОН і ЛІЗМОН.....71
2.7.1.8. Будова і принцип дії SST.....76
2.7.1.9. Будова і принцип дії MLC 76
2.7.1.10. Будова і принцип дії NROM (Nitrid ROM) 77
2.7.2. Пам'ять типу RAM.....78
2.7.2.1. DRAM.....78
2.7.2.2. SRAM 80
2.8. Твердотільні накопичувачі.....81
2.9. Флеш-пам'ять 83
2.9.1. Архітектура флеш-пам'яті.....84
Архітектура NOR.....84
Архітектура NAND 86
2.10. Карти пам'яті 88
2.11. Перспективні технології флеш-пам'яті.....88
Бібліографічний список до розділу 2 95

Національний університет водного господарства та природокористування

РОЗДІЛ 3 ОПТИЧНІ СИСТЕМИ ЗАПИСУ, ЗБЕРІГАННЯ ТА ЧИТАННЯ ІНФОРМАЦІЇ 96
3.1. Елементи оптики 96
3.1.1. Хвильові процеси.....96
3.1.2. Інтерференція світла.....99
3.1.3. Дифракція світла 99
3.1.4. Поляризація світла.....100
3.1.5. Фотоефект 100
3.1.6. Лазер і принцип його роботи.....102
3. 1. 7 Поняття про голографію 104
3.2. Оптичні технології в комп'ютерній техніці.....105
3.3. Принцип зчитування інформації з компакт-диску.....107
3.3.1. CD-ROM та технологія їх виготовлення.....108
3.3.2. CD-R – диски та технологія їх виготовлення 110
3.3.3. CD-RW та технологія запису і перезаписування даних на них 111
3.4. Принцип запису на DVD 114
3.4.1. DVD-5 116
3.4.3. DVD-10 118
3.4.4. DVD-18 118
3.4.5. Принцип запису на BD.....118
3.5. HD DVD 121
3.6. Головка читання-запису оптичних компакт-дисків 121
3.7. Магнітооптичні (МО) технології в комп'ютерній техніці .123
3.7.1. Принцип роботи МО-дисків 123
3.7.2. Перспективи МО- технологій.....125
3.8. Перспективні оптичні технології в комп'ютерній техніці.125
3.8.1. Флуоресцентні диски 125
3.8.2. Голографічна система запису та зберігання інформації .126
3.9. Квантовий комп'ютер 131
3.9.1. Квантовий процесор 132
3.9.2. Квантова пам'ять 138
3.9.3. Квантова шина.....140
Бібліографічний список до розділу 3 141
РОЗДІЛ 4 ПРИСТРОЇ ВИВЕДЕННЯ ТА ВВЕДЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ 142
4.1.Пристрої виведення інформації.....143
4.1.1. Електронно-променевий монітор, кінескоп 143

Національний університет водного господарства та природокористування

4.1.2. Монітори електростатичної емісії 144
4.1.3. Монітори на основі вуглецевих нанотрубок 146
4.1.4 Електролюмінісцентні екрани 147
4.1.5. Плазмові монітори.....148
4.1.6. Рідкокристалічні монітори 149
4.1.7. LCD - проектори 152
4.1.8. Світлодіодні екрани 153
4.1.9. Дисплеї на органічних світлодіодах 153
4.2. Проектори 155
4.2.1. Мікроелектромеханічні системи 155
4.2.1.1. Мікродзеркальні проектори 155
4.2.1.2. Проектори на основі технології TMA 157
4.2.1.3. Проектори на основі GLV - технології 157
4.2.1.4. Проектори на основі технології IMOD 158
4.3. Електронний папір.....159
4.3.1. Електронний папір на основі технології Gyricon 160
4.3.2. Електронний папір на основі технології електрозмочування 161
4.3.3. Електронний папір на основі нанотехнологій 162
4.3.4. Електронний папір на основі електрофлюїдної технології
4.4. Інші пристрої виведення інформації на екран.....164
4.5. Принтери 165
4.5.1. Матричні (голчасті) принтери 166
4.5.2. Рядкові принтери.....167
4.5.3. Кольорові голчасті принтери 167
4.5.4. Струменеві принтери 168
4.5.6. Кольорові струменеві принтери 170
4.5.7. Термічні принтери.....171
4.5.8. Сублімаційні та термовоскові принтери.....172
4.5.9. Лазерні технології друку 173
4.5.10. Лазерні кольорові принтери.....175
4.5.11. Світлодіодні принтери 177
4.6. Пристрої введення інформації 177
4.6.1. Клавіатура.....177
4.6.2. Маніпулятор типу „миша” 179
4.6.3. Сканер.....180
4.6.4. Дігітайзер 182
Бібліографічний список до розділу 4 182

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства
та природокористування

О.О. Лебедь, В.О. Мислінчук,
В.Й. Пастушенко

Національний університет
водного господарства
та природокористування

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Навчальний посібник

Рівне – 2015

Національний університет водного господарства та природокористування

УДК 681.518:53 (075.8)
ББК 32.98:22.3я7
Л33

Затверджено Національним університетом водного господарства та природокористування
(Протокол № 7 від 04.06.2015 р.)

Рецензенти:
Бомба А.Я., д-р техн. наук, професор Рівненського державного гуманітарного університету (м. Рівне);
Власюк А.П., д-р техн. наук, професор Міжнародного економіко-гуманітарного університету ім. акад. Степана Дем'янчука (м. Рівне);
Джунь Й.В., д-р фіз.-мат. наук, професор Міжнародного економіко-гуманітарного університету ім. акад. Степана Дем'янчука (м. Рівне);

Лебедь О.О., Мислінчук В.О., Пастушенко В.Й.
Л33 Фізичні основи комп'ютерно-інтегрованих інформаційних систем. Підручник. – Рівне: НУВГП, 2015. – 352с.

Підручник призначено для вивчення фізичних явищ, методик та технологій, які є основою роботи сучасних комп'ютерно-інтегрованих інформаційних систем. Детально розглянуто магнітні явища та фізику напівпровідників, їх роль в функціонуванні основних вузлів комп'ютера. У підручнику викладено елементи теорії хвиль, оптику та оптичні методи, які використовуються в інформаційних системах. Значну увагу приділено перспективним технологіям елементної бази комп'ютерної техніки та перспективним видам комп'ютерів – молекулярним, оптичним, квантовим, біологічним.

Підручник буде корисним для студентів технічних і педагогічних спеціальностей навчальних закладів III і IV рівнів акредитації.

УДК 681.518:53 (075.8)
ББК 32.98:22.3я7

© Лебедь О.О., Мислінчук В.О.,
Пастушенко В.Й., 2015
© Національний університет водного господарства та природокористування, 2015

Національний університет
водного господарства
та природокористування

ПЕРЕДМОВА

Комп'ютерно-інтегровані системи і їх основа – комп'ютер в сучасному інформаційному просторі відіграють визначальну роль. Сьогодні вже важко уявити повсякденне життя людини без обчислювальної техніки. А здавалося б фантастичний слоган компанії Microsoft, запропонований її главою Білом Гейтсом 25-30 років тому «Комп'ютер на кожному столі і в кожному домі» на сьогодні став реальністю.

Який же зміст вкладається у вираз «**комп'ютерно-інтегрована система**» сьогодні? Це сукупність взаємопов'язаних автоматичних або автоматизованих пристроїв, призначених для збору, обробки та передачі інформації. Конкретний набір пристроїв, які здійснюють обробку інформації, називають обчислювальною системою. Центральним пристроєм більшості обчислювальних систем є електронно-обчислювальна машина (ЕОМ) або комп'ютер.

Комп'ютер (з англ.: computer – обчислювач) – це програмований електронний пристрій, який обробляє дані, виконує обчислення та інші завдання маніпулювання символами. Існує два основні класи комп'ютерів:

- цифрові комп'ютери, що обробляють дані у вигляді двійкових кодів;
- аналогові комп'ютери, що обробляють дані про фізичні величини, які можуть змінюватися неперервно (електрична напруга, час, тощо).

Оскільки в даний час переважна більшість комп'ютерів є цифровими, далі будемо розглядати тільки даний клас комп'ютерів і слово «комп'ютер» вживати в значенні «цифровий комп'ютер».

Основу комп'ютера складає апаратура (англ.: HardWare), побудована, в основному, з використанням електронних та електромеханічних елементів і пристроїв. Принцип дії комп'ютерів полягає у виконанні програм (англ.: SoftWare) – наперед заданих, чітко визначених послідовностей операцій (арифметичних, логічних та ін.).

При розгляді комп'ютерних пристроїв прийнято розрізняти їх архітектуру і структуру.

Архітектурою комп'ютера називають його будову на деякому загальному рівні, що включає опис призначених для користувача можливостей програмування, системи команд, системи адресації,

Національний університет водного господарства та природокористування

організації пам'яті, тощо. Архітектура визначає принципи дії, інформаційні зв'язки і взаємне з'єднання основних логічних вузлів комп'ютера: процесора, оперативного запам'ятовуючого пристрою (ОЗП), зовнішніх запам'ятовуючих пристроїв (ЗЗП) і периферійних пристроїв. Спільність архітектури різних комп'ютерів забезпечує їх сумісність з погляду користувача.

Основи вчення про архітектуру обчислювальних машин заклав видатний американський математик Джон фон Нейман. Він підключився до створення першої в світі лампової ЕОМ ENIAC у 1944 році, коли її конструкція була вже вибрана. У процесі роботи фон Нейман висловив ідею принципово нової ЕОМ. У 1946 році вчений з колегами виклали свої принципи побудови обчислювальних машин у статті «Попередній розгляд логічної конструкції електронно-обчислювального пристрою» [1].

У статті обґрунтовується використання двійкової системи для представлення чисел. Автори переконливо продемонстрували переваги двійкової системи для технічної реалізації, зручність і простоту виконання в ній арифметичних і логічних операцій. Надалі ЕОМ отримали змогу обробляти і нечислові види інформації – текстову, графічну, звукову та інші, однак двійкове кодування даних, як і раніше, становить інформаційну основу будь-якого сучасного комп'ютера.

Нейман також першим запропонував зберігати програми за допомогою двійкового коду, причому в тій же самій пам'яті, що й оброблювані нею числа. Відсутність принципової різниці між програмою і даними дало можливість ЕОМ самій формувати для себе програму відповідно до результатів обчислень.

Структура комп'ютера – це сукупність його функціональних елементів і зв'язків між ними. Функціональними елементами можуть бути різноманітні пристрої – від основних логічних вузлів комп'ютера до найпростіших схем. Структуру комп'ютера графічно представляють у вигляді структурних схем, за допомогою яких можна дати опис комп'ютера на будь-якому рівні деталізації.

Сучасні комп'ютери, маючи найрізноманітнішу будову, своєю структурою базуються на загальних логічних принципах, що дозволяють виділити в кожному з них наступні головні пристрої:

- пам'ять (оперативний запам'ятовуючий пристрій);
- зовнішня пам'ять (зовнішній запам'ятовуючий пристрій);

Національний університет
водного господарства
та природокористування

- процесор, який включає в себе керуючий пристрій (КП) і арифметично - логічний пристрій (АЛП);
- пристрій введення даних;
- пристрій виведення даних.

Дані пристрої з'єднані каналами зв'язку (*загальною шиною*), якими передаються сигнали адрес, команд управління та живлення.

Зовнішні пристрої (клавіатура, принтер, сканер, тощо) підклю-

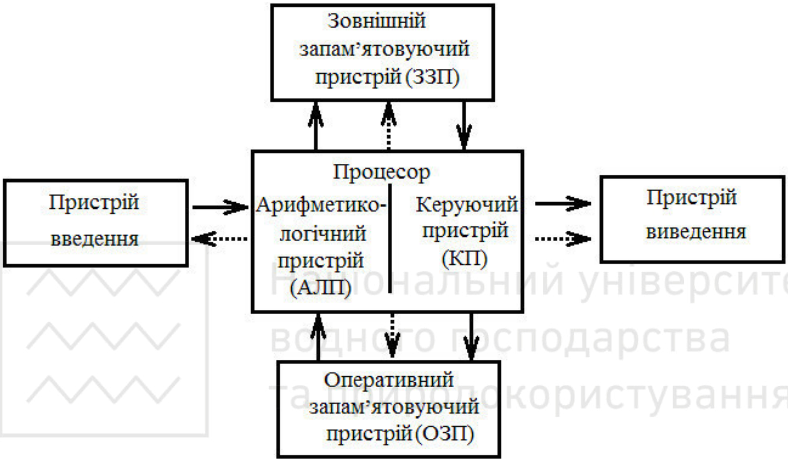


Рис. І. Структура ЕОМ, побудованої за принципами фон Неймана. Суцільні лінії зі стрілками вказують напрямок потоків інформації, пунктирні – керуючі сигнали від процесора до решти вузлів ЕОМ

чаються до комп'ютера за допомогою *контролерів*, пристроїв, які узгоджують швидкості роботи тих вузлів обчислювальної машини, що з'єднуються між собою.

Важливими елементами сучасного комп'ютера є *таймер* – пристрій вимірювання внутрішнього часу ЕОМ та КПДП – контролер прямого доступу до оперативної пам'яті, не звертаючись до процесора.

Надважливим пристроєм комп'ютера є його пам'ять. Вона виконує наступні функції:

- приймання інформації з інших пристроїв;
- запам'ятовування інформації;
- видавання інформації за запитом в інші пристрої

Національний університет
водного господарства
та природокористування

комп'ютера.

Зовнішня пам'ять відрізняється від пристроїв введення і виведення тим, що дані в неї заносяться у вигляді, зручному комп'ютеру, але недоступному для безпосереднього сприйняття людиною. Отже, накопичувач на магнітних дисках відноситься до зовнішньої пам'яті, а клавіатура – пристрій введення, дисплей і принтер – пристрої виведення.

Рис. II. Сучасний процесор. Вигляд з обох сторін

Пам'ять (ЗП) зберігає інформацію (дані) і програми. Запам'ятовуючий пристрій у сучасних комп'ютерів «багатоярусний». Він містить оперативний запам'ятовуючий пристрій (ОЗП), що зберігає ту інформацію, з якою комп'ютер працює безпосередньо в даний час (виконувана програма, частина необхідних для неї даних, деякі керуючі програми), і зовнішні запам'ятовуючі пристрої (ЗЗП) набагато більшої ємності, ніж ОЗП, але з набагато повільнішим доступом (і значно меншою вартістю в розрахунку на 1 байт збереженої інформації). На ОЗП і ЗЗП класифікація пристроїв пам'яті не завершується. Певні функції виконують і НОЗП (надоперативний запам'ятовуючий пристрій), і ПЗП (постійний запам'ятовуючий пристрій), та інші підвиди комп'ютерної пам'яті.

Процесор (центральний процесор, CPU), мабуть, є найважливішою частиною комп'ютера. Він встановлюється на материнську плату в спеціальне гніздо (сокет). На материнську плату встановлюються і інші вузли комп'ютера (відеокарта, ОЗП, тощо). Основними функціями процесора є:

- зчитування команд і даних із оперативної пам'яті та інших пристроїв;
- обробка даних за заданою програмою шляхом виконання

Національний університет водного господарства та природокористування

арифметичних і логічних операцій;

- змінювання програми в залежності від результатів обчислень;
- програмне керування роботою пристроїв комп'ютера.

З іншими пристроями, і в першу чергу з оперативною пам'яттю, процесор з'єднаний групами провідників, які називаються шинами. Основних шин є три:

- шина даних;
- шина адрес або адресна шина;
- шина команд або керуюча шина.

Дані, що передаються по **адресній шині** трактуються як адреси комірок оперативної пам'яті. Саме з цієї шини процесор зчитує адреси команд, які необхідно виконати, а також дані, з якими оперують команди. У сучасних процесорах адресна шина 32-розрядна (складається з 32 провідників).

По **шині даних** відбувається копіювання даних з оперативної пам'яті в регістри процесора і навпаки. У ПК на базі процесорів Intel Pentium шина даних 64-розрядна. Це означає, що за один такт на обробку поступає відразу 8 байт даних.

По **командній шині** з оперативної пам'яті поступають команди, які виконуються процесором. Команди представлені у вигляді байтів. Прості команди вкладаються в один байт, але є й такі команди, для яких потрібно два, три і більше байтів. Більшість сучасних процесорів мають 32-розрядну командну шину, хоча існують процесори з 64-розрядною командною шиною.

Периферійні або зовнішні пристрої – це пристрої, розміщені поза системним блоком і задіяні на певному етапі обробки інформації. Передусім – це пристрої фіксації вихідних результатів: принтери, плотери, модеми, сканери, тощо. Поняття «периферійні пристрої» досить умовне. До їх числа можна віднести, наприклад, накопичувач на компакт-дисках, якщо він виконаний у вигляді самостійного блоку і приєднується спеціальним кабелем до зовнішнього з'єднання системного блока. І навпаки, модем може бути вбудованим, тобто конструктивно виконаний як плата розширення, і тоді немає підстав відносити його до периферійних пристроїв.

Отже, в завдання даного посібника входить опис принципів будови та роботи основних вузлів сучасного комп'ютера як основи

комп'ютерно-інтегрованих систем, представлених на рис. III, а також висвітлення основних, на час написання підручника, тенденцій розвитку комп'ютерної техніки.

Автори використали досвід викладання спецкурсу «Фізичні основи інформаційних систем» при підготовці бакалаврів в Націона-

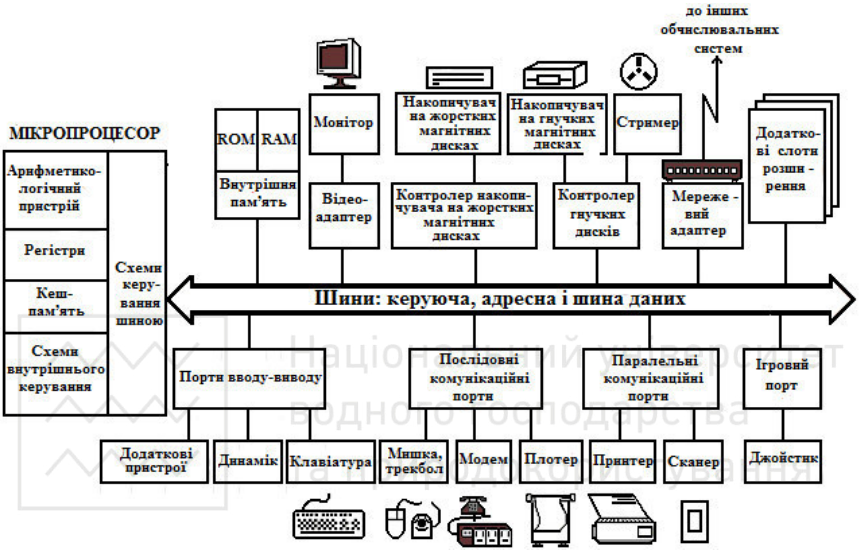


Рис. III. Блок-схема основних складових частин класичного комп'ютера

льному університеті водного господарства та природокористування за напрямами 6.040301 «Прикладна математика» та 6.080101 «Геодезія, картографія та землеустрій». Даний спецкурс викладається за матеріалами навчального посібника «Фізичні основи інформаційних систем» О.О. Лебедя, В.Ф. Орленка та О.Д. Кочергіної (гриф МОНУ № 1/11-1140 від 05.02.2013р.) і апробованого на протязі 4 років під час навчального процесу в Інституті автоматики, кібернетики та обчислювальної техніки НУВГП. Підручник є логічним розвитком даного навчального посібника.

Автори спільно розробляли план і обговорювали зміст усіх розділів підручника. Розділи 1, 4 написані О.О. Лебедем, розділи 2, 6 – В.О. Мислінчуком, розділи 3, 5 – В.Й. Пастушенком.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Автори висловлюють подяку доцентам кафедри фізики НУВГП Є.С. Никонюку, А.В. Рибалку, В.Р. Гаєвському за цінні зауваження, які сприяли поліпшенню рукопису підручника.

Окрема подяка К.О. Віннік за якісні ілюстрації до підручника.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Національний університет
водного господарства
та природокористування

РОЗДІЛ 1
ФІЗИЧНІ ОСНОВИ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИСТРОЇВ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

Сучасна обчислювальна техніка неможлива без напівпровідникових приладів. В елементах комп'ютерів і аналогових пристроях знаходять широке застосування напівпровідникові інтегральні схеми, які по суті є багатофункціональними напівпровідниковими приладами.

Інтегральні схеми містять велику кількість взаємодіючих окремих напівпровідникових елементів: діодів і тріодів різних типів, резисторів, конденсаторів, ключових приладів. Ці елементи скомпоновані в одній матриці, в якості якої використовується окремий кристал або декілька кристалів, розміщених в одному корпусі з безліччю контактних виводів. За сімдесят років свого розвитку фізика напівпровідників та пов'язана із нею промисловість пройшли великий шлях від перших діодів до мікросхем. У мікросхемі 1965 року було 30 транзисторів, тоді як сьогодні чіп Radeon HD 3870 містить 660 мільйонів транзисторів. На сьогоднішній день створені великі інтегральні схеми, густина активних елементів у яких досягає 10^4 на $мм^2$.

Застосування інтегральних схем дозволяє суттєво зменшити розміри обчислювальних пристроїв, підвищити їх надійність та економічність.

Очевидно, що ознайомлення з інтегральними схемами необхідно розпочинати з вивчення фізичних основ дії та характеристик їх складових частин – напівпровідникових приладів, а це неможливо без знання основ теорії електропровідності напівпровідників (зонної теорії).

1.1. Елементи зонної теорії напівпровідників

Різні речовини по різному проводять електричний струм. Так, для багатьох металів (алюміній, мідь, залізо, тощо) питомий опір ρ при кімнатній температурі не перевищує $10^{-7} Ом \cdot м$. Речовини з таким питомим опором називають *провідниками*. Діелектрики (скло, фарфор, парафін, тощо) практично не проводять електричний струм. Їх питомий опір становить $10^{12} – 10^{14} Ом \cdot м$. Це – *ізолятори*.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

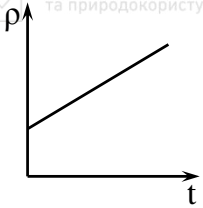


Рис. 1.1. Залежність питомого опору провідників від температури

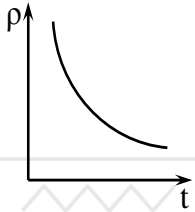


Рис. 1.2. Залежність питомого опору напівпровідників від температури

Поряд із провідниками та ізоляторами нує також цілий клас речовин, які називаються *напівпровідниками*. Їх питомий опір вищий, ніж у металів, але нижчий, ніж у ізоляторів, і перебуває в широких межах – від 10^{-5} до 10^{6} *Ом·м*.

Експериментальні дослідження показують [2, 3], що в широкому діапазоні температур для провідників справедливе співвідношення для питомого опору ρ:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \cdot t)\,, \qquad (1.1)$$

де ρ_0 – питомий опір при температурі 0 °*C*, α – температурний коефіцієнт опору, *t* – температура за шкалою Цельсія.

Залежність питомого опору ρ від температури *t* наведена на рис. 1.1. З рисунку видно, що з ростом температури питомий опір чистих металів зростає.

Для напівпровідникових речовин питомий опір з ростом температури зменшується (див. рис. 1.2). Досліди показують, що в металах струм створюється електронами, тоді як у напівпровідниках – рухом як негативних зарядів (електронів), так і позитивних зарядів (дірок).

Побудова теорії електропровідності металів і напівпровідників можлива лише в рамках квантової механіки. Згідно цієї теорії всередині кристалічних тіл, до яких відносяться метали і розглянуті нижче напівпровідники, нерухомі йони кристалічної решітки створюють періодичне, змінне в просторі електричне поле (див. рис. 1.3). Ця періодичність поля впливає на характер руху і стан електронів. У першому наближенні можна допустити, що електрони в твердому тілі перебувають всередині деякої «потенціальної ями» з плоским дном.

Розрахунки показують, що електрони в такій системі приймають дискретні значення енергії *E*, які визначаються за формулою:

$$E = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2\,m\,l^2} n^2\,,\ n=1,2\ldots \qquad (1.2)$$

Національний університет
водного господарства
та природокористування

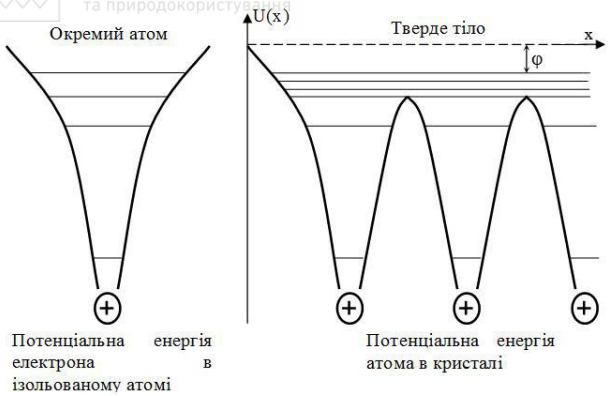
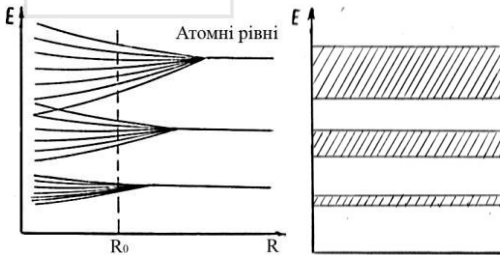


Рис. 1.3. Енергія електронів в атомі і кристалі

де $\hbar$ – стала Дірака, m – маса електрона, l – ширина потенціальної ями, n – квантове число дискретних станів .

При утворенні кристалічної решітки твердих тіл, тобто при зближенні окремих атомів до відстані $\sim 10^{-10}\,м$, атомні енергетичні рівні повинні розщеплюватись у зони рівнів, оскільки принцип Паулі тепер стосується не окремих атомів, а кристалічної решітки в цілому. Розщеплення тим сильніше, чим менша відстань між атомами і чим вищий енергетичний рівень (рис. 1.4а). Таким чином, шкала енергій електронів в кристалічній решітці розбивається на зони дозволених енергій і зони заборонених енергій (на рис. 1.4 б заштриховані зони дозволених енергій, які відповідають рівноважній відстані між атомами R_0).



а) б)

Рис. 1.4. Схема енергетичних рівнів кристалу

Кількість енергетичних рівнів в зонах співмірна з кількістю атомів речовини, тобто 10^{22}-10^{23}. Оскільки ширина зон 1-10eB, то відстань між окремими рівнями $10^{-22}eB$, що значно менше від енергії теплового руху $\boldsymbol{кT}$, тому можна вважати розподіл енергій в зонах неперервним.

Згідно принципу Паулі на кожному енергетичному рівні в зонах може перебувати не більше двох електронів з протилежними спінами. Якщо зона утворена з повністю заповненого електронами атомного рівня, то всі рівні такої зони також повністю заповнені. Зрозу-

Національний університет
водного господарства
та природокористування

міло, що це стосується зон, утворених з глибоких атомних рівнів. Електрони таких зон не можуть брати участь в електричних і теплових явищах, бо ні енергія електричного поля, ні теплова енергія не є достатніми для переходу електрона в сусідню вищу зону, а переходи в межах заповненої зони неможливі.

Інша ситуація в зонах, утворених з частково заповнених рівнів, тобто рівнів валентних електронів. Зрозуміло, що такі зони будуть заповнені також частково. Для прикладу розглянемо зону, утворену з атомного s-рівня, на якому перебуває лише один (валентний) електрон (Li, Na, K, тощо). Якщо кристалічна решітка утворена з N атомів, то вказана зона має N рівнів, на яких може розміститись $2N$ електронів. Оскільки валентних електронів лише N, то заповниться лише половина зони. А це означає, що під впливом зовнішнього збудження (тепло, електричне поле) електрони можуть вільно переходити на вищі рівні в межах однієї зони, тим самим збільшувати свою енергію, тобто прискорюватися. Отже, електрони в частково заповненій зоні є носіями струму. Тому така зона, яку ми назвемо *валентною,* є одночасно *зоною провідності*. Приведена зонна модель дозволяє пояснити властивості металів, напівпровідників та ізоляторів. Перш за все, їх відмінність в значеннях питомих опорів пояснюється різною шириною заборонених зон (див. рис. 1.5) .

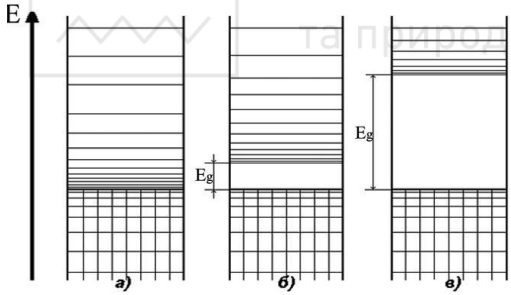


Рис. 1.5. Енергетичні діаграми при температурі, близькій до абсолютного нуля:
а – провідників; б – напівпровідників;
в – діелектриків

В металах валентна зона (V-зона) заповнена частково, всі вищі зони порожні, всі нижчі зони заповнені повністю. В напівпровідниках і діелектриках V-зона заповнена повністю (при $T = 0$) і тому не може бути зоною провідності. Наступна вища зона при $T = 0$ порожня. Ця зона називається зоною провідності (C-зоною), бо при певних умовах ($T \neq 0$) в ній можуть з'явитися електрони, які будуть носіями струму. Енергетична відстань між дном C-зони (E_c) і стелею V-зони (E_v) називається забороненою зоною

$E_g = E_c - E_v$. Якщо $E_g < 2{,}5eB$, то речовина – напівпровідник, якщо $E_g > 2{,}5eB$, то речовина – діелектрик.

1.2. Власна провідність напівпровідників

Появу носіїв струму в напівпровідниках розглянемо, використавши плоску модель кристалічної решітки чистого (бездомішкового) напівпровідника, наприклад, Ge (рис. 1.6). Такий напівпровідник має тетраедричну кристалічну структуру, при якій кожен атом оточений чотирма сусідніми. Зв'язок між сусідніми атомами забезпечується двома валентними електронами з протилежними спінами (ковалентний зв'язок). При $T = 0$ всі валентні електрони перебувають на зв'язках, «зайвих» електронів немає, що відповідає повністю заповненій валентній зоні і порожній зоні провідності.

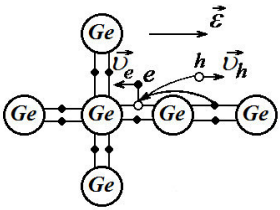


Рис. 1.6. Модель решітки чистого германію

При нагріванні кристалу деякі електрони за рахунок енергії теплового руху можуть втративши зв'язки, стати вільними і в електричному полі напруженістю $\vec{\varepsilon}$ набути швидкості напрямленого руху $\vec{v}_e$. На звільнене вакантне місце може перейти електрон із сусіднього зв'язку, що рівнозначно рухові вакантного місця в протилежному напрямку зі швидкістю $\vec{v}_h$. Даний незаповнений ковалентний зв'язок отримав назву *дірки* (*hole*). Оскільки дірка рухається за полем (електрон – проти поля), то дірку слід розглядати як позитивний заряд $+e$. На енергетичній діаграмі теплова генерація вільних електронів і дірок зображується як перехід електрона з V-зони у C-зону (рис. 1.7) . Зрозуміло, що чим вища інтенсивність теплового збудження (вища температура), тим вища концентрація електронів (n) і дірок (p) у відповідних

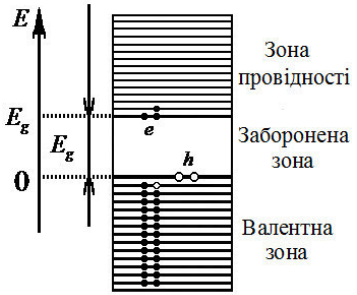


Рис. 1.7. Енергетична діаграма чистого напівпровідника

Національний університет водного господарства та природокористування

зонах. Відмітимо, що ця концентрація не перевищує, як правило, 0,1% від кількості енергетичних рівнів в зонах і визначається за формулою:

$$n = n_0 \, e^{-\frac{E_g}{2\,k \cdot T}}. \qquad (1.3)$$

Точний розрахунок показує, що концентрація електронів в зоні провідності чистого германію при T=300K дорівнює $2{,}5 \cdot 10^{13}$ $см^{-3}$, а сіліцію – $6{,}8 \cdot 10^{10}$ $см^{-3}$. Отже, електрони є носіями струму в майже порожній зоні провідності, а дірки – в майже повністю заповненій валентній зоні.

Провідність бездомішкового напівпровідника називається *власною*. Очевидно, що у власному напівпровіднику концентрації електронів n_i і дірок p_i однакові.

1.3. Домішкова провідність напівпровідників

Національний університет водного господарства та природокористування

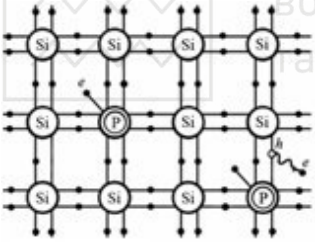


Рис. 1.8. Модель кристалу напівпровідника з донорними домішками.

Рис. 1.9. Енергетична діаграма напівпровідника з донорними домішками.

Чистий напівпровідник створити практично не можливо. В реальному напівпровіднику існує певна кількість домішок, тобто атомів іншої хімічної природи. Внесення навіть невеликої кількості домішок (порядку 0,001%) призводить до різкого збільшення електропровідності напівпровідника.

Нехай в чотиривалентний напівпровідник, наприклад, Сіліцій (Si), введено домішку п’ятивалентної речовини Фосфору (P). Такий домішковий йон заміщує в кристалічній решітці Si один із його вла-

Національний університет водного господарства та природокористування

сних йонів, як показано на рис. 1.8. Один електрон валентної оболонки п'ятивалентної речовини при цьому стає «зайвим» – він не потрібен для здійснення ковалентного зв'язку між йонами решітки. Такий слабо зв'язаний електрон за рахунок енергії теплового руху, легко відривається від йона, тобто переходить у зону провідності. Це означає, що на моделі енергетичних зон поблизу дна зони провідності з'являються рівні енергії, з яких електрони переходять в зону провідності. Такі рівні називають *донорними* (див. рис. 1.9).

Сама п'ятивалентна домішка також називається донорною. Очевидно, що в цьому випадку концентрація електронів провідності різко зростає. Електрони в зоні провідності в напівпровіднику з донорною домішкою називаються *основними носіями заряду*. Поряд з цим в такому напівпровіднику при достатньо високих температурах за рахунок власних переходів генеруються і дірки. Останні називаються *неосновними носіями*. Очевидно, що для напівпровідника з донорною домішкою концентрація електронів набагато більша концентрації дірок.

Національний університет водного господарства та природокористування

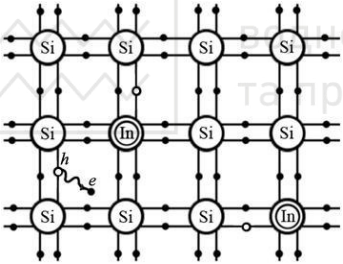


Рис. 1.10. Модель кристалу напівпровідника з акцепторними домішками

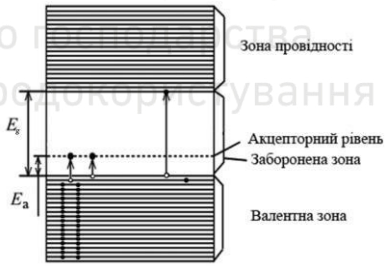


Рис. 1.11. Енергетична діаграма напівпровідника з акцепторними домішками

Якщо в чотиривалентний напівпровідник внести атоми тривалентної домішки, наприклад, Індію (In), то атом такої домішки, заміщуючи власний атом чотиривалентного напівпровідника, не здатний заповнити всі ковалентні зв'язки, як показано на рис. 1.10.

На енергетичній моделі це еквівалентно введенню рівнів енергії, які лежать біля вершини валентної зони (див. рис. 1.11). На ці рівні легко переходять електрони із валентної зони, утворюючи певне число дірок.

Дірки у валентній зоні напівпровідника з тривалентною домішкою, яка називається *акцепторною*, є основними носіями заряду.

Національний університет водного господарства та природокористування

При цьому завжди є певна кількість вільних електронів за рахунок власної генерації. Вони є неосновними носіями заряду. Для такого напівпровідника з акцепторною домішкою концентрація дірок набагато більша концентрації електронів.

Отже, струм в домішкових напівпровідниках здійснюється загалом основними носіями заряду. Вони з'являються в результаті введення в напівпровідник домішки. Така провідність називається домішковою: електронного (*n*-) або діркового (*p*-) типу.

1.4. Електронно-дірковий перехід

Електронно-дірковий перехід утворюється на межі двох напівпровідників з різним типом домішкової провідності (див. рис. 1.12). Важливо підкреслити, що електронно-дірковий перехід з потрібними для створення напівпровідникових приладів властивостями повинен бути отриманим в єдиній кристалічній структурі, у різні області якої вводяться акцепторні та донорні домішки. Для цього використовують технологію плавлення (технологія сплавного діода).

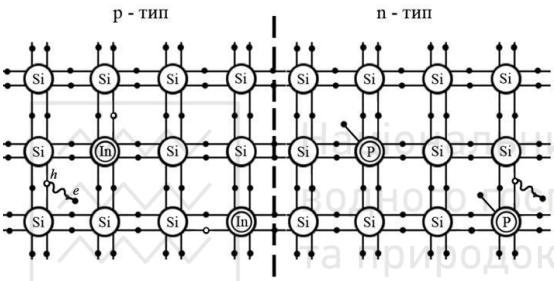


Рис. 1.12. Модель *p-n* переходу

На границі поділу областей *p* і *n* навіть за відсутності зовнішніх джерел електрорушійної сили утворюється потенціальний бар'єр, який власне і є електронно-дірковим переходом (*p-n-перехід*). Це пояснюється тим, що в приграничній області дірки із *p*-області внаслідок дифузії рекомбінують з електронами із *n*-області, збільшуючи кількість зарядово не скомпенсованих йонів решітки

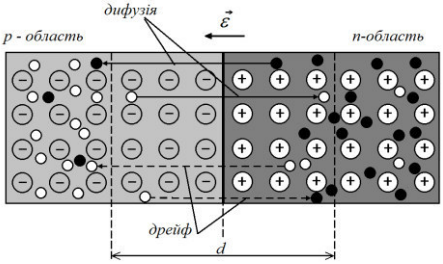


Рис. 1.13. Збіднений шар *p-n* переходу

Національний університет водного господарства та природокористування

Рис. 1.14. Позначення напівпровідникового діода

(*збіднений* носіями заряду *шар*). Зменшення кількості носіїв заряду приводить до збільшення опору *p-n*-переходу. Електричне поле подвійного зарядженого приконтактного шару забезпечує дрейфовий струм неосновних носіїв. Рівновага настає, коли цей струм дорівнює дифузійному струму основних носіїв. Товщина збідненого шару – потенціального бар'єру *d* сягає декількох мікрон (див. рис. 1.13).

1.5. Принцип дії напівпровідникового діода

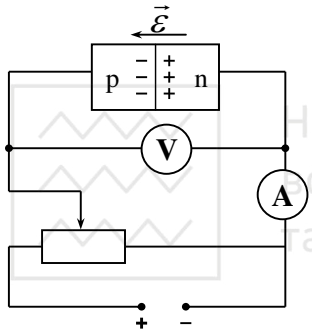


Рис. 1.15. Пряме включення напівпровідникового діода

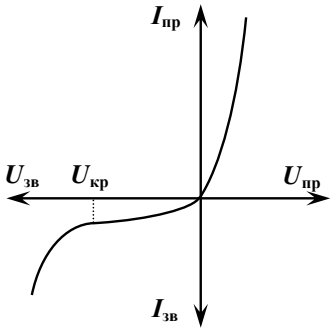


Рис. 1.16. Вольт-амперна характеристика напівпровідникового діода

Електронно-дірковий перехід є основною складовою частиною напівпровідникового діода. Схематично такий діод показано на рис. 1.14, причому риска відповідає *n*-області, а трикутник *p*-області.

Розглянемо процеси, які протікають в *p-n*-переході при внесені його в зовнішнє електричне поле. Пряма зовнішня напруга на *p-n*-переході (рис. 1.15) викликає збільшення дифузії основних носіїв як із *p*-області в *n*-область (дірок), так і в зворотному напрямку (електронів) і зменшення товщини збідненого шару. Проходячи через *p-n*-перехід в сусідні області надлишкові носії заряду рекомбінують. Оскільки прикладена зовнішня напруга порушує рівновагу, цей процес продовжується неперервно. Це означає, що пряме зміщення зумовлює протікання через *p-n*-перехід струму основних носіїв заряду. Цей струм (його називають *прямим*) збільшується з ростом прикладеної до діода напруги. При зворотній напрузі струм основних носіїв через перехід неможж-

Національний університет водного господарства та природокористування

ливий, товщина збідненого шару збільшується. Для неосновних носіїв електричне поле збідненого шару є прискорюючим. Зростання цього прискорюючого поля викликає протікання через діод струму неосновних носіїв, який називається *зворотнім струмом*. Оскільки неосновних носіїв в *p*- і *n*-областях відносно мало, то збільшення зворотного струму з ростом зворотної напруги відбувається набагато повільніше, ніж у випадку основних носіїв.

Залежність сили струму в діоді від прикладеної до нього зовнішньої напруги називають вольт-амперною характеристикою діода. Якісна вольт-амперна характеристика діода приведена на рис. 1.16, де показані прямий $I_{пр}$ і зворотний $I_{зв}$ струми діода в залежності від прикладеної напруги U.

1.5.1. Використання напівпровідникового діода

В основі застосування діодів лежить нелінійність їх вольт-амперної характеристики [4]. При цьому в багатьох пристроях діод виконує роль елемента з односторонньою провідністю, своєрідного ключа для пропускання струму тільки в одному напрямку.

Діод як випрямляч змінного струму

Випрямлячі змінного струму використовуються у джерелах живлення різноманітних пристроїв, в тому числі і комп'ютерів.

Найпростішою схемою випрямлення змінного струму є схема *однопівперіодного* випрямляча на одному діоді, показана на

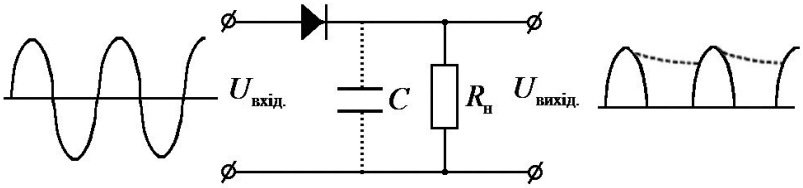


Рис. 1.17. Схема напівпровідникового випрямляча

рис. 1.17. В даній схемі вхідний струм на протязі однієї половини періоду тече через діод. При цьому на опорі $R_н$ спостерігались би додатні імпульси вихідної напруги $U_{вихід}$, якби в схемі не було конденсатора C. Його дія призводить до акумуляції заряду на обкладках в перший півперіод і розрядку через опір у другий півперіод. Це

Національний університет водного господарства та природокористування

дозволяє згладжувати імпульси напруги на опорі, тобто випрямляти струм.

Стабілізатори напруги

Явище пробою *p-n*-переходу використовують для стабілізації напруги. Для цього до джерела нестабільної напруги $U_{вхід}$ приєднують коло, що складається з резистора і стабілітрона – *p-n*-переходу, розрахованого на задану напругу пробою і ввімкненого у зворотному напрямі (див. рис. 1.18). Якщо напруга на стабілітроні починає перевищувати критичне значення, то стабілітрон відкривається, струм через резистор *R* збільшується і падіння напруги на опорі теж збільшується. Таким чином напруга на стабілітроні не зможе перевищити критичну (напругу пробою). При цьому нестабільна напруга виявиться сумою двох: нестабільної на резисторі *R* і стабільної на навантаженні $R_н$.

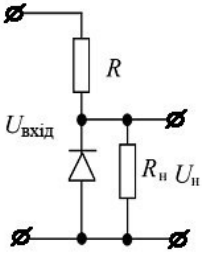


Рис. 1.18. Схема напівпровідникового стабілізатора напруги

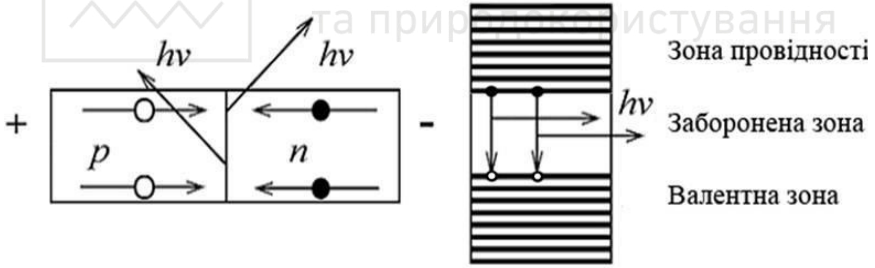


Рис. 1.19. Схема роботи світловипромінювального діода

Світловипромінювальні діоди

Принцип роботи світловипромінювальних діодів – пристроїв, що перетворюють енергію електричного струму в світлову енергію, можна зрозуміти, розглянувши рис. 1.19 зі схемою включення *p-n*-переходу в прямому напрямі. На границі поділу дірки з *p*-області рекомбінують з електронами *n*-області. При цьому відбувається перехід електрона із зони провідності у валентну зону, який супроводжується квантом електромагнітного випромінювання. Можна підібрати таку ширину забороненої зони напівпровідника, яка відпові-

дає заданій частоті електромагнітного випромінювання (від інфрачервоного до ультрафіолетового).

Світловипромінювальні діоди мають високий ККД, який може сягати 80%. Вони довговічні, оскільки на відміну від ламп розжарювання і газорозрядних ламп не містять ниток розжарення, та інших вузлів, які швидко зношуються.

Лазерні світловипромінювальні діоди

Дія лазерних світловипромінювальних діодів з деякими відмінностями подібна до роботи світловипромінювальних діодів. Необ-

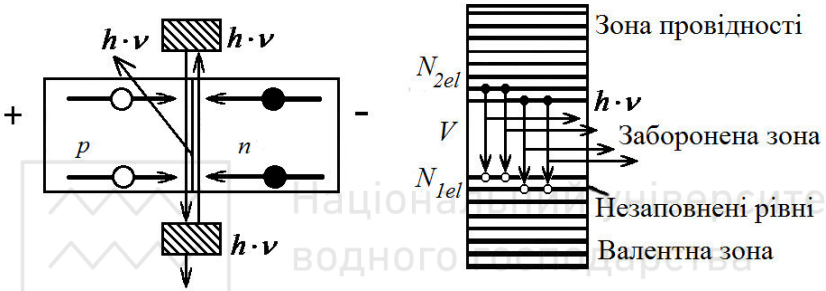


Рис. 1.20. Схема роботи лазерного діода

хідно в області *p-n*-переходу створити інверсну заселеність (багато електронів у збудженому стані і мало – в основному стані). Велика концентрація електронів провідності (вони відповідають збудженому рівню лазера) зумовлена їх надходженням з *n*-області (див. рис. 1.20). Велика концентрація дірок, що надходять з *p*-області, відповідає малій кількості електронів в основному стані переходу (N_1), що використовується в лазері. У такому випадку можна забезпечувати умову інверсної заселеності (багато (N_2) електронів у збудженому стані і мало (N_1) - в основному стані) в області *p-n*-переходу. В якості дзеркал лазерного резонатора використовують відполіровані торці самого напівпровідникового кристала (див. рис. 1.20); одне з них роблять

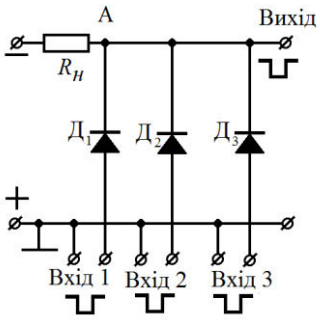


Рис. 1.21. Схема співпадань на напівпровідникових діодах

Національний університет водного господарства та природокористування

частково прозорим (нижнє на лівому рис. 1.20) для виходу випромінювання з резонатора.

Докладніше про принцип роботи лазера розглянуто у третьому розділі.

Логічні схеми на діодах

Часто діоди використовуються для реалізації різноманітних схем, що виконують логічні операції. Зупинимось на одному прикладі такої схеми – логічної схеми співпадань «І». Вона зображена на рис. 1.21.

Схема співпадань – це електронний пристрій для виділення з сукупності сигналів (електричних імпульсів), що поступили на нього, лише таких, які повністю або частково збігаються в часі. Це пристрій дискретної дії з декількома входами і одним виходом, сигнал на якому з'являється лише тоді, коли є сигнали на всіх входах одночасно.

У початковому стані діоди ввімкненні в прямому напрямку, тобто *p-n* переходи мають дуже малий опір, через них тече струм (входи діодів замкнені на землю) і напруга в точці А, а значить і на виході схеми практично дорівнює напрузі джерела. При подачі на вхід першого діода сигналу від'ємної напруги, яка більша за напругу джерела, і відсутності сигналів на входах другого і третього діодів, перший діод закривається, а через другий і третій продовжують проходити струми. Напруга в точці А, а значить і на виході схеми не змінюється. Те ж саме буде спостерігатися у випадку, коли сигнал буде надходити на будь-який інший діод, за умови відсутності сигналу на вході хоча б одного іншого діода. Лише при одночасній подачі сигналів на входи всіх трьох діодів, напруга в точці А впаде внаслідок закриття діодів.

Тунельні діоди

Тунельні діоди – це діоди, в яких використовуються напівпровідники з великою концентрацією домішок. ($10^{19} \div 10^{21} см^{-3}$). Така концентрація домішок дозволяє зробити *p-n*-перехід надзвичайно вузьким (соті мікрона), що дає можливість проявитись в діоді квантово-механічним явищам тунельного переходу через *p-n-перехід*. Внаслідок малої товщини збідненого шару електрони із зони провідності *n*–області можуть безпосередньо тунелювати через збіднений шар в

Національний університет водного господарства та природокористування

валентну зону *p*–області. Характерною особливістю тунельних діодів є *N* – подібна вольт-амперна характеристика (див. рис. 1.22). На ній при прямому включенні діода є ділянка від'ємної диференціальної провідності (між U_1 і U_2 на рис. 1.22). Наявність від'ємної провідності дає можливість використовувати тунельні діоди в якості підсилювачів або генераторів електричних сигналів, тригерів та швидкодіючих перемикачів.

Фоторезистори та фотодіоди

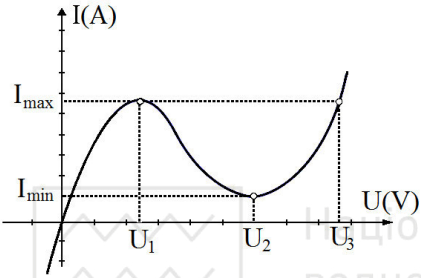


Рис. 1.22. Вольт-амперна характеристика тунельного діода

Принцип роботи фоторезисторів та фотодіодів базується на явищі фотопровідності. Під фотопровідністю розуміють електропровідність, яка виникає у напівпровіднику при його освітленні.

Енергія поглинутих напівпровідником квантів світла (фотонів) іде на утворення електронно-діркових пар (електронів в зоні провідності і дірок в валентній зоні). В результаті утворюється надлишкова концентрація носіїв заряду, яка пропорційна інтенсивності падаючого світла при малій освітленості напівпровідника. Прилади, які працюють на даному принципі називаються фотодіодами. Їх використовують для реєстрації інтенсивності світла і перетворення світлових сигналів в електричні.

Фоторезистор — напівпровідниковий прилад, який змінює величину свого опору під дією світла. Для виготовлення фоторезисторів використовують напівпровідникові матеріали з відповідною шириною забороненої зони. Так, для реєстрації видимого світла використовуються фоторезистори з селеніду і сульфіду кадмію. Для реєстрації інфрачервоного випромінювання використовуються напівпровідники Ge (чистий або легований домішками Au, Cu, Zn), Si, PbS, PbSe, PbTe, InSb, InAs, HgCdTe, часто охолоджувані до низьких температур. Напівпровідник наносять у вигляді тонкого шару на скляну або кварцову основу або вирізають у вигляді тонкої пласти-

Національний університет водного господарства та природокористування

нки з монокристалу. До шару або пластинки напівпровідника під'єднують два електроди.

1.6. Транзистори

Транзистор (від англ.: transfer – переносити і резистор), напівпровідниковий прилад для підсилення, генерування і перетворення електричних сигналів, виконаний на основі монокристалічного напівпровідника (переважно Si або Ge), що містить не менше трьох областей з різною – електронною (*n*) і дірковою (*p*) – провідністю [5]. Електронна промисловість випускає широкий асортимент транзисторів, застосування яких дозволяє створити економну за жив-

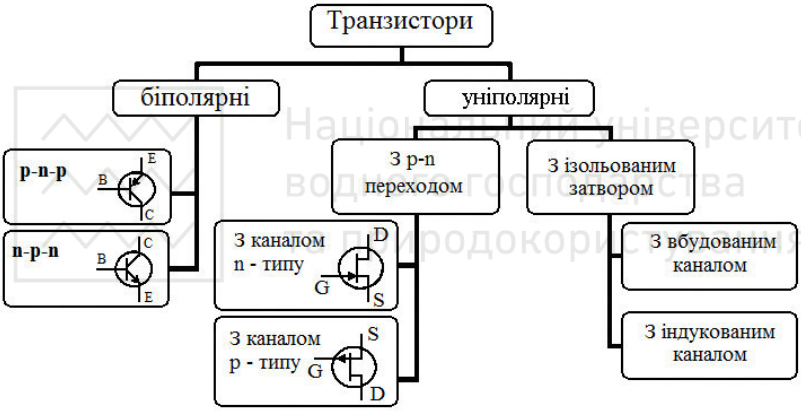


Рис. 1.23. Класифікація транзисторів, які використовуються в комп'ютерній техніці

ленням, малогабаритну і надійну апаратуру.

Класифікація транзисторів, які використовуються в комп'ютерній техніці представлена на рис. 1.23.

1.6.1. Біполярні транзистори

Схематичну будову плоского біполярного транзистора з двома *p-n*-переходами показано на верхньому рис. 1.24. Основним елементом транзистора є кристал Германію або Сіліцію, в якому створені три області різної провідності. Дві крайні області завжди мають провідність одного типу, протилежну до провідності середньої об-

Національний університет водного господарства та природокористування

ласті. Такі прилади називаються *транзисторами типу n-p-n* або *p-n-p* (див. нижній рис. 1.24). Середня область транзистора називається *базою*, одна крайня область – *колектором*, інша – *емітером*. Область бази в транзисторі є дуже тонкою – близько декількох *мкм*. Крім того, концентрація атомів домішки в базі незначна – в багато разів менша, ніж в емітері.

Отже, такий транзистор має два *p-n*-переходи, які називаються *колекторним* та *емітерним*.

1.6.1.1. Принцип дії біполярного транзистора

Для пояснення принципу роботи біполярного транзистора розглянемо рис. 1.25. Транзистор можна вважати з'єднанням двох напівпровідникових діодів, з підключенням до них двох джерел напруги: між емітером і базою – в прямому (пропускному) напрямку; між базою і колектором – в зворотному.

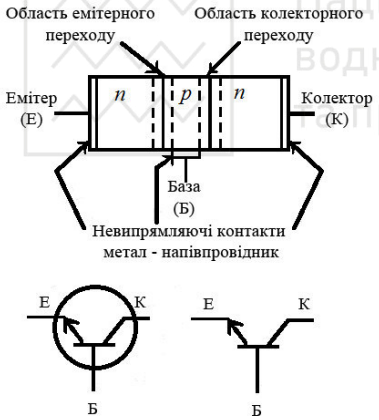


Рис. 1.24. Будова біполярного транзистора та його позначення

Внаслідок такого підключення джерел живлення ширина *p-n* переходу між базою і емітером буде малою а між колектором і базою - великою і, відповідно, опір переходу «база-емітер» буде набагато меншим опору переходу «колектор-база» (від 100 до 10000 разів). Для отримання струму в емітерному переході достатньо напруги в декілька десятих вольта.

Вольт-амперна характеристика емітерного переходу є характеристикою напівпровідникового діода при прямому включенні, вольт-амперна характеристика колекторного переходу подібна характеристиці діода при зворотному включенні (див. рис. 1.16).

В емітері електрони є основними носіями заряду і при такому включенні джерела вони легко інжектуються в базу. База насичується електронами, оскільки концентрація в ній основних носіїв (дірок) невелика.

Національний університет водного господарства та природокористування

Між колектором і базою підключена зворотна напруга, це означає, що основні носії бази (дірки) не можуть проходити в колектор. Електрони бази є неосновними носіями і вони легко дифундують в колектор. Ширина бази вибирається такою, щоб при її проходженні електрони не могли рекомбінувати з дірками бази.

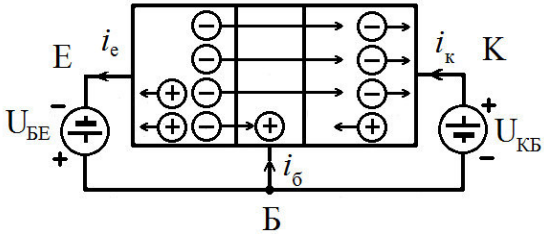


Рис. 1.25. Принцип дії біполярного транзистора

Оскільки струм, що проходить через перехід «емітер-база» практично дорівнює струму переходу «база-колектор», а опори переходів суттєво різні, то потужність, яка виділяється в колекторному колі, також суттєво більша потужності, що виділяється в емітерному колі. Дійсно, оскільки:

$$P_{БЕ} = I_e^2 \cdot R_{БЕ}, \text{ і } P_{БК} = I_к^2 \cdot R_{БК}, \qquad (1.4)$$

а $I_e \approx I_k$ і $R_{БК} \approx (100 \div 10000)\, R_{БЕ}$, то

$$P_{БК} = (100 \div 10000)\, P_{БЕ}. \qquad (1.5)$$

Тут $P_{БЕ}$ і $P_{БК}$ – потужності вхідного і вихідного струмів, I_e і $I_к$ – емітерний і колекторний струми, $R_{БЕ}$ і $R_{БК}$ – опори переходів «емітер-база» і «база-колектор», відповідно.

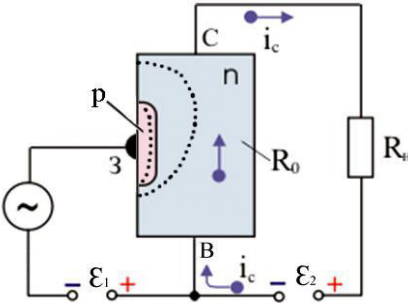


Рис. 1.26. Принцип дії польового транзистора

1.6.2. Польові транзистори

Польові транзистори – це транзистори, в яких носіями струму є або електрони, або дірки (носії одного знаку). Тому такі транзистори називаються *уніполярними*.

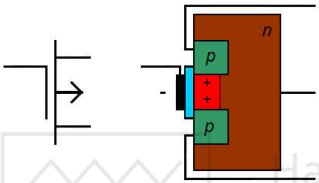
В основу роботи польового транзистора покладена залежність опору деякого струмопровідного шару–каналу від прикладеної напруги, тобто від величини електричного поля, з чим і пов'язаний термін «польовий транзистор». Польові транзистори по-

Національний університет водного господарства та природокористування

діляються на польові транзистори з управляючим *p-n*-переходом і польові транзистори з ізольованим затвором.

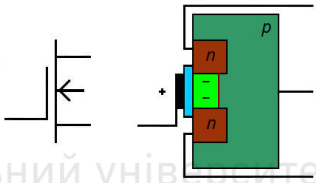
1.6.2.1. Принцип дії польового транзистора з управляючим *p-n* переходом

Схематично конструкція такого польового транзистора показана на рис. 1.26. Основою приладу є кристал домішкового напівпровідника, наприклад *n*–типу, з двома омічними контактами, які називаються *витік* і *стік*. Між витоком і стоком розміщений *p-n* перехід, у



P - канальний МОН-транзистор

Рис. 1.27, а. Будова *p*-канального МОН-транзистора та його позначення



n - канальний МОН-транзистор

Рис. 1.27, б. Будова *n*-канального МОН-транзистора та його позначення

Національний університет водного господарства та природокористування

якого зі сторони *p* - області знаходиться омічний контакт – *затвор*. При прикладенні до *p-n*-переходу, наприклад, між контактами затвор і витік зворотної напруги, збіднена область *p-n* переходу розширюється, в результаті чого переріз каналу зменшується. Носії заряду (електрони) протікають по каналу між витоком і стоком, створюючи електричний струм i_c. Подаючи зворотну напругу на вхід затвор - витік ми можемо регулювати ширину *p-n*-переходу і регулювати ширину каналу, яким протікає електричний струм, а отже і сам електричний струм через транзистор. Польові транзистори мають низку суттєвих переваг над біполярними, важливих для використання в обчислювальній техніці:

1. Вхідний опір польових транзисторів набагато більший від опору біполярних, що важливо для електричних схем, де потрібне економне споживання потужності для управління приладом (наприклад, у комп’ютерів). Крім того, великий вхідний опір транзистора спрощує узгодження послідовних каскадів електричних схем.

Національний університет водного господарства та природокористування

2. В каналі польового транзистора рух носіїв заряду відбувається під дією електричного поля на відміну від дифузійного руху носіїв в біполярному транзисторі. Цей факт суттєво підвищує швидкодію приладів, побудованих на основі польових транзисторів.

1.6.2.2. Принцип дії польового транзистора з ізольованим затвором

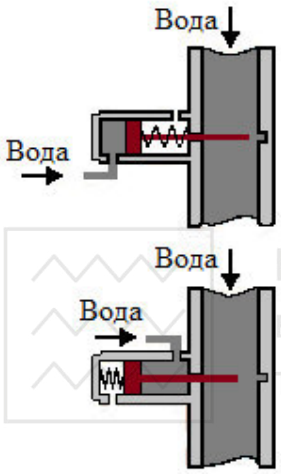


Рис. 1.27, в. Аналогія МОН-транзистора водяному вентилю

Окрім польових транзисторів з управляючим затвором існують так звані транзистори з ізольованим затвором. Такі транзистори часто називають МДН–транзистори (метал-діелектрик-напівпровідник) або МОН-транзистори (метал-оксид-напівпровідник). На рис. 1.27, а і рис.1.27, б показані позначення на схемах такого транзистора і його будова.

Основою транзистора може бути сіліцієва пластина з електропровідністю *n*-типу (*n*-канальний МОН-транзитор, див. рис. 1. 27, а) або *p*-типу (*p*-канальний МОН-транзитор, див. рис. 1. 27, б). Розглянемо *n*-канальний МОН-транзитор (*p*-канальний МОН-транзитор ідентичний, з заміною *p* на *n*). У його сіліцієвій основі створено дві області з електропровідністю *n*+-типу (з підвищеною провідністю). Ці області називаються витоком і стоком. Між стоком і витоком розміщується приповерхневий канал з електропровідністю *n*-типу. Заштрихована область – діелектричний шар з діоксиду сіліцію (його товщина зазвичай складає 0,1-0,2*мкм*). Над діелектричним шаром розташований затвор у вигляді тонкої металевої плівки. База такого транзистора (основа кристалу) зазвичай сполучена з витоком і її потенціал береться за нульовий. Інколи до бази приєднаний окремий контакт. Розглянутий транзистор називають транзистором з власним (вбудованим) каналом.

Принцип його дії можна зрозуміти, якщо застосувати аналогію транзистора з водяним вентилем, який закривається під тиском води

(див. рис. 1.27, в). Основною трубою (між витоком і стоком) тече вода (аналог струму). Її витрата може регулюватись заслінкою, прикріпленою до рухомого поршня, який знаходиться під пружиною всередині ізольованого бічного циліндра (аналог управляючого затвора). Під тиском води в бічному циліндрі поршень разом із заслінкою може переміщатися, відповідно закриваючи або відкриваючи основну трубу. Тоді вентиль, зображений вище на рис. 1.27,в, буде перекривати потік води в основний трубі, якщо керуючою трубою в нього потрапить вода під тиском. Вентиль, зображений на нижньому рис. 1.27,в, під дією тиску води в керуючій трубці навпаки відкриється. Два таких вентиля складають комплементарну

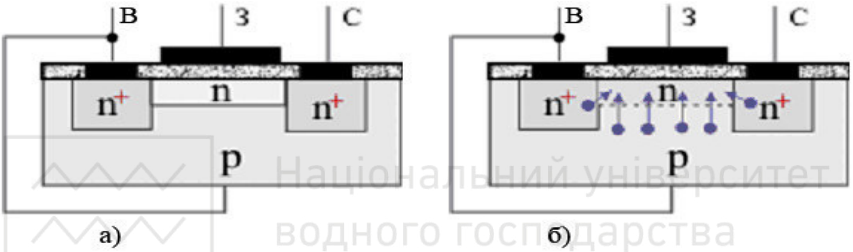


Рис. 1.28. Принцип дії польового транзистора з ізольованим затвором

пару вентилів (аналогів *p*- та *n*-канальних МОН-транзиторів).

Повернемось до транзистора (рис. 1.28). Відповідно до аналогії, якщо до його затвора не прикладена напруга, то при ненульовій напрузі між стоком і витоком, через канал потече струм (потік електронів). Через базу струм не піде, оскільки один з *p*-*n*-переходів перебуває під зворотною напругою. При подачі на затвор напруги негативної полярності відносно витоку (отже і бази) в каналі утворюється поперечне електричне поле, яке виштовхує електрони з каналу в області витоку, стоку і бази. Канал збіднюється електронами, його опір збільшується, струм зменшується. Чим більша напруга на затворі, тим меншим буде струм. Такий режим називається *режимом збіднення*. Якщо подати позитивну напругу на затвор, то під дією поля з областей стоку, витоку і кристалу в канал приходитимуть електрони. Опір каналу буде зменшуватись, а струм в каналі – збільшуватися. Такий режим називається *режимом збагачення*. Якщо база *n*-типу, то канал має бути *p*-типу і полярність напруги змінюється на протилежну. Іншим типом є так званий транзистор з індукованим (інверсним) каналом (див. рис. 1.28, б).

Національний університет водного господарства та природокористування

За рахунок значної різниці між роботами виходу електронів з напівпровідника (база) і металу (затвор) виникає сильне контактне електричне поле. Це поле виштовхує дірки з приповерхневого шару (і притягує електрони). Ефект настільки сильний, що в приповерхневому шарі основними носіями стають електрони і має місце інверсія типу провідності. Зовнішня напруга, прикладеної до затвору, діє аналогічно випадку транзистора з власним каналом.

Слід зазначити, що польовий транзистор дозволяє отримати набагато більший коефіцієнт підсилення, ніж біполярний. Володіючи високим вхідним опором (і низьким вихідним) польові транзистори поступово витісняють біполярні. Слід пам'ятати, що польові транзистори потребують захисту від статичної електрики.

1.6.2.3. Польовий транзистор з плаваючим затвором

Транзистор з плаваючим затвором є одним з різновидів польового транзистора (див. рис. 1.29). В ньому крім основних складових частин – витоку, стоку і управляючого затвору, є додатковий шар, який називається *плаваючим затвором*, у вигляді металевої або сіліцієвої пластинки. Плаваючий затвор транзистора розташований в глибині діелектрика на деякій відстані від усіх контактів транзистора, що не дає можливості малоенергетичним електронам каналу провідності потрапляти на нього. Над плаваючим затвором розташований управляючий затвор. Якщо до нього прикласти напругу, то багато електронів провідності набувають настільки високої енергії, що можуть внаслідок тунельного ефекту проходити крізь діелектрик і осідати на плаваючому затворі, в результаті чого заряд плаваючого затвору з нейтрального стає негативним. Електрони, що потрапили на плаваючий затвор, можуть залишатися там протягом десятків років, причому їх кількість не зменшуватиметься, якщо на транзистор не подається напруга. Якщо ж до управляючого затвору прикласти напругу про-

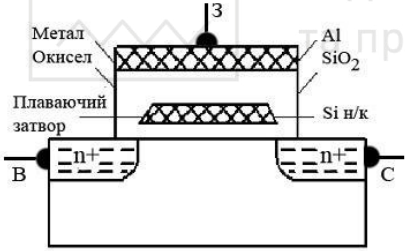


Рис. 1.29. Будова польового транзистора з плаваючим затвором

Національний університет
водного господарства
та природокористування

тилежного знаку, то електрони починають з плаваючого затвору стікати, тим самим розряджаючи його. Властивість транзисторів з плаваючим затвором зберігати на ньому заряди широко вується в напівпровідникових пристроях комп'ютерної пам'яті (докладніше в 1.10.1.6 – 1.10.1.7).

1.6.2.4. Тиристори

Тиристорами називаються напівпровідникові прилади з трьома та більше *p-n*-переходами, які призначені для використання в якості електронних ключів у схемах перемикання електричних струмів. В залежності від конструктивних особливостей і властивостей тиристори поділяються на діодні (диністори) і тріодні (триністори). Серед діодних тиристорів розрізняють тиристори зворотного закриття, зворотної провідності та симетричні. Тріодні тиристори поділяють на тиристори зворотного закриття з анодним або катодним управлінням, тиристори зворотної провідності з анодним або катодним управлінням та симетричні. Умовні графічні позначення тиристорів показані на рис. 1.30.

Національний університет водного господарства та природокористування

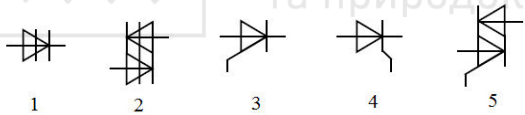


Рис. 1.30. 1. Диністор зворотного закриття. 2. Симетричний диністор. 3. Триністор зворотного закриття з анодним управлінням. 4. Триністор зворотного закриття з катодним управлінням. 5. Симетричний триністор

Найпростіші діодні тиристори, що закриваються у зворотному напрямку, містять чотири *p*- і *n*-області, що чергуються (див. рис. 1.31, а). Область p_1, в яку потрапляє струм із зовнішнього кола називають анодом, область n_2 – катодом; області n_1 і p_2 – базами.

Структуру тиристора можна подати у вигляді з'єднання двох транзисторів різної провідності (див. рис. 1.31, б, в), так що колекторний струм транзистора p_1-n_1-p_2 (VT1) є струмом бази транзистора n_1-p_2-n_2 (VT2), а колекторний струм транзистора n_1-p_2-n_2 є струмом бази транзистора p_1-n_1-p_2.

Принцип роботи тиристора покажемо на прикладі диністора. Якщо до диністора підключити джерело напруги, так як показано на

рис. 1.31, а, то переходи $П_1$ і $П_3$ виявляться відкритими, а перехід $П_2$ – закритим. Його називають колекторним переходом. Майже вся прикладена напруга падає на ньому.

Оскільки переходи $П_1$ і $П_3$ зміщені в прямому напрямку, з них в області баз інжектуються носії заряду: дірки з області p_1 і електрони з області n_2. Ці носії дифундуючи в областях баз n_1 і p_2, наближаються до колекторного переходу $П_2$ і його полем перекидаються через *p- n* - перехід. Рухаючись в протилежних напрямках ці дірки і електрони створюють загальний струм.

При малих значеннях зовнішньої напруги, практично вся вона падає на колекторному переході $П_2$. Тому до переходів $П_1$ і $П_3$, які мають малий опір, прикладена невелика різниця потенціалів і інжекція носіїв зарядів незначна. У цьому випадку струм малий і дорівнює зворотному струму через перехід $П_2$, тобто $I_{К0}$.

При збільшенні зовнішньої напруги струм у зовнішньому колі незначно збільшується, однак при досягненні напругою певного значення $U_{вкл}$ носії заряду проходячи через *p- n* - перехід $П_2$ прискорюються настільки, що при зіткненні з атомами в області *p- n* - переходу йонізують їх, викликаючи лавинне розмноження носіїв заряду.

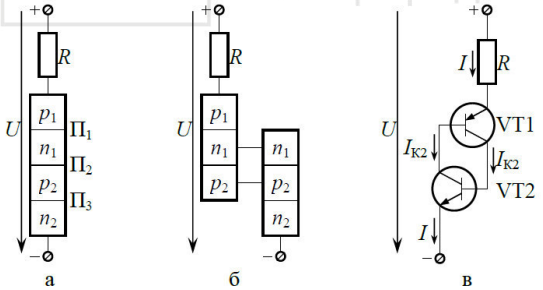


Рис. 1.31. Структура диністора

Дірки, які при цьому утворюються під впливом електричного поля переходять в область p_2, а електрони в область n_1. Струм через перехід збільшується, а його опір і падіння напруги на ньому зменшуються. Це призводить до зростання напруги прикладеної до переходів $П_1$ і $П_3$ і збільшенню інжекції через них, що викликає подальше зростання колекторного струму і збільшення струмів інжекції.

Процес протікає лавиноподібно і опір переходу $П_2$ стає малим. В результаті падіння напруги на тиристорі стає незначним, а струм через нього обмежується тільки опором R.

Національний університет водного господарства та природокористування

На вольт-амперній характеристиці (ВАХ) (див. рис. 1.32) закритому стану тиристора відповідає ділянка 1. Процес лавинного розмноження носіїв заряду відображає ділянка 2, з негативним диференціальним опором ($R_{диф} = \frac{\partial U}{\partial I}$). Після перемикання ВАХ тиристора аналогічна області ВАХ діода, зміщеного в прямому напрямку (ділянка 3).

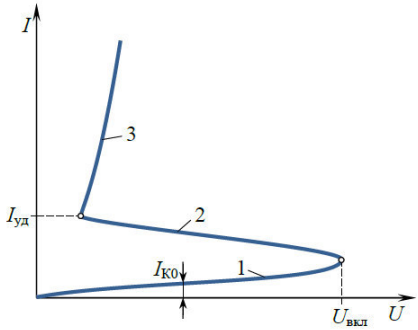


Рис. 1.32. Вольт-амперна характеристика диністора

Для того щоб замкнути тиристор потрібно зменшити його робочий струм до значення $I < I_{уд}$ шляхом пониження напруги живлення.

Національний університет водного господарства та природокористування

1.7. Основні логічні елементи комп'ютера

1.7.1. Основна «угода» цифрової електроніки

Головною тенденцією розвитку технологій мікроелектроніки є неперервне зменшення розмірів елементів приладів і, зокрема, елементної бази комп'ютерів. Відомий емпіричний *закон Мура* (див. табл. 1), згідно з яким починаючи з 1959 року кількість транзисторів в кристалі однієї інтегральної схеми протягом перших 15 років подвоювалася кожен рік, а після цього таке подвоєння відбувається за 1,5 року.

Таблиця 1

Залежність числа транзисторів в мікросхемі від року її випуску

Мікропроцесор	Рік випуску	Число транзисторів
4004	1971	2300
8008	1972	2500
		продовження табл. 1

Національний університет водного господарства та природокористування

8080	1974	5000
8086	1978	29000
286	1982	120000
Intel 386™ processor	1985	275000
Intel 486™ processor	1989	$1{,}18\cdot 10^6$
Intel® Pentium® processor	1993	$3{,}1\cdot 10^6$
Intel® Pentium® II processor	1997	$7{,}5\cdot 10^6$
Intel® Pentium® III processor	1999	$24\cdot 10^6$
Intel® Pentium® 4 processor	2000	$42\cdot 10^6$
Intel® Itanium® processor	2002	$220\cdot 10^6$
Intel® Itanium® 2 processor	2003	$410\cdot 10^6$

Якщо перші сіліцієві мікросхеми мали розміри елементів в площині кристала порядку десятків мікрон, то сучасні зразки характеризуються розмірами порядку 100*нм*, а їх контроль здійснюється з точністю порядку 10*нм*. Відповідно до закону Мура розміри інтегральної мікросхеми до 2020 року стануть порядку атомних, а отже, закони їх функціонування будуть визначатися законами мікросвіту, тобто квантовою механікою.

Сучасні комп'ютери є сукупністю **бітів** (елементів лише з двома можливими логічними станами «0» і «1», англ.: **b**inary dig**it - двійковий розряд**), обробляючих біти електронних елементів, та з'єднань між ними. Існують біти пам'яті, які зберігають інформацію, і керовані біти, які обробляють інформацію. На жорсткому диску комп'ютера бітом є намагнічена ділянка робочої поверхні, вектор намагнічення якої має два напрямки, що відповідає двом станам: «0» і «1». Керуючі біти електронних пристроїв комп'ютера реалізуються за допомогою напівпровідникової техніки (найчастіше – це тригери) і також мають два стійких стани. Між двома станами бітів повинен бути досить великий енергетичний бар'єр, для того щоб система не могла спонтанно переходити з одного стану в інший. Перемикання «0» $\longrightarrow$ «1» і «1» $\longrightarrow$ «0» вимагає подолання цього бар'єру, чим забезпечується надійність зберігання і обробки інформації.

Національний університет водного господарства та природокористування

При побудові комп'ютера на двійковій системі постало питання: що брати за логічний «0» та логічну «1»? Була укладена так звана «угода» між конструкторами комп'ютерів. В ній домовились, що за логічний «0» приймається напруга, менша 1/10 напруги живлення, а за логічну «1» – більше половини напруги живлення. Для елементів, виготовлених за різними технологіями, значення напруг можуть бути різними і для їх спільного використання можуть знадобитися спеціальні погоджуючі елементи. Угода, при якій за логічний «0» приймається низька напруга, а за логічну «1» – висока, називається *угодою позитивної логіки*. Можна зробити і навпаки. За логічну «1» прийняти низьку напругу, за логічний «0» – високу. Така угода називається *угодою негативної логіки*. Ми будемо користуватися позитивною угодою.

В сучасних управляючих пристроях комп'ютера, що реалізуються за допомогою напівпровідникової техніки (транзистор - транзисторна логіка – ТТЛ-логіка), рівню логічного «0» відповідають сигнали діапазону ($-0{,}4B < U_0 < 0{,}4B$), а рівню логічної «1» – ($2{,}2B < U_1 < 5{,}5B$). У булевій алгебрі їм відповідають поняття «FALSE» і «TRUE». Комп'ютери, в яких логічні операції виконуються з цими класичними, з точки зору фізики, станами в даний час прийнято називати **класичними** [5].

Національний університет водного господарства та природокористування

1.7.2. Логічні базиси

Будь-які операції комп'ютера здійснюються за допомогою логічних елементів. Логічні елементи – це пристрої, які призначені для обробки інформації в цифровій формі (найчастіше – послідовності сигналів високого – «1» і низького – «0» рівня). Фізично логічні елементи можуть бути виконані на електронних елементах, а також (рідше) на механічних, електромеханічних (електромагнітні реле), пневматичних, гідравлічних, оптичних, тощо.

До логічних елементів відносяться пристрої, які здійснюють певні операції над одним або двома вхідними сигналам. Якщо прийняти, що вхідні сигнали поступають на входи A і B, то результат логічних операцій над ними можна подати у вигляді наступних таблиць:

Таблиця 2

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Таблиця істинності «НЕ»

Вхід	Вихід
0	1
1	0

В такому логічному елементі реалізується схема з одним входом та одним виходом.

Таблиця 3

Таблиця істинності «І»

Вхід А	Вхід В	Вихід
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1

Таблиця 4

Таблиця істинності «АБО»

Вхід А	Вхід В	Вихід
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Таблиця 5

Таблиця істинності «І-НЕ»

Вхід А	Вхід В	Вихід
0	0	1
1	0	1
0	1	1
1	1	0

Таблиця 6

Таблиця істинності «АБО-НЕ»

Вхід А	Вхід В	Вихід
0	0	1
1	0	0
0	1	0
1	1	0

Національний університет водного господарства та природокористування

Завдяки різноманітним комбінаціям логічних елементів їх можна виражати один через одного, а також будувати з них схеми з більш складними логічними функціями. Будь-яку логічну функцію можна виразити за допомогою мінімального набору базових логічних елементів. Такий мінімальний набір називається *логічним базисом*. Найпростіший базис складається з трьох типів елементів – «І», «АБО» та «НЕ». На практиці, в цифрових пристроях частіше застосовуються базиси, що складаються з елементів «І-НЕ» або «АБО-НЕ», оскільки такі елементи простіше складати з транзисторів. Будь-яку логічну схему можна представити в будь-якому логічному базисі. Згідно аналогії, представленої в п. 1.6.2.2 елементи логічного базису можна змоделювати за допомогою послідовного та паралельного включення водопровідних вентилів.

Логічний елемент «НЕ»

Логічний елемент «НЕ» реалізується за допомогою схеми, яка називається – інвертор (див. рис.1.33). Він виконує операції, показані в таблиці істинності «НЕ».

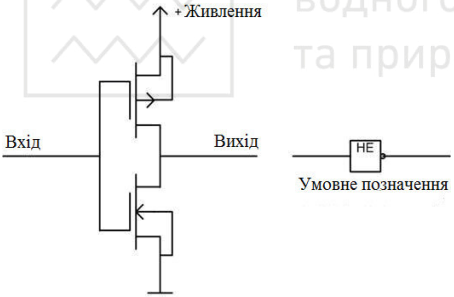


Рис. 1.33. Принципова схема інвертора та його позначення

Інвертор складається з двох комплементарних МОН-транзисторів (МОН – метал-окисел-напівпровідник), які з'єднані послідовно і мають спільний вхід. Якщо на вході такої схеми напруга наближена до напруги логічного «0», то нижній транзистор буде закритий, оскільки цієї напруги виявиться недостатньо для формування провідного каналу транзистора. Але відкриється верхній транзистор, у якого між сіліцієвою основою та управляючим затвором напруга буде максимальною. Тоді на виході схеми напруга буде близькою до напруги живлення. І навпаки, якщо напруга на вході буде приблизно рівною напрузі живлення (логічна «1»), верхній транзистор закриється, але відкриється нижній, і напруга на виході стане мінімальною. Якщо напругу наближену до нуля вважати за логічний «0», а наближене

до напруги живлення – за логічну «1», то ця схема буде виконувати логічну функцію «НЕ».

Якщо повернутися до рис. 1.27, в і до аналогії водяних вентилів, то зрозуміло, що потік води буде перекритий при послідовному включенні вентилів тоді, коли хоча б один з них буде перекритим (логічний елемент «І»). При паралельному включенні вентилів потік води буде перекритий тоді, коли обидва вентилі будуть перекритими (логічний елемент «АБО»).

Логічний елемент «І-НЕ»

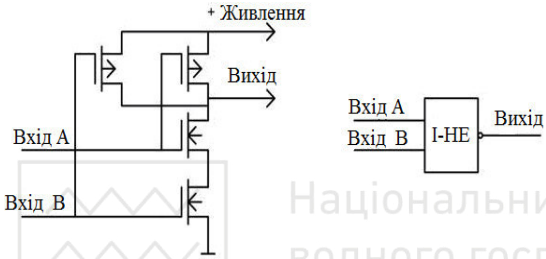


Рис. 1.34. Схема логічного елемента «І-НЕ»

Цей логічний елемент можна отримати, якщо з'єднати чотири транзистори, так як показано на рис. 1.34.

Принцип роботи схеми наступний. Якщо на обох входах присутня напруга, яка відповідає логічній «1», два верхніх транзистори будуть закриті, але відкриються два нижніх, і на виході схеми з'явиться напруга логічного «0». Якщо на якомусь із входів напруга буде відсутня, тобто виявиться логічний «0», відкриється один з верхніх транзисторів, але закриється один з нижніх. У цьому випадку на виході буде логічна «1». Якщо логічний «0» буде присутній на обох входах, будуть відкриті обидва верхніх транзистори і закриті два нижніх. На виході в цьому випадку також буде логічна одиниця. Таким чином, на виході схеми буде логічний «0» тільки тоді, коли на обох входах буде присутня логічна «1».

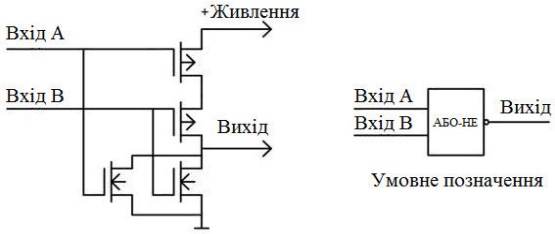


Рис. 1.35. Схема логічного елемента «АБО-НЕ»

Національний університет водного господарства та природокористування

Логічний елемент «АБО-НЕ»

Схема такого елемента представлена на рис. 1.35.

Якщо хоча б на одному з входів буде присутня напруга логічної «1», відкриється один з нижніх транзисторів, але один з верхніх закриється. Отже, на виході буде логічний «0». І тільки тоді, коли на обох входах буде логічний «0», на виході з'явиться логічна «1».

1.7.3. Найпростіші елементи, складені з елементів логічного базису

Логічний елемент «Виключаюче АБО»

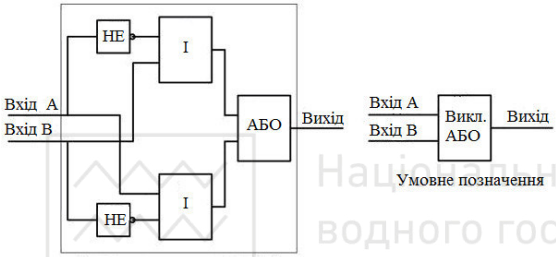


Рис. 1.36. Логічна схема «Виключаюче АБО»

У вигляді комбінації логічних елементів «АБО-НЕ» можна подати логічний елемент «Виключаюче АБО» (див. рис. 1.36). Цей елемент повинен видавати логічну «1» тільки в тому випадку, якщо два логічних значення на його входах не дорівнюють один одному. Іншими словами – якщо логічна «1» є не на якомусь з його входів, як у звичайному елементі «АБО», а тільки на одному з них.

Проілюструємо це. Нехай на вході А – логічна «1», а на вході В – логічний «0». Тоді на вході верхнього елемента «І» буде два «0», а нижнього – дві «1». Отже, згідно таблиці істинності «І», на входах елемента «АБО» буде «0» та «1», а значить, на виході – «1». Легко впевнитись, що таблиця істинності для такого елемента буде наступною:

Таблиця 7

Таблиця істинності «Виключаюче АБО»

Вхід А	Вхід В	Вихід
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	0

Національний університет
біоресурсів і природокористування

1.7.3.1. Тригер

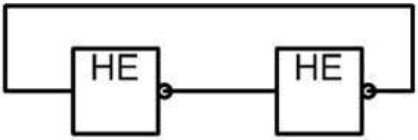


Рис. 1.37. Схема найпростішого тригера

Однією з найважливіших схем, які застосовуються в цифровій електроніці, є тригер. Термін «тригер» походить від англійського «trigger» – спусковий гачок (вогнепальної зброї). Основна властивість тригера – здатність запам'ятовувати і зберігати певне логічне значення. Ця властивість зумовлена наявністю в схемі зворотного зв'язку. Якщо взяти два інвертори і з'єднати їх згідно рис. 1.37, отримаємо найпростіший тригер.

При ввімкненні живлення, на деяких ділянках схеми встановиться стан логічного «0», на інших – логічної «1». Цей стан буде зберігатись до вимкнення живлення. Незручність схеми полягає в тому, що її стан непередбачуваний і некерований. Будь-який випадковий збій може встановити новий стан тригера. Однак якщо за аналогічним принципом побудувати більш складну схему з керуючими входами, її можна буде використовувати в якості запам'ятовуючого елемента, здатного зберігати один біт інформації.

Існує величезна кількість електронних схем організації тригерів. Класифікувати їх можна наступним чином:

- *за способом організації логічних зв'язків* розрізняють тригери з запуском (RS-тригери); з лічильним входом (T-тригери); тригери затримки (D-тригери); універсальні (JK-тригери); комбіновані (наприклад, RST-, JKRS-, DRS-тригери);
- *за способом запису інформації* тригери поділяють на несинхронізовані (асинхронні, нетактові) і синхронізовані (тактові);
- *за кількістю інформаційних входів* тригери можуть бути з одним, двома та багатьма входами;
- *за видом вихідних сигналів тригери* поділяються на статичні і динамічні. Статичні тригери – тригери, в яких вихідні сигнали в стійких станах залишаються незмінними в часі. Динамічні тригери – тригери, в яких вихідні сигнали в стійких станах змінюються в часі;
- *за способом запам'ятовування інформації* тригери можуть бути з логічною і фізичною організацією пам'яті. Перші виконують

Національний університет
водного господарства
та природокористування

на логічних елементах «І» (на схемах часто позначаються значком «&»), «АБО» (на схемах – «1»), «НЕ», «І-НЕ», «АБО-НЕ», «І-АБО-НЕ» тощо, а другі є елементами пристроїв пам'яті, у яких використовують нелінійні властивості матеріалів або нелінійні вольт-амперні характеристики компонентів.

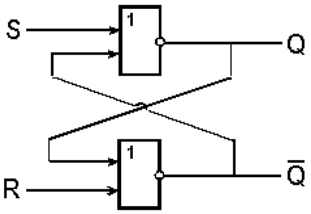


Рис. 1.38. RS-тригер

Як приклад RS-тригера, побудованого на логічній схемі «АБО-НЕ», можна привести схему (рис. 1.38).

Цей тригер має два симетричних входи S і R і два симетричних виходи Q і $\overline{Q}$, причому вихідний сигнал $\overline{Q}$ є логічним запереченням сигналу Q. На кожен з двох входів S і R можуть подаватися вхідні сигнали у вигляді короткочасних імпульсів. Наявність такого імпульсу на вході – це логічна «1», а його відсутність – логічний «0».

Таблицю істинності для такого тригера можна подати у вигляді:

Таблиця 8

Таблицю істинності RS-тригера

S	R	Q	$\overline{Q}$
0	0	Стан виходів не змінюється	
0	1	1	0
1	0	0	1
1	1	Заборонено	

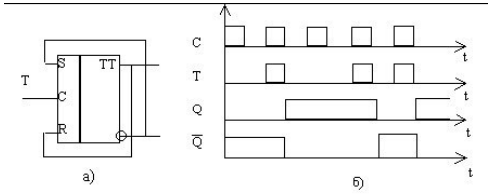


Рис. 1.39. Схема тригера з лічильним входом: а) функціональна схема; б) часова діаграма

Подача на обидва входи R і S логічної «1» може призвести до неоднозначного результату, тому ця комбінація вхідних сигналів заборонена. В схемі формування сигналу повинно бути передбачено блокування, яке унеможливить встановлення на входах R і S логічної «1» одночасно.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

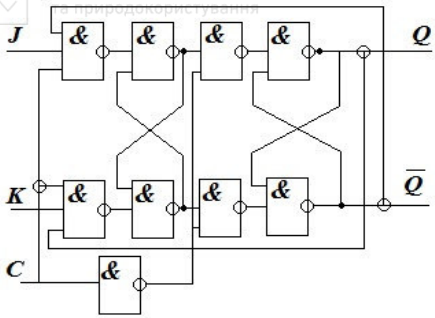


Рис. 1.40. Функціональна схема JK-тригера

Отже, у нетактових (асинхронних) тригерах (до яких відноситься приведений вище RS-тригер) перехід у новий стан викликається безпосередньо зміною вхідних інформаційних сигналів. В асинхронних RS-тригерах є один недолік: сигнали R і S мають бути рознесені в часі. Доповнення цього тригера комбінаційними схемами синхронізації на вході і виході дозволяє отримати тригери зі складнішою логікою роботи: синхронні RS-, T-, JK-, D-тригери і цілий ряд комбінованих RST-, JKRS-, DRS-тригерів.

Прописні букви в назвах тригерів означають:

- S (set – встановлення) – встановлення тригера в одиничний стан, Q=1;
- R (reset – скидання) – встановлення тригера в нульовий стан, Q=0;
- T (toggle – релаксатор) – лічильний вхід тригера;
- J (jerk – раптове включення) – встановлення JK-тригера в одиничний стан, Q=1;
- K (kill – раптове виключення) – Q=1;
- D (delay – затримка) – встановлення тригера в одиничний або нульовий стан на час одного такту;
- C (clock – годинник) – вхід тактових імпульсів синхронізації.

У тактових (синхронних) тригерах є додатковий вхід керуючого сигналу і зміна стану тригера відбувається лише при його наявності. Як приклад, на рис. 1.39 приведемо схему T-тригера (RS-тригер перетворюється в T-тригер).

Тут синхронно з тактовими імпульсами (C) можуть на вхід тригера поступати імпульси (T), які своїм закінченням (заднім фронтом) змінюють стан виходів T-тригера Q і $\overline{Q}$ на протилежний.

Національний університет водного господарства та природокористування

Прийнято говорити, що такий тригер синхронізується за перепадом або фронтом сигналу (в даному випадку – за заднім). Це *тригери з динамічним керуванням* за входом синхронізації. Існують також тригери, які синхронізуються рівнем сигналу. Такі тригери називаються *тригерами зі статичним керуванням* за входом синхронізації.

Найбільш складним типом тригера є JK-тригер. Він, по суті, є об'єднанням двотактного RS- і T-тригерів. Цьому відповідає таблиця істинності JK-тригера (див. табл. 9 та рис. 1.40). JK-тригер працює подібно до RS-тригера, з одним винятком: при подачі логічної «1» на обидва входи J і K стан виходу тригера змінюється на протилежний. Входи J і K аналогічні відповідно входам S і R у RS-тригера.

При подачі «1» на вхід J і «0» на вхід K вихідний стан тригера стає рівним логічній «1». А при подачі «1» на вхід K і «0» на вхід J вихідний стан тригера стає рівним логічному «0». JK-тригер на відміну від RS-тригера не має заборонених станів на основних входах. На практиці застосовуються тільки синхронні JK-тригери, тобто стани основних входів J і K враховуються тільки в момент такту, наприклад по позитивному фронту імпульсу на вході синхронізації.

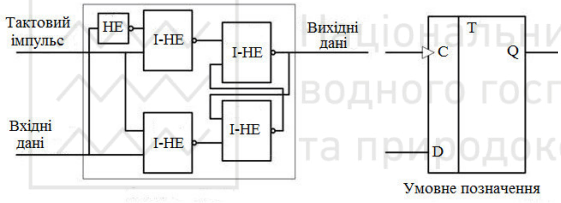


Рис. 1.41. Електронна схема і позначення D-тригера

Таблиця 9

Таблиця істинності JK-тригера

Вхід J	Вхід K	Q	$\overline{Q}$	Режим
0	0	0	1	Зберігання
0	1	0	0	Встановлення «0»
1	0	1	1	Встановлення «1»
1	1	1	0	Інверсія

D-тригер зазвичай будується на основі двотактного RS- або JK-тригера. Він призначений для зберігання стану (1 або 0) на один

Національний університет водного господарства та природокористування

період тактових імпульсів (з затримкою на 1 такт). На рис. 1.41 приведена функціональна схема D-тригера на основі RS-тригера.

Роботу схеми проілюструємо за допомогою наступних графіків (див. рис. 1.42).

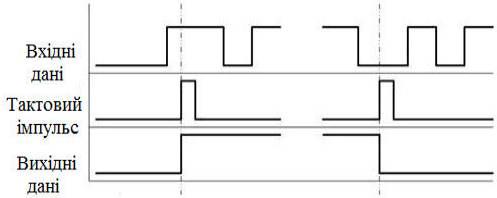


Рис. 1.42. Запис даних в тригер в момент позитивного перепаду тактового імпульсу

Як видно з графіків, у момент приходу тактового імпульсу така схема запам'ятовує стан вхідних даних, і буде видавати його на вихід до приходу наступного тактового імпульсу. Відмітимо, що запам'ятовування даних відбувається не тоді, коли тактовий імпульс має якесь певне логічне значення, а тоді, коли логічне значення тактового імпульсу переходить від логічного «0» до логічної «1» (синхронізація за переднім фронтом сигналу).

Національний університет водного господарства та природокористування

1.7.3.2. Мультиплексор (комутатор, селектор)

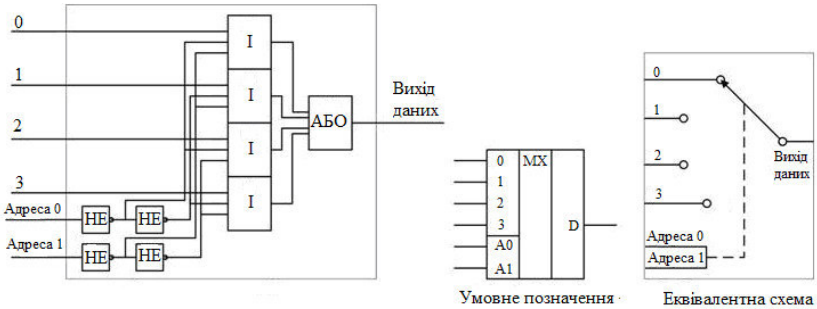


Рис. 1.43. Електронна схема мультиплексора на чотири канала, її умовне позначення та еквівалентна схема

Мультиплексор організовує логічне перемикання сигналів з декількох входів на один вихід. Схема найпростішого чотирьохрозрядного мультиплексора показана на рис. 1.43.

Для того, щоб організувати перемикання сигналів з декількох входів на один вихід необхідно адресувати логічні елементи, які підключаються до виходу. Для цього служать адресні входи. Двійковий код на адресних входах вибирає вхід, з якого буде передаватися сигнал на вихід. Можна самостійно переконатися, що для схеми наведеної на рис. 1.43, двійковий код на адресних входах завжди буде відповідати обраному входу.

1.7.3.3. Демультиплексор (дешифратор, декодер)

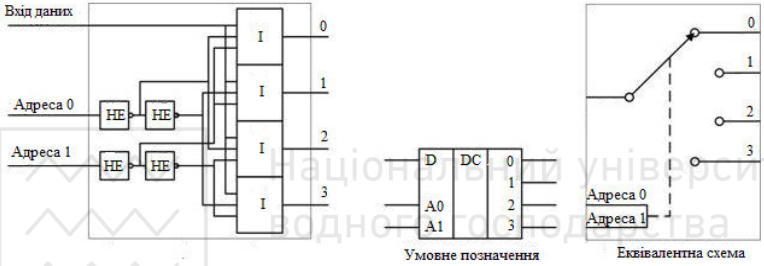


Рис. 1.44. Електронна схема чотирирозрядного дешифратора, її умовне позначення та еквівалентна схема

Демультиплексор виконує функцію, протилежну мультиплексору, – організовує логічне перемикання сигналів з одного входу на декілька виходів. Схема найпростішого чотирирозрядного дешифратора показана на рис. 1.44.

Вибір виходу, на який необхідно передати вхідний сигнал, як і в мультиплексорах, здійснюється за допомогою адресних входів, на які подається двійковий код, що відповідає номеру обраного виходу.

1.7.3.4. Регістри

Якщо об’єднувати в схеми не прості логічні елементи, а тригери, можна одержувати не менш корисні пристрої. Якщо у групі тригерів об’єднати керуючі входи – вийде регістр (див. рис. 1.45). Регістри використовують для запам’ятовування слова даних, що

Національний університет водного господарства та природокористування

складається з декількох розрядів. Оскільки керуючі входи регістра об'єднані, всі розряди даних запам'ятовуються в регістрі одночасно.

Якщо в регістрі об'єднувати не тільки керуючі входи, але і комбінувати входи і виходи даних, можна отримувати різні регістри спеціального призначення. Найбільшого поширення отримали двійкові лічильники і регістри зсуву.

Регістри зсуву

При послідовному з'єднанні входів і виходів тригерів, так щоб вихід попереднього з'єднувався з входом наступного тригера, можна отримати регістр зсуву.

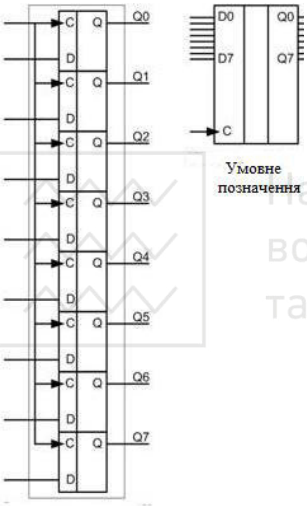


Рис. 1.45. Схема восьмирозрядного регістра

Зсув – це операція, при якій біти числа, зсовуються в регістрі вправо або вліво на один, або декілька біт. При цьому, поведінка крайніх бітів в числі суттєво відрізняється в залежності від виду зсуву. Операція зсуву важлива при роботі з двійковими числами, оскільки, при певних видах зсуву, зсув на один біт вліво чи вправо означає збільшення або зменшення числа в десятковій системі в два рази.

Розрізняють *логічний*, *арифметичний* та *циклічний* зсув.

При логічному зсуві на один біт, один із крайніх бітів пропадає, не впливаючи на залишені, і у вільній комірці регістра з'являється логічний «0» (див. рис. 1.46, а і б).

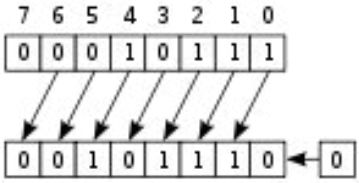


Рис. 1.46,а. Логічний зсув вліво

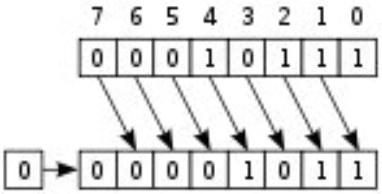


Рис. 1.46, б. Логічний зсув вправо

Національний університет водного господарства та природокористування

В більшості процесорів біт, який пішов з регістра, не пропадає, а зберігається в спеціальній комірці пам'яті, яка називається *прапор перенесення* CF (англ.: Carry Flag). Функція збереження цього біта широко використовується при роботі з багатобайтовими числами.

При арифметичному зсуві на один біт вліво арифметичний зсув веде себе як логічний зсув. При зсуві на один біт вправо біт найменшого розряду пропадає, а на місце біта найбільшого розряду встановлюється біт знаку («0» або «1») (див. рис. 1.47, а і б). З цього видно, що арифметичний зсув використовується в основному для чисел, які мають від'ємний знак.

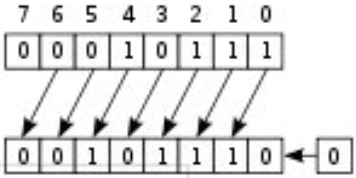


Рис.1.47, а. Арифметичний зсув вліво

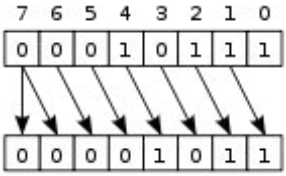


Рис. 1.47, б. Арифметичний зсув вправо

Національний університет водного господарства та природокористування

Для прикладу розглянемо найпростіший випадок для чисел в двійковій та десятковій формі (таблиця 10).

Таблиця 10

Двійкове число	Десяткове число
00000011	3
00000110	6
00001100	12

З таблиці видно, що якщо число 6 в двійковому коді зсувати вліво на один біт, то це означає збільшувати його в два рази, а якщо – вправо на один біт, то – зменшувати в два рази.

Схемно реалізація операцій зсуву не дуже складна і буде представлена нижче. Саме тому ці операції рекомендують використовувати для операцій множення і ділення цілих чисел на числа, що дорівнюють 2^n (n=1, 2, 3, тощо).

При циклічному зсуві біт, який іде з регістра, з'являється на вільному місці (див. рис. 1.48, а і б).

Національний університет
водного господарства
та природокористування

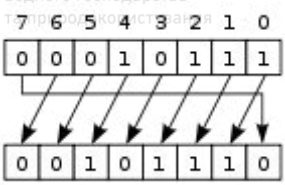


Рис. 1.48, а. Циклічний зсув вліво

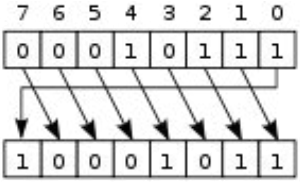


Рис. 1.48, б. Циклічний зсув вправо

В архітектурах багатьох процесорів для багатобайтових чисел використовується циклічний зсув в регістрі разом з задіянням прапора переносу. Зокрема, щоб зсунути вправо на 1 біт довге число, потрібно очистити прапор CF (у разі ділення числа зі знаком потрібно записати в CF старший біт старшого слова) і циклічно зсунути на одиницю через CF кожне слово, починаючи з верхнього (в прапор заноситься біт, що зникає з регістра). Приведемо для прикладу велике число 010000111100, що займає три 4-бітних слова:

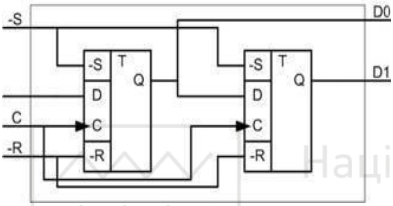


Рис. 1.49. Електронна схема найпростішого дворозрядного регістра зсуву

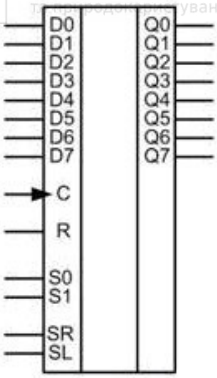
Таблиця 11

Перед зсувом:	1 слово: 0100	2 слово: 0011	3 слово: 1100	CF: 0
Після зсуву 1 слова:	0010	0011	1100	0
Після зсуву 2 слова:	0010	0001	1100	1
Після зсуву 3 слова:	0010	0001	1110	0

Зсув через регістр прапорів більш ніж на один біт в сучасних процесорах практично не використовується.

Схемна реалізація регістрів зсуву виконується також за допомогою тригерів. Розряд даних, записаний першим керуючим імпульсом в перший тригер, з кожним наступним імпульсом буде зсуватися в наступний тригер. Електронна схема найпростішого дворозрядного регістра зсуву показана на рис. 1.49.

Національний університет водного господарства та природокористування



C- завантаження/зсув
R- скидання
S0, S1 - режим
SR - вхідний розряд при зсуву вправо
SL - вхідний розряд при зсуву вліво

S0	S1	Режим
0	0	Зберігання
0	1	Зсув вліво
1	0	Зсув вправо
1	1	Завантаженння

Режими роботи

Рис.1.50. Універсальний 8-розрядний регістр зсуву

Існує велика лькість різновидів лічильників та регістрів зсуву. Наприклад, широко використовують лічильники, що мають діапазон рахунку від 0 до 10, в електронних годинниках – лічильники від 0 до 12 (див. рис. 1.50).

1.7.3.5. Суматор

Не менш важливим вузлом процесора є суматор. За допомогою нього можна отримати арифметичну суму вхідних сигналів у двійковому коді. Сума двох однорозрядних двійкових чисел здійснюється за наступним правилом:

$$0+0=0,\ 1+0=1,\ 0+1=1,\ 1+1=10.$$

Якщо в перших трьох випадках сума двох однорозрядних двійкових чисел залишилася однорозрядною, то в останньому випадку вона стала дворозрядною. Якщо складати дворозрядні двійкові числа, то отриманий додатковий розряд в молодшому розряді, потрібно буде додавати до суми старших розрядів. Отже, при додаванні може виникати перенесення, яке потрібно враховувати в наступному розряді. І відповідно, однорозрядний суматор повинен мати не один, а два виходи. Найпростіший суматор можна отримати, якщо з'єднати елемент «Виключаюче АБО» з елементом «І» як показано на рис. 1.51.

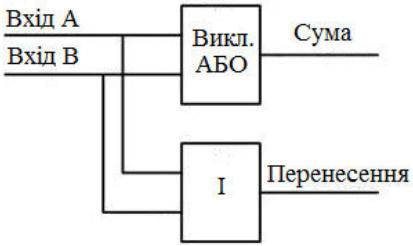


Рис.1.51. Електронна схема напівсуматора

Національний університет водного господарства та природокористування

В результаті додавання сигналів на виходах А і В отримуються наступні значення:

Таблиця 12

Таблиця істинності напівсуматора

Доданки		Результат суми	
Вхід А	Вхід В	Вихід «Перенесення»	Вихід «Сума»
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0

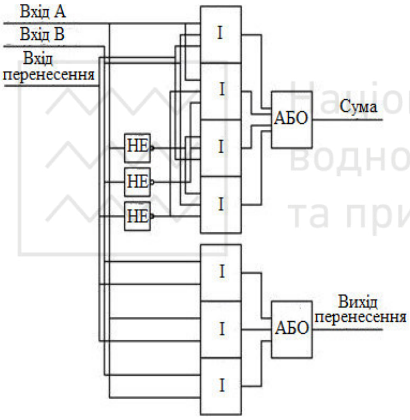


Рис. 1.52. Електронна схема повного суматора

Як видно з таблиці, молодший розряд суми (вихід «Сума») повинен бути логічною «1», якщо вона присутня тільки в одному з доданків розрядів, що точно відповідає елементу «Виключаюче АБО», а перенесення повинне бути логічною «1», тільки якщо вона присутня в обох розрядах, які сумуються, що відповідає елементу «І».

Однак, якщо за допомогою двох таких суматорів ми захочемо скласти два дворозрядних числа, то у нас нічого не вийде – суматор в старшому розряді не зможе враховувати перенесення з молодшого розряду. Тому така схема називається *напівсуматор*.

Повний суматор повинен враховувати вхідне перенесення, і його схема складніша. Схема повного суматора представлена на рис. 1.52. В таблиці 13 приведені результати обчислень за допомогою такого суматора.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Таблиця 13

Таблиця істинності суматора

Доданки			Результат суми		
Вхід «Пере-несення»	Вхід А	Вхід В	Вихід «Перене-сення	Вихід «Сума»	Десят-кове число
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	1	1
0	1	0	0	1	1
0	1	1	1	0	2
1	0	0	0	1	1
1	0	1	1	0	2
1	1	0	1	0	2
1	1	1	1	1	3

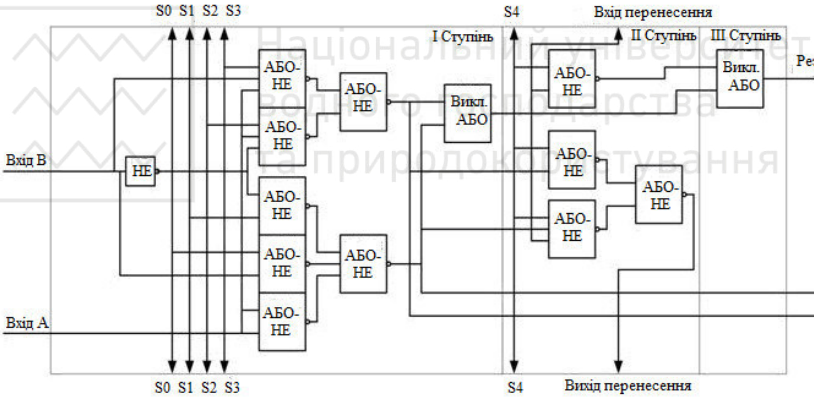


Рис. 1.53. Електронна схема одного розряду АЛП

Такі суматори можна об’єднувати для додавання багаторозрядних двійкових чисел. При такому об’єднанні вхід перенесення кожного розряду має бути з’єднаний з виходом перенесення попереднього розряду, тобто, перенесення поширюється послідовно від молодшого розряду до старшого. Кожен розряд, через який поширюється перенесення, вносить певну часову затримку в його поширення, і чим більша розрядність чисел, які сумуються, тим більше часу потрібно на поширення перенесення. Тому існують спеціальні логічні схеми, що дозволяють прискорювати цей процес.

Національний університет водного господарства та природокористування

1.7.3.6. Арифметико-логічний пристрій (АЛП)

В реальних цифрових пристроях, суматори в чистому вигляді зустрічаються не дуже часто. У процесорах частіше застосовується інша типова схема. Ця схема ненабагато складніша суматора, але дозволяє виконувати не тільки додавання, а 16 різноманітних арифметичних і 16 логічних операцій. Така схема називається арифметично - логічний пристрій, або скорочено – АЛП. Схема одного розряду АЛП показана на рис. 1.53. Список арифметичних і логічних операцій, які може проводити АЛП представлений в таблиці 14.

Таблиця 14

Список арифметичних та логічних операцій АЛП

№з/п	S3	S2	S1	S0	Логічні операції S4=1	Арифметичні операції S4=0
1	0	0	0	0	«НЕ» А	А
2	0	0	0	1	«НЕ» (А+В)	А+В
3	0	0	1	0	(«НЕ» А)В	А+(«НЕ» В)
4	0	0	1	1	0	-1
5	0	1	0	0	«НЕ» (АВ)	А+А(«НЕ» В)
6	0	1	0	1	«НЕ»В	А+В+ +А («НЕ» В)
7	0	1	1	0	А («Викл. АБО» В)	А-В-1
8	0	1	1	1	А («НЕ» В)	АВ-1
9	1	0	0	0	(«НЕ» А)+В	А+АВ
10	1	0	0	1	«НЕ» (А («Викл. АБО» В))	А+В
11	1	0	1	0	В	(А+«НЕ» В)+ +АВ
12	1	0	1	1	АВ	АВ-1
13	1	1	0	0	1	А+А
14	1	1	0	1	А+(«НЕ» В)	(А+В)+А
15	1	1	1	0	А+В	(А+«НЕ» В)+ +А
16	1	1	1	1	А	А-1

Національний університет водного господарства та природокористування

Для отримання АЛП більшої розрядності, до цієї схеми зверху і знизу можна приєднувати такі ж самі схеми, відповідно з'єднуючи керуючі сигнали S0-S4, а також входи і виходи перенесення. Виходи P і G служать для підключення схеми прискореного перенесення, якщо необхідно отримати високу швидкість роботи при великій розрядності АЛП.

Керуючі входи S0-S3 визначають тип операції, яку виконує АЛП. Сигнал S4 вибирає один з двох наборів операцій – арифметичні або логічні операції. Інші розряди визначають саму операцію.

Виходи прискореного перенесення необхідні для зменшення затримки в часі результату розрахунку на виході багаторозрядних АЛП. Затримка 32-розрядного АЛП приблизно в 32 рази більша ніж у однорозрядного, оскільки вона дорівнює сумі затримок логічних елементів, що утворюють найдовший ланцюг логічних елементів всередині АЛП. Використання спеціальних схем прискореного перенесення дозволяє в кілька разів зменшити затримку багаторозрядних АЛП.

Національний університет водного господарства та природокористування

1.7.3.7. Багаторозрядні селектори та зсувачі

Об'єднувати в групи зі спільними керуючими входами, але роздільними входами і виходами даних можна не лише однорозрядні АЛП, але й інші вузли. При об'єднанні в групу *N* тригерів утворюється регістр, який дозволяє зберігати двійкове число, що складається з *N* розрядів. При об'єднанні *N* мультиплексорів, які мають по *M* входів утворюється *N*-розрядний селектор на *M* напрямків, який дозволяє вибирати *N*-розрядні двійкові числа з *M* різних джерел.

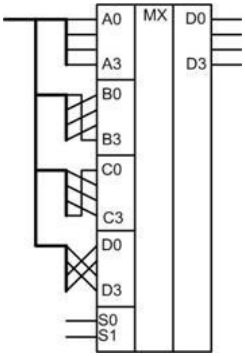


Рис. 1.54. Електронна схема чотирьохрозрядного селектора

Такий селектор можна використовувати в якості зсувача даних. Якщо на один з входів такого селектора дані подаються прямо, то на інших входах підключення вхідних сигналів до вхідних розрядів селектора можна варіювати, наприклад зсунувши на один розряд в ту або іншу сторону. Тоді при виборі відповідного входу селектора можна або отримувати дані без змін, або з

відповідним зсувом.

Чотирьохрозрядний селектор, зображений на рис. 1.54, має чотири входи, які підключені до шини даних різними способами. Вхід A підключений прямо і передає дані без змін. На вхід B дані подаються зі зсувом на 1 розряд в бік молодшого розряду, а наймолодший розряд шини даних подається на вільний старший розряд входу. На вході C зсув даних здійснюється аналогічно, але в протилежну сторону. На вході D переставлені пари розрядів – дані двох молодших розрядів шини подаються на старші розряди входу, а молодша пара розрядів шини даних – навпаки на старші розряди входу. Якщо необхідно виконувати зсув на довільне число розрядів, можна комбінувати кілька зсувачів, з'єднуючи їх послідовно, і тоді зсуви будуть сумуватися.

1.8. Процесор

Як говорилось у вступі, процесор комп'ютера повинен виконува-

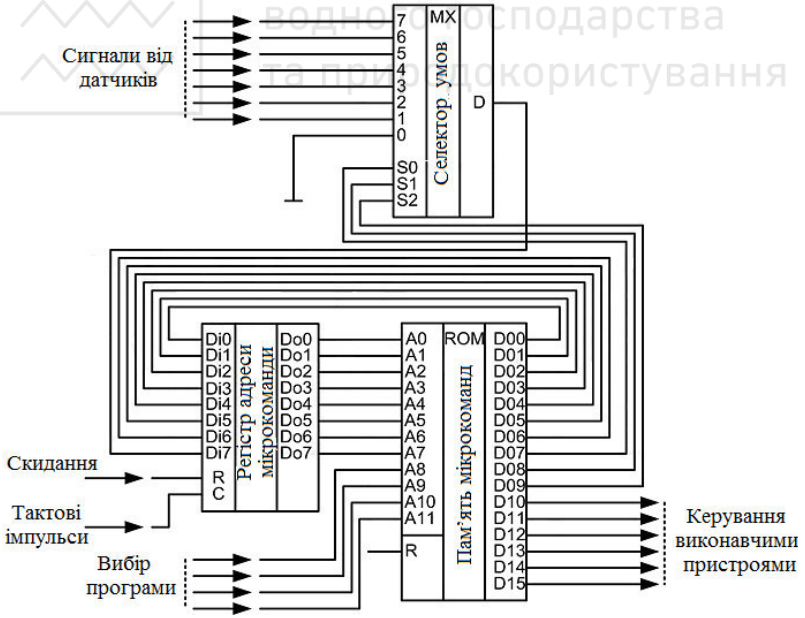


Рис. 1.55. Структурно-електронна схема найпростішого процесора

Національний університет водного господарства та природокористування

ти наступні функції:

1. Зчитувати дані і команди з пристроїв пам'яті та інших пристроїв;
2. Виконувати арифметичні та логічні операції з цими даними під дією команд;
3. Змінювати послідовність виконання команд в залежності від результатів обчислень.

Для розгляду роботи найпростішого процесора можна обмежитися його функцією організації послідовного виконання команд (наприклад, порядок вмикання лампочок на ялинковій гірлянді) без виконання арифметичних та логічних операцій над даними та їх запам'ятовування.

Такий найпростіший процесор складається всього з трьох мікросхем (див. рис. 1.55): мікросхеми пам'яті – ПЗП (справа знизу на рис.), регістра (зліва знизу на рис.) та мультиплексора (зверху на рис.). Нехай ПЗП (постійний запам'ятовуючий пристрій) містить деяку кількість 16-розрядних слів, які можуть подаватись на виходи мікросхеми D00-D15. З рисунку видно, що молодші 7 розрядів цього слова даних, зчитаних з мікросхеми даних D00-D06, можуть подаватись на вхід регістру адреси Di0-Di6. У самий старший розряд регістра Di7 може бути записано логічне значення виходу мультиплексора. Дані, що знаходяться в регістрі, використовуються в якості молодшої частини адреси постійної пам'яті.

Інша група розрядів слова даних, що зберігається в ПЗУ (D07-D15), використовується для вибору одного з восьми джерел зовнішніх сигналів. Обране джерело буде записане в старший розряд регістра, і буде використовуватися в якості одного з розрядів адреси пам'яті. Отже, шість старших розрядів даних, що зберігаються в ПЗП (D10-D15) можна використовувати для управління зовнішніми механізмами, розряди (D07-D09) можна використовувати для вибору програм керування пристроєм (див. табл.14), а входи мультиплексора для аналізу стану певних датчиків пристрою. Послідовностей управляючих слів може бути декілька різних, якщо використовувати входи «Вибір програми».

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Таблиця 15

Призначення розрядів ПЗП

Розряди	15, 14, 13, 12, 13, 12, 11, 10	9, 8, 7	6, 5, 4, 3, 2, 1, 0
Призначення	Керування зовнішніми пристроями	Вибір умов	Адреса наступної команди

Якщо ввімкнути цей пристрій, встановивши логічний «0» на входи, позначені як «Вибір програми» і подати імпульс скидання на вхід R регістра, то з ПЗП буде зчитане 16-розрядне слово, записане за нульовою адресою. Нехай в цьому слові записано значення 0000000000000001. Це означає, що на всіх виходах «Управління виконуючими пристроями» буде стан логічного «0». На адресних входах мультиплексора теж буде логічний «0», а отже, буде обраний нульовий вхід мультиплексора, на якому завжди встановлений «0». Тільки на найменшому вхідному розряді регістра буде встановлена логічна «1». Якщо тепер надійде один окремий тактовий імпульс, то в регістр запишеться значення «00000001», і через деякий час на виході пам'яті з'явиться значення іншого слова даних. Якщо це слово в молодших розрядах містить «0000010», то відбудеться перехід до наступної адреси. Отже, **цей пристрій може послідовно, слово за словом, діставати дані з мікросхеми пам'яті та інтерпретувати їх деяким чином**.

Нехай в слові записано «0000001110000010». Відповідно, після його зчитування на керуючих виходах раніше буде логічний «0», а мультиплексор вибере сьомий вхід і передасть його на вхід регістра. На інших входах регістру буде значення «0000010». Яке значення буде на сьомому вході мультиплексора, і що він передасть на старший розряд регістра, невідомо. Тому з надходженням наступного тактового імпульсу в регістр буде записано або «1000010», якщо на сьомому вході мультиплексора логічна «1», і «00000010», якщо на цьому вході «0». Отже, чергове слово може вилучатись з пам'яті не тільки раз і назавжди заданим способом, але й залежно від зовнішніх умов.

Описаний пристрій володіє однією з основних функцій процесора – він може виконувати послідовність заданих команд, і змінювати послідовність їх виконання залежно від зовнішніх умов.

Національний університет водного господарства та природокористування

Якщо повернутися до запропонованого прикладу – ялинкової гірлянди, то можна запрограмувати вмикання на цій гірлянді по одній лампочці наступним чином, показаним в таблиці 16.

Таблиця 16

Програма вмикання ялинкової гірлянди

	15 14 13 12 11 10	9 8 7	6 5 4 3 2 1 0
Адреса в пам'яті	Керування зовнішніми пристроями	Вибір умов	Адреса наступної команди
0000000000000000	0 0 0 0 0 1	0 0 0	0 0 0 0 0 0 1
0000000000000001	0 0 0 0 1 0	0 0 0	0 0 0 0 0 1 0
0000000000000010	0 0 0 1 0 0	0 0 0	0 0 0 0 0 1 1
0000000000000011	0 0 1 0 0 0	0 0 0	0 0 0 0 1 0 0
0000000000000100	0 1 0 0 0 0	0 0 0	0 0 0 0 1 0 1
0000000000000101	1 0 0 0 0 0	0 0 0	0 0 0 0 0 0 0

1.8.1. Основні складові частини процесора

З переліку основних функцій процесора можна зробити висновок, що головним його пристроєм є **арифметично - логічний пристрій (АЛП)**. АЛП за будовою є комбінаційною схемою, стан виходу якої відповідає деякій логічній або арифметичній функції в залежності від вхідних даних. Якщо дані на вході є – на виході є результат, коли немає – немає і результату. Доки АЛП виконує операцію над даними, вони зберігаються в регістрі. Для виконання більшості операції, АЛП необхідно два аргументи і для них в ньому є два входи. Відповідно, і регістрів для вхідних даних АЛП має бути два.

Як було показано вище (див. параграф 1.7.3.4), для організації обчислень і обробки даних дуже часто існує необхідність використовувати **зсувач даних**. Завдання його полягає в зсуванні слова даних на задане число розрядів у ту чи іншу сторону. За допомогою АЛП можна зсунути слово даних у бік старшого розряду, якщо скласти число з самим собою (в двійковій системі числення зсунення на один розряд вліво дає той же результат, що і множення на 2 або додавання числа з самим собою). Однак часто буває необхідним зсув і у зворотній бік, а за допомогою АЛП його виконати не можна. Також може існувати необхідність зсуву даних і на більше число розрядів за один раз. Тому є прямий сенс об'єднати АЛП з пара-

Національний університет водного господарства та природокористування

лельним зсувачем в один блок, і отримувати результат операції не з виходу АЛП, а з виходу зсувача, розташованого після АЛП.

Отриманий результат операції над двома аргументами, що зберігаються у вхідних регістрах, перш ніж переходити до наступної операції необхідно зберегти в якомусь місці. Його можна зберігати і в зовнішній (відносно процесора) оперативній пам'яті. Проте звернення до зовнішньої пам'яті є складною дією, і займає тривалий час. Тому всередині процесора майже завжди роблять **регістровий файл**, що складається з декількох регістрів, де зберігаються проміжні дані. Причому чим більше таких регістрів буде всередині процесора, тим краще. Такий регістровий файл – ще одна необхідна складова процесора.

У регістровому файлі повинен зберігатися результат виконаної операції. Але при цьому, для виконання операції необхідно діставати дані, що зберігаються в регістровому файлі для викори-

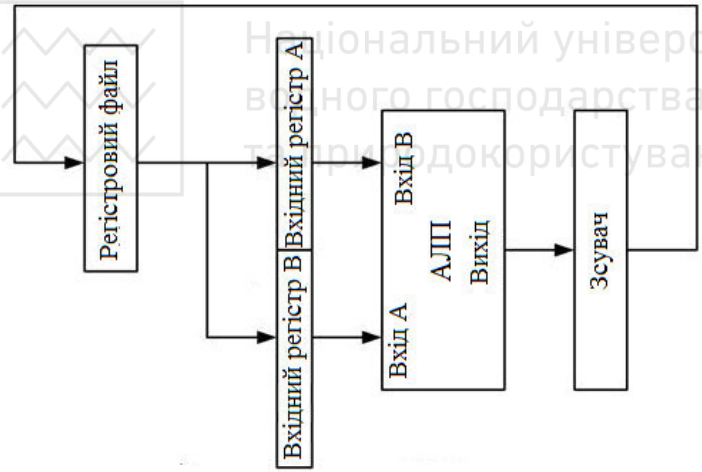


Рис. 1.56. Найпростіший тракт даних в процесорі

стання як аргументів для операції. Тому вихід зсувача повинен бути з'єднаний з входом регістрового файлу, а вихід регістрового файлу з входом вхідних регістрів АЛП. Отже, повинне існувати кільце з вузлів обробки та зберігання даних. Це кільце називається **основним трактом даних** (див. рис. 1.56).

Крім вище приведених основних вузлів процесора необхідні й інші, допоміжні вузли, а також необхідна можливість передавати

Національний університет водного господарства та природокористування

дані в ці вузли з тракту даних, і навпаки, з цих вузлів в тракт даних. До таких допоміжних вузлів відносяться:

1. **Лічильник команд** для зберігання адреси поточної команди, з можливістю автоматичного збільшення, а також зчитування і запису даних.
2. Спеціальний **регістр стану** для зберігання ознак результату виконання операції, таких як рівність операндів, перенесення при додаванні, перенесення при зсуві.

Крім того, необхідно мати можливість прийому і передачі даних в ОП і зовнішні пристрої. Зазвичай для цього використовують зовнішню шину. Для організації взаємодії процесора із зовнішньою шиною, необхідно мати такі можливості:

3. Приймати дані з зовнішньої шини і зберігати їх для подальшого передавання вузлам процесора. Приймати дані від інших вузлів процесора, для передачі на шину даних. Для цього необхідний **регістр вхідних даних шини**.
4. Приймати дані від інших вузлів процесора, для передачі на шину адреси при зверненні до аргументів команд, що зберігаються в оперативній пам'яті. Для цього необхідний **регістр адреси шини**.
5. Передавати на шину адреси вміст регістра адреси шини при зверненні до пам'яті в процесі виконання команди і вміст лічильника команд при вибірці самої команди. Для цього необхідний **селектор адреси шини**.

Ну і нарешті, необхідний **регістр** для **зберігання** самої **команди** в процесі виконання. Цей регістр повинен приймати дані з шини і передавати їх керуючим схемам.

Частина вмісту регістра команд – адреси регістрів, в яких зберігаються операнди, повинна комутуватися і передаватися в регістровий файл. Для цього необхідний спеціальний **комутаційний пристрій**. Найчастіше, це додатковий селектор з декількома входами, до кожного з яких підключений один з цих допоміжних вузлів.

1.8.2. Розрядність та система команд процесора

Для кожного процесора визначальну роль відіграє його продуктивність. Вона визначається **розрядністю** процесора і **структурою**

Національний університет водного господарства та природокористування

його **системи команд**. Розрядність процесора визначається тим, скільки розрядів даних обробляє АЛП процесора за один прийом. Відповідно, інші вузли процесора повинні, в основному, мати таку ж розрядність. На даний час найчастіше використовуються 32-розрядні процесори, оскільки вони володіють обчислювальною потужністю і адресним простором, які дозволяють вирішувати більшість практичних завдань. До того ж, 32-розрядне слово надає максимум зручностей при розробці системи команд процесора.

64-розрядні процесори, і процесори більшої розрядності, поки що є надлишковими для більшості додатків, і в основному є пристроями для спеціальних застосувань.

Система команд процесора визначає чергову дію, яку повинен виконати процесор, вид операції та характер змінюваних даних, або ж визначає послідовність зміни виконання операцій.

Кодувати команди процесора можна різними способами, в залежності від розрядності процесора, а також від наявності та властивостей деяких внутрішніх об'єктів процесора. Формат команди зазвичай відповідає розрядності процесора – якщо процесор, наприклад, 8-розрядний, то і основні команди теж повинні бути восьмирозрядними. Якщо процесор 32-розрядний, то і команда повинна мати 32-розряди. Щоб сформулювати деякі команди, розрядності процесора може не вистачити, і тоді команда може складатися з двох слів. Для 8-розрядних процесорів ця ситуація типова, в 32-розрядних – зустрічається рідше.

Якщо необхідно вирахувати, наприклад, суму двох регістрів, то можна сформулювати команду у вигляді 32-розрядного слова, розбитого на 4 групи розрядів, показаних у таблиці 17.

Таблиця 17

Розбиття 32-розрядного слова на 4 групи розрядів

Код команди суми	Адреса регістра, який містить перший доданок	Адреса регістра, який містить другий доданок	Адреса регістра, який буде містити результат

Це означає, що процесор повинен вибрати з регістрового файлу перший доданок і записати його в один із вхідних регістрів АЛП. Потім вибрати з регістрового файлу другий доданок, і помістити його в інший вхідний регістр. Потім потрібно дані з виходу АЛП

Національний університет водного господарства та природокористування

записати в регістровий файл. Всі три адреси, необхідних для звернення до регістрового файлу, будуть міститися в самій команді. Такий формат команди називається *трьохадресним*, і найбільш зручний для розуміння. 32-розрядного слова цілком достатньо для цього формату. Якщо розбити 32 розряди на 4 рівні групи, в кожній групі буде по 8 розрядів. За допомогою 8 розрядів можна закодувати 256 різних значень, отже, регістрів у такого процесора може бути 256, і самих команд теж може бути 256. Однак якщо спробувати 8-розрядну команду зробити трьохадресною, вийде гірше, оскільки в групі буде по 2 розряди і, значить, регістрів може бути 4, і команд теж може бути тільки чотири. Якщо ж зробити групи неоднаковими за кількістю розрядів, то можна закодувати 16 команд, але регістрів тоді можна буде вказувати тільки два. Тому такий формат кращий для процесорів з розрядністю 32 і більше.

Якщо потрібно вкластися в більш коротке слово, наприклад 16 розрядів, можна домовитися, що результат операції буде записаний за адресою, де міститься другий доданок. Такий формат команди називається *двохадресним*.

Процесор сучасного комп'ютера найчастіше вибирається з наступними параметрами: розрядність – 32 біта, трьохадресна система команд і обсяг регістрового файлу – 256 регістрів. У цьому випадку формат команди виходить найбільш простим і гармонійним – команда складається з чотирьох байтів, один з яких визначає код операції, а три інших – регістри, що беруть участь у цій операції.

1.8.3. Структура процесора та керування ним

Як було показано вище, для швидкої операції над двома аргументами їх необхідно одночасно діставати з двох регістрових файлів. Для цього в процесорі передбачено копіювання регістрових файлів, тобто існують файли з однаковим вмістом. Відповідно, в кожну копію регістрового файлу має бути передана адреса регістра з відповідного байта регістра команд. Запис в регістровий файл повинен здійснюватися одночасно в обидві копії, за однією і тією ж адресою. Для комутації адреси регістрового файлу потрібно передбачити додатково два селектори адрес регістрів.

Крім того, для деяких з необхідних додаткових вузлів, передбачена можливість не тільки передачі даних з основного тракту даних

Національний університет водного господарства та природокористування

в ці вузли, а й у зворотному напрямку. Для цього між регістровим файлом і вхідними регістрами АЛП передбачено два 32-розрядних селектора. Їх включення в структуру процесора дозволяє вхідні регістри АЛП використовувати не тільки в якості тимчасового сховища при передачі даних з регістрового файлу в АЛП, а й з інших вузлів процесора, а також для тимчасового зберігання даних в процесі виконання команди.

Отже, більш повна блок-схема тракту даних процесора з підключеними до нього необхідними додатковими вузлами буде ви-

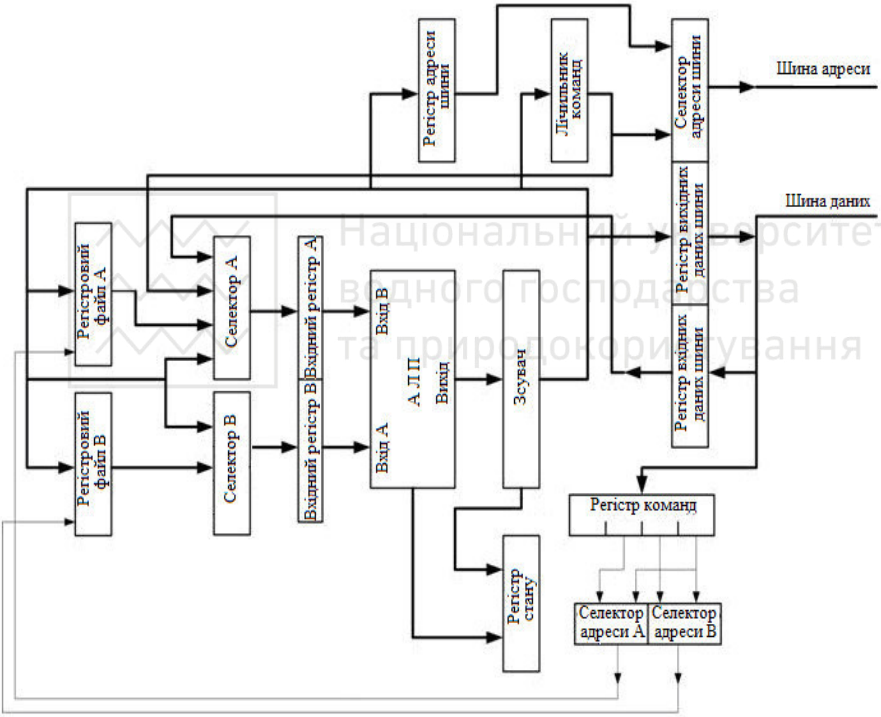


Рис. 1.57. Варіант повного тракту даних процесора

глядати приблизно так як показано на рис. 1.57.

Для керування вузлами процесора (див. рис. 1.57) випишемо список потрібних для цього сигналів (див. табл. 18).

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Таблиця 18

Сигнали керування процесором

Вузол	Список сигналів	Примітка
АЛП	Вибір операції 0	Див. табл. функцій АЛП (табл. 13)
	Вибір операції 1	
	Вибір операції 2	
	Вибір операції 3	
	Вибір операції 4	
Зсувач	Вибір зсуву 0	00 – без зсуву 01 – зсув на біт вліво 10 – зсув на біт вправо
	Вибір зсуву 1	
Регістровий файл А	Запис в файл А	Запис в файл
Регістровий файл В	Запис в файл В	Запис в файл
Селектор А	Вибір входу А0	00 – регістровий файл 01 – вихід зсувача 10 – лічильник команд 11 – регістр даних шини
	Вибір входу А1	
Селектор В	Вибір входу В0	0 – регістровий файл 1 – вихід зсувача
Буферний регістр А	Запис в регістр А	
Буферний регістр В	Запис в регістр В	
Лічильник команд	Запис в лічильник команд	
	Збільшення лічильника команд	Читання команди і відповідь шини
	Скидання лічильника команд	Загальне скидання
Регістр адреси шини	Запис адреси шини	
Селектор адреси шини	Вибір джерела адреси	Читання команди
	Дозвіл видачі адреси на шину	Читання даних по шині або читання команди по шині або запис по шині

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Національний університет
водного господарства
та природокористування

продовження табл. 18

Регістр вхідних даних шини	Запис в регістр вхідних даних шини	Відповідь шини
Регістр вихідних даних шини	Запис в регістр вихідних даних шини	
	Дозвіл видачі даних на шину	Запис по шині
Регістр команд	Запис в регістр команд	Читання команди та відповідь шини
	Скидання регістра команд	Загальне скидання
Регістр станів	Запис в регістр станів	
	Скидання регістру станів	
Шина	Запис по шині	
	Читання даних по шині	
	Читання команди по шині	
	Запит шини	
Селектор адреси А	Вибір входу	Фаза виконання команди
Селектор адреси В	Вибір входу	Фаза виконання команди

З таблиці 18 видно що, розглядати зовнішню шину потрібно як один із вузлів процесора, який налічує всього 18 вузлів, і для яких необхідно 33 керуючих сигнали. Деякі з цих сигналів однакові і тому можуть бути об’єднані в один керуючий сигнал. Інші сигнали є найпростішою логічною комбінацією інших сигналів і можуть бути отримані за допомогою елементарних логічних елементів з інших сигналів.

Для передачі даних і команд доцільно використовувати шину з максимально простими правилами такої передачі. Краще використовувати шину, яка складається з 32-х розрядної шини адреси (два молодших розряди завжди дорівнюють нулю) і 32-х розрядної шини даних. Передача по шині здійснюється 32-розрядними словами.

Національний університет водного господарства та природокористування

Якщо необхідно зчитати дані з якогось пристрою на шині, наприклад, з оперативної пам'яті, процесор повинен спочатку видати на шину адреси адресу слова, яке він хоче прочитати, встановити сигнал типу операції в стан «читання», і потім встановити сигнал запиту шини. Через деякий час після цього він повинен отримати сигнал відповіді шини, який означає, що на шині даних присутня необхідна інформація. Отримавши сигнал відповіді шини, процесор записує дані в регістр вхідних даних шини, і тільки після цього прибирає з шини адресу і сигнал запиту. При запису процесор повинен видати дані на шину одночасно з адресою, а сигнал відповіді шини означає, що дані прийняті пристроєм і їх можна прибрати з шини. Використання таких керуючих сигналів і правил їх формування гарантує, що дані по шині будуть передаватися без спотворень.

1.8.4. Мікрокоманди і мікропрограми

Завдання управління трактом даних процесора полягає у формуванні певних послідовностей керуючих сигналів в залежності від коду операції виконуваної команди. Для формування таких послідовностей необхідно задавати чітко виражені часові проміжки, на протязі яких можна задавати одне командне слово. Такі часові проміжки задає тактовий генератор, який виробляє тактовий сигнал. Тоді для кожного періоду тактового сигналу необхідно сформувати слово, що складається з потрібної кількості розрядів (за числом керуючих сигналів тракту даних) і використовувати розряди цього слова як керуючі сигнали. Таке слово називається **мікрокомандою**. Кожній команді повинна відповідати послідовність мікрокоманд – **мікропрограма**. Кожна мікропрограма повинна закінчуватися діставанням з оперативної пам'яті наступної команди і записом її в регістр команд. Після цього починається виконання цієї мікропрограми і так далі.

У завдання даного посібника не входить опис етапів виконання мікрокоманд, використання для цього часових міток, синхронізації роботи різних вузлів процесора. Автори відсилають читача до бібліографічного списку до даного розділу [8-11].

Достатньо сказати, що якщо врахувати вищесказане, то можна сформулювати більш точно список необхідних керуючих сигналів процесора і їх прив'язку до тактових імпульсів. Якщо скоротити

Національний університет водного господарства та природокористування

співпадаючі сигнали, в отриманому раніше списку таблиці 18 залишиться 24 керуючих сигнали. Частина з них не вимагає тимчасової прив'язки до тактових імпульсів, частина повинна діяти в середині періоду, а частина – в кінці. Якщо це врахувати, то з переліку сигналів табл. 18 можна отримати перелік сигналів табл. 19.

Таблиця 19

Сигнали керування процесором

Скидання регістру стану	Немає прив'язки
Вибір входу A0	Немає прив'язки
Вибір входу A1	Немає прив'язки
Вибір входу B0	Немає прив'язки
Запис по шині	Немає прив'язки
Читання даних по шині	Немає прив'язки
Читання команди по шині	Немає прив'язки
Запит шини	Немає прив'язки
Вибір зсуву 0	Немає прив'язки
Вибір зсуву 1	Немає прив'язки
Функція АЛП 0-4	Немає прив'язки
Запис результату в регістр A	В кінці періоду
Запис результату в регістр B	В кінці періоду
Запис аргументу в регістр A	В середині періоду
Запис аргументу в регістр B	В середині періоду
Запис в регістровий файл	В кінці періоду
Запис в лічильник команд	В кінці періоду
Запис в регістр стану	В кінці періоду
Запис в регістр адреси шини	В кінці періоду
Запис в регістр даних шини	В кінці періоду

З описаним трактом даних і таким форматом мікрокоманди можна організувати виконання обмеженого набору елементарних команд і зчитування команд з оперативної пам'яті. У цьому випадку, кожна команда буде складатися з однієї мікрокоманди, і виконуватися за один такт. Такі процесори реально існують і складають окремий клас RISC процесорів (процесори з скороченим набором команд).

Звичайно, сучасні комп'ютери мають дещо складнішу будову процесорів. Виглядає вона приблизно так, як показано на рис. 1.55 (хоча і ця конструкція є спрощеною).

Національний університет
водного господарства
та природокористування

1.8.5. Висновки

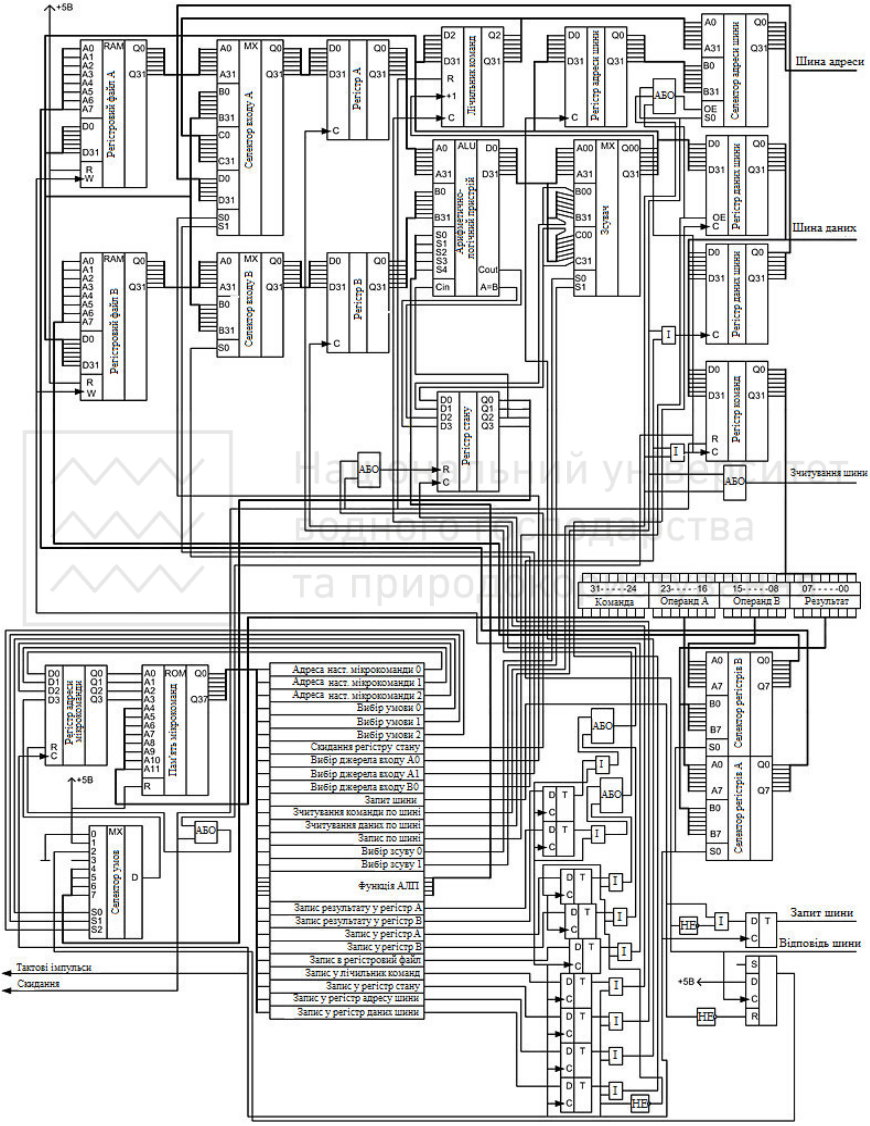


Рис. 1.58. Варіант будови процесора

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Отже, процесор складається з двох основних частин – тракту даних і схеми управління. Тракт даних є сукупністю вузлів для зберігання, обробки і комутації даних. За допомогою керуючих сигналів можна задавати різні маршрути передачі даних, математично оброблюючи їх на цьому маршруті. Задавати ці маршрути можна приблизно так само, як на залізниці перемиканням стрілок задається маршрут поїзда. Сукупність усіх керуючих сигналів тракту даних повністю визначає поточний маршрут даних і, тим самим, ту операцію, яка буде здійснена над даними протягом поточного інтервалу часу – такту, і називається мікрокомандою. Виконання кожної команди зводиться до виконання послідовності з однієї або декількох мікрокоманд. Вибір потрібної послідовності мікрокоманд здійснюється за допомогою коду операції, що вказується в команді. Послідовність мікрокоманд формується схемою управління за таблицею, побудованою на базі ПЗП, або логічних схем і яка задається при розробці процесора.

Сучасні процесори у багато разів складніші, більші, і продуктивніші, ніж розглянутий процесор. Вони можуть включати в себе кілька АЛП, конвеєр, кеш-пам’ять, пристрої керування пам’яттю та інші пристрої, що підвищують продуктивність. Однак, основні принципи їх роботи подібні. Розібравшись, як працює розглянутий вище процесор, зрозуміти, як працює справжній процесор не складе особливих труднощів.

1.10. Оперативні запам’ятовуючі пристрої (ОЗП) на базі напівпровідникової техніки

ОЗП, який часто називають оперативною пам’яттю (ОП) – це робоча область процесора комп’ютера. В ній під час роботи зберігаються програми і дані, які в неї вносить процесор. ОП часто розглядається як тимчасове сховище, оскільки інформація в ній зберігається тільки при ввімкненому комп’ютері [6].

Фізично ОП в системі є набором мікросхем або модулів, які підключені до системної плати.

В сучасних ПК використовуються запам’ятовуючі пристрої трьох основних типів:

1. ПЗП (постійний запам’ятовуючий пристрій), або ROM (англ.: Read Only Memory – пам’ять тільки для читання);

Національний університет водного господарства та природокористування

2. Динамічна оперативна пам'ять, або DRAM (англ.: Dinamic Random Access Memory – динамічний запам'ятовуючий пристрій з довільним доступом);

3. Статична оперативна пам'ять, або SRAM (англ.: Static Random Access Memory – статичний запам'ятовуючий пристрій з довільним доступом).

Довільний доступ означає, що звернення до даних, які зберігаються в ОП, не залежать від порядку їх зберігання. Поняття RAM означає основний *робочий* простір пам'яті, який створюється мікросхемами DRAM і SRAM. RAM є ***енергозалежною пам'яттю***. Після виключення ПК дані, які зберігаються в енергозалежній пам'яті, втрачаються, якщо не будуть збережені на жорсткому диску або пристроях зовнішньої пам'яті.

Часто недосвідчені користувачі ПК не розуміють відмінності між поняттями ОП і зовнішньої пам'яті (наприклад, вінчестера). Якщо уявити собі вінчестер у вигляді бібліотеки, де інформацію зберігають у файлах-книгах на дисках-стелажах, то ОП буде аналогічна робочому столу, на якому користувач працює з книгами. Його робота подібна роботі процесора. Він має прямий доступ до всіх документів, які знаходяться на столі. Якщо стіл достатньо великий, то можна одночасно працювати з декількома документами. Збільшення ємності жорсткого диску аналогічне встановленню нового стелажа в бібліотеці, а збільшення ємності ОП аналогічне встановленню більшого робочого столу.

1.10.1. Постійний запам'ятовуючий пристрій (ROM)

В пам'яті типу ROM дані можна лише зберігати, змінювати їх не можна. Саме тому цей вид пам'яті використовується тільки для читання даних. ROM є ***енергонезалежною пам'яттю***, оскільки записані в неї дані зберігаються після вимкнення комп'ютера. Тому в ROM розміщуються команди запуску ПК, тобто програмне забезпечення, яке завантажує систему.

Відмітимо, що ROM і оперативна пам'ять – не протилежні поняття. ROM – це частина оперативної пам'яті системи. Іншими словами, частина адресного простору ОП відводиться для ROM. Це необхідно для зберігання програмного забезпечення завантаження операційної системи. Основний код BIOS (англ.: Basic Input/Output

Національний університет водного господарства та природокористування

System – базова система введення/виведення) зберігається в мікросхемі ROM на системній платі, але на платах адаптерів також є аналогічні мікросхеми. Вони зберігають допоміжні підпрограми BIOS і драйвери, необхідні для конкретної плати, особливо для тих плат, які повинні бути активовані на ранньому етапі початкового завантаження, наприклад для відеоадаптера.

ROM [7] поділяється на:

1. ROM(M).
2. PROM.
3. EPROM.
4. EEPROM.
5. FlashROM.

ROM(M)

ROM(M)**,** точніше Mask-ROM, не може виконувати операції запису і зміни даних, вона може їх лише зберігати. ROM(M) є енергонезалежною пам’яттю, тому використовується лише для читання. Дані на ROM(M) записують під час виробництва мікросхеми шляхом нанесення на маску (звідси назва) алюмінієвих з’єднувальних доріжок літографічним методом. По суті, мікросхема ROM(M) – це набір провідників між її входами і виходами. Наявність або відсутність у відповідному місці такої доріжки кодує логічні «0» або «1».

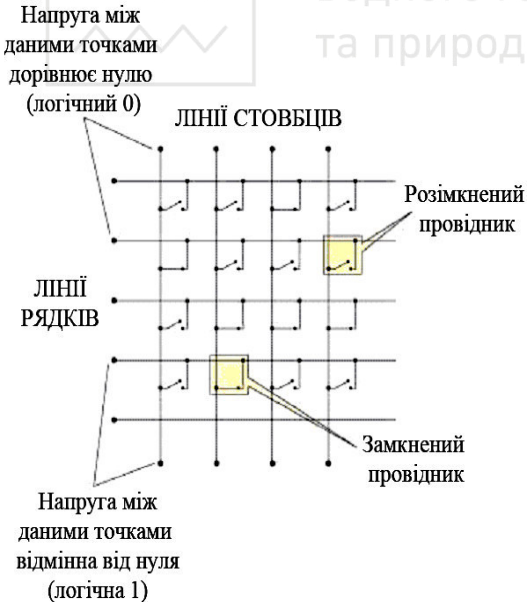


Рис. 1.59. Еквівалентна схема PROM

В ROM(M) знаходяться команди запуску комп’ютера, тобто програмне забезпечення, яке завантажує систему.

Переваги:

1. Низька вартість при масовому виробництві.

Національний університет водного господарства та природокористування

2. Висока швидкість доступу до комірки пам'яті.
3. Висока надійність.
4. Стійкість до електромагнітних полів.

Недоліки:

1. Неможливість перезапису.
2. Складний виробничий цикл (до 8 тижнів).

В сучасних комп'ютерах такий тип пам'яті вже не використовують.

PROM

В PROM (англ.: Programmable ROM – програмована пам'ять тільки для читання), – як і в ROM, інформація може записуватись лише один раз. Вона виготовлювалась у вигляді мікросхем. Відмінність мікросхем пам'яті PROM від ROM полягала в тому, що мікросхеми PROM випускались чистими, а в ROM інформація закладалась вже при виготовленні. Для запису інформації в PROM використовували програматор. Еквівалентна схема PROM показана на рис. 1.59. В такій пам'яті масив комірок пам'яті можна представити набором плавких перемичок. Деякі перемички з цього набору під час запису розплавлюють при пропусканні через них великого струму від програматора, а деякі залишають не пошкодженими. Такі перемички відіграють роль логічних «0» і «1». Не розплавленому стану перемички можна присвоїти значення логічного нуля, а розплавленому – логічної одиниці.

Пам'ять PROM практично вийшла з ужитку наприкінці 1980-их років.

Переваги:

1. Висока надійність.
2. Стійкість до електромагнітних полів.
3. Можливість програмування готової мікросхеми, що є зручним для штучного виробництва.
4. Висока швидкість доступу до комірки пам'яті.

Недоліки:

1. Неможливість перезапису.
2. Необхідність у спеціальному тривалому термічному тренуванні, без якого надійність зберігання даних невисока.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

EPROM

EPROM (англ.: Erasable PROM – програмована пам'ять тільки для читання з можливістю стирання) – це спеціальний вид PROM з можливістю стирання даних ультрафіолетовим випромінюванням через кварцове вікно в корпусі мікросхеми. Після стирання EPROM може бути перепрограмована. Електронна схема EPROM ідентична PROM. Дані зберігаються у вигляді заряду на плаваючих затворах МОН-транзисторів з лавинною інжекцією заряду (фактично, на обкладках конденсатора з дуже низьким стіканням заряду).

Стирання приводить всі біти області в один стан (частіше у логічні «1», рідше – у «0»). Запис також здійснюється на програматорах, але вони схемно відрізняються від програматорів PROM. В даний час EPROM майже повністю витіснені EEPROM і FlashROM.

Переваги:

1. Можливість перезапису інформації.

Недоліки:

1. Невелика кількість циклів перезапису.
2. Неможливість модифікації частини даних на мікросхемі.
3. Велика імовірність перетримання або недотримання мікросхеми в ультрафіолетовому випромінюванні, що призводить до „перепалювання" мікросхеми або до збоїв у роботі.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

EEPROM

EEPROM (англ.: Electrically EPROM – програмована пам'ять тільки для читання з можливістю стирання електричним розрядом) – спеціальний тип PROM з можливістю стирання даних електричним розрядом. Перший зразок мікросхеми (16*Кбіт*) на основі польових транзисторів з „плаваючим" затвором був випущений в 1983 році. Головна відмінність EEPROM від попередніх видів ROM полягала в можливості перепрограмовувати її процесором ПК. Стирання кожної комірки пам'яті відбувалось автоматично електричним струмом при запису в неї нової інформації. У комірці пам'яті EEPROM можна було змінювати дані, не знищуючи їх в інших комірках. Час стирання інформації в такій комірці є суттєво більшим часу запису.

Переваги:

1. Збільшений ресурс роботи.
2. Простіша в експлуатації.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Недоліки:

1. Відносно висока вартість.

FlashROM

FlashROM (Flash-memory, флеш-пам’ять).

Цей вид мікросхем можна вважати схематичним варіантом EEPROM. Таку мікросхему також можна перепрограмовувати процесором, але перед цим необхідно виконати стирання (повне або поблочне). Існують мікросхеми FlashROM-пам’яті з автоматичним посторінковим автостиранням і дуже дрібною розбивкою на сторінки, що наближає їх за можливостями до EEPROM. Слід розрізняти ОП на основі FlashROM і зовнішню флеш-пам’ять. Перша знаходиться на материнській платі, а друга є зовнішнім незалежним пристроєм зберігання даних і лише має подібну до FlashROM організацію (див. 1.12).

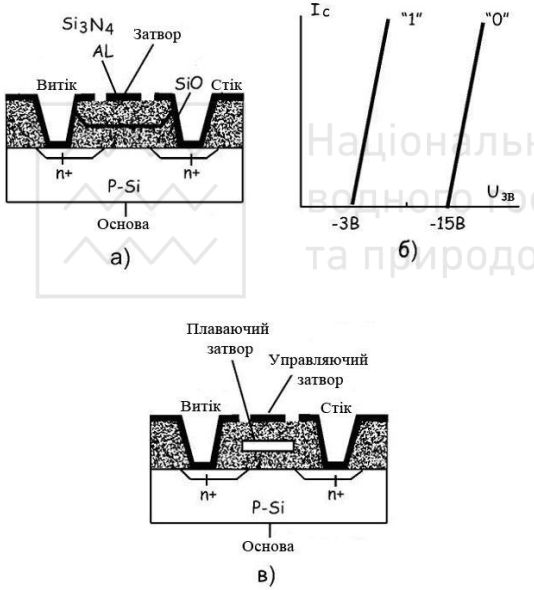


Рис. 1.60. Будова МНОН- і ЛІЗМОН- транзисторів

Переваги:

1. Висока швидкість перезапису за рахунок того, що стирання інформації відбувається блоками.
2. Собівартість виробництва невисока.

Недоліки:

1. Повільний запис в довільні комірки пам’яті.

1.10.1.1. Будова і принцип дії ROM з можливістю перезапису

У всіх перепрограмованих ПЗП кількість перезаписів складає від 10 до 10000 завдяки використанню елементів пам’яті на МДН-транзисторах зі структурою МНОН (**М**етал Al – **Н**ітрид Сіліцію

Si_3N_4 – **О**кисел Сіліцію SiO – **Н**апівпровідник Si) або зі структурою ЛІЗМОН (**М**етал – **О**кисел Сіліцію – **Н**апівпровідник з **Л**авинною **І**нжекцією **З**аряду). Як говорилось вище, ці ПЗП можна розділити на мікросхеми, дані на яких стирають електричним струмом або ультрафіолетовим випромінюванням.

1.10.1.2. Будова і принцип дії МНОН і ЛІЗМОН

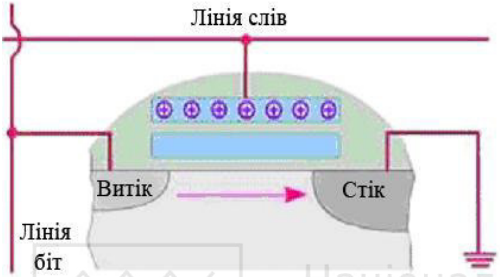


Рис. 1.61. Елемент пам'яті на транзисторі ЛІЗМОН з подвійним затвором

МНОН є, найчастіше, МОН-транзисторами (Метал – Окисел Сіліцію – Напівпровідник) з провідним каналом n- або p- типу, що має двошаровий діелектрик під затвором (див. рис. 1.60, а). Верхній шар сформований з нітриду Сіліцію, нижній (набагато тонший) – з окислу Сіліцію. Якщо до затвора прикласти напругу близько 40*В*, то електрони каналу отримають достатню енергію для проходження за рахунок тунельного ефекту в область границі двох діелектриків. Оскільки верхній шар діелектрика достатньо товстий для проходження електронів, всі вони накопичуються між двома шарами діелектрика. Їх накопичення зміщує робочі характеристики транзистора (див. рис. 1.60, б) і, відповідно, змінює струм через нього. Стан транзистора з зарядом під затвором відповідає логічній одиниці, без – логічному нулю.

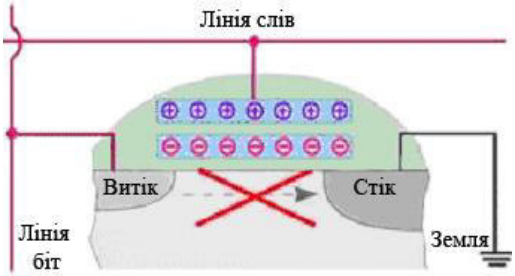


Рис. 1.62. Закритий ЛІЗМОН - транзистор

Процес програмування такої мікросхеми відбувається в два етапи:

1. Стирається інформація шляхом подачі імпульсу напруги негативної полярності близько 40*В* на затвор. Електрони витісня-

Національний університет водного господарства та природокористування

ються із підзатворного діелектрика в основу напівпровідника (елемент пам'яті переходить в стан логічного «0»);

2. Подається імпульс напруги позитивної полярності на затвор. Електрони переходять в міждіелектричний шар, що, відповідно, еквівалентне стану логічної «1».

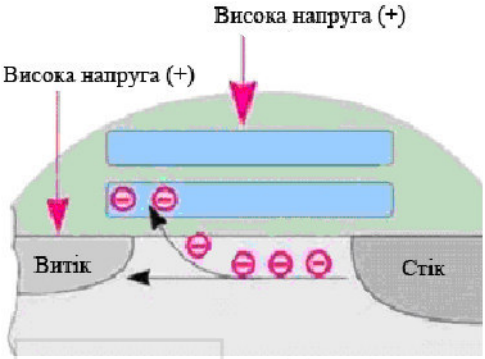


Рис. 1.63. Запис даних на ЛІЗМОН – транзистор

Елемент пам'яті на транзисторі ЛІЗМОН з подвійним затвором показаний на рис. 1.60, в. Це польовий транзистор n-типу з плаваючим затвором. При читанні, за відсутності заряду на плаваючому затворі, під дією позитивного потенціалу, утворюється *n*- канал між витоком і стоком, і проходить струм (див. рис. 1.61).

Наявність заряду на плаваючому затворі змінює вольт-амперні характеристики транзистора. Це відбувається тому, що електрони каналу провідності витісняються електричним полем, яке створене зарядом плаваючого затвору, в основу напівпровідника і не попадають в стік (див. рис. 1.62).

В режимі програмування на управляючий затвор і витік подається напруга близько 25*В* (див. рис. 1.63).

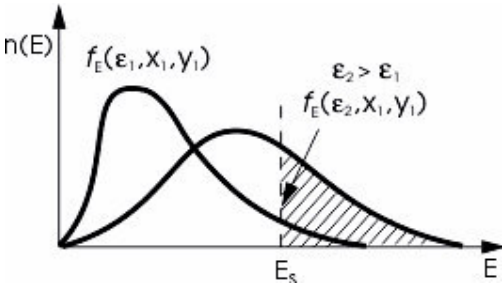


Рис. 1.64. Функція розподілу концентрації електронів в залежності від напруженості електричного поля E

Електрони в провідному каналі отримують високе дрейфове прискорення і при напруженості електричного поля вищій 100*кВ/см* їх кінетична енергія не встигає розсіятись на атомах кристалічної решітки. Це приводить до їх «розігріву», що дає можливість більшій частині електронів здолати потен-

ціальний бар'єр діелектрика і інжектуватись у плаваючий затвор (див. рис. 1.63). Цей процес називається інжекцією «гарячих» тронів.

На рис. 1.64. показана функція розподілу концентрації електронів з різними середніми енергіями (ε_1 і ε_2) в місці інжекції з координатами (x_1, y_1) в залежності від напруженості електричного поля E. E_s – величина потенціального бар'єру переходу Si/SiO_2. Електрони заштрихованої області мають достатню енергію для інжекції в плаваючий затвор.

Накопичення електронів у плаваючому затворі зміщує робочі характеристики транзистора і такий його стан відповідає елементу пам'яті з логічним «0». Стирання інформації здійснюється витісненням заряду з плаваючого затвора.

Ця процедура виконується двома способами. В EEPROM і FlashROM подається імпульс негативного потенціалу на керуючий затвор і позитивного на витік (див. рис. 1.65). Під дією такої різниці потенціалів відбувається тунельний перехід електронів з плаваючого затвора у витік (тунелювання Фаулера - Нордхейма) і плаваючий затвор звільняється від електронів.

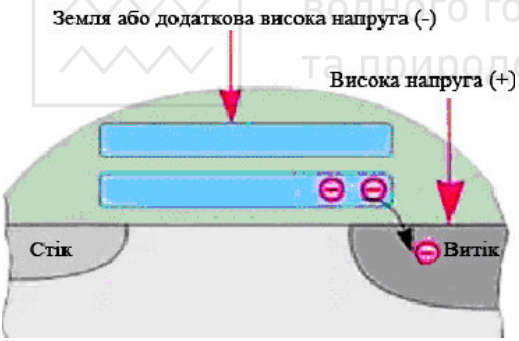


Рис. 1.65. Стирання даних з ЛІЗМОН – транзистора

Ефект тунелювання Фаулера - Нордхейма (автоелектронна емісія, польова емісія) полягає в інжекції електронів провідними або напівпровідними твердими і рідкими тілами під дією зовнішнього електричного поля в вакуум або діелектрик. Для звичайних провідників напруженість електричного поля, яка необхідна для цього, становить близько 10*В/см*. Зовнішнє електричне поле звужує і понижує потенціальний бар'єр на границі металу або напівпровідника і вакууму або діелектрика. Відповідно, збільшується кількість електронів, які проникають через цей бар'єр (збільшується прозорість бар'єру).

Національний університет водного господарства та природокористування

Автоелектронна емісія найбільш повно вивчена для переходу електрона з металу у вакуум. В цьому випадку густина струму тунелювання J дорівнює:

$$J = C_1 E^2 \exp(-C_2 / E), \qquad (2.6)$$

де C_1 і C_2 – константи, E – напруженість електричного поля.

Для переходу із напівпровідника в діелектрик залежність подібна.

Залежність струму Фаулер - Нордхейм – тунелювання від напруженості електричного поля показано на рис. 1.66.

З рис. 1.63. видно, що залежність струму через діелектрик при операціях програмування транзисторів має експоненціальний характер. Це є причиною великих проблем при керуванні цими операціями, оскільки незначні коливання товщини діелектрика в матриці транзисторів призводять до значного розкиду величин струмів програмування і стирання (часу запису і стирання).

У EPROM за допомогою ультрафіолетового опромінення кристал напівпровідника розігрівається. Внаслідок підсилення теплового руху електрони «розсмоктуються» з плаваючого затвора, переходячи в основу кристала. Стан елемента пам'яті без заряду на плаваючому затворі відповідає логічній «1».

Як видно з приведених рисунків, струми зарядки і розрядки плаваючого затвора сконцентровані в локальних, рознесених між собою областях діелектрика, що забезпечує збільшення циклів перезарядки плаваючого затвора.

Рис. 1.66. Залежність струму Фаулер-Нордхейм – тунелювання від напруженості електричного поля

Флуктуації товщини діелектрика у EPROM і FlashROM призводять до локальної неоднорідності напруженості електричного поля, яке викликає «перевантаження» ділянок діелектрика. Циклічне навантаження на діелектрик на цих ділянках викликає прискорення процесів його деградації – порушення структури і зміни опору. Причиною деградації може бути як поява і

ріст дефектів кристалічної решітки діелектрика (дислокацій і розривів Si-O зв'язків), так і дифузія йонів, викликана локальним перегрівом в областях підвищеного струму. Ці процеси призводять до появи «пасток» для заряду в шарі діелектрика і в результаті з'являється так званий «викликаний перевантаженням паразитний струм витікання» (SILC). Він суттєво впливає на час зберігання заряду в ізольованих місцях транзисторів і на швидкість програмування та стирання. В граничному випадку деградації може наступити пробиття діелектрика – шар SiO_2 перестає виконувати свої ізолюючі функції, оскільки велика кількість дефектів у ньому не дає можливості зберігати заряд в ізольованих місцях.

1.10.1.3. Будова і принцип дії SST

Описаними вище комірками на основі транзисторів із плаваючим затвором не обмежується різноманіття можливих конструкцій пам'яті комп'ютера. Широкого вжитку набула комірка SST. Будовою вона нагадує комірку на основі ЛІЗМОН, але в ній змінені форми плаваючого і управляючого затворів (див. рис. 1.67).

Управляючий затвор має вигнуту форму. Він одночасно знаходиться над витоком і краєм стоку. Плаваючий затвор при такій конструкції управляючого може знаходитись між ним і витоком. Це суттєво спрощує процеси інжекції «гарячих» електронів і тунелювання Фаулера - Нордхейма, яке відбувається не в область витоку, а в область управляючого затвору. Така будова транзистора значно підви-

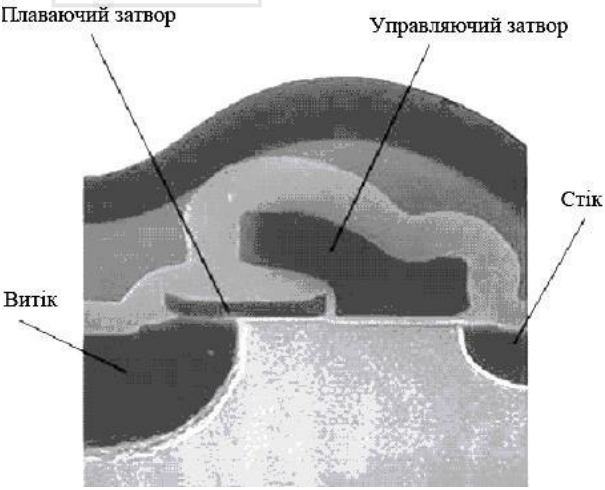


Рис. 1.67. Фото комірки SST на електронному мікроскопі

Національний університет водного господарства та природокористування

щує його довговічність за рахунок довшого збереження структури діелектрика.

1.10.1.4. Будова і принцип дії MLC

Комірка MLC відноситься до так званих багаторівневих комірок. В ній одночасно може зберігатись декілька біт інформації. Принцип роботи такого транзистора полягає в розпізнаванні кількості заряду на плаваючому затворі за величиною струму через транзистор. Як видно з рис. 1.65 при наявності заряду на плаваючому затворі, провідний канал перекривається і струм через транзистор припиняється. Транзистор можна відкрити подаючи деякий більший потенціал (пороговий) на управляючий затвор. Таким чином, за значенням порогового потенціалу на управляючому затворі можна судити про кількість заряду на плаваючому затворі. В MLC є можливість розрізняти за допомогою порогового потенціалу різну кількість заряду на плаваючому затворі: немає заряду – відповідає логічному «11», одна третина заряду – відповідає логічному «10», дві третини – логічному «01», повністю заряджений плаваючий затвор – логічному «00». Це означає, що в одній комірці пам'яті можна зберігати два біта інформації. В сучасних розробках є можливість розрізняти 16 рівнів порогового потенціалу, що відповідає 4 бітам.

1.10.2. Пам'ять типу RAM

Пам'ять типу RAM (енергозалежна пам'ять). RAM поділяється на DRAM і SRAM.

1.10.2.1. DRAM

DRAM (динамічна оперативна пам'ять) використовується в більшості систем оперативної пам'яті сучасних ПК. Основна перевага пам'яті такого типу полягає у великій щільності інформації, яка може в ній зберігатись.

Комірки пам'яті в мікросхемах DRAM – це маленькі конденсатори, які утримують заряд. Саме наявністю або відсутністю заряду і кодуються біти. Фізично для зберігання одного біта інформації в комірці DRAM використовується один транзистор і один конденса-

Національний університет водного господарства та природокористування

тор (рідше – декілька). Сукупність таких комірок утворюють умовний «прямокутник», який складається із певної кількості *рядків* і *стовпців* (див. рис. 1.68). Один такий «прямокутник» називається *сторінкою*, а сукупність сторінок – *банком*.

Проблеми, пов'язані з пам'яттю даного типу, викликані тим, що вона динамічна, тобто повинна постійно регенеруватися. Конденсатори комірок не можуть довго утримувати заряди, вони «стікають» на корпус і дані комірки втрачаються. Регенерація відбувається, коли контролер пам'яті робить перерву (15*мс*) і звертається до всіх рядків пам'яті. Вони прочитуються кожні 1,92*мс* для забезпечення регенерації даних. Це відбувається шляхом подачі потенціалів з ліній слів на затвори транзисторів, вони відкриваються і по лініях біт відбувається зарядка конденсаторів, там де це необхідно.

На жаль, регенерація DRAM забирає час у процесора: кожен цикл регенерації за тривалістю займає декілька циклів центрального процесора. В старих ПК цикли регенерації займали до 10% процесорного часу, у сучасних – менше 1%.

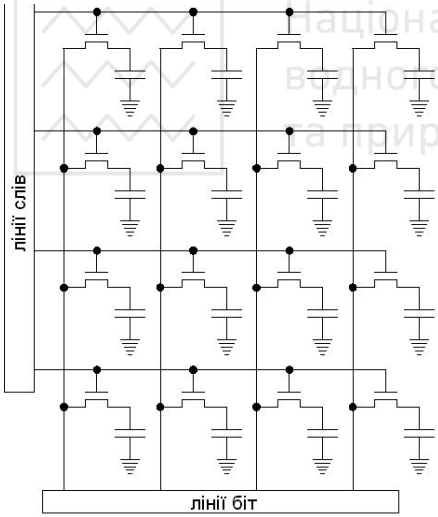


Рис. 1.68. Сторінка пам'яті DRAM

Зчитування інформації відбувається за допомогою спеціального чутливого підсилювача, який приєднаний до кожного стовпця «прямокутника». Він реагує на струм, що йде через відкриті транзистори із обкладок конденсаторів і зчитує цілком всю сторінку. Саме сторінки і є мінімальною порцією обміну із динамічною пам'яттю.

Ще одним недоліком DRAM є низька швидкодія, зазвичай DRAM набагато «повільніша» процесора. Тому існує велика кількість різних типів організації DRAM, що дозволяють покращити цю характеристику: SDRAM, DDR SDRAM (англ.: Double Data Rate three Synchronous Dynamic Random Access Memory), DDR2 SDRAM, DDR3 SDRAM, RDRAM та інші.

Національний університет водного господарства та природокористування

На даний час велику популярність у користувачів здобула ОП на основі DDR2 (подвійна швидкість передачі даних) з робочою частотою 400, 533, 667, 800, 900 і 1000*МГц* для різних модифікацій. Ця частота узгоджується з тактовою частотою процесора, який працює на частоті 400*МГц* і вище. Мікросхема DDR2 передає дані процесору з подвійною швидкістю. Це досягається не за рахунок подвоєння тактової частоти, а за рахунок передачі даних двічі за один цикл: перший раз на початку циклу, а другий – в кінці. Крім того, в ній використовуються диференціальні пари сигнальних контактів, що забезпечує покращення передачі даних. Робоча напруга DDR2 менша ніж у інших DRAM (1,8 замість 2,5*В*), завдяки чому модулі пам'яті DDR2 споживають менше енергії і виділяють менше тепла.

У DDR3 (третє покоління ОП) зменшена напруга живлення до 1,5*В* за рахунок використання нового покоління транзисторів зі зменшенням паразитного струму стікання з плаваючого затвору. Робоча частота в модифікаціях DDR3 доводиться до 2500*МГц*.

Пам'ять типу DDR4 SDRAM імовірно з'явиться у найближчому майбутньому. Вона буде відрізнятись від попередніх поколінь більш високими частотними характеристиками і меншою напругою живлення. За оцінками вона має підтримувати робочу частоту від 2133 до 4266 *МГц* при напрузі живлення в 1,2 *В*.

Схеми всіх приведених вище поколінь DDR і їх фізичні принципи роботи практично не відрізняються, а удосконалення визначаються лише покращеною організацією роботи з ними.

1.10.2.2. Кеш-пам'ять – SRAM

SRAM – це статична оперативна пам'ять. На відміну від DRAM, для зберігання в ній інформації не потрібна періодична регенерація оскільки в ній в якості комірки пам'яті не використовується конденсатор. Для збереження біта інформації використовується комірка, яка складається із тригера і необхідної схеми керування, а це щонайменше шість транзисторів. На рис. 1.69 показана матриця таких комірок. Завдяки цьому габарити мікросхеми SRAM такої ж ємності як і DRAM приблизно в 30 разів більші. Приблизно у стільки ж разів вища і її вартість.

На виході тригера (див. рис. 1.69) знаходиться схема з трьома станами, яка дозволяє підключити всі комірки до одного провідни-

Національний університет водного господарства та природокористування

ка, який проходить через всі комірки, і який використовується для зчитування даних. Вхід даних тригера всіх комірок підключений до загального провідника, через який передаються дані при записі. Для управління комірками до кожної з них за допомогою таких же загальних провідників підведені сигнали управління, один з яких дозволяє зчитування з комірки, а інший дозволяє запис в неї. Крім того, є вертикальні і горизонтальні провідники, необхідні для вибору комірки. Комірка приймає або передає дані тільки тоді, коли на вертикальному і горизонтальному провідниках присутня логічна «1», тобто вибирається лише та комірка, яка знаходиться в точці перетину активних провідників. Для вибору комірок, матриця має два дешифратора – відповідно дешифратор рядків і дешифратор стовпців, які управляються адресними сигналами. Представлена на даному рисунку матриця може зберігати 16 біт інформації. Якщо об'єднати, наприклад, 32 таких матриці, в них можна зберігати шістнадцять 32-розрядних слів. Звичайно, матриці статичної пам'яті мають набагато більшу ємність, але аналогічну структуру.

Якщо порівняти пам'ять DRAM і SRAM, то можна зробити наступні висновки:

Тип пам'яті	Швидкодія	Щільність	Вартість
DRAM	Низька	Висока	Низька
SRAM	Висока	Низька	Висока

Незважаючи на високу вартість однієї комірки пам'яті SRAM в порівнянні з коміркою DRAM при тій же щільності інформації розробники ПК все ж використовують її для підвищення ефективності роботи комп'ютера. Але щоб запобігти значного збільшення вартості ОП встановлюється лише невеликий об'єм високошвидкісної пам'яті SRAM, яка використовується в якості **кеш-пам'яті** (англ.: cache, утворено від фр.: cacher – «ховати»). Вона виступає в якості проміжного буфера з швидким доступом, який містить інформацію, що може бути використана з найбільшою ймовірністю. Кеш-пам'ять працює на тактових частотах близьких до тактової частоти процесора і саме кеш-пам'ять використовується процесором для читання і запису. Під час операції читання дані в високошвидкісну кеш-пам'ять попередньо записуються із ОП з низькою швидкодією (DRAM). Кеш-пам'ять вперше була застосована у 386 процесорі у вигляді буфера, який безпосередньо обмінювався даними з проце-

Національний університет
водного господарства
та природокористування

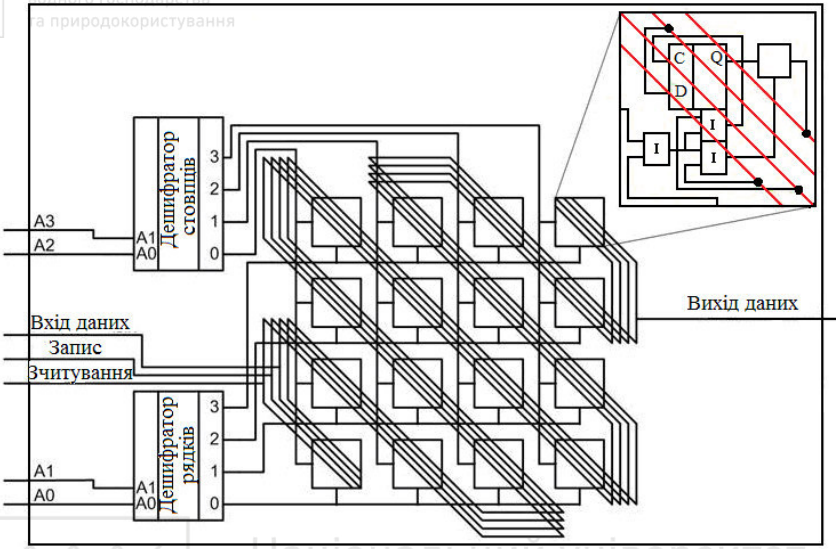


Рис.1.69. Матриця комірок SRAM-пам’яті

Національний університет
водного господарства
та природокористування

сором. Контролер кеша міг передбачати необхідності процесора в даних і попередньо завантажувати необхідні дані в високошвидкісну кеш-пам’ять. Тоді при видачі процесором адреси пам’яті дані могли бути передані із кеша, а не DRAM.

Щоб мінімізувати час чекання при зчитуванні процесором даних із DRAM, в сучасних ПК передбачені три види кеш-пам’яті: кеш-пам’ять першого рівня (L1), кеш-пам’ять другого рівня (L2), кеш-пам’ять третього рівня (L3). Всі вони мають подібну електронну будову. Кеш-пам’ять першого рівня ще називають *вбудованим*, або *внутрішнім кешем*; вона безпосередньо вбудована в процесор. Кеш-пам’ять другого рівня називається *вторинним*, або *зовнішнім кешем* і встановлювалась на системній платі (для процесорів 386, 486 і Pentium). З 1999 року кеш-пам’ять другого рівня також вбудовується в процесор. Кеш-пам’ять третього рівня в широкому вжитку з’явилась в кінці 2003 року в процесорах Pentium 4 Extreme Edition.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

1.11. Зовнішні запам'ятовуючі пристрої на базі напівпровідникової техніки

1.11.1. Твердотільні накопичувачі

Твердотільний накопичувач (англ.: SSD (Solid State Drive)) — це напівпровідниковий накопичувач, що складається з мікросхем пам'яті і контролера (подібно до флеш-пам'яті). Існують два види SSD - накопичувачів, які базуються на використанні енергозалежної (RAM SSD) і незалежної (NAND або Flash SSD) пам'яті. Перші характеризуються швидким читанням, записом і пошуком інформації в пристрої пам'яті і використовуються в основному для прискорення роботи великих систем управління базами даних і потужних графічних станцій. Основним їх недоліком є надзвичайно висока вартість. Інші ж мають набагато нижчу вартість і характеризуються відносно невеликими розмірами і низьким енергоспоживанням, саме вони є найбільш перспективними.

Використовується дві технології для виробництва твердотільної пам'яті:

1. NAND SSD (SLC).
2. MLC.

SLC (англ.: Single Level Cell) — технологія, при якій кожна комірка пам'яті використовується для зберігання одного біта даних. У свою чергу MLC (англ.: Multi Layer Cell) дозволяє зберігати у комірці 4 біта даних. Зрозуміло, що на основі MLC можна створювати більш місткі SSD-диски. Недоліком є те, що вони при цьому програють в швидкості читання/запису в порівнянні з технологією SLC (приблизно у півтора рази).

Велика різниця і у вартості пам'яті, оскільки MLC-мікросхеми у двічі дешевші за SLC-мікросхеми при однаковій ємності. Варто відзначити, що MLC SSD також поступаються SLC в тривалості роботи – кількість циклів перезапису комірок у них приблизно вдесятеро менша.

Найочевидніша перевага SSD перед звичними жорсткими дисками полягає в його монолітності. Якщо HDD мають рухомі частини (в більшості вінчестерів диски обертаються зі швидкістю 7200*об/с*), то в SSD рухомих частин немає. Це гарантує вищу надій-

ність роботи пам'яті — адже чим менше рухомих деталей, тим надійніший пристрій, що гарантує повну безшумність флеш-дисків.

Окрім очевидних, SSD має також ряд інших переваг. Зокрема, варто відзначити, що твердотільні накопичувачі мають в 2-3 рази меншу вагу ніж вінчестери. Але більше значення має мале енергоспоживання SSD-дисків в порівнянні з HDD-дисками.

Окрім переваг, на зразок низької шумності і надійності, в SSD - накопичувачів є свої переваги при читанні/запису даних. Твердотільні накопичувачі працюють на однакових фізичних елементах - елементах пам'яті. При читанні файлу, що займає декілька блоків, весь процес фактично займає час, потрібний для доступу до одного блоку, оскільки SSD може працювати паралельно з декількома елементами пам'яті. Магнітна головка HDD працює послідовно з кожною коміркою пам'яті, тому вона буде послідовно проходити блоки і зчитувати з них інформацію. Швидкість зчитування при цьому досить суттєво падає, оскільки потрібна інформація знаходиться в різних секторах диску. І тому HDD витрачає в середньому 12-13*мс* на позиціонування головки і дообертання диску до потрібного місця. В SSD на цей процес витрачається близько 0,01*мс*.

Серед недоліків SSD слід зазначити малий життєвий цикл. Так, життя комірки пам'яті SSD в середньому складає близько 10 тис. перезаписів. Крім того, у SSD неможливо записати нову інформацію поверх старої без попередніх дій. Щоб записати дані у комірки пам'яті SSD, необхідно спочатку стерти те, що в них знаходиться. У сучасних носіїв при заповненні 50-60% ємності носія особливих проблем з цим не виникає, а надалі доводиться вдаватися до вимушеної процедури стирання блоків, що призводить до зношення елементів пам'яті. У сучасних SSD-накопичувачах за ці процеси відповідає контролер, який контролює рівномірність розподілу даних по об'єму носія. Це призводить до вирівнювання зношеності всіх комірок пам'яті SSD.

Інший суттєвий недолік, який і є визначальним для користувача, – висока ціна SSD-накопичувачів. Потрібно також враховувати, що ціна на SSD-диски зростає прямо пропорційно їх об'єму. В той же час при збільшенні об'єму HDD-дисків співвідношення вартості за гігабайт об'єму істотно знижується.

Очевидно, що на даний момент SSD-накопичувачі не зможуть вважатися повноцінною заміною «класичним» HDD. В той же час,

Національний університет водного господарства та природокористування

вже зараз вони використовуються в нових ноутбуках, а також деяких інших портативних пристроях. Також дуже цікавими виглядають гібридні системи зберігання даних, коли швидкий SSD комбінується з жорстким диском. У таких накопичувачах масив незалежної флеш-пам'яті використовується як проміжна ланка між ОЗП і магнітним вінчестером, що входить в «гібрид». Гібридні накопичувачі демонструють підвищену швидкодію при певних типах операцій читання/запису, дозволяють прискорити процес первинного завантаження і зменшити енергоспоживання.

1.11.2. Флеш-пам'ять

Найновішим типом змінного накопичувача є флеш-пам'ять (англ.: **Flash-memory**). Флеш-пам'ять можна означити як особливий вид енергонезалежної, напівпровідникової пам'яті з можливістю перезапису. Вона:

1. **Енергонезалежна**, оскільки не вимагає додаткової енергії для зберігання даних. Енергія потрібна тільки для запису.
2. **Має можливість перезапису** даних як окремих блоків пам'яті, так і пам'яті цілком.
3. **Напівпровідникова** (твердотільна), оскільки побудована на основі інтегральних мікросхем і не має рухомих механічних частин (як жорсткі диски або CD).

Історично флеш-пам'ять походить від ROM-пам'яті і функціонує подібно RAM-пам'яті. Принципова відмінність флеш-пам'яті від RAM полягає в її енергонезалежності. Ця пам'ять може на протязі необмеженого часу (десятки років) зберігати інформацію при відсутності зовнішнього живлення. Взагалі кажучи, існує декілька типів енергонезалежної пам'яті (наприклад, ROM, про яку розповідалось в параграфі 1.10.1), флеш-пам'ять лише одна із їх різновидів.

Основною структурною одиницею, яка використовується для зберігання біта інформації, у флеш-пам'яті є МДН транзистор з плаваючим затвором. Заміни пам'яті DRAM і SRAM флеш-пам'яттю не відбувається через наступні причини:

1. Суттєво повільніша робота.
2. Обмеження по кількості циклів перезапису (10^4 – 10^6).

Національний університет водного господарства та природокористування

Архітектура флеш-пам'яті

Комірка флеш-пам'яті на основі транзистора з плаваючим затвором може використовуватись для створення масивів енергонезалежної пам'яті. Для цього потрібно певним чином об'єднати в один масив множину таких комірок, тобто створити архітектуру пам'яті. Існують два основних види архітектур флеш-пам'яті: **NOR** і **NAND**

а). Архітектура NOR

Дана архітектура була розроблена для флеш-пам'яті фірмою Intel в 1988 році. Схема базується на реалізації логічного елемента, який отримав назву NOR (Not OR – в булевій математиці означає логічну функцію Пірса, представленій в таблиці істинності «АБО–НЕ» (таблиця 6)).

Логічна схема NOR у пристроях флеш-пам'яті реалізується на польових транзисторах з плаваючим затвором, за схемою, показаною на рис. 1.32. Матриця 2x2 такої пам'яті представлена на рис. 1.70. Тут вхідні сигнали ідуть по керуючих лініях (лініях слів) на управляючі затвори транзисторів, а вихідні сигнали, за якими визначається вміст комірок, знімаються по лініях аналізу (лініях біт). Як видно з рис. 1.70 при подачі сигналу на будь-який транзистор стовпця на виході буде завжди «0», оскільки лінія біт закорочується через відкритий транзистор. Лише при відсутності вхідного сигналу на управляючих затворах транзисторів стовпця («0»), на виході буде «1» (транзистори закриті). Наявність заряду на плаваючих затворах відповідно корегує відкривання і закривання транзисторів згідно рис. 1.61 - 1.62 (параграф 1.10.1.2).

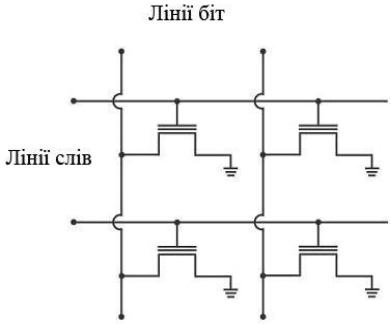


Рис. 1.70. Комірка NOR – пам'яті

Як недолік комірки NOR-пам'яті слід відзначити незадовільне масштабування. Як видно з рис. 1.70 комірка пам'яті перетинається сіткою провідників ліній слів і біт. Оскільки запис інформації в комірку відбувається методом інжекції «гарячих» електронів, що вимагає високої напруги, всі лінії слів, біт і витоків потрібно розміщувати на достатньо великій відстані одна від одної для забезпечення необхідної ізоляції. Це унемо-

Національний університет водного господарства та природокористування

жливлює зменшення площі мікросхем шляхом мінімізації розмірів транзисторів.

Іншим недоліком такої комірки є ефект видалення надлишкового заряду з плаваючого затвору, який не може компенсуватись процесом запису. На плаваючому затворі утворюється позитивний заряд і транзистор завжди залишається у відкритому стані.

Архітектура NOR найчастіше застосовується в мобільних телефонах, фото- і відеокамерах та для збереження програмного коду (BIOS, RAM кишенькових комп'ютерів тощо).

б). Архітектура NAND

Дану архітектуру флеш-пам'яті розробила фірма Toshiba в 1989 році. Схема базується на реалізації логічного елемента, який отримав назву NAND (Not AND – в булевій математиці означає логічну функцію Шеффера, представлену в таблиці істинності «І–НЕ» (таблиця 5)). Схемно вона побудована на польових транзисторах, показаних на рис. 1.29. Фактично це поєднання схем рис. 1.31. Архітектура NAND у флеш-пам'яті застосовується найчастіше у матриці, елемент якої показано на рис. 1.71. Тут, як і в архітектурі NOR, вхідні сигнали ідуть по лініях слів на управляючі затвори, а вихідні сигнали знімаються по лініях біт. При проходженні одночасно сигналів на два сусідні транзистори з плаваючими затворами («1») і на два транзистори з селективних ліній вони відкриваються, їх опори стають близькими до нуля і на лінії біт потенціал стає рівний нулю («0»). Будь які інші варіанти з відкриттям лише одного транзистора будуть давати на виході «1». Селективні лінії необхідні для керування записом і зчитуванням необхідних комірок.

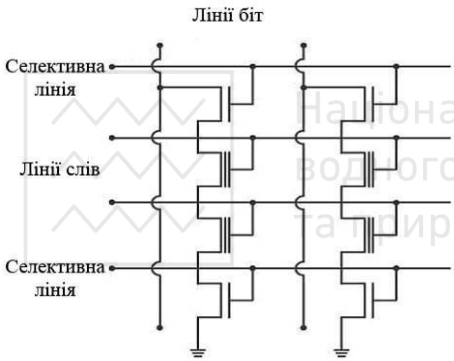


Рис. 1.71. Комірка NAND – пам'яті

З рис. 1.71 видно, що в схемі реалізована двотранзисторна комірка пам'яті, яка складається із звичайного МДН транзистора і транзистора з плаваючим затвором (див. рис. 1.72). Така схема дозволяє

Національний університет водного господарства та природокористування

ефективно масштабувати комірку пам'яті (зменшувати розміри), оскільки транзистор з плаваючим затвором ізолюється від бітової лінії. Крім того, в даній флеш-архітектурі в якості і методу запису і методу зчитування використовується метод тунелювання Фаулера - Нордхейма, що дозволяє суттєво зменшити напругу, необхідну для операції запису.

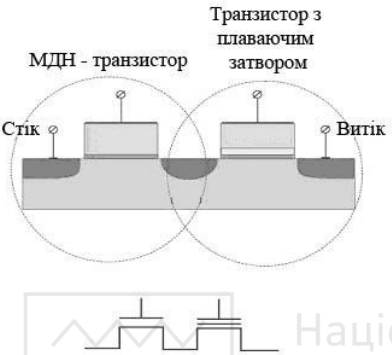


Рис. 1.72. Двотранзисторна комірка пам'яті

Якщо порівнювати архітектури NOR і NAND, то можна відзначити більшу швидкість читання у першої і запису (причому, набагато) у другої архітектури.

Архітектура NAND найчастіше застосовується в картах пам'яті.

Існують альтернативні архітектури NOR і NAND. Серед них можна виділити DiNOR, розробки Міцубісі, і superAND – Хітачі. Схематично вони комбінують кращі якості NOR і NAND.

1.11.3. Карти пам'яті

В даний час на ринку присутні карти флеш-пам'яті різних форматів, найновіші з яких – це Secure Digital (SD), Memory Stick (MS), MultiMediaCard (MMC), CompactFlash (CF), xD-Picture Card (XD) та інші. Вони є високоякісними універсальними перезаписуючими носіями інформації, орієнтованими на побутову електроніку і комп'ютерне обладнання нового покоління. Перша серійна карта пам'яті (CF) була випущена в 1994 році. На схемному рівні карти пам'яті побудовані на транзисторах з плаваючим затвором в архітектурах NOR і NAND.

Національний університет водного господарства та природокористування

Бібліографічний список до розділу 1

1. Беркс А., Голдстейн Г., Нейман Дж. Предварительное рассмотрение логической конструкции электронного вычислительного устройства // Кибернетический сборник, вып. 9. М.: Мир, 1964. – с.7-67.
2. Лебедь О.О. Фізичні основи інформаційних систем [Текст]/ О.О. Лебедь, В.Ф. Орленко, О.Д. Кочергіна. – Рівне: НУВГП, 2013. – 182 с.
3. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3 т. [Текст] / И. В. Савельев. – М.: Наука, 1982. – Т. 2. – 496 с.
4. Викулин И. М. Физика полупроводниковых приборов [Текст]/ И. М. Викулин, В. И. Стафеев. – М. : Советское радио, 1980.
5. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем [Текст] / И. П. Степаненко. – М. : Энергия, 1977.
6. Капцов Л.Н. Физика элементов ЭВМ [Текст] / Л. Н. Капцов. – М. : Из-во МГУ, 1983. – 240 с.
7. Мюллер С. Модернизация и ремонт ПК, 17-е издание [Текст] / С. Мюллер. – М. : ООО «И. Д. Вильямс», 2008. – 1360 с.
8. Угрюмов Е.П. Цифровая схемотехника [Текст] / Е. П. Угрюмов. – Петербург, 2004. – 528 с. : ил.
9. http://mnc.ru/?path=./cpu/&file=p18.src
10. http://www.kolasc.net.ru/cdo/programmes/os/index.html
11. http://edu.dvgups.ru/METDOC/ITS

Національний університет водного господарства та природокористування

Національний університет
водного господарства
та природокористування

РОЗДІЛ 2
МАГНІТНІ МЕТОДИ, ЗАСТОСОВАНІ В ОБЧИСЛЮВАЛЬНІЙ ТЕХНІЦІ

У другому розділі розглянуто електромагнітні методи запису, зберігання та зчитування інформації, які використовуються в комп'ютерній техніці. Передбачається, що читач знайомий з основами електромагнетизму в рамках курсу загальної фізики для студентів технічних спеціальностей вищих навчальних закладів.

Відомо, що в 1949 році група інженерів компанії IBM розпочала розробку нового пристрою зберігання даних – магнітного носія. В його основу було покладено явище намагнічування шару феромагнітного матеріалу (робочого шару), нанесеного на немагнітну основу. Дане явище використовувалось в ЕОМ першого покоління, широко воно застосовується й донині. Пояснюється це наступними *перевагами* магнітного запису у порівнянні з іншими:

1. малою вартістю зберігання 1 біта інформації;
2. простотою процесу запису і зчитування;
3. великою щільністю зберігання інформації.

Для пояснення переваг використання магнітного методу в обчислювальній техніці зробимо короткий екскурс у фізику електромагнетизму.

2.1. Магнетики

Речовини, які здатні змінювати індукцію магнітного поля називаються *магнетиками*. При внесенні магнетика в магнітне поле у ньому виникає власне магнітне поле, яке змінює сумарне. Процес намагнічування магнетика полягає у впорядкуванні просторової орієнтації його атомів і молекул. У найпростішій моделі намагнічування рух електронів в атомі еквівалентний коловим струмам і тому кожен атом може розглядатись, як контур із результуючим електричним струмом.

Відомо, що така рамка характеризується магнітним моментом

$$\vec{p} = i \cdot S \cdot \vec{n}\ , \qquad (2.1)$$

Національний університет
водного господарства
та природокористування

де i – сила струму, S – площа рамки, $\vec{n}$ – вектор нормалі до площі контуру [1].

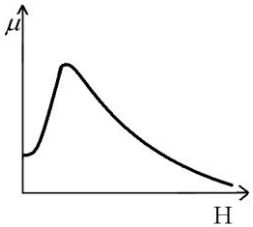


Рис. 2.1. Залежність магнітної проникності феромагнетика μ від напруженості зовнішнього магнітного поля H

В однорідному магнітному полі з індукцією $\vec{B}$ на контур зі струмом діє момент сили

$$\vec{M} = \left[\vec{p} \times \vec{B}\right], \tag{2.2}$$

який намагається повернути контур так, щоб напрями векторів $\vec{p}$ і $\vec{B}$ співпадали. Для більшості матеріалів при відсутності зовнішнього магнітного поля, магнітні моменти $\vec{p}$ атомів напрямлені хаотично, тому сумарний магнітний момент дорівнює нулю. В зовнішньому магнітному полі в результаті дії моментів сил відбувається орієнтація магнітних моментів окремих атомів за напрямом цього поля. В результаті сумарний магнітний момент магнетика стає відмінним від нуля – магнетик намагнічується. Однак, орієнтації магнітних моментів атомів заважає хаотичний тепловий рух останніх. Тому в слабких магнітних полях ступінь орієнтації магнітних моментів $\vec{p}$ невелика, але вона зростає при збільшенні зовнішнього поля.

Кількісною характеристикою намагнічення магнетика є вектор намагнічення

$$\vec{J} = \frac{1}{V}\sum_i \vec{p}_i\,, \tag{2.3}$$

який дорівнює сумі магнітних моментів $\vec{p}$ одиниці об’єму магнетика.

За характером залежності вектора $\vec{J}$ від напруженості $\vec{H}$ зовнішнього намагнічуючого поля магнетики поділяються на три класи: діамагнетики, парамагнетики та феромагнетики.

Діамагнетики (мідь, свинець, срібло, вода тощо) намагнічуються таким чином, що вектори $\vec{J}$ і $\vec{H}$ стають антипаралельними. Парамагнетики (платина, алюміній, кисень, тощо) намагнічуються так, що вектори $\vec{J}$ і $\vec{H}$ співпадають. Для діамагнетиків і парамагнети-

Національний університет
водного господарства

ків в широкому діапазоні практично застосовуваних $\vec{H}$ зберігається прямопропорційна залежність:

$$\vec{J} = \chi \vec{H}\ , \qquad (2.4)$$

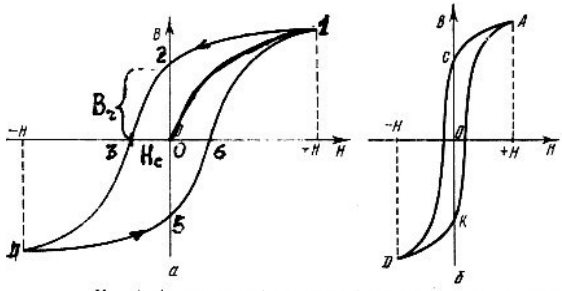
де χ – магнітна сприйнятливість (χ <0 для діамагнетиків і χ >0 для парамагнетиків). На практиці частіше користуються величиною магнітної проникності

$$\mu = 1 + \chi\ . \qquad (2.5)$$

Нарешті, третій клас магнетиків (феромагнетики) відрізняється складною нелінійною і неоднозначною залежністю вектора $\vec{J}$ від $\vec{H}$. Ці вектори в загальному випадку не колінеарні. Крім того магнітні властивості феромагнетиків часто залежать від взаємної орієнтації зовнішнього намагнічуючого поля і магнітного поля зразка – феромагнетики анізотропні. Прикладами феромагнетиків є залізо, кобальт, нікель, магнетит, ферит, тощо.

До основних властивостей феромагнетиків, що відрізняють їх від діа- і парамагнетиків можна віднести наступні:

1. Величина коефіцієнта χ, а значить і μ, значно перевищує одиницю, досягаючи значень ~ 10^6. Крім того, ці коефіцієнти є тензорними величинами, напрями $\vec{J}$ і $\vec{H}$ в загальному випадку не співпадають.



Криві гістерезису різних матеріалів: *а*) жорстка сталь; *б*) м'яка сталь.

Рис. 2.2. Залежність індукції магнітного поля зразка *B* від напруженості зовнішнього магнітного поля *H*

2. На відміну від парамагнетиків, феромагнетики намагнічуються до насичення вже в слабких полях.

3. Магнітна проникність феромагнетика залежить від напруженості намагнічуючого поля (рис. 2.1).

4. Залежність індукції магнітного поля зразка *B* від напруженості зовнішнього магнітного поля *H* (рис. 2.2) має гістерезисний характер.

Національний університет водного господарства та природокористування

При внесенні розмагніченого феромагнетика в зовнішнє поле залежність *B(H)* описується спочатку кривою 0-1. При зменшенні *H* до нуля *B(H)* змінюється по кривій 1-2; тобто має місце відставання зміни індукції від зміни напруженості. Дане явище називається магнітним гістерезисом. Магнітна індукція, що зберігається у феромагнетику після зникнення зовнішнього поля (при $H = 0$), називається залишковою магнітною індукцією B_r (постійні магніти). Щоб розмагнітити феромагнетик, потрібно прикласти зовнішнє поле протилежного напряму з напруженістю H_c, яка називається коерцитивною силою. При подальшому збільшенні напруженості відбувається намагнічування протилежного напрямку по кривій 3-4. Ділянка 4-5-6 знову відповідає розмагнічуванню. Надалі процес перемагнічування відбувається вздовж замкненої кривої 6-1-2-3-4-5-6 (рис. 2.2), яка називається петлею гістерезису. В залежності від величини H_c усі феромагнітні матеріали поділяють на жорсткі (рис. 2.2,а) і м'які (рис. 2.2,б).

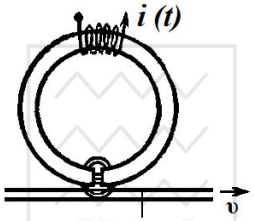


Рис. 2.3. Найпростіша головка запису

Властивості феромагнетиків пояснюються наявністю областей, які при відсутності зовнішнього поля спонтанно намагнічені до насичення. Ці області називаються *доменами.* Розміри доменів ~ $(10^{-4} \div 10^{-6})$ *м*. Розташування і намагніченість доменів такі, що у відсутності зовнішнього поля сумарна намагніченість дорівнює нулю. В зовнішньому полі вектори намагніченості доменів частково орієнтуються в напрямі поля, феромагнетик намагнічується. Напрямок векторів намагнічення доменів збігається з напрямком так званих *осей легкого намагнічення*.

Для феромагнетиків є цікавим явище суперпарамагнетизму. **Суперпарамагнетизм** – це явище квазіпарамагнітної поведінки систем, що складаються з сукупності дуже малих феромагнітних частинок. Для таких малих частинок цих систем властивий однодоменних стан з однорідною спонтанною намагніченістю по всьому об'єму частинки. При подальшому зменшенні розмірів частинок, але при збереженні намагніченості (тобто при температурі нижче точки Кюрі) зростає ймовірність теплових флуктуацій орієнтації вектора намагніченості $\vec{J}$ частинки. Вектор $\vec{J}$ орієнтується вздовж

Національний університет водного господарства та природокористування

осі найлегшого намагнічення, що визначається сумарною магнітною анізотропією частинки, тому для повороту вектора $\vec{J}$ з цього напрямку необхідно подолати енергетичних бар'єр ~ *KV*, де *K* – константа сумарної анізотропії, *V* – об'єм частинки. Вектор $\vec{J}$ може змінити орієнтацію, коли енергія *kT* теплових флуктуацій визначається співвідношенням: $kT \geq KV$. Для типових феромагнетиків *K* ~ 1-10^{-4}*Дж/см*^{3}. Отже, при температурі *T* ~ 100*K*, коли *kT* ~ 10^{-14}*Дж*, вплив теплових флуктуації стає помітним для частинок, об'єм яких <10^{-21}-10^{-17}*см*^{3} (лінійні розміри частинок <1-10*нм*). При цих умовах вектор намагнічення частинок поводиться стосовно впливу зовнішніх магнітних полів і температури подібно парамагнітному газу, з тією різницею, що в газі в результаті теплових флуктуацій змінюються положення і просторова орієнтація самих атомів (молекул) разом зі своїми магнітними моментами, тоді як в однодоменних магнітних частинках твердого тіла атоми залишаються нерухомими, відбувається лише зміна орієнтації векторів намагнічення частинок $\vec{J}$ під впливом теплових флуктуацій. Незважаючи на дане розходження, ефект виявляється в обох випадках однаковим.

Національний університет водного господарства та природокористування

2.2. Фізичні основи принципу запису на магнітний носій та зчитування з нього

В основі магнітного запису лежить явище зберігання залишкової намагніченості феромагнітного робочого шару. Магнітний запис перетворює інформацію, закладену в якусь часову функцію $F_1(t)$, в інформацію зафіксовану на магнітному носієві у вигляді функції, залежної від координат, в найпростішому випадку від однієї координати $F_2(x)$. Зазвичай функція $F_1(t)$ задається у вигляді змінного в часі струму $i(t)$. Цей струм протікає через обмотку головки магнітного запису. Найпростіша головка запису представлена на рис. 2.3. Осердя такої головки повинне бути виготовлене з феромагнетика з вузькою петлею гіс-

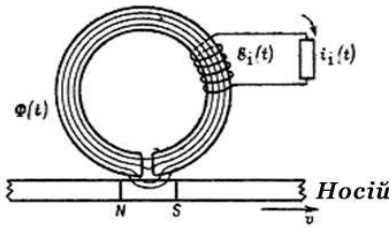


Рис. 2.4. Головка читання

Національний університет водного господарства та природокористування

терезису (м'якого заліза), на осердя одягнена котушка. В обчислювальних машинах струм не є неперервний, а подається в котушку у вигляді коротких імпульсів. У котушці виникає магнітний потік $\Phi(t)$, який поширюється вздовж осердя і попадає в його щілину – зазор між торцями осердя. Цієї частини осердя торкається рухомий робочий феромагнітний шар носія, що рухається з деякою швидкістю υ відносно головки. Струм $i(t)$, що протікає в обмотці, створює змінне магнітне поле з індукцією $B(t)$, яка, при умові вузькості петлі гістерезису матеріалу осердя, достатньо точно повторює закон зміни струму $i(t)$. Магнітне поле, розсіюючись у зазорі осердя, проникає всередину феромагнітного робочого шару, намагнічуючи його. Величина і напрямок вектора залишкової намагніченості J залежать від координати x і представляє функцію $F_2(x)$, що несе записану інформацію. Оскільки $x=\upsilon \cdot t$, то **умовою неспотвореної інформації** є

$$F_1(t) = \alpha \cdot i(t) = \beta \cdot J(\upsilon \cdot t) = \gamma \cdot F_2(\upsilon \cdot t), \qquad (2.6)$$

де α, β, γ – постійні коефіцієнти [3].

Очевидно, що внаслідок складного гістерезисного характеру кривої намагнічення робочого шару, умова (2.6) може бути виконана лише наближено.

Для відтворення інформації магнітного запису служить головка читання, яка, якщо не вдаватися в деталі, аналогічна головці запису (див. рис.2.4).

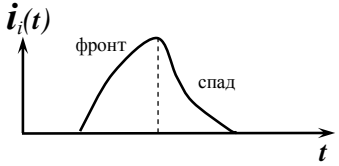


Рис. 2.5. Графік залежності $i_i(t)$ для фронту і спаду сигналу

При проходженні феромагнітного робочого шару носія, намагніченого за законом $F_2(\upsilon \cdot t)$, біля зазору головки читання зі швидкістю υ потік магнітної індукції Φ, що пронизує обмотку котушки, змінюється в першому наближенні за законом $F_2(x) = k \cdot \Phi(\upsilon \cdot t)$, де k – постійний коефіцієнт пропорційності. Згідно з законом Фарадея в котушці головки виникає електрорушійна сила (е. р. с.) індукції:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}, \qquad (2.7)$$

причому кожному відтвореному імпульсу відповідає два імпульси $\varepsilon_i(t)$ різної полярності. Індукційний струм котушки $i_i(t)$, що відповідає прямокутним імпульсам $\varepsilon_i(t)$, визначається формулами:

1. За переднім фронтом імпульсу:

Національний університет
водного господарства
та природокористування

$$i_i = \frac{\varepsilon_{im}}{R}\left(1 - \exp\left(-\frac{R}{L}t\right)\right). \qquad (2.8)$$

2. За заднім фронтом (спадом) імпульсу:

$$i_i = C\exp\left(-\frac{R}{L}t\right). \qquad (2.9)$$

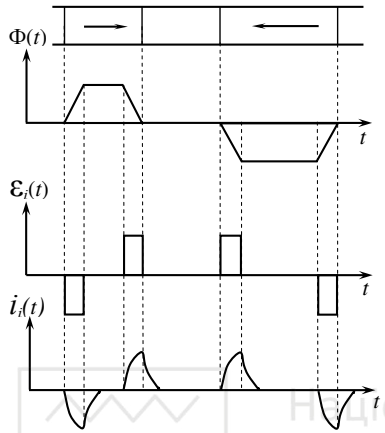


Рис. 2.6. Залежність Ф *(t)*, $\varepsilon_i(t)$, $i_i(t)$

Тут ε_{im} – амплітудне значення $\varepsilon_i(t)$, R – опір котушки, L – її індуктивність, C – стала.

Залежність $i_i(t)$ для фронту і спаду сигналу показана на рис. 2.5.

Залежність магнітного потоку Ф*(t)* в осерді головки зчитування при проходженні магнітної стрічки з намагніченими ділянками, а також залежність е.р.с. $\varepsilon_i(t)$ і струму індукції $i_i(t)$ в котушці показано на рис. 2.6.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

2.3. Зовнішні запам'ятовуючі пристрої (ЗЗП), засновані на магнітному принципі запису, читання та зберігання даних

За геометрією носія такі ЗЗП бувають наступними:
1. Пам'ять на магнітній дротині.
2. Пам'ять на магнітній стрічці.
3. Феритова пам'ять.
4. Пам'ять на магнітних дисках.

2.3.1. Пам'ять на магнітній дротині

Пам'ять на магнітній дротині (англ.: plated wire memory) [2, 3] використовувалась в магнітофонах до запровадження в якості носія магнітної стрічки. Вперше як носій інформації магнітна дротина була застосована у 1898 році в телеграфоні Паульсена (див. рис. 2.7). На циліндр, який міг обертатись з постійною швидкістю, щільно намотувався металевий дріт діаметром 0,5*мм*. Вздовж цилі-

Національний університет
водного господарства
та природокористування

ндра по направляючій рухалась електромагнітна головка зі швидкістю 2,1*м/с*, яка могла намагнічувати певні ділянки дроту. Для відтворення запису процеси відбувались у зворотному напрямку. Слід зазначити, що при використанні дроту в якості носія виникала проблема з'єднання окремих його відрізків.

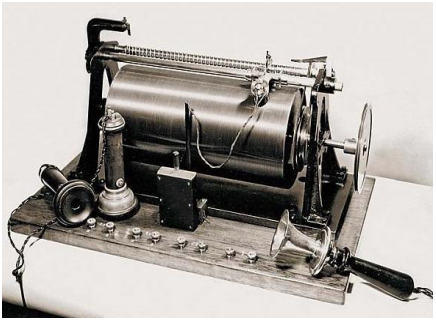


Рис. 2.7. Телеграфон Паульсена

Останнім часом пам'ять на магнітній дротині використовується в авіаційних «чорних скриньках», оскільки цей носій має високу стійкість до зовнішнього впливу екстремальних температур, тисків, дії агресивних середовищ тощо.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

2.3.2. Пам'ять на магнітній стрічці

Пам'ять на магнітній стрічці (англ.: magnetic tape memory, стрімер) відноситься до економного засобу зберігання інформації. Вона застосовується для зберігання великого обсягу відповідальних даних, які використовуються досить рідко або не вимагають малого часу доступу [1].

Вперше приводи на магнітній стрічці були випущені корпорацією IBM у 1952 році. В цих пристроях з цифровим зберіганням інформації використовувалась перша комерційна комп'ютерна стрічка, розроблена компанією 3M. Мета 3M полягала в розробці магнітної стрічки із щільністю запису близько 100*біт/дюйм*^{2} (bpi) і загальної ємності до 2*МБ*.

У 1957 році в якості основи магнітної стрічки почала використовуватись попередньо витягнута тонка поліефірна плівка. Перші магнітні стрічки містили від 7 до 9 доріжок (треків), а їх щільність досягала 488 доріжок на дюйм (lpi). Робочий шар стрічки покривався тонким шаром пластику для захисту стрічки від деформації головкою, а також – від впливу вологості. Крім того, вперше бобіни магнітної стрічки було вкладено в *картриджі*. Така конструкція зменшувала чутливість стрічки до умов навколишнього середовища і

Національний університет водного господарства та природокористування

механічних впливів. Вона стала більш придатною для використання в автоматичному режимі, полегшуючи пошук та управління інформацією.

Параметри сучасних магнітних стрічок наступні:

1. Ширина стрічки – від 3,81*мм* до 12,5*мм*.
2. Ширина треку на магнітній стрічці – 1,5*мкм*.
3. Щільність доріжок (lpi) – 488 доріжок на дюйм.
4. Лінійна щільність бітів інформації в найновіших зразках стрічок становить 150000*біт/дюйм*.
5. Матеріал основи: ацетилцелюлоза, полівінілхлорид, поліефірна смола. Товщина основи – 20-45*мкм*.
6. Загальна кількість інформації на одній стрічці – до 8*ТБ*.

Матеріалом феромагнітного робочого шару служить сухий лак, в якому знаходиться феромагнітний матеріал (Fe_2O_3, сплав Co - Ni, CrO_2, металізоване покриття). Феромагнітний матеріал з лаком має назву – феролак. Товщина феролаку – 5-20*мкм*. Частинки феромагнетику можуть мати кубічну або голкову форму при довжині голок – 0,1-1*мкм*. Голки розміщуються вздовж стрічки. Феромагнетик робочого шару складає близько 30% від об'єму лаку.

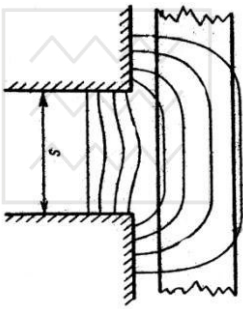


Рис. 2.8. Силові лінії магнітного поля біля зазору записуючої головки

Використовується також магнітні стрічки з подвійним барій-феритовим робочим шаром, що дозволяє в декілька разів підвищити щільність інформації на стрічці.

В якості головок читання використовуються GMR-головки.

В цілому запис і читання інформації на магнітну стрічку відбувається за фізичними принципами приведеними в параграфі 2.2, але існує низка обмежень до матеріалу робочого шару стрічки, її швидкості відносно головки читання, величини зазору головки та ін.

Результати розрахунку магнітного поля біля зазору записуючої головки приведені на рис. 2.8, де зображені силові лінії магнітного поля. При імпульсній зміні струму *i(t)* в обмотці головки запису на стрічці утворюються ділянки, напрямок вектора намагнічення яких або співпадає з напрямком руху стрічки для імпульсів струму однієї полярності, або протилежний напрямку руху стрічки для імпульсів

Національний університет водного господарства та природокористування

струму протилежної полярності. Орієнтовно можна вважати, що довжина ділянки l намагніченості доріжки стрічки становить

$$l \approx \upsilon \tau + s\,, \qquad (2.10)$$

де τ – час імпульсу струму в головці, s – величина зазору, υ – швидкість руху стрічки.

Для того, щоб вектор намагнічення ділянки треку стрічки мав однорідне значення, необхідно щоб на ньому була присутня достатньо велика кількість голок феромагнетику. Тому необхідне виконання умови: $l >> l_г$, (2.11)

де $l_г$ – середня довжина однієї голки.

Для розділення намагнічених ділянок, що відповідають двом послідовним імпульсам в котушці головки необхідно, щоб за час паузи між імпульсами струму τ_n намагнічена ділянка встигла вийти із магнітного поля в зазорі осердя. Для цього повинна виконуватись умова:

$$\frac{s}{\upsilon} < \tau_n\,. \qquad (2.12)$$

Національний університет водного господарства та природокористування

Співвідношення (2.10) і (2.12) показують, що допустима щільність запису інформації на доріжці при заданій швидкості її руху збільшується при зменшенні ширини зазору осердя записуючої головки. Однак, довільно зменшувати ширину зазору s неможливо, оскільки при цьому буде зменшуватись розсіювання магнітного поля і глибина його проникнення в робочий шар стрічки. В результаті цього буде зменшуватись і величина вектора намагнічення. Крім того, створення вузьких і в той же час достатньо однорідних по товщині зазорів є технічно важкою задачею.

Наведені фактори, а також умова (2.11) обмежують граничну щільність магнітного запису на стрічку та інші магнітні носії.

Технології запису даних на магнітну стрічку

Технології, що використовуються при створенні стрічкових накопичувачів, залежать від декількох обставин. Вони повинні оптимізувати ширину стрічки і метод розміщення запису на ній, забезпечити максимальну швидкість руху і мінімальне число перегинів при перемотуванні, знайти спосіб зниження тертя між стрічкою і головками запису/читання, тощо. Інший комплекс проблем пов’язаний з вибором способу запису на плівку та визначенням методу зчитування інформації, в тому числі і компресії даних. Але

Національний університет
водного господарства
та природокористування

найголовніше – знайти оптимальне поєднання, що забезпечує найшвидший доступ до даних, високу їх пропускну здатність та надійність зберігання. У пошуках оптимального рішення фірми-виробники розробляють власні системи. Проте, незважаючи на конструктивні відмінності, в усіх стрічкових пристроях використовується лише два базових методи запису:

1. **Лінійний магнітний запис** (DLT/SDLT, SLR, LTO).
2. **Похило-рядковий магнітний запис** (DAT/DDS, AIT, S-AIT, VXA).

Лінійна технологія (серпантинний запис) (див. рис. 2.9.*I*) передбачає рух магнітної стрічки вздовж нерухомих записуючої і читаючої головок. Операції запису/читання виконуються як при прямому, так і при зворотному русі стрічки. Таким чином, інформація записується по доріжках, розташованих вздовж магнітної стрічки. При записі/читанні стрічка рухається в обох напрямках вздовж нерухомої

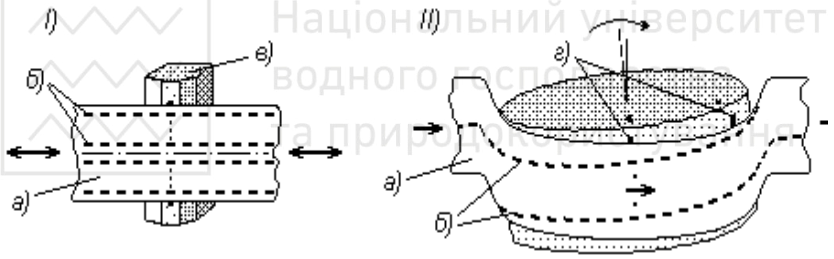


Рис. 2.9. Лінійний (*I*) і похило-рядковий (*II*) магнітний запис: *а)* магнітна стрічка, *б)* доріжки, *в)* фіксована магнітна головка, *г)* магнітні головки, що обертаються

головки; по досягненні кінця стрічки головка зсувається на одну доріжку, а стрічка рухається в протилежному напрямку. Для збільшення швидкості запису/читання встановлюється декілька головок, які працюють з декількома доріжками одночасно.

***Переваги*:**

1. Можливість створення простого і надійного механізму протягування стрічки.
2. Незначне зношування магнітної стрічки.
3. Висока надійність зберігання даних.

***Недоліки*:**

1. Відносно низька щільність запису інформації.

Національний університет водного господарства та природокористування

2. Залежність швидкості запису/читання від швидкості руху магнітної стрічки.

У системах з *похило-рядковим записом (спіральний запис)* кілька записуючих/читаючих головок розміщують на барабані, що обертається (див. рис. 2.9.*II*). Цей барабан встановлюється під деяким кутом до вертикальної осі. Доріжки запису розміщуються під кутом до напрямку швидкості магнітної стрічки, тобто вони мають невелику скінчену довжину. При обертанні барабану, головка описує спіраль відносно рухомої стрічки весь час попадаючи на нову доріжку. Оскільки абсолютна швидкість руху стрічки невелика, процеси старту і зупинки запису/читання займають менше часу і створюють менші механічні навантаження на стрічку.

***Переваги*:**

1. Можливе використання більш тонких стрічок.
2. Щільність розташування доріжок (lpi) в декілька разів вища ніж при лінійній технології.

***Недоліки*:**

1. Складна (ненадійна) конструкція протягування стрічки.
2. Сильне зношування магнітної стрічки при експлуатації.

В розглянутих технологіях реалізуються різні **способи запису даних на магнітну стрічку.**

Розглянемо два найпростіші з них:

1. **Запис з поверненням до нуля**

В цьому способі запису стрічка намагнічується до насичення лише під час проходження послідовності коротких імпульсів. В проміжку між імпульсами стрічка залишається не намагніченою. Такий запис ще називають записом з проміжками.

Для прикладу розглянемо запис і читання з поверненням до нуля коду 10110001 (див. рис. 2.10). На малюнку показані:

1) Заданий код.
2) Тактові синхроімпульси.
3) Форма струму намагнічення $i(t)$ в записуючій головці, що відповідає заданому коду. 4) Орієнтація намагнічених ділянок на стрічці $J(x)$, розділених не намагніченими ділянками. Наступні рядки показують процес відтворення запису. Їм відповідають:
5) Імпульси електрорушійної сили (ЕРС) $\varepsilon_i(t)$ в головці читання.
6) Імпульси на виході дешифратора запису.

Національний університет водного господарства та природокористування

7) Синхроімпульси, які разом з сигналами на виході дешифратора дозволяють відтворити записаний код.

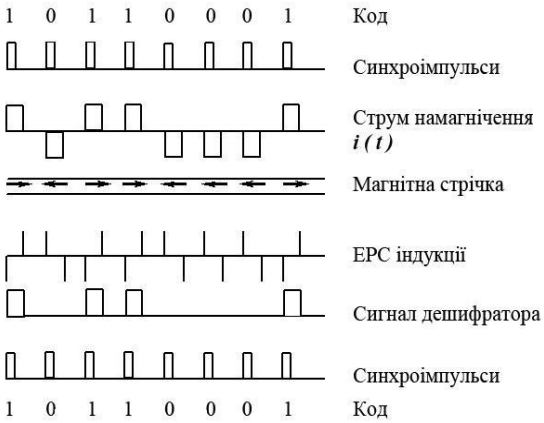


Рис. 2.10. Запис з поверненням до нуля

На головку запису обов'язково попадають синхроімпульси. Це імпульси, які дозволяють дані на стрічці розміщувати рівномірно. При подачі синхроімпульсу на котушку головки запису одночасно з ними подаються струми намагнічення. З рис. 2.10 видно, що при запису з поверненням до нуля сигналу «1» відповідає струм намагнічення позитивної полярності, «0» – негативної. Відповідно до подачі струму намагнічення в магнітній стрічці будуть намагнічуватись відповідні її ділянки. При зчитуванні інформації в котушці головки зчитування виникають по два імпульси електрорушійної сили на одну ділянку намагнічення доріжки.

Національний університет водного господарства та природокористування

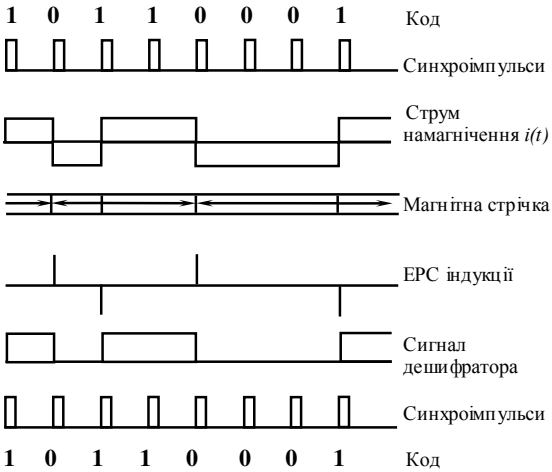


Рис. 2.11. Запис без повернення до нуля

Для розшифрування такого запису потрібен дешифратор, який видає імпульси, при умові, що на початку синхроімпульсу має місце негативний викид струму відтворення і не видає імпульси, якщо на початку синхроімпульсу струм читання позитивний. В якості дешифраторів використовуються тригерні схеми, розглянуті в розділі 1.

Національний університет водного господарства та природокористування

***Недоліки*:** Низька економність. Та обставина, що кожному біту інформації відповідає два імпульси ЕРС (а отже, і струму читання) приводить до швидкого зношування головок. Крім того на магнітній доріжці є ділянки, на які не записується інформація, що знижує загальну щільність запису і об'єм пам'яті.

2. **Запис без повернення до нуля (запис без проміжків)**

Такий вид запису на стрічку показаний на рис. 2.11. При ньому напрямок струму в котушці запису змінюється на протилежний лише при зміні «0» на «1» і навпаки. Струм в обмотці запису не зникає, а лише змінює напрямок на протилежний.

***Недоліки*:**

Великі вимоги до дешифратора. Якщо в записі є велика кількість логічних «1», підряд, то дешифратор повинен працювати неперервно, що накладає обмеження на електричну схему тригера. Можливі помилкові включення тригера, а також пропуски тригером сигналів, що вносить суттєві помилки при відтворенні.

Національний університет водного господарства та природокористування

2.3.3. Пам'ять на магнітних осердях

Пам'ять на магнітних осердях (англ.: magnetic core memory) або **феритова пам'ять** (англ.: ferrite memory) – запам'ятовуючий пристрій, що зберігає інформацію у вигляді намагніченості невеликих феритових осердь [4].

Як пристрій зберігання інформації феритове осердя вперше було застосоване на початку 50-их років XX століття в цифрових обчислювальних машинах першого покоління. Пам'ять на таких осердях була основним типом комп'ютерної пам'яті до середини 1970-их років (див. рис. 2.12).

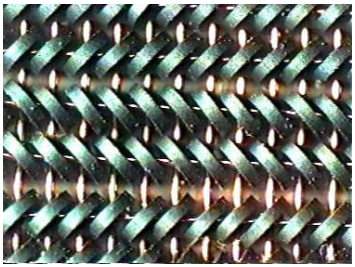


Рис. 2.12. Прямокутна матриця феритових осердь

Феритові осердя виготовлялись найчастіше у формі кілець з магнітожорсткого заліза з майже прямокутною петлею гістерезису і двома стійкими станами залишкової намагніченості. Ферит за хімічною структурою є окислом феромагнітного матеріалу, змішаного з магнітним

Національний університет водного господарства та природокористування

залізняком. Основним елементом пристрою управління і арифметичного пристрою був тригер на електронних лампах.

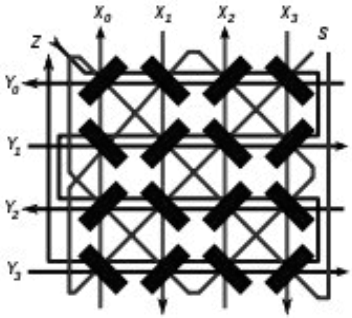


Рис. 2.13. Схема розміщення провідників в матриці феритових кілець

Феритові кільця найчастіше розміщуються у прямокутній матриці, через кожне кільце якої проходить, в залежності від конструкції запам'ятовуючого пристрою, від двох до чотирьох провідників (див. рис. 2.13). Ці провідники відіграють роль котушок, намотаних на кільця для їх перемагнічування. Діаметр таких кілець (менше 1*мм*) роблять якомога меншим для швидкого перемагнічування. Швидке перемагнічування осердь визначає швидкодію запам'ятовуючих пристроїв. Вона для кращих зразків таких пристроїв пам'яті становить 10^6 перемикань за секунду. Стан намагнічення кільця, тобто записаний код, визначається пробним імпульсом струму, який подається на тактову обмотку. Якщо цей імпульс не перемагнічує кільце, то на виході сигнал відсутній (логічний «0»), якщо струм перемагнічує кільце, то це означає, що в ньому була закодована логічна «1» [5].

Схема передачі інформації між кільцями

Схема послідовного з'єднання двох магнітних кілець показана на рис 2.14. Кожне кільце має чотири обмотки. Робота схеми:

1. Імпульс струму, за допомогою якого записується інформація подається на **вхідну обмотку**. При цьому феритове кільце намагнічується певним чином. Воно може зберігати цей стан (логічні «1»

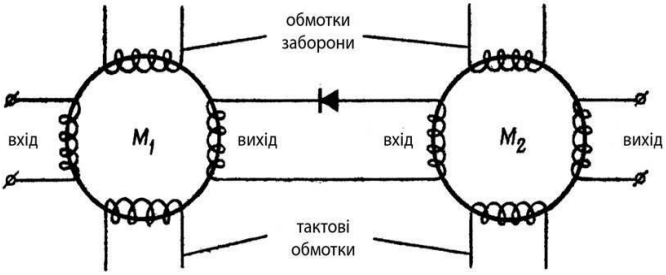


Рис. 2.14. Послідовне з'єднання двох магнітних осердь

Національний університет водного господарства та природокористування

або «0») практично нескінченно довгий час.

2. При подачі сигналу на **обмотки заборони** будь який імпульс із вхідної котушки не може змінити стан феритового кільця.

3. **Тактові обмотки** служать для індикації стану феритового кільця. Якщо при подачі сигналу на них стан феритового кільця не змінюється, це означає, що в ньому закодований «0», а якщо змінюється – то закодована «1». Крім того, тактові обмотки синхронізують роботу всього лічильного пристрою.

Таблиця 20

Вхідний імпульс	Імпульс тактової обмотки	M_1	M_2
0	-	←0	←0
-	1	←0	←0
1	-	→1	←0
-	1	←0	→1
0	-	←0	→1
-	1	←0	←0 *

* – інформація «1» передана в комірку, наступну за кільцем

Національний університет водного господарства та природокористування

4. **Вихідні обмотки** служать для передачі імпульсів струму між кільцями.

Приведемо приклад передачі біту інформації від одного феритового кільця до іншого (див. табл. 20). Нехай вихідний стан 2-х феритових кілець M_1 і M_2 – «0». При подачі на вхід першого кільця імпульсу струму і відсутності сигналу в тактовій обмотці кільце M_1 перемагнітиться і перейде в стан «1». Цей імпульс струму не може пройти на вхід другого кільця і перемагнітити його внаслідок включення діода, який знаходиться у вихідній обмотці, проти струму. Діод не пропускає цей імпульс у вхідну котушку другого кільця і воно залишиться в стані «0». При відсутності імпульсу у вхідній котушці і подачі імпульсу на тактову обмотку він переводить стан першого кільця в «0» і має такий напрямок що проходить через діод і переводить друге кільце в стан «1». Таким чином відбулася передача логічної «1» з кільця 1 в кільце 2. Сказане вище проілюстровано в таблиці, де стрілками, направленими в протилежні сторони умов-

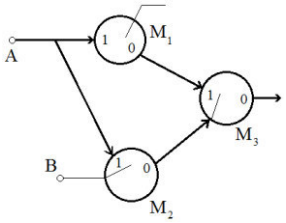


Рис. 2.15. Логічна операція кон'юнкції на трьох феритових кільцях

Національний університет водного господарства та природокористування

но позначено два стани намагнічення кілець, що відповідають «0» і «1».

Таблиця 21

Імпульс на вході	M_1	M_2	M_3
Тільки А	1	1	0
Тільки В	0	0	0
А і В	1	0	1

Приклад логічної схеми на феритових кільцях

На рис. 2.15. показано схему, яка реалізує логічну операцію кон'юнкції («І»). Цю схему можна назвати також схемою співпадань. Імпульс на виході кільця M_3 з'являється тільки при одночасній появі імпульсів на входах *A* і *B*. В цьому випадку кільце M_2 свого стану не змінює, оскільки сигнал *B* подано на обмотку заборони. Тому не з'являється сигнал і на обмотці заборони кільця M_3, і воно перекидається черговим тактовим імпульсом, даючи на виході імпульс, який відповідає логічній «1». Якщо ж сигнал *B* відсутній, то сигнал *A* перекидає кільце M_2, а вихідний сигнал з цього кільця забороняє перекидання кільця M_3. Якщо немає сигналу *A*, то поява сигналу *B* теж може визвати перекидання M_3. Можливі варіанти станів схеми на рис. 2.15 зведені в таблицю 21.

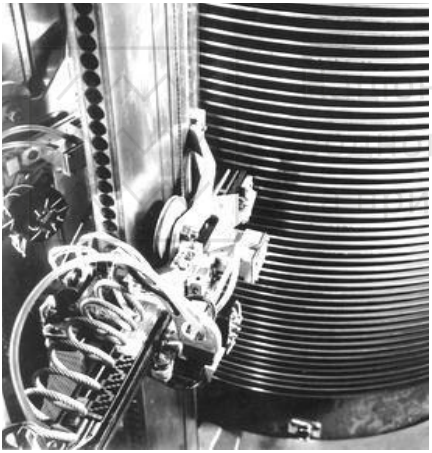


Рис. 2.16. Перший жорсткий диск

2.3.4. Пам'ять на магнітних дисках

Даний вид пам'яті реалізується в накопичувачах на жорстких магнітних дисках (жорсткий диск, вінчестер, хард, HDD, з англ.: Hard (Magnetic) Disk Drive) – енергонезалежний, комп'ютерний, перезаписуючий пристрій [6]. Вперше жорсткий диск було запропоновано в 1956 році корпорацією IBM під назвою IBM 350 Disk File. Він

Національний університет водного господарства та природокористування

складався з 50 дисків діаметром 24 дюйма, які обертались зі швидкістю 1200*об/хв*.

Таблиця 22

Еволюція HDD

	IBM RAMAC	**Maxtor 7040A**	**Hitachi Deskstar 7K1000**
Рік випуску	1956	1991	2007
Об'єм	5*МБ*	40*МБ*	1*ТБ*
Кількість пластин	50	3	5
Діаметр пластини	24*дюйм*	3,5*дюйм*	3,5*дюйм*
Щільність запису	2*кбіт/дюйм*^{2}	10*Мбіт/дюйм*^{2}	150*Гбіт/дюйм*^{2}
Швидкість обертання	1200*об/хв*	3500*об/хв*	7200*об/хв*
Середній час доступу	1*с*	30*мс*	4,17*мс*
Максимальна швидкість інтерфейсу	9*кБ/с*	800*кБ/с*	300*МБ/с*
Питома вартість	$10 000/*МБ*	$6/*МБ*	$0,4/*ГБ*

Єдина магнітна головка по черзі підводилася до кожної зі ста поверхонь за допомогою сервоприводу. Середній час доступу до довільної комірки складав 0,6*с*, щільність – 2 *кбіт/дюйм*^{2}, загальна ємність – 5*МБ* (див. рис. 2.16). В якості технології запису використовувався паралельний запис інформації. Еволюцію HDD показано в таблиці 22.

Сучасний жорсткий диск складається з таких основних частин [6]:

1. Блок електроніки.
2. Механічна система і сервосистема для забезпечення обертання дисків і позиціювання головок.
3. Блок головок читання/запису.
4. Жорсткі диски з магнітним покриттям.
5. Корпус.

Основними характеристиками жорсткого диску є:

Національний університет водного господарства та природокористування

- ***Форматована ємність*** – це об'єм накопичувача, доступний для зберігання призначених для користувача даних після форматування накопичувача. Ємність сучасних жорстких дисків на початок 2014р. складає до 4000 ГБ (4 терабайти).
- ***Час затримки через обертання диску*** – це час, необхідний головці зчитування для повороту від довільного сектора доріжки до необхідного сектора на тій же доріжці. Типовий час затримки через обертання диску становить біля 4*мс*.
- ***Час доступу*** – це час, необхідний для переміщення головки читання з поточної доріжки до початку зчитування даних із заданого сектору. Він є сумою трьох величин: ***часу пошуку*** (часу, необхідного для переміщення з довільної доріжки до заданої доріжки, але без готовності читання), ***часу встановлення головки*** (часу, необхідного для стабілізації вібрацій головки в кінці етапу пошуку) та *часу затримки через обертання диску*. Характерний час доступу у сучасних HDD складає біля 5-10*мс*.
- ***Поверхнева щільність запису*** (див. рис. 2.17). – це добуток лінійної щільності запису вздовж доріжки (біт на дюйм, англ.: Bits Per Inch – BPI), і кількості доріжок на дюйм (англ.: Tracks Per Inch – TPI). В сучасних накопичувачах розміром 3,5 дюйми величина цього параметру складає 10-20*Гбіт/дюйм*^{2}, а в експериментальних моделях досягає 100*Гбіт/дюйм*^{2}.
- ***Швидкість передачі даних*** – кількість записаних/зчитаних бітів у одиницю часу, які обробляються голівкою. Вона є різ-

Національний університет водного господарства та природокористування

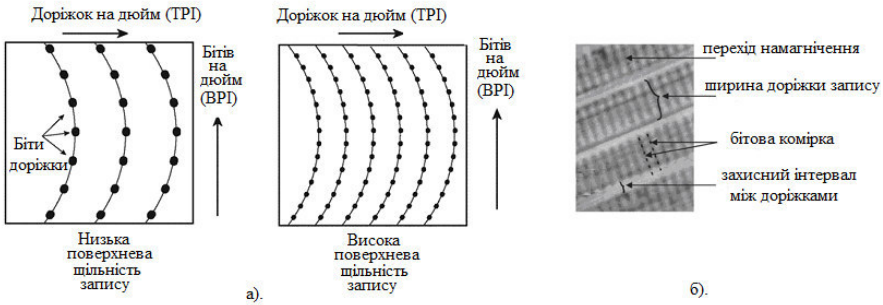


Рис. 2.17. а). Поверхнева щільність запису магнітних дисків; б). Електронне фото доріжок магнітного диску

Національний університет водного господарства та природокористування

ною для внутрішніх і зовнішніх доріжок диску. Типові значення швидкості передачі даних для сучасних накопичувачів становлять від 45-75*МБ/с* (для внутрішніх доріжок) до 60-120*МБ/с* (для зовнішніх доріжок).

- ***Формфактор*** – це фізичний розмір диску. Сучасні жорсткі диски мають стандартні розміри. Найбільш популярні комп'ютерні диски з шириною 3,5 дюйма та 2,5 дюйма (у ноутбуків). Випускаються також диски 1,8 дюйма, 1 дюйм і 0,85 дюйма.

2.3.4.1. Жорсткий диск

Основними елементами сучасного накопичувача є декілька пластин в якості основи, на які нанесено робочий феромагнітний шар і які знаходяться на одній осі (див. рис. 2.18). Дані записуються і зчитуються універсальними головками читання/запису з поверхні дисків, розбитих на *доріжки і сектори* (512 *Байт* даних в кожному). Доріжка – це одне «кільце» даних на одній стороні диску. В багатьох накопичувачах її ємність перевищує 10^5 *Байт*. Відводити такий блок для зберігання одного файла недоцільно, тому доріжки на диску розбивають на нумеровані відрізки, які називають сектори. Кількість секторів може бути різною в залежності від щільності доріжок і типу накопичувача. В середніх накопичувачах доріжка вінчестера має від 380 до 700 секторів.

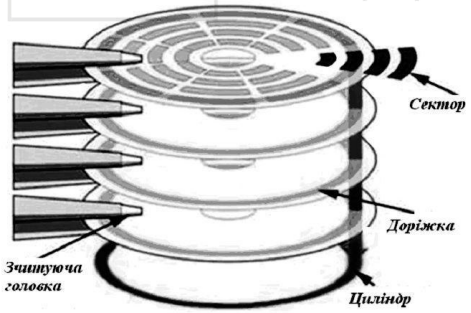


Рис. 2.18. Основні елементи накопичувача жорсткого диска

Принцип запису на магнітний диск практично не відрізняється від принципу запису на магнітну стрічку. В таких накопичувачах зазвичай встановлюється декілька дисків і дані записуються на обидві сторони кожного з них. Однотипні (однаково розміщені) доріжки на всіх сторонах дисків об'єднуються в *циліндр*. Всі головки змонтовані на загальному стержні і можуть рухатись

Національний університет водного господарства та природокористування

тільки синхронно. Основні параметри типового магнітного диску приведені в таблиці 23.

Таблиця 23

Параметри накопичувача IBM Deskstar 75GXP з інтерфейсом ATA

Параметр	Значення	Одиниця вимірювання
Лінійна щільність запису	390000	BPI (бітів на дюйм)
Відстань між бітами на доріжці	2,56	10^{-6} дюйма
Щільність доріжок	28350	TPI (доріжок на дюйм)
Відстань між доріжками	35,27	10^{-6} дюйма
Кількість доріжок	27724	
Частота обертання	7200	*об/хв*
Середня лінійна швидкість руху диску відносно головки	85,68	*км/год*
Довжина повзунка головки	1,225	*мм*
Ширина повзунка головки	0,975	*мм*
Висота повзунка головки	0,8	*мм*
Висота повітряного прошарку	15	*нм*
Середньостатистичний час пошуку	8,5	*мс*

Національний університет водного господарства та природокористування

У HDD в якості основи дисків використовуються диски, виготовлені з алюмінію з добавкою магнію або зі склокераміки. Диски зі склокераміки мають велику механічну міцність і меншу товщину, але вони дуже тендітні (це накладає значні обмеження на удари і вібрацію не тільки в робочому стані, але і в період транспортування). Диски з алюмінієвого сплаву, навпаки, менш тендітні, що дозволяє їм витримувати значно сильніші вібрації і удари, але вони при цьому можуть деформуватися (що в високоточній механіці неприпустимо).

Робочий шар є «бутербродом» з магнітного та захисного шарів. Найпоширенішими є два типи робочого шару:

1. Оксидний.
2. Тонкоплівковий.

Оксидний шар виготовляється з полімерного матеріалу, наповненого окислом заліза. Наносять його наступним чином, спочатку над поверхнею алюмінієвого диску, який швидко обертається розбризкується суспензія порошку оксиду заліза в розчині полімеру. За

Національний університет водного господарства та природокористування

рахунок дії відцентрових сил вона рівномірно розтікається по поверхні диску від його центру до зовнішнього краю. Після полімеризації розчину поверхня шліфується. Потім на неї наноситься ще один шар чистого полімеру, що має достатню міцність і низький коефіцієнт тертя, і диск остаточно полірується.

Даний матеріал в якості робочого шару дисків використовувався з 1955 року, але в процесі експлуатації виявилось, що оксидний шар недостатньо твердий, він кришиться при мікроударах головок по диску (наприклад, при випадкових струсах накопичувача). Тому оксидний робочий шар зараз майже повністю замінений тонкоплівковим робочим шаром.

Тонкоплівковий робочий шар має меншу товщину, він твердіший, і якість його покриття набагато вища. Дана технологія використувалася в основі виробництва накопичувачів нового покоління, в яких вдалося істотно зменшити величину зазору між головками і

Національний університет водного господарства та природокористування

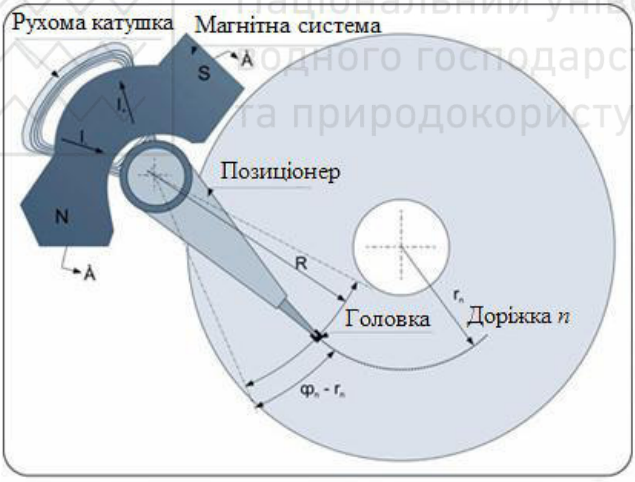


Рис. 2.19. Поводок жорсткого диску з закріпленим на ньому слайдером

поверхнями дисків, що дозволило підвищити щільність запису. Наносять його на основу шляхом електролізу сплаву кобальту товщиною біля 0,025*мкм* або шляхом напилення на основу двох шарів: фосфориту нікелю і магнітного кобальтового сплаву (0,025-0,5*мкм*).

Національний університет водного господарства та природокористування

Зверху робочий шар покривається захисною карбоновою плівкою товщиною 0,025*мкм*.

І при гальванічному осадженні, і при напиленні робочий шар отримується дуже тонким і міцним. Тому вірогідність «виживання» головок і дисків у випадку їх контакту між собою на великій швидкості істотно підвищується. Дійсно, сучасні накопичувачі з дисками, що мають тонкоплівкові робочі шари, практично не виходять з ладу при вібраціях і струсах.

2.3.4.2. Механічна система і сервосистема

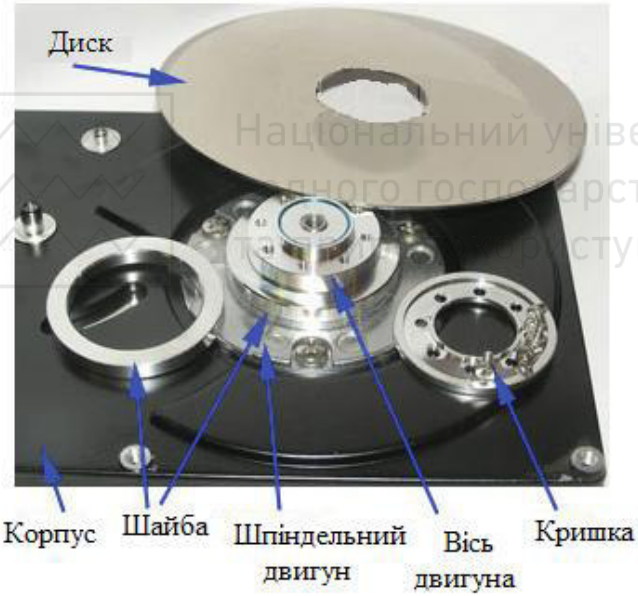


Рис. 2.20. Шпіндельний двигун забезпечує обертання дисків

Вона складається з:

- поворотного двигуна позиціонера, призначеного для переміщення головок над дисками (див. рис. 2.19);
- магнітної системи поворотного двигуна;

Національний університет
водного господарства
та природокористування

- шпіндельного двигуна для забезпечення обертання дисків (див. рис. 2.20).

Механізм, який встановлює головки запису/читання (англ.: read/write head) в необхідне положення над поверхнею дисків називається приводом головок. Розміри головок у сучасних накопичувачів становлять 30-50*нм*, що в декілька тисяч разів менше товщини людської волосини. Розміщення головок відносно дисків в HDD показане на рис. 2.21.

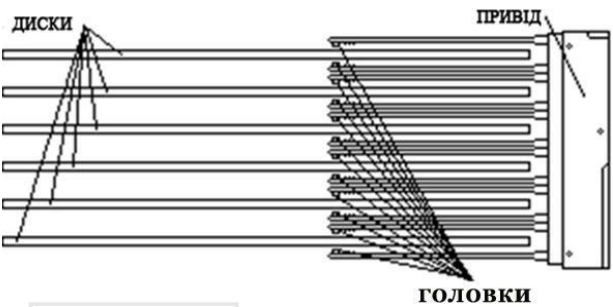


Рис. 2.21. Розміщення головок запису/читання в HDD

Над кожною поверхнею кожного диска знаходиться своя головка. Всі головки змонтовані на одному загальному рухомому приводі і пересуваються одночасно. Для захисту від пошкоджень головки закріплюються на кінці слайдера (див. рис. 2.22). Він має обтічну аеродинамічну форму, що забезпечує можливість «польоту» головок на необхідній висоті над диском, який обертається з великою швидкістю. Фактично, при нормальній роботі жорсткого диска головка ніколи не торкається диску, вона «ширяє» над нею.

Слайдер закріплюється на кінці підпружиненого сталевого поводка, формуючи, так званий, блок поводків і головок (англ.: head-gimbal assembly, HGA). Поводок, в свою чергу, фіксується на жорсткому важелі приводу, що забезпечує переміщення головок над пластинами в радіальному напрямку. Система з декількох позиціонерів (по одному на кожну робочу поверхню пластини) називається блоком магнітних головок (БМГ).

Привід з рухомою котушкою використовується практично у всіх сучасних накопичувачах. У нього немає заздалегідь зафіксованих положень. Замість цього в таких приводах використовується спеціальна система позиціювання, яка точно підводить головки до потрібного циліндру (тому привід з рухомою котушкою може плавно переміщати головки в будь-які положення). Оскільки диски

обертаються зі швидкістю від 60 до 120*об/с*, вони нагріваються і розширюються, тобто фізично змінюють свої розміри. Деякі диски повинні періодично здійснювати рекалібровку механізмів переміщення, щоб компенсувати ці розширення. Тому потужність приводу, що переміщує головки над поверхнею диску, періодично змінюється. При стисненні і розширенні дисків всі зміни їх розмірів відслідковуються сервоприводом, і положення головок (не будучи наперед визначеними) коригуються належним чином. У багатьох сучасних накопичувачах в процесі роботи через певні проміжки часу

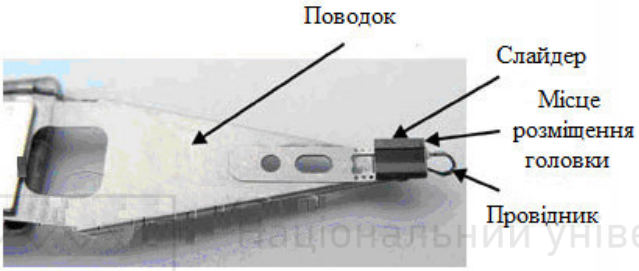


Рис. 2.22. Поводок жорсткого диску з закріпленим на ньому слайдером

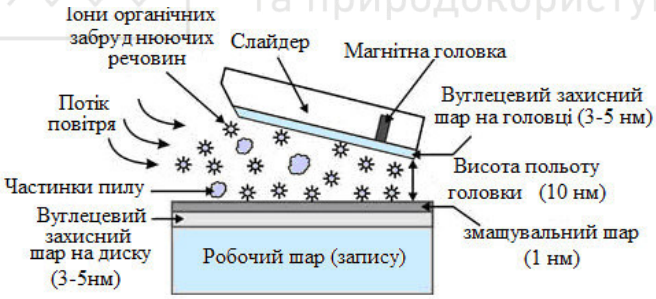


Рис. 2.23. Рух головки запису/читання над магнітним диском

виконується температурна рекалібровка привода з рухливою котушкою. Дана процедура полягає в тому, що всі головки почергово переводяться з нульового на якийсь інший циліндр, при цьому за допомогою процесора жорсткого диску перевіряється, на скільки змістилася дана доріжка щодо свого положення в попередньому сеансі калібрування, і обчислюються необхідні поправки, які зано-

Національний університет водного господарства та природокористування

сяться в кеш процесора жорсткого диску. Згодом дана інформація використовується при кожному переміщенні головок, дозволяючи встановлювати їх з максимальною точністю. У більшості накопичувачів температурне калібрування виконується через кожні 5*хв* протягом першої півгодини після включення живлення, а потім через кожні 25*хв*.

При виключеному комп'ютері головки лежать на зовнішньому краю дисків, у вільній від записування інформації зоні. При вмиканні комп'ютера головки піднімаються над поверхнею дисків в середньому на 0,1*мкм* при швидкості між слайдером і диском ~ 10*м/с* і більше (див. рис. 2.23).

Частота обертання шпіндельного двигуна повинна бути чітко визначеною. Зазвичай вона знаходиться в межах від 3600 до 15000*об/хв*, а для її стабілізації використовується схема керування двигуном зі зворотнім зв'язком (автопідстроювання), яка дозволяє досягнути необхідної точності. В техніці конструкції шпіндельних двигунів передбачають використання кулькових підшипників, але у випадку HDD вони не підходять. Основним їх недоліком є радіальне биття, яке виникає в результаті поперечного зміщення кульок на величину зазору і яке становить приблизно 0,1 мікродюйма. Існування такого биття приводить до виникнення хаотичного поперечного руху жорсткого диску, який приводить до нестійких коливань доріжок по відношенню до головок читання/запису.

Вирішенням цієї проблеми став новий тип підшипника, який отримав назву гідродинамічного, в якому основну роль відіграє високопластичне мастило, що знаходиться між шпінделем і втулкою двигуна. Використання такого мастила зменшує радіальне биття в 10 разів по відношенню використання кулькових підшипників. Це приводить до зниження рівня вібрації, поперечного зміщення жорстких дисків, підвищення їх ударної міцності, покращення регулювання швидкості і зниження рівня генерованого шуму.

Національний університет водного господарства та природокористування

2.3.4.3. Головки запису/читання

Історично відомі 6 видів головок запису/читання [4]:

1. Індукційні, або електромагнітні (ІГ).
2. Феритові (ФГ).
3. З металом в зазорі (MIG, англ.: **M**etal **I**n **G**ap).
4. Тонкоплівкові (TF).
5. Магніторезистивні (MR).
6. Гігантські магніторезистивні (GMR).

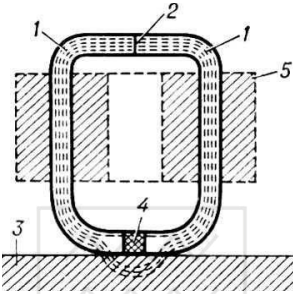


Рис. 2.24. Індукційна головка

Індукційні головки

Індукційні (електромагнітні) головки (ІГ) вперше були застосовані для магнітних стрічок, осердь і перших жорстких дисків [10]. Будова їх показана на рис. 2.24. В своєму складі вони містять:

1. Осердя з м'якого заліза.
2. Додатковий зазор.
3. Носій запису (не входить до складу головки).
4. Робочий зазор.
5. Котушка.

Додатковий зазор (2) носить технологічний характер. При виготовленні головки, її не вдається зробити монолітною, тому вона виготовляється з двох частин, які з'єднуються механічно.

Феритові головки

Феритові головки вперше були застосовані в накопичувачах фірми IBM (див. рис. 2.25). Осердя ФГ виготовлялись із пресованого фериту на основі окислу заліза, тому вага їх була відносно велика. ФГ використовувались як для запису так і для читання інформації. Пізніше як модифікація ФГ виникли склоферитові (композитні) головки. У них феритове осердя знаходилось в керамічному корпусі. За рахунок зменшення ваги цих головок вдалося дещо зменшити робочий зазор (4 на рис. 2.24), а це дозволило збільшити щільність розміщення доріжок. ФГ використовувались в накопичувачах до середини 80-их років.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

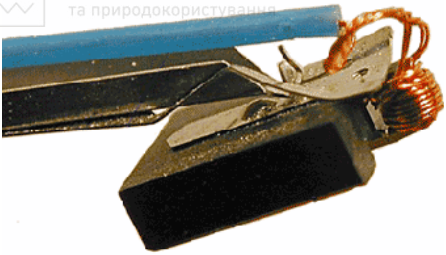


Рис. 2.25. Феритова головка

Недоліки ІГ і ФГ:

1. Не підходять для запису на носіях з великою коерцитивною силою.
2. Частотна характеристика обмежена.
3. Низька чутливість (погане співвідношення «сигнал – шум»).

Велика вага і, як наслідок, великий зазор між носієм і головкою.

Перевага: мала вартість.

Головки MIG

Головки MIG (головки з металом в зазорі) були розроблені на основі композитних головок. У них додатковий зазор (2) (див. рис. 2.24) заповнювався металом, що знижувало схильність матеріалу осердя до насичення і дозволяло підвищити магнітну індукцію в робочому зазорі.

Ці головки дозволяють використовувати матеріали з більшою коерцитивною силою і тонкоплівковим робочим шаром. Вони формують на поверхні диска намагнічені ділянки з більш чіткими межами, що дозволяє використовувати тонший феромагнітний шар. До того ж, це дозволяє зменшити зони зміни знаку при намагнічені, а значить, і підвищити щільність запису. Пізніше з’явились двошарові MIG-головки, в яких метал нанесений в робочий і додатковий зазори. Це дозволило суттєво зменшити відстань між дисками і головками.

Переваги:

1. зменшена відносно ІГ маса;
2. менший відносно ІГ робочий зазор;
3. в MIG використовують головку з заповненим зазором металізованим сплавом, індукція насичення якого в 2 рази більша ніж у феритів.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Тонкоплівкові (TF) головки

Тонкоплівкові (TF) головки (англ.: Thin Film Heads) з'явилися в 1979 році (див. рис. 2.26). Вони виготовлялись фотолітографічним методом, подібно до мікросхем. На основу наносяться тонкі плівки майбутніх фрагментів головки. На одну основу можна нанести декілька тисяч фрагментів осердя із залізо-нікелевого сплаву. Крім того, конструкція нового типу дозволила зменшити відстань (до 0,03*мкм*) між головкою і диском шляхом нарощування шарів алюмінієвого сплаву на робочу поверхню головки. Це дозволило зменшити розмір і масу головок. Головки стали тонші, зменшились робочий і технологічні зазори

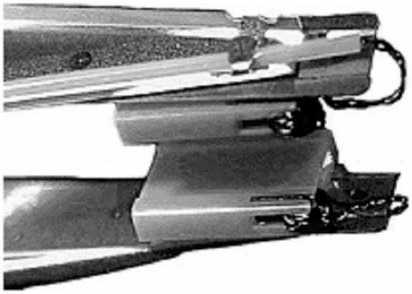


Рис. 2.26. Тонкоплівкові головки

Переваги:

1. Зменшення величини робочого зазору дозволяє підвищити залишкову намагніченість носія і щільність запису (індукція таких головок в робочому зазорі в 2-4 рази більша ніж індукція в ІГ і MIG-головці).
2. Підвищено відношення «сигнал-шум», оскільки збільшується амплітуда сигналу.
3. Зменшено зону зміни знаку на робочій поверхні.
4. Алюмінієвий сплав захищає головку від пошкоджень.
5. Невеликі розміри головки дають змогу розмістити більшу кількість магнітних дисків.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

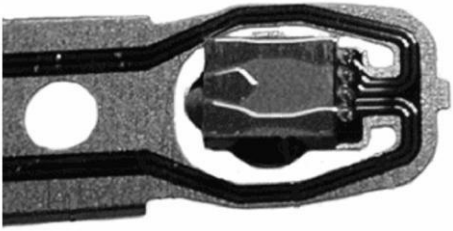


Рис. 2.27. Магніторезистивна головка

Магніторезистивні (MR) головки

Магніторезистивні (MR) головки (англ.: Magneto-Resistive) вперше були застосовані фірмою IBM в 1991 році в накопичувачах ємністю 1*ГБ* (див. рис. 2.27). Принцип роботи

MR-головки базується на магніторезистивному ефекті зміни опору провідників в магнітному полі. При проходженні головки над ділянками робочого шару диску з різною залишковою намагніченістю електричний опір головки буде змінюватись. Цей ефект зміни опору матеріалів в магнітному полі був відкри-

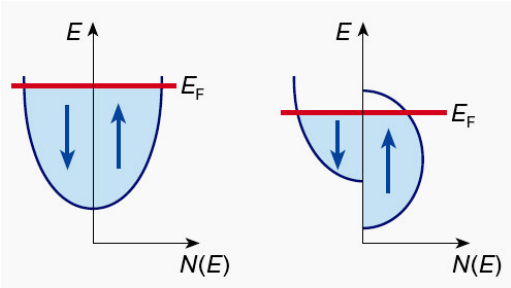


Рис. 2.28. Залежність енергії електронів від орієнтації спіну

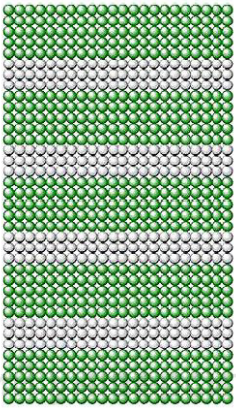


Рис. 2.29. Надрешітка

тий Кельвіном у 1857 році.

Магнітоопір (у відносних одиницях) зручно характеризувати величиною ефекту магнітоопору (або гальваномагнітного ефекту) δH :

$$\delta H = \frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\rho - \rho_H}{\rho}, \qquad (2.13)$$

де ρ – питомий опір матеріалу без магнітного поля, ρ_H – питомий опір цього матеріалу у магнітному полі з індукцією B.

Магнітоопір більшості досліджуваних речовин зазвичай не перевищував декількох відсотків.

Звичайний електричний опір провідника виникає внаслідок того, що електрони при своєму русі наштовхуються на перешкоди в провіднику (дефекти кристалів, домішкові атоми, теплові коливання кристалічної решітки).

В результаті, при накладанні напруги, на швидкий хаотичний рух електронного газу всередині металу накладається повільне зміщення електронів. Цей повільний дрейф і є електричним струмом. У цьому русі приймають участь ті електрони, які володіють енергією, близькою до енергії Фермі. Якщо таких електронів багато, то струм великий, а опір малий і навпаки.

Національний університет водного господарства та природокористування

У явищі магніторезистивного ефекту визначальну роль відіграє орієнтація спіну електронів в зовнішньому магнітному полі. Магнітне поле всередині феромагнетика діє на електрони, збільшуючи або зменшуючи їх енергію в залежності від орієнтації їх спінів. Це приводить до зсуву енергії електронів і до зміни їх кількості біля енергії Фермі в залежності від орієнтації спіну (див. рис. 2.28).

Електричний струм у феромагнетику складається *з двох різних потоків електронів,* із спінами, орієнтованими за напрямом вектора намагнічення і проти. Електричний опір для цих потоків різний. Для електронів зі спінами, орієнтованими проти поля, він менший, ніж для електронів зі спінами, орієнтованими за полем. Особливо слід наголосити, що така картина специфічна лише для феромагнетиків.

Такими властивостями електричного опору феромагнетиків вдалося скористатися в матеріалах, які характеризуються своїми ***надрешітками.*** Надрешітка – це кристал, який складається з декількох шарів магнітних і немагнітних речовин зі схожою кристалічною структурою, що чергуються. Товщина шарів становить 1-2*нм*, що відповідає 2-5 періодам кристалічної решітки (див. рис. 2.29).

Виготовлення шарів надрешітки – технологічно дуже складне завдання. Їх вирощують в глибокому вакуумі, напилюючи на основу шар за шаром потрібні речовини. Обидві речовини, а також сама основа повинні мати схожі кристалічні решітки, інакше шарування буде різноплановим, що негативно вплине на протікання електричного струму. Напилення повинно бути рівномірним, щоб шари різних речовин накладались один на одного не перемішуючись. Також суттєве значення має і контроль магнітних властивостей зростаючих шарів.

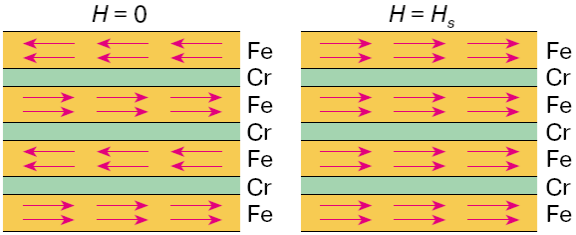


Рис. 2.30. Напрямок вектора намагнічення магнітних шарів надрешітки в магнітному полі і без нього

Якщо правильно підібрати матеріал для немагнітних шарів і його товщину, то магнітні шари будуть мати неспецифічну для феромагнетиків тенденцію чер-

Національний університет водного господарства та природокористування

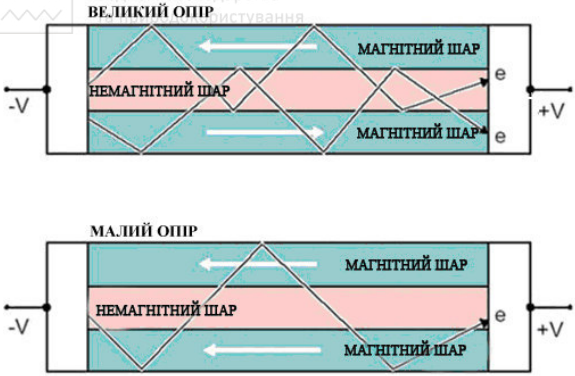


Рис. 2.31. Рух електронів в надрешітці

гування орієнтації намагніченості шарів. Це особливо яскраво проявляється в шарах залізо – хром.

Якщо шари феромагнетику (Fe) чергуються з тонкими шарами немагнітного металу (Cr) певної товщини, то в шарах феромагнетику напрям вектора намагнічення буде чергуватись за відсутності зовнішнього магнітного поля (H=0) (див. рис. 2.30, зліва).

Однак, якщо таку структуру помістити в сильне зовнішнє магнітне поле, то вектор намагнічення шарів феромагнетика повернеться в одну сторону (див. рис. 2.30, справа). Якщо магнітне поле зникне, то чергування намагнічення шарів відновиться.

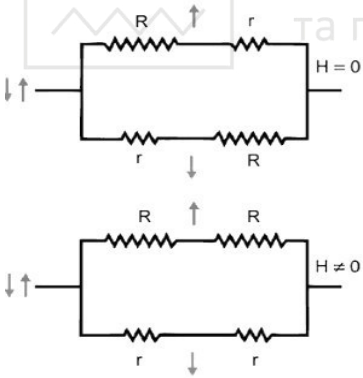


Рис. 2.32. Еквівалентна схема протікання струму через надрешітку

Рухаючись упоперек шарування електрони з одним напрямком спіна відчувають великий опір всередині одних шарів (наприклад, парних), але малий – всередині інших шарів (непарних), а електрони з протилежним напрямком спіна відчувають малий опір всередині парних шарів і великий – всередині непарних. Оскільки шарів обох типів однакова кількість, то різні сорти електронів перебувають в однакових умовах. При накладанні зовнішнього магнітного поля і вирівнюванні напрямку намагнічення феромагнітних шарів електрони обох сортів опиняться в різних умовах. Електрони з одним напрямком спіна «відчують» великий опір у всіх шарах феромагнетика і їх внесок в струм зменшиться, а електрони з протилежним напрямком спіну «відчують»

Національний університет водного господарства та природокористування

малий опір і будуть фактично рухатись в режимі короткого замикання. В результаті, струм суттєво збільшиться, а сумарний опір зменшиться (див. рис. 2.31).

Еквівалентна схема процесу представлена на рис. 2.32. Тут R – великий опір одних феромагнітних шарів, а r – малий опір інших феромагнітних шарів.

Початкові експерименти Ферта показали зменшення опору зразка майже в два рази. Цей результат вдалося досягти з використанням сильних магнітних полів при температурі 4,2*К*. Дослідження Грюнберга дозволили досягти зменшення опору у два рази при кімнатній температурі і набагато слабших магнітних полях.

Використання MR-головок дозволило довести щільність інформації на диску до 3,09*Гбіт/дюйм*^{2}.

Переваги:

1. Головка є резистивним датчиком магнітного поля.
2. Амплітуда вихідного сигналу в декілька разів більша ніж у TF-головки.

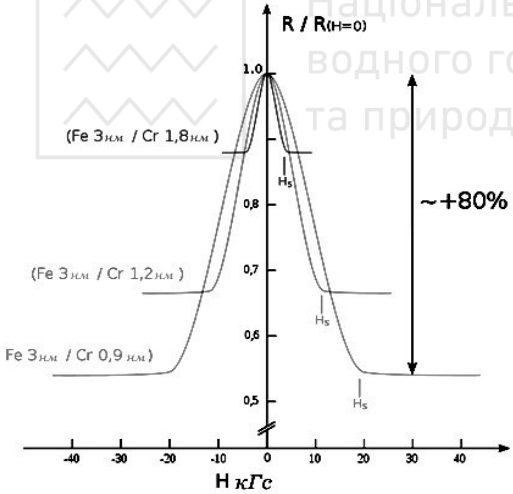


Рис. 2.33. Відносна зміна опору в GMR-матеріалах

Недоліки:

1. Головка має додаткову обмотку для подачі високостабілізованого вимірного струму.
2. Головка дуже чутлива до зовнішніх магнітних полів, тобто вимагає екранування.
3. Використання в процесі виробництва додаткових 4-6 фотомасштабів (масок).

Оскільки на основі магніторезистивного ефекту можна створити тільки пристрій читання, то в сучасних магнітних головках здійснюється розділення запису і зчитування інформації різними головками. Так запис здійснюється за допомогою TF-головки, а зчитування за допомогою MR-головки. В розглянутих головках застосовувався один робочий зазор як для за-

Національний університет водного господарства та природокористування

пису, так і для читання. У магнітної головки їх два – кожний для своєї операції. У вузла читання зазор повинен бути вузьким (для збільшення роздільної здатності), а у записуючого вузла – більш широким (для глибокого проникнення магнітного потоку в робочий шар носія). Крім того, записуюча TF-головка створює більш широкі доріжки, ніж це необхідно для читаючої MR-головки. Тому, при читанні головкою не захоплюються шуми сусідніх доріжок.

Хоча вартість таких головок вища порівняно з вартістю MIG і TF-головок, цей недолік нівелюється надзвичайно високою щільністю запису і надійністю.

Гігантські магніторезистивні (GMR) головки

Гігантські магніторезистивні (англ.: Giant Magneto – Resistive, GMR) головки носять таку назву не через їх геометричні розміри, а за величиною магніторезистивного ефекту, який в них виникає. Він досягається за рахунок введення додаткового шару в надрешітку.

GMR-ефект був відкритий у 1988-1989 рр. А. Фертом і П. Грюнбергом. Експериментуючи з матеріалами надрешіток і їх товщиною вченим вдалося довести величину зміни опору до 80% (див. рис. 2.33).

Національний університет водного господарства та природокористування

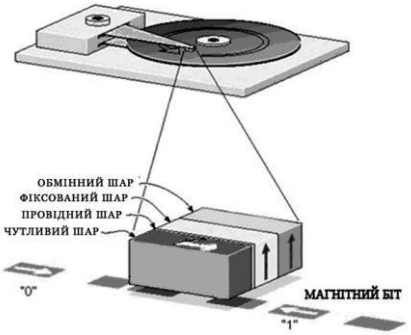


Рис. 2.34. Тонкоплівкові шари GMR-головки

Великий GMR-ефект досягається завдяки спеціальній будові GMR-головки. До надрешітки з трьох тонкоплівкових (1-5*нм*) шарів (див. рис. 2.34):

- чутливого (sensing layer), виготовленого із залізонікелевого сплаву;
- провідного (conducting spacer), – із немагнітного матеріалу (найчастіше – міді);
- фіксованого (pinned layer), – із кобальту, з зафіксованим напрямком вектора намагнічення,

Національний університет водного господарства та природокористування

добавляється четвертий – обмінний (exchange layer), який є сильним антиферомагнетиком із спеціальних сплавів (найчастіше, із FeMn або NiO).

Перші три з них настільки тонкі, що електрони провідності, проходячи через провідний шар, можуть вільно переміщатися з чутливого шару у фіксований і назад. Така структура отримала назву спінового затвору.

Введення шару з фіксованим напрямком намагнічення дає можливість суттєво збільшити зміну магнітоопору (в порівнянні з MR-ефектом) при накладанні зовнішнього магнітного поля. Зміна магнітоопору сильно залежить від орієнтації вектора намагнічення в шарі з нефіксованим магнітним полем щодо орієнтації цього вектора в шарі з фіксованим полем.

Магнітна орієнтація чутливого шару змінюється в залежності від напрямку вектора намагнічення бітів доріжок диску. Напрямок намагнічення всередині фіксованого шару завжди однаковий, це досягається завдяки обмінному шару, функція якого і полягає в тому, щоб стежити за магнітним полем всередині фіксованого шару і забезпечувати його постійну спрямованість. В результаті сумарний опір чутливого і фіксованого шарів змінюється при проходженні головки над бітами диску – спрацьовує GMR-ефект.

Якщо вектори намагнічення в чутливому і фіксованому шарах спрямовані однаково, то всі електрони, спін яких співнапрямлений з вектором намагнічення, вільно пересуваються в обох шарах. Якщо напрямки векторів намагнічення в чутливому і фіксованому шарах протилежні один одному, то рух електронів зі спіном «вгору» буде стримуватися одним з цих двох шарів, а зі спіном «вниз» – іншим, внаслідок чого загальний опір чутливого і фіксуючого шарів зростає. Опір чутливого шару також змінюється внаслідок MR-ефекту, проте GMR-ефект тут домінує.

Переваги:

1. Приблизно у два рази вища чутливість ніж у MR-головки до слабких сигналів.
2. Вища щільність інформації для дисків де використовуються GMR-головки (до 100*Гбіт/дюйм*^{2}).
3. Малі розміри.
4. Завадостійкість.
5. Не схильні до інтерференції сигналів.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

2.3.4.4. Блок електроніки

Блок електроніки в першу чергу включає в себе ***канал читання/запису***. Він містить коло детектування при читанні і коло запису. Даний канал читання/запису входить складовою частиною ***мікросхеми процесора жорсткого диску***. Крім неї в блок електроніки входять ***мікросхеми керування двигунами*** та ***інтерфейсний роз'єм*** (***SATA***).

У герметичній камері HDD знаходиться лише один елемент каналу читання/запису – попередній підсилювач-комутатор, який прикріплений безпосередньо до блоку магнітних головок. Він відповідає за формування струмів запису індивідуально для кожної головки запису і попереднього підсилення сигналів читання.

Інтерфейс, розташований на платі контролера. Через нього комп'ютер обмінюється даними з жорстким диском.

2.3.4.5. Корпус жорсткого диску

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Корпус HDD або гермоблок (англ.: HDA – Head Disk Assembly) призначений для герметичного зберігання всіх механічних складових частин HDD (шасі, диски, двигуни) Крім того, в ньому знаходиться також попередній підсилювач-комутатор та повітряні фільтри. Майже у всіх накопичувачах на жорстких дисках використовуються два повітряних фільтри: фільтр рециркуляції і барометричний фільтр. Фільтр рециркуляції призначений для очищення внутрішньої «атмосфери»від невеликих частинок робочого шару носія, які, незважаючи на всі вжиті заходи, все ж осипаються з дисків. Зовнішнє повітря проникає всередину HDD крізь барометричний фільтр, оскільки це необхідно для вирівнювання тиску всередині і ззовні блоку. Саме тому, що жорсткі диски не є повністю герметичними пристроями, фірми-виробники вказують для них діапазон висот над рівнем моря, в якому вони зберігають працездатність (зазвичай від -300 до +3000*м*). Деякі фірми випускають спеціальні HDD, які є повністю герметичними і можуть працювати на значних висотах і глибинах, витримувати великі температурні коливання та механічні струси. Такі HDD можуть використовуватися у військовій авіації, на підводних човнах, в космосі, тощо.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

2.3.5. Накопичувач на гнучких магнітних дисках

Як варіант ЗЗП раніше використовувався накопичувач на гнучких магнітних дисках (дискета, НГМД, англ.: Floppy Disk Drive – FDD). FDD був винайдений в кінці 60-их років А. Штудгартом. Перші FDD з'явились в продажу на початку 80-их років в форматі 5,25 дюйма і об'ємі 1,2*МБ*. На дискеті вкладалось 80 доріжок з 18 секторами. Сучасні FDD можуть зберігати до 3*ГБ* інформації.

FDD – це носій невеликого об'єму інформації. Він представляє собою (див. рис. 2.35) гнучкий пластиковий диск на полімерній основі покритій з обох сторін магнітним окислом. Такий диск розміщується в захисній оболонці, на внутрішню поверхню якої нанесено очисне покриття. В упаковці зроблені з обох сторін радіальні щілини, через які головки запису/читання отримують доступ до диску. Дисками FDD можна переносити дані (програмне забезпечення) з одного комп'ютера на інший.

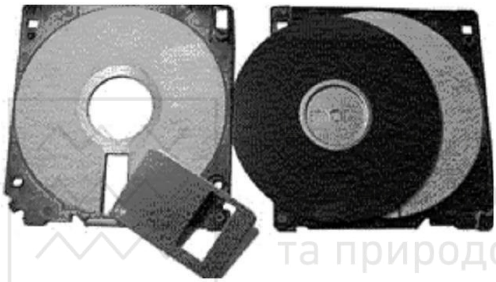


Рис. 2.35. FDD-гнучкий пластиковий диск

В накопичувачах на гнучких дисках для переміщення головок використовувався привод з кроковим двигуном, менш надійний ніж з рухомою котушкою. Але його параметрів (в тому числі і точності) виявляється цілком достатньо для дисководу цього типу, оскільки щільність доріжок на гнучкому диску значно менша (135 доріжок на дюйм), ніж у накопичувачах на жорстких дисках. У сучасній комп'ютерній техніці гнучкі магнітні диски майже не застосовуються.

Національний університет водного господарства та природокористування

2.3.6. Накопичувач на змінних жорстких дисках

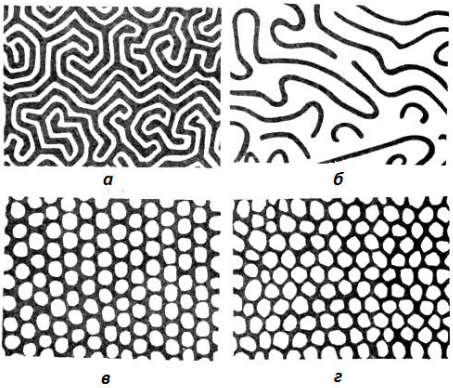


Рис. 2.36. Трансформація смугової доменної структури під дією зовнішнього магнітного поля:
а) смугова доменна структура; б) відокремлені ЦМД; в) решітка ЦМД; г) стільникова доменна структура

Змінні жорсткі магнітні диски (англ.: HDD Rack) були розроблені фірмою SyQuest. За своєю суттю – це переносний вінчестер. В накопичувачах цього типу жорсткі диски (одна або дві стандартні пластини) знаходяться в герметичному картриджі разом з приводом запису/читання. Це дозволяє наблизити їх параметри до параметрів жорстких дисків. Загальним недоліком цього виду жорстких дисків є їх чутливість до зовнішніх магнітних полів.

2.3.7. Пам’ять на циліндричних магнітних доменах (ЦМД)

Пам’ять на ЦМД використовує генерацію і кероване переміщення доменів в нерухомому магнітному матеріалі [5, 6, 7]. Вона має послідовний доступ і є енергонезалежною; довгий час зберігала лідерство в щільності зберігання інформації серед енергонезалежних пристроїв.

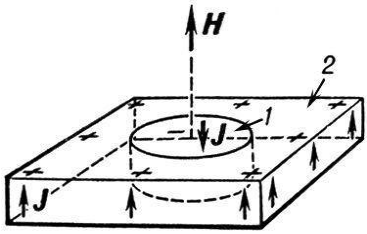


Рис. 2.37. Циліндричний магнітний домен (1) в феромагнетику (2)

Магнітна сприйнятливість феромагнетиків є тензорною величиною. Це означає, що вони характеризуються значною анізотропією намагнічення. Можна виділити такі напрями вздовж яких в процесі намагнічення досягається насичення при мінімальних напруженостях намагнічуючого поля. Ці напрями називаються осями легкого намагнічення. Феро-

Національний університет водного господарства та природокористування

магнетик, який має одну вісь легкого намагнічення називається одноосним. ЦМД виникають в тонких монокристалічних плівках одноосних феромагнітних матеріалів, осі легкого намагнічення яких перпендикулярні поверхні плівки. За відсутності магнітного поля у них самовільно утворюються домени, які мають форму стрічки, довжина якої набагато більша ширини. Такі домени отримали назву ***смугових доменів*** (див. рис. 2.36, а).

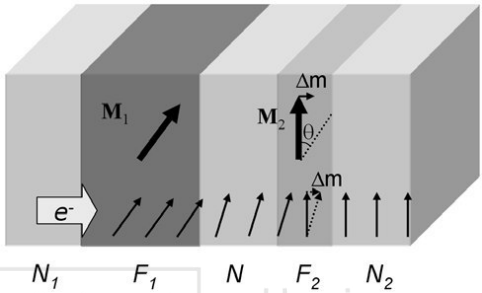


Рис. 2.38. Ілюстрація руху домену за рахунок зміщення доменної стінки. Тут: струм напрямлений з області N_1 в N_2, Домен M_1 займає область домену M_2.

В ненамагніченому стані ширина смугових доменів з антипаралельною орієнтацією вектора намагнічення однакова, тому індукція магнітного поля, створеного плівкою, дорівнює нулю.

У магнітному полі для тих доменів, у яких напрямок вектора намагнічення J співпадає з напрямком напруженості зовнішнього магнітного поля H, ширина домену збільшується. Якщо ж вони мають протилежний напрямок, то ширина зменшується. Так виникає рух доменних стінок, що приводить до збільшення розмірів одних доменів і зменшення інших [8]. При деяких значеннях магнітних полів відбувається руйнування смугових доменів на окремі ізольовані ділянки,

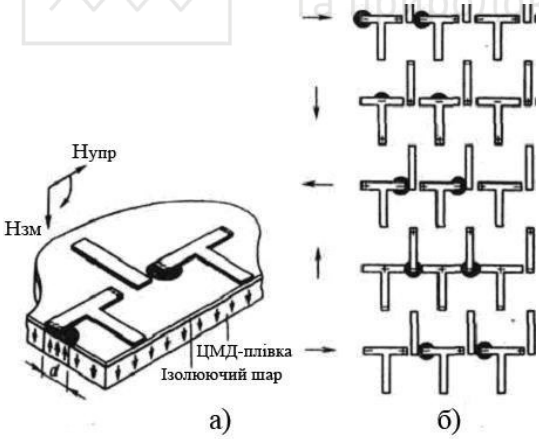


Рис. 2.39, *а* – Доменорухома ТІ-структура із пермалоєвих аплікацій ($H_{зм}$ і $H_{упр}$ - напруженість магнітного поля зміщення і управління, *d* – діаметр ЦМД),
б – Схема руху ЦМД вздовж ТІ-структури

форма яких швидко стає циліндричною (див. рис. 2.36 б, в, г та рис. 2.37). Ці утворення отримали назву ***циліндричних магнітних доменів*** (**ЦМД**).

Відомо, що ЦМД можуть рухатись в феромагнітних матеріалах за рахунок руху доменних стінок при збереженні поперечної площі домена. Зокрема, такий рух ЦМД може здійснюватись під дією електричного струму спін-поляризованих електронів, що протікає перпендикулярно осі ЦМД (див. рис. 2.38). Спіни електронів - носіїв струму, потрапляючи в домен-поляризатор, орієнтуються за напрямком намагніченості домену M_1. Далі струм інжектується в сусідній домен з напрямком намагніченості M_2, а оскільки обмінна взаємодія зберігає спін, то на намагніченість M_2 діє момент сили, який прагне вибудувати M_2 в напрямку M_1. Такий ефект еквівалентний руху доменів за напрямком струму.

Застосування ЦМД

Властивості ЦМД (стійкість в деякому інтервалі полів зміщення, рухливість, можливість керування їх рухом, властивість знаходитись в різних станах тощо) визначають їх застосування в пристроях обробки інформації. Такий пристрій складається із низки функціональних елементів, які забезпечують генерацію, рух, перемикання і детектування ЦМД [9, 10]. *Ідея зазначеного пристрою в наступному*: нехай в плівці якимось способом сформований канал, вздовж якого можуть рухатись з заданою швидкістю ЦМД (канал пересування ЦМД). Інформація кодується за принципом наявності або відсутності в даній точці плівки ЦМД (див. рис. 2.37, 1 – логічна «1», 2 – логічний «0»). У певних місцях каналу формують генератор і детектор ЦМД, які виконують ті ж функції, що і головки запису/читання в пристроях з рухомими магнітними носіями інформації. Генератор перетворює сигнали, які поступають на його вхід, у ЦМД, детектор робить зворотне перетворення. Важливою відмінністю ЦМД-пристроїв є те, що в них не потрібний механічний рух магнітного носія або головки.

Найчастіше використовуються доменорухомі структури у вигляді аплікацій певної форми (наприклад, у вигляді ТІ; рис. 2.39) із магнітом'якого матеріалу (найчастіше – пермалою). При намагнічені пермалоєвих аплікацій управляючим магнітним полем, орієнтованим в площині плівки, на їх краях виникають магнітні полюси.

Національний університет водного господарства та природокористування

ЦМД притягаються до від'ємних полюсів аплікацій, тобто створюється магнітостатична пастка. При обертанні управляючого магнітного поля в площині плівки потенціальні ями рухаються разом з ЦМД, а у вузькому зазорі між аплікаціями ЦМД переходить на сусідню аплікацію і продовжує рух по її периметру.

За один повний поворот керуючого поля в площині плівки відбувається зміщення ЦМД на один період доменорухомої структури. Тактова частота обертання поля (10^5-10^6 *Гц*) визначає швидкодію ЦМД-пристроїв. Величина періоду структури і відстань між каналами повинні бути більшими або порядку 4*d*, щоб виключити взаємодію доменів. Ця величина визначає щільність запису в ЦМД-пристроях (6000000*біт/см*^{2} при *d*=1*мкм*). Доменорухома структура створюється літографічним способом.

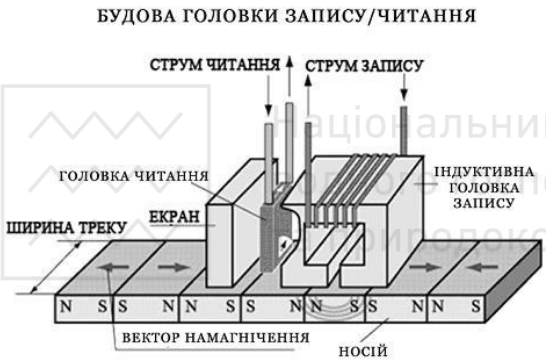


Рис. 2.40. Система паралельного зберігання даних

Читання інформації відбувається за допомогою магніторезистивної головки. Пристрої збереження інформації, які базуються на використанні намагнічення циліндричних доменів у широкий вжиток плануються бути введеними в 2015-2020 роках.

2.4. Сучасні технології магнітного зберігання інформації

Система паралельного (горизонтального) зберігання даних

У цій системі намагнічування робочого шару диску відбувається вздовж його руху (див. рис. 2.40), тобто вектор намагнічення ділянок робочої поверхні паралельний цій поверхні. Він дозволяє здійснити щільність запису до 23*Гбіт/см*^{2}. Дані записуються на диск, покритий феромагнітним робочим шаром.

Національний університет водного господарства та природокористування

З рис. 2.40 видно, що у всіх сучасних жорстких дисках головки читання та запису об'єднані в одну конструкцію, яка так і називається – «головка читання/запису» (англ.: read/write head). В ній, як говорилось в розділі 2.3.4, є індуктивна (TF) головка запису (англ.: inductive write head) і MR-головка читання, яку також називають «сенсором». Для того щоб підкреслити подвійний характер такої конструкції, іноді вживається також термін merged head (з англ. – подвійна головка, дослівно – «об'єднана, подвійна голівка»).

Очевидно, що головки читання і запису можуть бути конструктивно виконані і розміщені в вінчестері як два самостійних і незалежних один від одного елемента (англ.: separate read and write heads). Обидва підходи мають свої переваги і недоліки. При роздільній конструкції робочі параметри головки читання можуть бути оптимізовані незалежно від робочих параметрів головки запису, і навпаки. При такому підході, кожна головка буде краще справлятися зі своїми функціями. Подвійну ж головку легше розмістити всередині жорсткого диска, оскільки відстань між її читаючими і записуючими елементами менша, ніж між двома незалежними головками. Крім того, виготовлення жорстких дисків із подвійною головкою обходиться дешевше за рахунок скорочення кількості виконуваних технологічних операцій під час виробництва. Остання обставина, швидше за все, стала головною причиною того, що до середини 90-х років усі виробники перейшли на випуск подвійних головок.

Система перпендикулярного (вертикального) зберігання даних (PMR)

У перпендикулярній системі запису даних орієнтація намагнічення доменів робочого шару перпендикулярна поверхні диску. Таке її розміщення вперше запропонував Ш. Івасакі у 1976 році.

Під робочим шаром диску чи стрічки знаходиться шар магнітом'якого заліза (див. рис.2.41).

Магнітна головка, як і при поздовжньому записі, знаходиться з однієї сторони носія, але має відмінну від головки поздовжнього запису конструкцію. Полюси такої головки різні за поперечним перерізом – «гострий» і «тупий». Густі силові лінії, які стікають з «гострого» полюса, записують дані на диск і, розтікаючись по магнітом'якій основі, в розрідженому стані повертаються до «тупого»

Національний університет водного господарства та природокористування

полюса. При цьому розріджені вони настільки, що вже не в стані перемагнітити носій. Таким чином, якщо в поздовжньому запису магнітне поле запису генерується між полюсами головки, то в перпендикулярному – між зрізом полюсу головки і магнітом'якою основою диску. Тому домени записуючого шару орієнтуються вертикально, а основи – горизонтально. Це забезпечує додаткову стабільність положення доменів.

В системі перпендикулярного запису використовується робочий шар набагато складнішої будови. Під тонким захисним шаром розташований записуючий шар, що складається з окисленого сплаву кобальту, платини та хрому. Магнітом'який підшар складається з двох шарів складної хімічної будови, які називаються антиферомагнітно зв'язаними шарами [10].

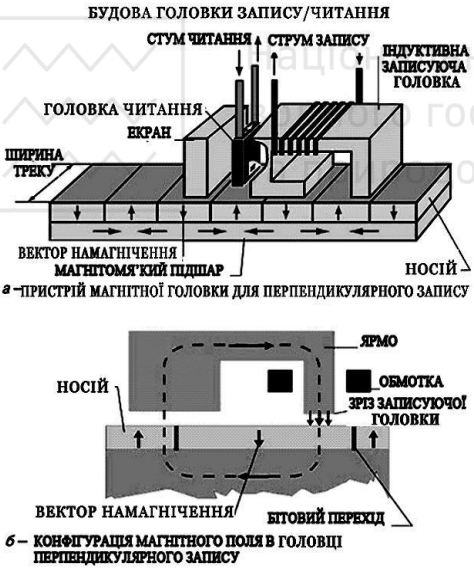


Рис. 2.41. Система перпендикулярного зберігання даних

При перпендикулярному запису використовується набагато більш складний магнітний робочий шар. Під тонким захисним карбоновим шаром знаходиться записуючий шар із окисленого сплаву кобальту, платини і хрому. Основа складається із двох антиферомагнітних шарів, які дозволяють зняти внутрішнє напруження магнітного поля.

Для зчитування інформації в системах з перпендикулярним магнітним записом потрібні принципово нові головки читання, які дозволяють значно збільшити співвідношення сигнал/шум і потужність самого

Національний університет водного господарства та природокористування

сигналу. Тому деякі компанії починають застосовувати нове покоління головок на тунельному магніторезистивному ефекті (TMR Heads) вже сьогодні.

Система перпендикулярного магнітного запису дозволяє досягти щільність запису даних до 650*Гбіт/дюйм*^{2} (теоретична межа).

Бібліографічний список до розділу 2

1. Капцов Л. Н. Физика элементов ЭВМ [Текст] / Л. Н. Капцов. – М. : Из-во МГУ, 1983. – 240 с.
2. Флорес А. Внешние устройства ЭВМ [Текст] / А. Флорес. – М. : Мир, 1977.
3. Розенблат М. А. Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники [Текст] / М. А. Розенблат. – М. : Наука, 1974.
4. Мюллер С. Модернизация и ремонт ПК, 17-е издание [Текст] / С. Мюллер. – М. : ООО «И. Д. Вильямс», 2008. – 1360 с.
5. О'делл Т. Магнитные домены высокой подвижности [Текст] / Т. О'делл. – М. : Мир, 1978.
6. Бобек Э. Цилиндрические магнитные домены [Текст]/ Э. Бобек, Э. Делла Торре. – М., 1977.
7. Элементы и устройства на цилиндрических магнитных доменах. Справочник, под ред. Н. Н. Евтихиева, Б. Н. Наумова [Текст] / – М., 1987.
8. Пучко А. Н. Электронные цифровые вычислительные машины [Текст]/ А. Н. Пучко, О. Д. Жуков-Емельянов, И. С. Ксенофонтов. – М. : Машиностроение, 1979. – 328 с.
9. Радаев А. HDD будущего [Текст]/ А. Радаев, Е. Пугач. – http://www.ferra.ru/online/storage
10. Лебедь О.О. Фізичні основи інформаційних систем [Текст]/ О.О. Лебедь, В.Ф. Орленко, О.Д. Кочергіна. – Рівне: НУВГП, 2013. – 182 с.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

РОЗДІЛ 3
ОПТИЧНІ ПРИСТРОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ ТЕХНІКИ

У третьому розділі представлено короткий огляд вибраних питань курсу оптики без яких неможливе розуміння оптичних методів, що застосовуються в комп'ютерній техніці. Увага зосереджена на таких явищах як інтерференція, дифракція, поляризація світла, голографія та фотоефект, основи фізики лазерів.

Показано можливі перспективи подальшого використання оптичних методів для покращення характеристик ПК, таких як швидкодія, об'єм пам'яті, габарити, тощо [1,2].

3.1. Елементи оптики

3.1.1. Хвильові процеси

Хвиля це процес поширення коливань у середовищі. Електромагнітні хвилі можуть поширюватись як у середовищі, так і у вакуумі. Частинки середовища, в якому поширюється хвиля, не переносяться хвилею, вони лише здійснюють коливання відносно положень рівноваги. Хвилі, в яких частинки коливаються перпендикулярно до напрямку поширення хвилі, називаються *поперечними*. Хвилі, в яких частинки коливаються вздовж напрямку поширення хвилі, називаються *поздовжніми*. Геометричне місце точок, до яких доходять коливання в момент часу t, називається фронтом хвилі. Геометричне місце точок, які коливаються в однаковій фазі, називається хвильовою поверхнею. Фронт хвилі переміщується, а хвильові поверхні залишаються нерухомими (хвильових поверхонь існує безліч).

Рівняння плоскої хвилі, що поширюється вздовж осі x (див. рис. 3.1) з фазовою швидкістю v, описується рівнянням:

$$\xi(x,t) = A\cos\left(\omega t - \frac{2\pi x}{T\mathrm{v}}\right) = A\cos\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda}\right) = A\cos(\omega t - kx), \quad (3.1)$$

де $k = \dfrac{2\pi}{\lambda}$ – хвильове число, $\lambda = \mathrm{v}T$ – довжина хвилі, $\omega = \dfrac{2\pi}{T}$ – циклічна частота, T – період коливань.

Національний університет водного господарства та природокористування

Довжина хвилі λ – це відстань, яку проходить хвиля за час, рівний періоду коливань, або відстань між найближчими точками, що коливаються синхронно. Фаза коливання – це аргумент при функції косинуса в рівнянні (3.1).

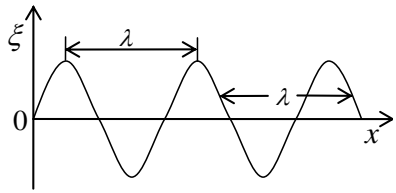


Рис. 3.1. Графік коливання точок хвилі

Серед великої кількості хвиль слід виділити електромагнітні хвилі. Електромагнітні хвилі – це процес поширення електромагнітних коливань у просторі. Джерелом електромагнітних хвиль може бути відкритий коливальний контур. Рівняння плоскої електромагнітної хвилі мають вигляд:

$$\begin{cases} E = E_{\max}\cos(\omega t - kx), \\ H = H_{\max}\cos(\omega t - kx). \end{cases}, \qquad (3.2)$$

де E і H – напруженості електричного і магнітного полів, $E_{\max}$ і $H_{\max}$ – їх амплітудні значення. Електромагнітна хвиля – поперечна, при цьому напрямки коливань $\vec{E}$ та $\vec{H}$ – взаємноперпендикулярні (див. рис. 3.2).

Електромагнітні хвилі можуть мати широкий діапазон довжин хвиль або частот в залежності від способу їх генерації; зокрема, радіохвилі мають довжини $\lambda = 10^{-4} \div 10^{4}\,м$, а для інфрачервоних, світлових, ультрафіолетових довжина хвилі становить $\lambda = 10^{-6} \div 10^{-4}\,м$. Радіохвилі генеруються вібраторами; світлові хвилі – молекулами і атомами.

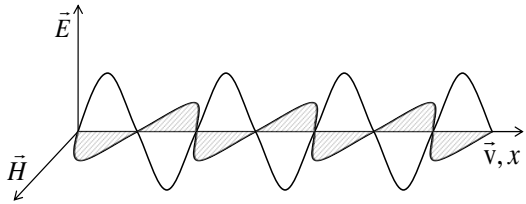


Рис. 3.2. Коливання $\vec{E}$ та $\vec{H}$ електромагнітної хвилі

У більшості оптичних явищ дія світла на речовину визначається електричним вектором $\vec{E}$ електромагнітного поля. Світлове випромінювання ($\nu \sim 10^{15}\,Гц$) не призводить до намагнічування середовища. Тому, саме вектор $\vec{E}$ називають світловим вектором. Світлова хвиля називається монохроматичною, якщо амплітуда

Національний університет
водного господарства
та природокористування

$E_{\max} = const$, частота $\omega = const$, а початок і кінець хвилі жодним чином не обмежені, тобто $-\infty < r < +\infty$. Однак, оскільки тривалість процесу випромінювання електромагнітних хвиль окремими атомами є скінченою $\left(\tau \approx 10^{-8} c\right)$, то світло є сукупністю просторово обмежених хвиль (цугів).

Нехай плоска світлова хвиля, поширюється вздовж напрямку $\vec{r}$. Тоді її можна описати системою рівнянь для електричної та магнітної складових хвилі:

$$\begin{cases} \vec{E} = \vec{E}_0 \cos\left(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \alpha_0\right) \\ \vec{H} = \vec{H}_0 \cos\left(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \alpha_0\right) \end{cases}, \tag{3.3}$$

де $\vec{E}_0, \vec{H}_0$ – відповідні амплітуди, $(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \alpha_0)$ – фаза коливань, α_0 – початкова фаза коливань.

Якщо дві такі монохроматичні хвилі однакової частоти накладаються в певній точці простору, то їх різниця фаз:

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \left(\vec{k}_1\vec{r}_1 - \vec{k}_2\vec{r}_2\right) + \left(\alpha_{02} - \alpha_{01}\right)$$

за рахунок випадковості і непередбачуваності початкових фаз α_0 не буде залишатись постійною в часі. Якщо ж обидві хвилі мають спільне походження $\left(\alpha_{01} = \alpha_{02}\right)$, то $\Delta\varphi = const$. Хвилі однакової частоти, що мають постійну в часі різницю фаз, і коливаються в одній площині називають *когерентними*. Якщо врахувати, що хвильове число

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{\mathrm{v}T} = \frac{2\pi n}{cT} = \frac{2\pi n}{\lambda_0}, \tag{3.4}$$

де n – показник заломлення середовища, в якому поширюється хвиля, а λ_0 – довжина світлової хвилі у вакуумі, то

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0}\left(n_1 r_1 - n_2 r_2\right) = \frac{2\pi}{\lambda_0}\Delta. \tag{3.5}$$

Тут Δ – оптична різниця ходу когерентних світлових хвиль (променів), оскільки добуток nr називається оптичним шляхом променя. Для когерентних світлових хвиль оптична різниця ходу не залежить від часу.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

3.1.2. Інтерференція світла

Інтерференція світла – це явище накладання когерентних світлових хвиль, в результаті якого відбувається перерозподіл світлової енергії в просторі. В точках простору, куди когерентні хвилі приходять у фазі, вони підсилюють одна одну; в точках, куди вони попадають у протифазі, відбувається послаблення світла. На екрані спостерігається характерна інтерференційна картина у вигляді чергування темних і світлих смуг – максимумів і мінімумів освітленості.

У випадку максимуму інтенсивності інтерференційної картини в оптичній різниці ходу двох когерентних хвиль вкладається ціле число довжин хвиль (у вакуумі) λ_0, тобто

$$\Delta = \pm m\lambda_0,\ (m = 0,1,2,...). \tag{3.6}$$

Мінімум інтерференції спостерігається, коли в оптичній різниці ходу вкладається непарне число півхвиль, тобто

$$\Delta = \pm(2m+1)\frac{\lambda_0}{2},\ (m = 0,1,2,...). \tag{3.7}$$

Так, якщо при накладанні двох когерентних хвиль однакової амплітуди, одна з них пройшла в тому ж середовищі шлях на $\frac{\lambda_0}{2}$ більший ніж інша, то згідно (3.7) вони взаємно погасять одна одну.

На основі інтерференційних умов (3.6), (3.7) працюють інтерферометри. Дані прилади використовуються для вимірювання довжин хвиль спектральних ліній, показників заломлення прозорих середовищ, довжин і кутових величин. На явищі інтерференції оснований запис і зчитування інформації з компакт-дисків.

3.1.3. Дифракція світла

Дифракція світла – це сукупність явищ, які зумовлені хвильовою природою світла і спостерігаються в середовищах з різкими неоднорідностями (наприклад, при проходженні світла через вузькі отвори, поблизу границь непрозорих тіл і т.п.). Дифракція, зокрема, приводить до огинання світловими хвилями перешкод і проникання світла в область геометричної тіні. Для спостереження дифракції

Національний університет водного господарства та природокористування

необхідно, щоб розміри перешкод були співмірні з довжиною хвилі світла.

Проникнення світла в область геометричної тіні пояснює принцип Гюйгенса: кожна точка фронту хвилі є джерелом вторинної сферичної хвилі; положення фронту хвилі в наступний момент визначається огинаючою фронтів усіх вторинних хвиль.

Френель доповнив принцип Гюйгенса уявленням про інтерференцію вторинних хвиль. Розрізняють дифракцію сферичних хвиль (за Френелем) і дифракцію плоских хвиль (за Фраунгофером). Саме дифракція Фраунгофера має велике практичне застосування. Прикладом може служити дифракційна решітка як диспергуючий елемент спектрометра. Явища дифракції і інтерференції використовуються в голографії.

3.1.4. Поляризація світла

Світлова хвиля складається з багатьох цугів електромагнітних хвиль, що випромінюються окремими атомами. Площина коливань (площина коливань світлового вектора $\vec{E}$) для кожного цугу орієнтована випадково (див. рис. 3.3). Тому в природному світлі коливання різних напрямків швидко і хаотично змінюють одне одного. Світло, в якому напрямки коливань якимось чином впорядковані, називається поляризованим.

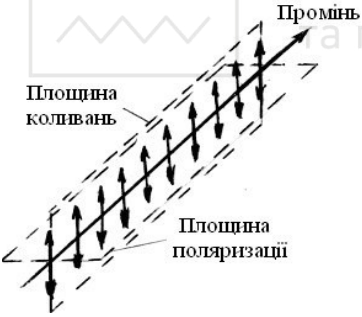


Рис. 3.3. Плоскополяризований промінь

Якщо коливання світлового вектора відбувається в одній площині, світло називають плоско- (або лінійно-) поляризованим. Площину, перпендикулярну до площини коливань, називають площиною поляризації. Якщо кінець світлового вектора описує еліпс, то світло називається еліптично-поляризованим.

3.1.5. Фотоефект

Фотоефектом називається процес взаємодії світла з речовиною, в

результаті якого енергія фотонів передається електронам речовини. Для твердих і рідких тіл розрізняють *зовнішній* фотоефект, при якому поглинання фотонів супроводжується вилітанням електронів за межі тіла, і *внутрішнім* фотоефектом при якому електрони залишаються в тілі (напівпровіднику), змінюють свій енергетичний стан (змінюється провідність напівпровідника). В газах фотоефект проявляється в йонізації атомів або молекул під дією світла (фотойонізація).

Усі закономірності зовнішнього фотоефекту пояснюються рівнянням Ейнштейна (закон збереження енергії для фотоефекту):

$$h\nu = A + W_к, \tag{3.8}$$

де A – робота виходу електрона, $h\nu$ – енергія фотона, $W_к$ – максимальна кінетична енергія електрона.

На явищі зовнішнього фотоефекту працюють вакуумні фотоелементи та фотоелектронні помножувачі (ФЕП). Саме ці фотоприймачі тривалий час переважно використовувались у фотометрії та спектрометрії видимої та ультрафіолетової ділянок спектру. Перевагою цих приймачів є те, що їх фотострум пропорційний інтенсивності падаючого світла. Крім того фотострум не залежить від величини опору навантаження. Це дозволяє реєструвати малі світлові сигнали.

В інфрачервоній ділянці спектру використовують фотоелементи, які діють на основі явища внутрішнього фотоефекту. Це явище спостерігається у напівпровідниках. Під дією світла зростає концентрація носіїв струму (електронів провідності та дірок). Таким чином, збільшується електропровідність напівпровідника. При енергії фотона $h\nu_o \geq E_g$, де E_g – енергія активації провідності в чистому провіднику (ширина забороненої зони), можуть відбуватись переходи електронів із заповненої валентної зони в зону провідності. ν_o називається червоною межею фотопровідності.

Якщо в напівпровіднику є домішки, то під дією світла електрони можуть переходити із домішкових донорних рівнів в зону провідності, або із валентної зони на акцепторні домішкові рівні. У першому випадку виникає електронна фотопровідність, у другому – діркова.

На внутрішньому фотоефекті основана дія фоторезисторів. Кількість виникаючих носіїв струму пропорційна інтенсивності падаючого світла. Тому фоторезистори застосовуються у фотометрії.

Національний університет водного господарства та природокористування

На межі металу і напівпровідників або напівпровідників p - типу і n – типу (p-n перехід) спостерігається вентильний фотоефект. Він проявляється у тому, що під дією світла, внаслідок внутрішнього фотоефекту в p-n - переході виникає електрорушійна сила (фото-е.р.с.). Величина фото-е.р.с. пропорційна інтенсивності падаючого світла.

Вентильний фотоефект в p-n переході це безпосереднє перетворення світлової енергії в енергію електричного струму. Це явище використовують у фотоелектричних джерелах струму, приймачах світла (напівпровідникові фотоелементи).

Напівпровідникові фотоелементи маючи малі габарити, низькі напруги живлення і ряд інших конструктивних переваг, широко застосовують для автоматичних систем, систем управління, перетворення сонячної енергії, а також в обчислювальній техніці.

3.1.6. Лазер і принцип його роботи

Національний університет водного господарства та природокористування

Лазер (оптичний квантовий генератор, англ.: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (LASER)) – підсилення світла за допомогою вимушеного випромінювання) - це джерело оптичного когерентного випромінювання, що характеризується високою спрямованістю і великою густиною енергії.

Основний фізичний процес, що визначає дію лазера, – це вимушене випромінювання електромагнітної хвилі. Воно відбувається при взаємодії фотона із збудженим атомом при точному збігу енергії фотона з енергією збудження атома (або молекули). В результаті цієї взаємодії атом переходить в незбуджений (основний) стан, а надлишок енергії випромінюється у вигляді нового фотона з такою ж енергією, напрямом поширення і поляризацією, як і в первинного фотона. Таким чином, наслідком даного процесу є наявність вже двох абсолютно ідентичних фотонів. При подальшій взаємодії цих фотонів із збудженими атомами, аналогічними першому атому, може виникнути “ланцюгова реакція” розмноження однакових фотонів, що “летять” в одному напрямі. Це приведе до появи вузьконаправленого світлового променя. Для виникнення лавини ідентичних фотонів необхідне *активне середовище*, в якому збуджених атомів було б більше, ніж незбуджених, оскільки при взаємодії фотонів з незбудженими атомами відбувалося б поглинання фотонів. Таке се-

Національний університет водного господарства та природокористування

редовище називається середовищем з *інверсною населеністю рівнів енергії*.

Отже, крім вимушеного випромінювання фотонів збудженими атомами відбуваються також процес спонтанного випромінювання фотонів при переході збуджених атомів в незбуджений стан і процес поглинання фотонів під час переходу атомів з незбудженого стану в збуджений.

Якщо кількість збуджених атомів велика та існує інверсна населеність рівнів (у верхньому, збудженому стані атомів більше, ніж в нижньому, основному), то перший же фотон, що народився в результаті спонтанного випромінювання, викличе зростаючу лавину появи ідентичних фотонів. Відбудеться підсилення спонтанного випромінювання.

На практиці для генерації лазерного випромінювання реалізується трирівнева схема (наприклад, в рубінових лазерах), за якою атом з основного стану переходить у один із двох збуджених станів. В цьому стані він знаходиться короткий проміжок часу і майже відразу переходить у другий збуджений стан з меншою енергією, де знаходиться тривалий час. Саме з цього стану атом переходить в основний стан випромінюючи фотон.

Головний елемент лазера – активне середовище, для утворення якого використовують дію світла не лазерних джерел – електричний розряд в газах, хімічні реакції, бомбардування електричним пучком та інші методи, які називаються «накачкою». Активне середовище знаходиться між двома паралельними дзеркалами (рис. 3.4).

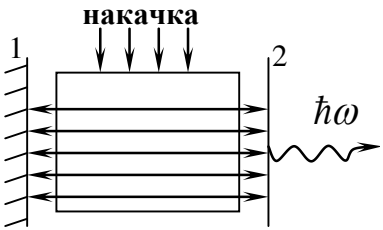


Рис. 3.4. Оптичний квантовий генератор (лазер)

Фотони, утворені накачкою, напрям поширення яких не перпендикулярний площині дзеркал, створюють лавини фотонів, які виходять за межі активного середовища. В той же час фотони, напрям поширення яких перпендикулярний площині дзеркал, створюють лавину, яка багатократно підсилюється внаслідок відбиття від дзеркал.

Оскільки одне з дзеркал напівпрозоре, то через нього виходить направлений потік фотонів перпендикулярно площині дзеркал. При

Національний університет водного господарства та природокористування

правильно підібраному коефіцієнті пропускання дзеркал, точному їх налаштуванню одне відносно одного і відносно поздовжньої осі активного середовища зворотний зв'язок може виявитися настільки ефективним, що випромінюванням «вбік» можна повністю нехтувати в порівнянні з випромінюванням, що виходить через дзеркало. Таку схему зворотного зв'язку називають оптичним резонатором, і саме такого типу резонатори використовують у більшості існуючих лазерів.

Схематичне зображення лазера представлене на рис. 3.4. Тут: 1 – відбивне дзеркало; 2 – напівпрозоре дзеркало; А – активне середовище; $\hbar\omega$ – випромінювання, яке генерується лазером.

Між двома дзеркалами, одне з яких напівпрозоре (2), рухається потік фотонів, що випромінюються атомами. Більша частина цього потоку проходить через напівпрозоре дзеркало в навколишнє середовище у вигляді когерентного випромінювання. Невелика частина потоку світа відбивається від дзеркала 2, рухається підсилюючись до дзеркала 1 і т.д.

Національний університет водного господарства та природокористування

Існують газові лазери, рідинні та твердотільні (на діелектричних кристалах, напівпровідниках, склі).

В якості активного середовища зазвичай використовують:

1 Газ (гелій+неон, вуглекислий газ тощо)
2 Кристал (напівпровідник).
3 Рідину.
4 Скло.

3.1.7. Поняття про голографію

Голографія є особливим методом реєстрації на фотопластинці (або фотоплівці) хвильового фронту випромінювання, який іде від предмета, і подальше його відновлення фронту для отримання уявного або дійсного зображення предмета [3]. Голографія базується на фотографуванні результату інтерференції двох частин хвилі (плоскої або сферичної), яка випромінюється когерентним джерелом (наприклад, лазером): одна частина попадає на фотопластинку безпосередньо (називається – опорний промінь, англ.: reference beam), а інша направляється для освітлення досліджуваного об'єкту і після відбивання від нього поступає на ту ж пластинку (об'єктний промінь, англ.: signal beam). На фотоплівці фіксується складна інтерфе-

Національний університет водного господарства та природокористування

ренційна картина, яка називається *голограмою* (див. рис. 3.5). В кожній точці голограми результат інтерференції об'єктної та опорної хвиль залежить не тільки від амплітуд світлових векторів, а і від їх різниці фаз.

Для відновлення хвильового поля предмета, тобто для отримання його об'ємного зображення, голограму розміщують в тому ж місці, де була розташована фотопластина при записі, а потім освітлюють її опорною хвилею лазера під тим самим кутом, під яким був здійснений запис. При цьому внаслідок дифракція опорної хвилі на голограмі виникає «уявне» об'ємне зображення об'єкта. В ньому зберігається повна інформація про амплітуду і фазу об'єктної хвилі.

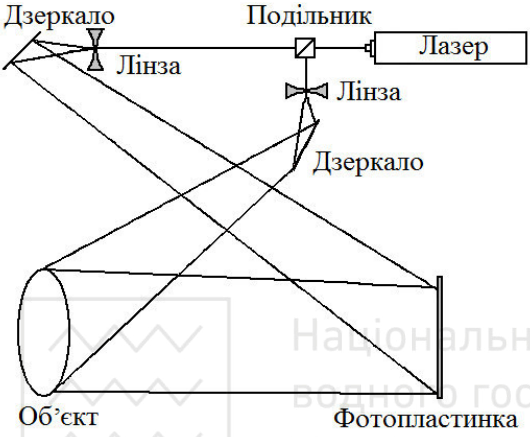


Рис. 3.5. Створення голографічного зображення

3.2. Оптичні технології в комп'ютерній техніці

В даний час існує три основних типи зберігання даних в комп'ютері: напівпровідниковий, магнітний і оптичний. Пристрої напівпровідникового та магнітного зберігання даних докладно розглядались у розділах 1 і 2.

Оптичні методи є більш перспективними для розвитку інформаційних технологій, оскільки традиційні методи мають низку суттєвих недоліків і обмежень, перш за все, у швидкодії і щільності запису.

Серед переваг оптичних методів над іншими фізичними методами у реєстрації, обробці і збереженні інформації можна відзначити:

1. Високу щільність запису інформації (~10^5 *біт/мм*^{2}).
2. Відсутність (у більшості випадках) безпосереднього контакту між носієм і системою запису/читання.

Національний університет
харчового господарства
імені Петра Могили

3. Швидкодія.

4. Завадостійкість.

5. Різноманітність способів практичної реалізації, яка базується на великій кількості механізмів взаємодії світла з реєструючими середовищами.

У пристроях оптичного зберігання даних запис (читання) здійснюється за допомогою лазерного променя який направлений на диск, що обертається. Історична назва такого диску – **компакт-диск** (англ.: Compact Disk, CD, КД).

Патент на перші аналогові оптичні диски отримав Девід Грегг (DP Gregg) в 1961 і 1969 роках. Перший варіант оптичного диску, який працював у пропускному режимі, було виготовлено в лабораторних умовах у 1958 році. В 1969 році з'явилися відбивні диски (Philips).

Компакт-диски були розроблені як носії музичних записів приблизно часової тривалості (CD-DA – «digital audio», Philips і Sony, 1979-1981рр.). З 1985р. подібні диски стали використовуватися для зберігання комп'ютерної інформації (програми, бази даних, тощо). Нові диски мали високу надійність і довговічність, що дозволяло використовувати їх для архівного зберігання інформації. Тогочасні лазерні диски дуже відрізнялись від сучасних компакт-дисків, що застосовуються в комп'ютерній техніці

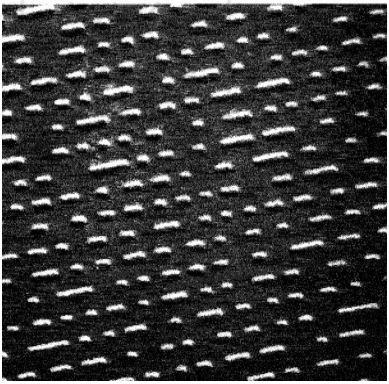


Рис. 3.6. Вигляд доріжок оптичного компакт-диску при збільшенні

Компакт-диск – це полікарбонатна, прозора для широкого діапазону світлових хвиль, пластина діаметром 120*мм* (4,72 дюйми) або 80*мм* (3,1 дюйми) і товщиною 1,2*мм*, в центрі якої розміщений отвір діаметром 15*мм*. На цій штампованій або литій основі розміщена одна спіральна доріжка, яка починається на внутрішній і закінчується на зовнішній частині диску. Крок спіралі становить 1,6*мкм*. Інформація записується на доріжку у вигляді виступів на ній (штрихи, піти, pits) і плоских поверхонь між ними (площадки, ленди, lands) (див. рис. 3.6) . Висота пі-

Національний університет водного господарства та природокористування

та, його ширина і довжина, довжина ленда, а також відстань між витками доріжки визначаються стандартом компакт-диску. Зазвичай компакт-диск має від трьох до шести різних шарів. Для відбиття зерного променя тильна сторона диску покривається ваючим шаром речовини, найчастіше – алюмінієм.

До полімерних матеріалів, з яких виготовляються компакт-диски, висуваються дуже жорсткі вимоги:

- прозорість;
- ізотропність;
- стабільність і однорідність механічних та оптичних властивостей;
- стійкість до механічних, теплових, світлових впливів.

Вимоги посилювалися при переході від CD до DVD і далі до BD; послідовна зміна форматів дисків вимагала розробки не тільки нових напівпровідникових лазерних джерел, а й нових марок полікарбонату, здатних до швидкого формування оптично однорідних пластин без помітних залишкових напружень, що можуть викликати оптичну анізотропію (подвійне променезаломлення). Сучасний прогрес у полімерній оптиці багато в чому обумовлений рівнем розвитку технології зберігання інформації на оптичних дисках.

Національний університет водного господарства та природокористування

3.3. Принцип зчитування інформації з компакт-диску

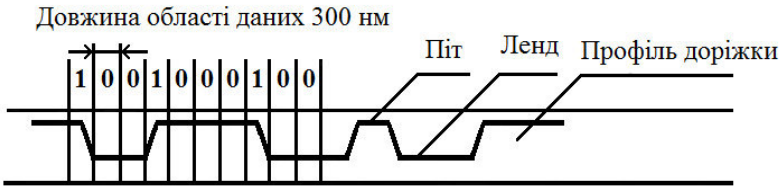


Рис. 3.7. Перехід від піта до ленда

Принцип зчитування інформації з компакт-диску базується на явищі інтерференції світлових променів [3]. При зчитуванні інформації з компакт-диску лазерний промінь проходить крізь прозору полікарбонатну основу і сканується вздовж доріжки диску. Відбитий від доріжки промінь фіксується фотоприймачем і перетворюється в електричний сигнал. Глибина ленда доріжки по відношенню до піта має важливе значення для зчитування інформації. Вона по-

Національний університет водного господарства та природокористування

винна дорівнює 1/4 довжини хвилі лазерного променя. Відбитий від ленда промінь накладається на падаючий промінь у фотоелектричному елементі (фотоприймач, рис.3.17). В результаті інтерференції ці промені взаємно гасять один одного (згідно формули 3.7), фотоприймач не отримує світлової енергії і не перетворює її в електричний сигнал. В результаті такого сканування доріжки в фотоприймач буде надходити світло, відбите від пітів, яке буде уриватися на час проходження лазера над лендом (ленд стає «чорним», тобто не відбиваючим світло). Фотоприймач сприймає систему таких спалахів, перетворючи їх в логічні «1». Перехід від піта до ленда (кінець спалаху світла) і від ленда до піта (спалах світла) відповідає логічній «1». Той час, який лазер проходить над пітом чи лендом (без переходу між ними), при зчитуванні заповнюється логічними «0» (див. рис. 3.7).

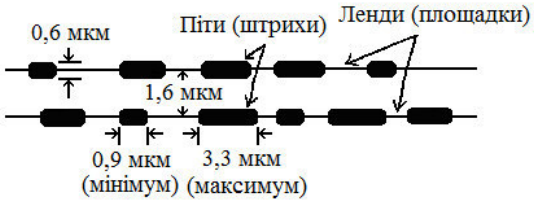


Рис. 3.8. Фізичні параметри CD-ROM

Для прикладу визначимо висоту піта CD. Довжина хвилі лазера в вакуумі для зчитування даних з цього диску становить λ_0=780*нм*. Оскільки промінь проходить через полікарбонатну основу диску з показником заломлення $n = 1{,}55$, то висота піта становить:

$$d = \frac{\lambda_0}{4n} = \frac{780}{4 \cdot 1{,}55} = 125\,нм\,. \qquad (3.9)$$

На даний час найбільш поширеними стандартами оптичних технологій запису інформації є:

1. CD (CD-ROM, CD-R, CD-RW);
2. DVD (DVD-ROM, DVD-RAM, DVD-R, DVD-RW, DVD+R, DVD+RW);
3. BD (BD-ROM, BD-R, BD-RE).

Формати оптичних дисків описані в так званих «райдужних книгах» (англ.: Rainbow books) [3].

Національний університет водного господарства та природокористування

3.4. Технології запису даних на компакт-диски

3.4.1. Технології запису інформації на CD

CD-ROM

CD-ROM (англ.: Compact Disk Read Only Memory – пам'ять тільки для читання на компакт-дисках). Він є найбільш поширеним оптичним накопичувачем. Термін CD-ROM відноситься як до самих компакт-дисків, так і до пристроїв, в яких інформація зчитується з компакт-диска. Фізичні параметри CD-ROM, а також його доріжок, пітів і лендів показані на рис. 3.8. Довжина пітів і лендів визначається системою кодування інформації. В прийнятій на даний час системі кодування Ріда - Соломона прийнято, що між двома логічни-

Рис. 3.9. Принцип запису на CD-ROM

Національний університет водного господарства та природокористування

ми «1» на диску може бути від двох до десяти «0».

Розглянемо принцип запису інформації на CD-ROM (часто в побуті користуються назвою – ліцензійний диск).

В таких дисках система пітів і лендів на доріжці диску створюється методом заводського штампування [3].

Цей процес проходить наступні стадії (див. рис. 3.9):

1. На скляний диск наноситься шар світлочутливої речовини – фоторезистивний шар товщиною 150*мкм* і відпалюється при температурі 80°*С* протягом 30*хв*.

2. За допомогою лазера на поверхні фоторезистивного шару формують ділянки, які внаслідок фоточутливості змінюють кристалічну будову матеріалу.

3. Скляна пластинка обробляється 10% розчином NaOH, який розчиняє експоновані лазером ділянки, формуючи на поверхні фоторезистивного шару впадини.

4. За допомогою гальванопластики диск покривається шаром нікелевого сплаву. В результаті утворюється металевий майстер-диск. Такий диск називається *батьківським диском (father)*.

5. Металевий майстер-диск відділяється від скляної основи. Його можна використовувати для виготовлення невеликих партій дисків, оскільки він дуже швидко зношується. Тому з нього методом гальванопластики створюють ще декілька негативних копій, які називаються *материнськими дисками (mother)*. Вони використовуються для тиражування позитивних металевих копій (синівських дисків). Це дозволяє штампувати велику кількість дисків без повторення процесу формування скляного майстер-диску.

6. Один із синівських дисків розміщується в основі, в якій знаходиться полікарбонатна маса близько 18 грам в розплавленому вигляді при температурі 350°*С*. В результаті такого штампування утворюється пластиковий диск з системою виступів і западин.

7. На цей диск шляхом напилення наноситься шар алюмінію товщиною 0,05-0,1*мкм* для створення відбивної для світла поверхні.

8. Для захисту алюмінієвої плівки від окислення зверху наноситься шар акрилового лаку (6-7*мкм*) і етикетка. Одного майстер-диска вистачає на виготовлення 1-3000 CD–ROM дисків.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

CD-R

CD-R (англ.: Compact Disk Recordable – компакт-диск з можливістю одноразового запису). Початок випуску – 1988 рік. Принцип запису даних базується не на заводському штампуванні пітів і лендів на доріжці диску, а на зміні оптичних властивостей робочого шару, що наноситься на полікарбонатну основу. В якості такого робочого фоточутливого шару використовують органічні сполуки – ціаніни (cyanine), азобарвники або фталоціаніни (phtalocyanine). Колір диска визначається кольором ціаніну (зелений), азобарвника (синій) або фталоціаніну (золотистий). Відбивна здатність даних сполук складає 70% (близько до відбивної здатності золота). Властивість цих матеріалів змінювати коефіцієнт відбивання світла лежить в основі запису на CD-R. Під дією лазерного променя (відносно великої потужності) вони темніють і перестають пропускати крізь себе лазерний промінь. На доріжці диску утворюється система темних і світлих ділянок, які є тими ж самими псевдопітами і псевдолендами для лазерного променя. В якості відбиваючих світло матеріалів використовують золото та срібло, рідше – алюміній і сплави. На даний час експлуатуються диски CD-R наступних ємностей (див. табл. 1).

Національний університет водного господарства та природокористування

Таблиця 1

Ємності дисків CD-R

Тип	**Тривалість, хвилини**	**Секторів**	**Макс. розмір даних**	
			байти	***МіБ***
650*МБ*	74	333 000	681 984 000	650,3
700*МБ*	80	360 000	737 280 000	703,1
800*МБ*	90	405 000	829 440 000	791,0
900*МБ*	99	445 500	912 384 000	870,1

Безумовною ***перевагою CD-R над CD-ROM*** є матеріал світловідбивного шару. Оскільки він, в основному, виготовляється із золота і срібла, менш здатних до окислення, ніж алюміній, який застосовується у більшості штампованих дисків, CD-R тьмяніють повільніше. Однак, ***основним недоліком дисків CD-R*** є чутливість робочого шару до світла. Від дії світла наступає деструкція і окислення ціаніну і фталоціаніну, хоча останній менш схильний до цих процесів.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

CD-RW

CD-RW (англ.: Compact Disc ReWritable – компакт-диск, з можливістю перезаписування).

Основою запису і зберігання даних на дисках CD-RW є гія зміни фазового стану речовини (phase-change). При запису і танні з дисків використовуються різні оптичні властивості деяких речовин (Ag-In-Sb-Te, Ge-Sb-Te, Ge-Sb-Te-N, Ge-Sn-Sb-Te, Ge-Bi-Sb-Te, Ge-Bi-Te або Ge-In-Sb-Te), в залежності від того, знаходяться вони в кристалічному стані чи аморфному. Як було зазначено в розділі 1, халькогеніди (сплав Ge-Sb-Te із стехіочним складом 2:2:5) прозорі для червоного та інфрачервоного світла в кристалічному стані і не прозорі – в аморфному. Крім того, вони характеризуються великою оптичною контрастністю кристалічного і аморфного станів. Зміну вого стану такої речовини можна здійснювати шляхом вання відповідної ділянки на диску відносно ним променем лазера. Оскільки для запису даних на сучасні CD-RW необхідна дуже швидка кристалізація, то найкраще для цього підходять саме сплави Ge, Sb і Te, у яких $t_{крист}$<100*нс*. Також такі халькогеніди мають прийнятні для технології температури кристалізації і плавлення ($T_{крист}$=150-200°*C*, $T_{плавл}$=600°*C*). Будова CD-RW показана на рис 3.10. На CD-RW диску робочий шар Ge-Sb-Te знаходиться між двома шарами буферного матеріалу ZnS-SiO_2. Цей матеріал характеризується високою тугоплавкістю і прозорістю в заданому діапазоні довжин хвиль.

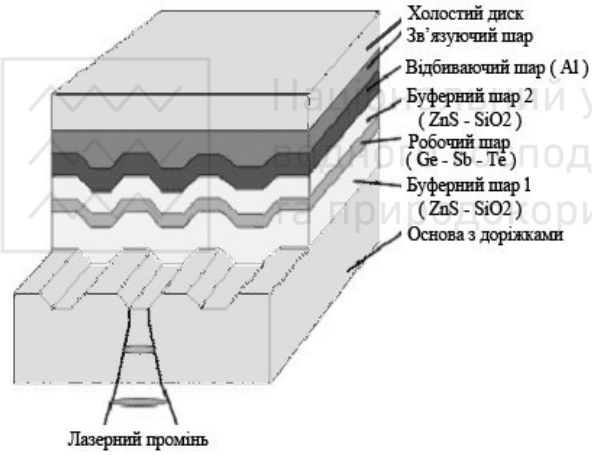


Рис. 3.10. Будова CD-RW

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Рис. 3.11 Графік залежності температури робочого шару від часу нагрівання і охолодження диску при запису

Рис. 3.12. Графік залежності температури робочого шару від часу нагрівання і охолодження диску при стиранні

Для запису даних на диск використовується гатоімпульсна стратегія запису. Розглянемо технологію запису на CD-RW (див. рис. 3.11). На графіку зображена залежність температури робочого шару (Ge-Sb-Te) від часу нагрівання і охолодження диску.

При подачі короткочасного імпульсу лазера високої потужності (P=10÷15*мВт*) на певну ділянку доріжки, температура її зростає і робочий шар в цьому місці переходить в рідкий стан. При закінченні дії імпульсу лазера і швидкому охолодженні диска температура цієї точки робочого шару різко падає і стає меншою температури кристалізації ($T<T_{крист}$). Таке різке охолодження призводить до того, що структура кристалічної решітки робочого шару у цьому місці доріжки не може відновитись і він залишається в аморфному стані.

Таким чином, при записі на CD-RW диск, на ньому формуються ділянки, на яких робочий шар є в кристалічному, прозорому для світла стані, і аморфні ділянки, які є непрозорими для інфрачервоного світла.

Національний університет водного господарства та природокористування

Так формуються на поверхні піти і ленди.

При стиранні інформації з CD-RW диску імпульс лазерного променя подається меншої потужності (0,5-1*мВт*), такої, щоб він розігрівав робочий шар до температури, яка була б більшою за $T_{крист}$, але меншою $T_{плавл}$ ($T_{крист}<T<T_{плавл}$) (див. рис. 3.12, рис. 3.13). При розігріві, атоми робочого шару відновлюють кристалічну структуру речовини. Така відбудова кристалічної решітки носить назву «відпалення». В результаті, речовина робочого шару відновлює свої оптичні властивості.

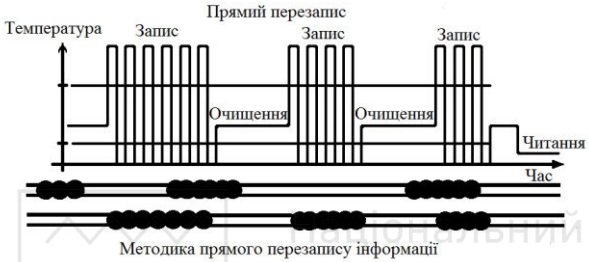


Рис. 3.13. Перезапис на диск

Завдяки коротким та потужним імпульсам запису і довгим та слабким імпульсам стирання перезапис на CD-RW можна проводити прямо поверх старого запису (див. рис. 3.13).

3.4.2. Технології запису даних на DVD

Перші DVD (англ.: Digital Versatile Disk – цифровий багатоцільовий диск) з'явились у 1996 році в Японії. Вони називались MMCi або MMCD і розроблялися фірмами Philips і Sony. Паралельно фірмою Toshiba розроблявся диск «Super Disk». Для уникнення боротьби між різними форматами фірма IBM викупила патенти на ці диски і на їх основі розробила версію DVD диску. За структурою даних DVD бувають трьох типів:

1. DVD-Video, на які записуються високоякісне зображення та звук не дуже високої якості.
2. DVD-Audio, на які записуються звук дуже високої якості.
3. DVD-Data, на які записуються текстові дані та відео і аудіо середньої якості.

DVD як носії бувають наступних типів:

Національний університет
водного господарства
та природокористування

1. DVD-ROM – диски, виготовлені в заводських умовах методом штампування полікарбонатної основи.
2. DVD-RAM – диски багаторазового запису з довільним доступом.
3. DVD-R/RW – диски одноразового і багаторазового запису.
4. DVD+R/RW – диски одноразового і багаторазового запису.

DVD-ROM

DVD-ROM виготовляються за тією ж технологією, що і CD-ROM.

DVD-RAM

DVD-RAM – відноситься до DVD, які перезаписуються, і є розробкою фірми Panasonic. Вони можуть перезаписуватись до 100000 разів, на відміну від DVD-RW і DVD+RW, які можуть перезаписуватись всього до 1000 разів (лазерне опромінення призводить до деформації диска). За цим показником DVD-RAM можна порівняти з жорсткими дисками ПК. Перші DVD-RAM з'явились в 1998 році ємністю 2,6*ГБ* в захисних картриджах. Нині вони випускаються без захисної оболонки ємністю 9,4*ГБ* для двосторонніх дисків. DVD-RAM дисководи читають DVD-відео, DVD-ROM і всі види CD. Головним ***недоліком*** DVD-RAM є те, що в цьому форматі більшість побутових DVD-програвачів не працює.

DVD+R/RW.

Цей формат виник внаслідок монополізації ринку DVD-дисків консорціумом компаній «DVD-Forum», який почав одноосібно розробляти диски формату DVD-R і DVD-RW і встановив високу ціну ліцензії на виготовлення дисків цих форматів. Низка фірм об'єднались між собою у компанію «DVD+RW Alians», яка почала розробляти свій стандарт DVD. Диски DVD+R/RW з'явилися в у 2002 році. Принцип запису, стирання і перезаписування інформації у них подібний до DVD-R і DVD-RW. Відмінність між ними полягає в тому, що DVD+R використовують, подібно CD-R, частотну модуляцію доріжки, а в DVD-R частота модуляції спіральної доріжки постійна і адресація лазерного променя здійснюється за допомогою вкраплених при виготовленні між доріжками пітів; в DVD+R застосовується надійніша обробка помилок. Конкуренція форматів

Національний університет водного господарства та природокористування

+R і -R привела не до витіснення якогось з них, а до їх мирного співіснування; сучасні апаратні і програмні засоби здатні працювати з обома форматами.

DVD-R/RW.

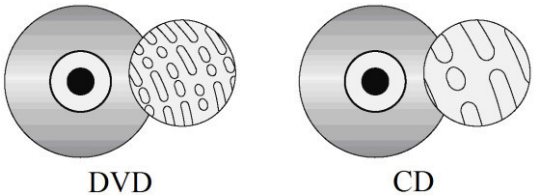


Рис. 3.14. DVD та CD-диски

За принципом запису даних DVD-R/RW не відрізняється від CD-R/RW, крім довжини хвилі лазера, геометричних параметрів пітів, лендів і доріжки (див. рис. 3.14). Крім того, в якості матеріалу фоточутливого шару DVD-R використовуються азоціаніни, ціаніни та хелати металів.

Оскільки довжина хвилі лазера для читання інформації з DVD становить 650*нм*, то висота піта для диска дорівнює 105*нм*.

На дисках DVD на відміну від CD можливий дворівневий запис інформації. Це реалізовано у наступних форматах: **DVD-5, DVD-9, DVD-10, DVD-18.**

Національний університет водного господарства та природокористування

DVD-5

DVD-5 – це перша ринкова версія DVD: одношаровий односторонній диск ємністю 4,7*ГБ*. Він складається з двох з'єднаних між собою основ. Одна з них містить записаний шар (називається шаром 0), інший шар – порожній. Нульовий шар покритий алюмінієвою відбивною плівкою товщиною 55*нм*, як і для CD-ROM. Структура DVD-5 показана на рис. 3.15.

DVD-9

DVD-9 являє собою односторонній диск ємністю 8,5*ГБ* з двома робочими шарами (шар запису 0 і шар запису 1). Робочі шари знаходяться з однієї сторони диску, з іншої сторони – пуста основа (див. рис.3.15). Зовнішній шар 0 покритий напівпрозорою плівкою золота або його сполуками (альтернатива золоту – кремнієві або срібні сплави). Відбивна здатність такої плівки близько 30%. Зовнішня сторона шару 1(сторона 0) має алюмінієве покриття.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

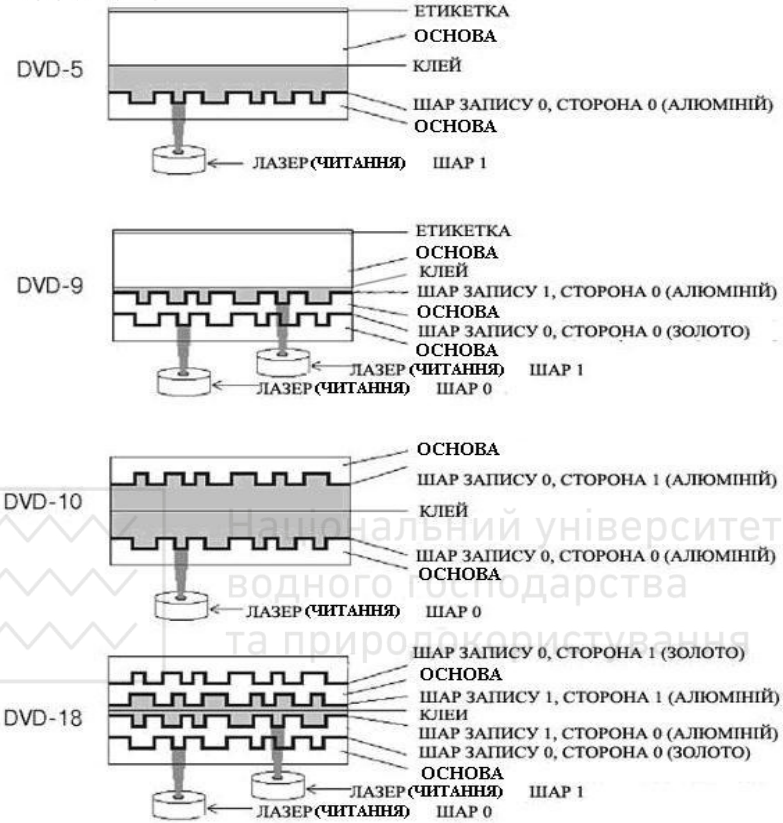


Рис. 3.15. Структура дисків DVD різних форматів

Для зчитування інформації з обох робочих шарів використовують один лазер зі змінним фокусуванням променя. Фокусуючи промінь лазера на шар 0 (сторона 0), або на шар1 (сторона 0), зчитують інформацію з одного, або іншого робочого шару.

DVD-10

DVD-10 – це одношаровий двосторонній диск ємністю 9,4 ГБ. За принципом запису, це подвійний DVD-5. Два диски, покритих металевими плівками, склеєні між собою неробочими поверхнями. Записаний шар (нульовий шар на кожній стороні) зазвичай має алюмінієве покриття. Для зчитування інформації з обох сторін використовується один лазер. Структура цього диску показана на рис. 3.15.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

DVD-18

DVD-18 – це двошаровий двосторонній диск ємністю 17,1 ГБ. Структура його така ж, як у DVD-9. Це фактично два DVD-9 склеєних неробочими поверхнями. Принципова структура показана на рис. 3.10.

Відбивна здатність одношарового диску становить 45-85%, двошарового – 18-30%. Різні відбивні здатності шарів компенсуються схемою автоматичного регулювання підсилення (АРП).

Крім цих найбільш поширених форматів DVD зустрічаються DVD-14 (один шар на одній стороні диску, два – на іншій), який має ємність 13,2 ГБ і диски, діаметром 80*мм* форматів DVD-1, DVD-2, DVD-3 і DVD-4.

Як бачимо, в даний час існують лише двошарові диски DVD. Створення багатошарових дисків гальмується проблемою інтерференції відбитих когерентних променів від різних відбивних шарів,

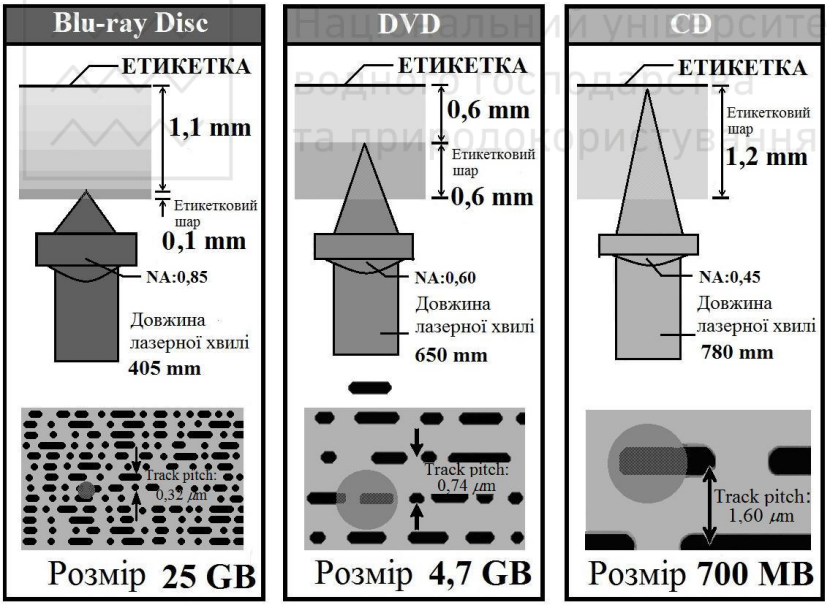


Рис.3.16. Порівняльна характеристика CD, DVD та BD

що значно ускладнює будову пристроїв читання для розшифровування відбитих сигналів, а значить значного їх подорожчання.

Національний університет водного господарства та природокористування

3.4.3. Технології запису даних на BD

BD (англ.: Blu-ray Disk – диск з використанням синього променя) поступив у продаж в 2002 році. У дисках BD в якості записуючого і зчитуючого променя використовується лазерний промінь з довжиною хвилі 405*нм*. При такій довжині хвилі висота піта становить 0,065*мкм*, що висуває високі вимоги до якості поверхні диску. За принципом запису і читання інформації BD не відрізняються від CD та DVD.

Диски Blu-ray, які є сьогодні в продажу, містять максимум два шари даних по 25*ГБ*, при цьому верхній шар пропускає близько половини світлового потоку. В 2009 році фірма TDK повідомила про створення записуваних Blu-ray дисків ємністю 320*ГБ*. У новому диску кількість шарів з даними збільшено до десяти, а прозорість верхнього шару складає понад 90 відсотків. Найнижчий записуваний шар (L0) виготовлений з неорганічного кремнієво-мідного сплаву. Для інших записуваних шарів (L1-L9) використано матеріал на основі пероксиду вісмуту і діоксиду германію.

BD бувають трьох типів:

1 BD-ROM – диски, виготовлені в заводських умовах методом штампування полікарбонатної основи;

2 BD-R – диски одноразового запису;

3 BD-RE – диски багаторазового запису.

Порівняльна характеристика CD, DVD та BD показана на рис. 3.16 і приведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Порівняльна характеристика CD, DVD та BD

Параметр	CD-ROM (650*MiB*)	CD-ROM (700*MiB*)	DVD-ROM	BD-ROM
Діаметр, *мм*	120	120	120	120
Товщина, *мм*	1,2	1,2	1,2 (по 0,6*мм* на шар)	1,2
Кіл-сть робочих шарів	1	1	1, 2, 4	1, 2, 3, 4 , 8, 10
Крок доріжки, *мкм*	1,6	1,48	0,74	0,32

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Продовження таблиці 2

Довжина хвилі лазера, *нм*	780, інфрачервоний	780, інфрачервоний	650, червоний	405, синьо-фіолетовий
Ємність, *ГБ*	0,65	0,7	4,7	25
Кількість витків на 1*мм*	625	676	1351	Немає даних
Загальна довжина доріжки, *м*	5772	6240	11836	Немає даних
Ширина піта, *мкм*	0,6	0,6	0,4	0,16
Висота піта, мкм	0,125	0,125	0,105	0,065
Мінімальна довжина піта, *мкм*	0,9	0,9	0,4 (одношаровий диск)	0,149
Максимальна довжина піта, *мкм*	3,31	3,31	1,87 (одношаровий диск)	Немає даних
Кількість секторів	333000	360000	2292897 (одношаровий диск)	Немає даних
Довжина біта, *мкм*	0,67	0,67	0,1333 (середня довжина для одношарового диску)	Немає даних
Числова апертура лінзи лазера	0,45	0,45	0,60	0,85
Діаметр плями лазера, *мкм*	2,11	2,11	1,32	0,58
Щільність інформації на шар, *біт/мкм*^{2}	0,6	0,7	4	22

* – 1*МіВ* дорівнює 1048576*байт*.

Національний університет водного господарства та природокористування

3.4.4. HD DVD

Формат HD DVD (англ.: Hight-Definition DVD – DVD високої щільності) є розробкою компаній Toshiba, NEC і Sanyo. Для запису використовується лазер з довжиною хвилі, як і для BD, але ці формати несумісні. Планується випуск наступних різновидів дисків HD DVD: HD DVD-ROM, HD DVD-R, HD DVD-RW і HD DVD-RAM. За принципом запису цей формат аналогічний дискам BD, поступаючись ємністю. Одношаровий HD DVD вміщує 15*ГБ*, двошаровий – 30*ГБ*, тришаровий – 45*ГБ* інформації. На сьогодні формат BD знаходить більше застосування ніж HD DVD.

3.5. Принцип роботи оптичного приводу читання/запису

Оптичний привід читання/запису складається з плати електроніки, шпиндельного двигуна, системи головок читання/запису оптичних компакт-дисків і системи завантаження диску.

На платі електроніки розміщені всі керуючі схеми приводу, інтерфейс з контролером комп'ютера, роз'єми інтерфейсу і виходу звукового сигналу. Більшість приводів використовує одну плату електроніки, проте в деяких моделях окремі схеми виносяться на допоміжні невеликі плати.

Шпиндельний двигун служить для приведення диска в обертання з постійною або змінною лінійною швидкістю. Зазвичай диск обертається з постійною лінійною швидкістю. Це означає, що шпиндель змінює частоту обертання залежно від радіуса доріжки, з якої в даний момент зчитує інформацію оптична головка. При переміщенні головки від зовнішнього до внутрішнього радіуса диск повинен збільшити швидкість обертання приблизно вдвічі, тому від шпиндельного двигуна потрібна хороша динамічна характеристика. Двигун використовується як для розгону, так і гальмування диску.

На осі шпиндельного двигуна закріплена підставка, до якої після завантаження притискається диск. Поверхня підставки звичайно покрита гумою або м'яким пластиком для усунення проковзування диску. Притискання диску до підставки здійснюється за допомогою шайби, розташованої з іншого боку диску; підставка і шайба містять постійні магніти, сила взаємодії яких притискає шайбу через диск

Національний університет водного господарства та природокористування

до підставки. Зазвичай для цього використовуються спіральні або плоскі пружини.

Система оптичних головок складається з двох головок і системи їх переміщення. У головках читання/запису розміщені два лазерних випромінювачі на основі лазерних світлодіодів для довжин хвиль 780 і 650*нм* (для CD та DVD), системи фокусування, фотоприймач і попередній підсилювач.

Рис. 3.17. Будова оптичної головки читання/запису

Алгоритм роботи системи оптичної головки читання/запису:

Малопотужний лазерний промінь пройшовши через призму (див. рис. 3.17) і дві фокусуючі лінзи попадає на диск. Серводвигун за командами, які поступають від вбудованого процесора, зміщує лазер до потрібної доріжки диску. При попаданні променя на піти і ленди інтенсивність відбитого променя змінюється. Відбитий від диску промінь фокусується лінзою і знову попадає на призму. Розділювальна призма направляє відбитий промінь на ще одну лінзу, а вона – на спеціальний фотоприймач [4]. В результаті на виході фотоприймача формується електричний сигнал, що за формою повторює інформаційний малюнок на поверхні диску. Дуже важливе значення для головки має числова апертура об'єктива. Вона визначає параметри освітлення і дорівнює:

$$A = n \sin \varphi_{\max}, \tag{3.10}$$

де $\varphi_{\max}$ – максимальний кут заломлення променів в лінзі; n – показник заломлення лінзи. Наприклад, лінза, що використовується в накопичувачах CD-ROM, збирає пучок світла під кутом 26,7°, тому A

Національний університет водного господарства та природокористування

для неї дорівнює 0,45. Лінза накопичувача DVD збирає пучок світла

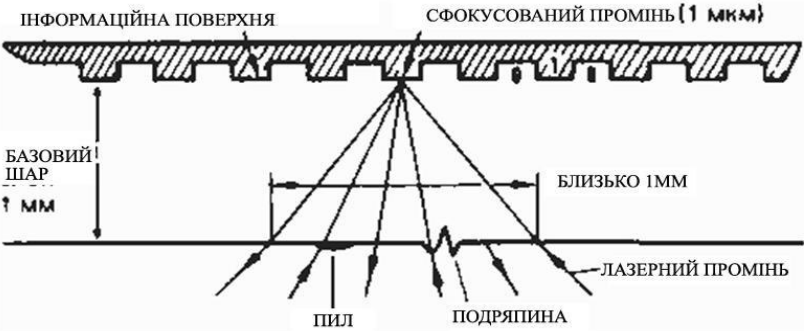


Рис. 3.18. Фокусування променя на робочу поверхню

під кутом 36,9°, при цьому апертура становить 0,60, в накопичувачах BD світлові промені виходять з лінзи під кутом 58,2° і апертура дорівнює 0,85 (див. рис. 3.17). Лінзи з більш високою числовою апертурою дають можливість створювати зображення з більшою роздільною здатністю. Апертура також визначає обмеження інформаційної ємності оптичних дисків. Інформаційний елемент, що записується (зчитується) не може бути меншим половини діаметра *d* дифракційної плями (кружка Ері):

$$d = 1{,}22\lambda / A, \qquad (3.11)$$

де λ – довжина хвилі світла.

Об'єктив лазера фокусує промінь на робочій поверхні диску. Глибина різкості складає не більше 2*мкм*. На поверхні прозорої основи CD лазерний промінь розфокусований. Діаметр плями променя складає близько 1*мм*, а це приводить до того, що частинки пилу, відбитки пальців або подряпини на поверхні CD не можуть бути «прочитаними» лазерним променем (див. рис. 3.18.).

Особливості оптичного способу зчитування даних:

1. Успішне зчитування залежить від стану поверхні компакт-дисків. Подряпини, пил і забруднення ускладнюють, а інколи і роблять неможливим зчитування з них інформації.

2. Застосування лазера ІЧ-діапазону для формату CD дозволяє виготовляти «темні» диски. Вони прозорі для ІЧ – діапазону випромінювання.

Національний університет водного господарства та природокористування

3.6. Магнітооптичні (МО) технології в комп'ютерній техніці

Перші магнітооптичні диски (CD-MO, англ.: Compact Disk — Magneto Optical) з'явились у 1988 році. Вони об'єднали в собі компактність гнучких дисків і дискет, швидкість середнього жорсткого диску, надійність компакт-диску і достатню, на той час ємність. Але широкому поширенню CD-MO заважає відносно висока вартість і конкуренція сучасних жорстких дисків. В порівнянні з сучасними жорсткими дисками, вони більш повільні і поступаються їм максимальною місткістю. Це робить неможливим застосування CD-MO в якості вінчестерів. Проте CD-MO диски мають великі перспективи як вторинні накопичувачі для резервного зберігання інформації.

Принцип роботи CD-MO-дисків

Принцип роботи CD-MO накопичувача базується на суміщенні магнітного і оптичного принципів зберігання інформації [5]. *Запис даних* відбувається на магнітний робочий шар диску *магнітним полем* головки *за допомогою променя лазера* відносно великої потужності. Цей метод теплового магнітного запису (англ.: Heat Assisted Magnetic Recording – HAMR) докладно описано в розділі 5. В сучасних CD-MO накопичувачах для запису використовується два цикли: цикл стирання і цикл запису. За цикл стирання диску, або його ділянки, лазер нагріває послідовно всю ділянку. Магнітне поле головки намагнічує доріжку вибраної ділянки в одному певному напрямку, що відповідає логічному «0». Таким чином, вся вибрана ділянка диску переводиться в стан послідовності «0». В циклі запису для запису «1» в необхідних місцях диску вмикається лазер і це місце перемагнічується в зворотно-

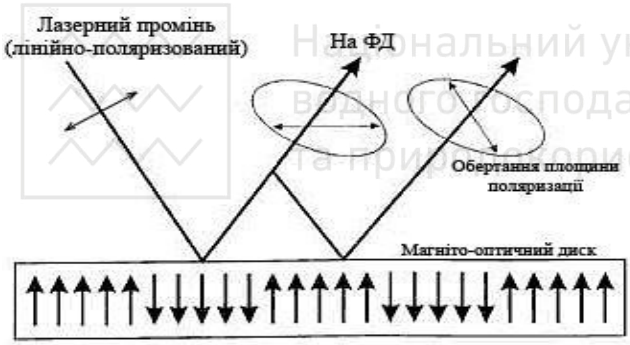


Рис. 3.19. Повертання площини поляризації променя головки зчитування після відбиття від поверхні МО-диска

Національний університет водного господарства та природокористування

му напрямку. Подвійний цикл запису суттєво знижує його швидкість. Але розігрів робочої поверхні диску променем лазера щує надійність зберігання даних, завдяки малій імовірності перемагнічення ділянки.

Принцип читання інформації з CD-MO базується *на магнітооптичному ефекті.* Він полягає у впливі намагнічення середовища на інтенсивність і поляризацію світла, відбитого від його поверхні. Цей ефект досить помітний для речовин зі здатністю до значного намагнічення і з високим коефіцієнтом поглинання, тобто для металічних феромагнетиків. Якщо плоскополяризований промінь відбивається від поверхні намагніченого феромагнетика, то він стає еліптично поляризованим, при цьому велика вісь еліпса поляризації повертається на деякий кут по відношенню до площини поляризації падаючого світла (див. рис. 3.19).

Відбиваючим елементом для лазерного променя, що повертає площину його поляризації, у випадку CD-MO є намагнічена при запису точка поверхні робочого шару. Фотоприймач (ФП) оптичної головки зчитування сприймає відбитий промінь і аналізує величину повороту площини поляризації променя. Таким чином, визначаєть-

Національний університет водного господарства та природокористування

Таблиця 3

	Магнітооптика	Phase-change
Механізм запису	Зміна напряму вектора намагнічення	Перехід між аморфним і кристалічним станом
Роль світла	Локальний розігрів	Локальний розігрів
Механізм читання	Зміна поляризації відбитого світла за рахунок магнітооптичного ефекту	Зміна інтенсивності відбитого світла із-за відмінності коефіцієнтів пропускання робочого шару в кристалічному і аморфному станах
Характерні температури	Точка Кюрі (200-300)°*C*	≈ 600°*C* плавлення ≈ 200°*C* кристалізація
Число циклів	10^6	10^3 (CD-RW) 10^5 (DVD-RAM)

Національний університет водного господарства та природокористування

ся напрямок намагнічення ділянки диску і значення біта інформації на цій ділянці.

При читанні використовується лазерний промінь невеликої інтенсивності, що не приводить до нагріву поверхні і її деформації.

В таблиці 3 порівнюються основні властивості магнітооптичного запису і запису за рахунок зміни фазового стану (phase-change).

Перспективи CD-MO - технологій

Основні перспективи CD-MO - технологій пов'язані зі збільшенням швидкості запису даних. Це може бути реалізовано технологією зміни фазового стану (подібно до реалізованої у CD-RW та DVD-RW). У найновіших розробках напрямок намагнічення ділянки робочої поверхні можна змінювати за декілька наносекунд.

3.7. Тривалість зберігання інформації на компакт-дисках

Повсякденний досвід використання CD-R показує, що час експлуатації таких дисків становить: 2-3 роки – при акуратній роботі з ними і 1 рік – при інтенсивній роботі з неакуратним поводженням (удари, згини, дія тепла, яскравого світла тощо). Очевидно, що реальний час зберігання інформації на оптичних дисках залежить від стійкості складових їх елементів – матеріалів відбиваючого та інформаційного шарів, полімерної основи, лакового покриття – до природного старіння і впливу зовнішніх чинників (нагрівання, ультрафіолетове (УФ) випромінювання, вологість, окислення). Мабуть, головною умовою збереження інформації є якісне виготовлення диска, що оберігає його внутрішні елементи від контакту з навколишнім середовищем. Хоча більшість дисків стають непридатними вже через декілька років після їх виготовлення, в цілому конструкція дисків і корекція помилок забезпечують збереження інформації протягом ще декількох років навіть при помітному руйнуванні елементів диску. На рис. 3.20 приведена мікрофотог-

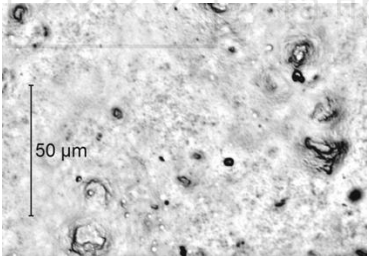


Рис. 3.20. Мікрофотографія зруйнованої корозією ділянки відбиваючого шару CD-R

Національний університет водного господарства та природокористування

рафія ділянки робочого шару диску CD-R, видиме руйнування якого корозією не завадило інформації залишитися доступною для ня через 10 років після запису.

Виробники дисків вказують термін їх служби в 50-200 років; часто ці оцінки ґрунтуються на екстраполяції даних по деградації окремих елементів дисків, отриманих за відносно короткий час при підвищених температурах.

З відомих фоточутливих шарів найвищу стійкість до УФ-випромінювання і дії тепла виявляє фталоціанін. За роки широкого вжитку оптичних дисків матеріали фоточутливих шарів були значно покращені і їх стійкість до шкідливих впливів більш не є критичним фактором. Відбиваючий (дзеркальний) шар дисків виготовляється з алюмінію, золота, срібних сплавів. Золото є найінертнішим матеріалом, але дуже дорогим. Якість срібних сплавів цілком достатня за умови якісного лакового покриття. При недостатньому захисті срібний шар страждає від сірки і кисню. Висока стійкість дзеркального шару забезпечується і його рівномірною дрібнозернистою структурою. Алюмінієвий сплав значно дешевший за срібний, а в іншому виявляє не гірші якості стосовно дисків -ROM та -RW. У дисках -R алюміній не застосовується, оскільки він кородував би, хімічно взаємодіючи з фоточутливим шаром. Дзеркальний шар DVD роблять товщим, ніж у CD, зокрема, з метою поліпшення тепловідведення.

Робочий шар дисків -RW більш стабільний до УФ-випромінювання і дії температури, ніж робочий шар дисків -R, однак і робочі температури, які йому доводиться неодноразово піддаватись, набагато вищі. Шар може бути пошкоджений вологою, якщо вона до нього проникне через недостатньо добре заклеєні краї. Термін використання дисків -RW співмірний терміну використання дисків -R, а часом і перевершує його.

Найлегше пошкоджується тонке лакове покриття дисків. Полікарбонатна основа CD і частково DVD досить товста для запобігання проникнення парів і газів через неї, а механічні пошкодження дисків не позначаються фатально на доступі до інформації (див. рис. 3.18).

Наближення робочого шару до поверхні в CD – DVD – BD (див. рис. 3.16) знижує вимоги до оптичного якості матеріалу основи (компенсуючи посилення вимог, викликаних зменшенням розмірів

Національний університет водного господарства та природокористування

пітів і відстаней між ними), але підвищує чутливість записаної інформації до дефектів поверхні. Диски BD для запобігання виникненню подряпин мають спеціальне тверде покриття, а до його впровадження поміщались в захисні картриджі.

На відміну від дисків CD і BD, відбиваючий і робочий шари DVD розташовані всередині товщини диска, що забезпечує їх кращий механічний та оптичний захист. Проблеми можуть породжуватися шаром клею, що з'єднує половинки диску. Якщо їх з'єднання недостатньо щільне, туди можуть проникати волога, повітря та інші небажані речовини.

Бібліографічний список до розділу 3

1. Загальна фізика. Частина II. (за ред. Олексин Д. І., Орленко В. Ф.): Інтерактивний комплекс навчально-методичного забезпечення [Текст] / – Рівне: НУВГП, 2009. – 457 с.
2. Савельев И. В. Курс общей физики : В 3 т. [Текст] / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1982. – Т. 2.
3. Мюллер С. Модернизация и ремонт ПК, 17-е издание [Текст] / С. Мюллер. – М. : ООО «И. Д. Вильямс», 2008. – 1360 с.
4. Вениаминов А.В. Оптические системы записи, хранения и отображения информации. Учебное пособие. Изд.1 [Текст] / А. В. Вениаминов, В. Н. Михайлов. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2009. – 94 с.
5. Капцов Л. Н. Физика элементов ЭВМ [Текст] / Л. Н. Капцов. – М. : Из-во МГУ, 1983. – 240 с.
6. Сороко Л. М. Основы голографии и когерентной оптики [Текст] / Л. М. Сороко. – М. : Наука, 1971.
7. Новиков М.Г. Голографические диски HVD http://novikovmaxim.narod.ru/statyi/comptech/golograph/hvd.htm
8. Баргатин И. В. Запутанные квантовые состояния атомных систем [Текст] / И. В. Баргатин, Б. А. Гришанин, В. Н. Задков // УФН. – №171 (625).
9. Шимони А. Реальность квантового мира [Текст] / А. Шимони // В мире науки (Scientific American). – 1988. – № 3.
10. Бауместер Д. Физика квантовой информации [Текст]/ Д. Бауместер, А. Экерт, А. Цайлингер. – М. : Постмаркет, 2002.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

РОЗДІЛ 4
ПРИСТРОЇ ВВЕДЕННЯ ТА ВИВЕДЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ

Інформаційний зв'язок між користувачем і комп'ютером забезпечують стандартні пристрої введення та виведення інформації та периферійні пристрої (англ.: peripheral devices), які є тими ж пристроями введення та виведення даних. Автори розуміють умовність такого поділу, але виділяють стандартні пристрої, без яких сучасний процес діалогу між людиною та комп'ютером взагалі неможливий, та периферійні, які є додатковими.

Всі пристрої введення перетворюють інформацію у машинні коди, після чого комп'ютер може її обробляти і запам'ятовувати, а пристрої виведення переводять інформацію з машинних кодів в образи, зрозумілі людині. В якості стандартних пристроїв введення використовуються клавіатура та маніпулятор «миша», в якості стандартного пристрою виведення використовується монітор.

Периферійними або зовнішніми пристроями будемо називати всі пристрої (крім стандартних), які розміщені поза системним блоком комп'ютера, і які задіяні на певному етапі обробки інформації. Насамперед – це пристрої фіксації вихідних результатів: принтери, плотери та специфічні пристрої введення даних: сканери, дигітайзери, web-камери, мікрофони, тощо. Взагалі, поняття «периферійні пристрої» комп'ютера досить умовне. До їх числа можна віднести, наприклад, накопичувач на компакт-дисках, якщо він виконаний у вигляді самостійного блоку і з'єднаний спеціальним кабелем із зовнішнім роз'ємом системного блоку. І навпаки, модем може бути внутрішнім, тобто конструктивно виконаним як плата розширення, і тоді немає підстав відносити його до периферійних пристроїв.

У перших комп'ютерів була клавіатура, але практично не було засобів індикації отриманих результатів. Користувач мав у своєму розпорядженні набір ламп, які могли світитися, або роздруківку результатів роботи на принтері. З розвитком комп'ютерної техніки з'явилися монітори і зараз вони є невід'ємною частиною базової конфігурації персонального комп'ютера.

Розглянемо основні технології виготовлення сучасних пристроїв введення та виведення інформації, а також принцип їх дії, особливості, переваги і недоліки.

Національний університет водного господарства та природокористування

4.1. Пристрої введення інформації

Класифікація основних пристроїв введення інформації показана на рис. 4.1.

4.1.1. Клавіатура

Клавіатура (англ.: keyboard) наразі залишається основним засобом введення інформації в обчислювальні системи і, зокрема, в ПК. Це стандартний клавішний пристрій, призначений для введення алфавітно-цифрових даних та команд керування комп'ютером. Одночасне використання монітора та клавіатури забезпечує найпростіший інтерфейс користувача: за допомогою клавіатури керують обчислювальною системою, а за допомогою монітора отримують результат роботи ПК.

Клавіатура відноситься до стандартних засобів ПК, тому для реалізації її основних функцій не потрібне використання спеціальних системних програм (драйверів). Необхідне програмне забезпечення для початку роботи з клавіатурою знаходиться в мікросхемі ПЗП у складі базової системи введення/виведення BIOS. Саме тому ПК реагує на натиснення клавіш на клавіатурі відразу після включення. Клавіатура стаціонарного ПК, як правило, – це

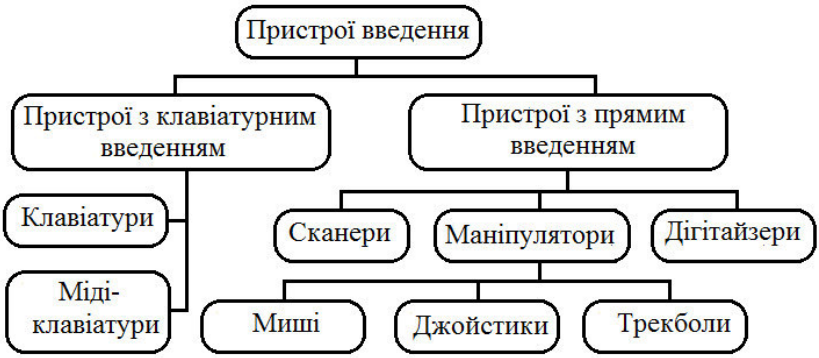


Рис. 4.1. Класифікація основних пристроїв введення інформації

самостійний конструктивний блок, а в портативних ПК вона входить до складу корпуса.

Національний університет водного господарства та природокористування

Клавіатури мають по 101-104 клавіші, розміщені за стандартом QWERTY (у верхньому лівому кутку літерної частини клавіатури знаходяться клавіші Q, W, E, R, T, Y). Відрізняються вони лише незначними варіаціями розташування та форми службових клавішів, а також особливостями, зумовленими мовою, що використовується. Усю сукупність клавішів клавіатури розбито на декілька функціональних груп (див. рис. 4.2):

- алфавітно-цифрові (1);
- спеціальні (2);
- управління курсором (3);

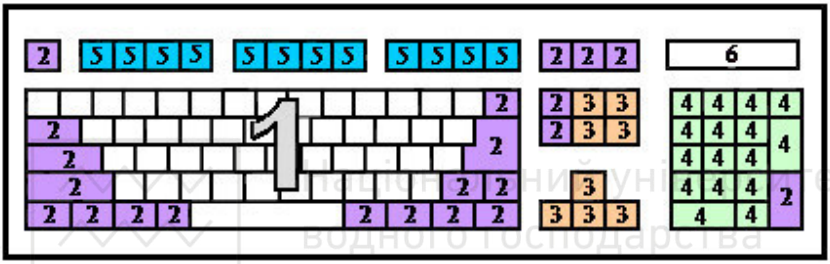


Рис. 4.2. Вигляд клавіатури ПК

- переключення режимів ((цифрові/управління курсором) (4);
- функціональні (5).

Крім того, на клавіатурі знаходиться низка індикаторів (6).

Алфавітно-цифрові клавіші призначені для введення цифр і команд, які набираються по буквах і символах. Кожна клавіша може працювати в двох режимах (регістрах) і, відповідно, може використовуватися для введення декількох символів. Перемикання між нижнім регістром (введення малих символів) і верхнім регістром (введення великих символів) здійснюється при натисканні клавіші <Shift> (нефіксоване перемикання) або за допомогою клавіші <Caps Lock> (фіксоване перемикання).

Група функціональних клавіш складається з 12 клавіш, позначених від F1 до F12, і розташованих у верхній частині клавіатури. Їх функції залежать від конкретної, працюючої у даний момент часу програми, а в деяких випадках і від операційної системи. Жорсткого закріпленого значення клавіш немає.

Національний університет водного господарства та природокористування

Клавіші управління курсором подають команди на пересування курсору по екрану монітора відносно поточного зображення.

Курсором називається спеціальний значок на екрані монітору (рисочка, стрілка, підсвічений прямокутник, хрестик, тощо), який показує місце, де з'явиться введений з клавіатури символ або позначення команди (програми, документу), яку треба виконати. Клавіші управління курсором дозволяють керувати позицією введення даних. Конкретне значення клавіш управління курсором може залежати від програми. Проте найчастіше клавіші зі стрілками служать для переміщення курсору в напрямку вказаному стрілкою або прокручування списків чи тексту по екрану, клавіші <Pg Up> і <Pg Dn> прокручують текст відразу на сторінку вгору або вниз, відповідно, клавіша <Home> встановлює курсор на початок рядка, а клавіша <End> – на кінець.

Спеціальні клавіші використовуються для різноманітних допоміжних завдань, наприклад, зміни регістру, режимів вставки, утворення комбінацій «гарячих» клавіш, тощо. До цієї групи спеціальних клавіш відносяться <Shift>, <Caps Lock>, <Enter>, <Ctrl>, <Alt>, <Esc>, <Del>, <Insert>, <Tab>, <Backspace> та інші.

Група клавіш перемикання режимів (цифрові/управління курсором) дублює дію цифрових клавіш, клавіш керування курсором та деяких службових. Основне призначення даних клавіш – введення цифр, тому клавіші розміщені в порядку, найзручнішому для такої функції. Перехід у режим дублювання клавіш управління курсором і, навпаки, здійснюється натисненням на клавішу <Num Lock>. Крім цього, клавіші додаткової панелі використовуються для введення символів, що мають розширений код ASCII, але не мають відповідної клавіші на клавіатурі.

Клавіатури ПК володіють властивістю повторення знаків, яка використовується для автоматизації процесу введення інформації. Вона полягає в тому, що при тривалому натисненні клавіші починається автоматичне введення символу, який закріплений за нею. При цьому параметрами, які можна налаштовувати є: інтервал часу після натиснення, з завершенням якого починається автоматичне повторення символу та швидкість повторення (кількість знаків за секунду).

Розглянемо принцип роботи клавіатури. Всі клавіші клавіатури підключаються до матриці контактів. Кожне натиснення на клавішу

Національний університет водного господарства та природокористування

замикає контакт, який передає сигнал окремому мікропроцесору, що знаходиться всередині клавіатури. Кожній клавіші або комбінації клавіш присвоєний певний код. При натисканні відповідно до матриці контактів мікропроцесор генерує код натиснутої клавіші. Даний код запам'ятовується в спеціальній області (буфері мікропроцесора) і стає доступним для обробки програмними засобами.

Клавіатури бувають механічні, напівмеханічні та мембранні. Деякі клавіатури при натисканні на клавішу клацають, інші – беззвучні. Основні характеристики, які цікавлять споживача – це (див. табл. 1):

- кількість натискань кожної клавіші до її відмови;
- зручність в роботі і дизайн (ергономічність).

Таблиця 1

Тип клавіатури	Максимальна кількість натискань клавіші	Переваги, застосування
Мембранна	$20 \cdot 10^6$	Практично безшумна, для звичайного користувача
Напівмеханічна	$50 \cdot 10^6$	Для інтенсивного введення текстової інформації
Механічна	$100 \cdot 10^6$	Для довготривалого введення текстової інформації

Національний університет водного господарства та природокористування

Як різновид клавіатури можна згадати **міді – клавіатуру**. Це клавіатура фортепіанного типу і використовується в електронних музичних інструментах.

4.1.2. Маніпулятор типу «мишка»

Маніпулятор типу «мишка» призначений для управління курсором, введення керуючої інформації.

Принцип роботи маніпулятора. «Мишка» — невелика коробочка з кнопками. Історично у перших маніпуляторів всередині знаходились два взаємноперпендикулярних коліщатка або кулька, яка може котитись по поверхні столу при русі маніпулятора. До кульки (див. рис. 4.3, 4) притиснуті два взаємно перпендикулярних ролики (2), які вона обертає. Ролики під'єднані до двох кілець з отворами (3), які повертаючись перекривають інфрачервоне світло між двома парами (5) світлодіодів та фотодіодів (оптопари). Сигнали з оптопар

Національний університет водного господарства та природокористування

передаються в комп'ютер, процесор якого переводить рух маніпулятора в рух курсора на екрані. Кульку можна рухати так званим «скролом» (1) не рухаючи мишку. Це кільце, яке виступає над поверхнею мишки. Мишки бувають одно-, дво-, трьохкнопкові. Вони можуть з'єднуватися з комп'ютером провідником або за допомогою радіопередавачів (безпровідні).

Найважливішими характеристиками мишки зразу ж після її появи було визначено:

- кількість натискань кнопок до їх відмови;
- реакція на рух руки або балістичний ефект;
- роздільна здатність;
- дизайн і зручність у роботі (ергономічність).

Роздільна здатність мишки вимірюється в dpi (англ.: dot per inch – кількість точок на дюйм). Якщо мишка має роздільну здатність 900 dpi і її пересунули на 1*дюйм* (2,53*см*) вправо, то привід мишки отримує через мікроконтролер інформацію про зміщення на 900 одиниць вправо. Нормальна роздільна здатність мишки – від 200 до 900 dpi.

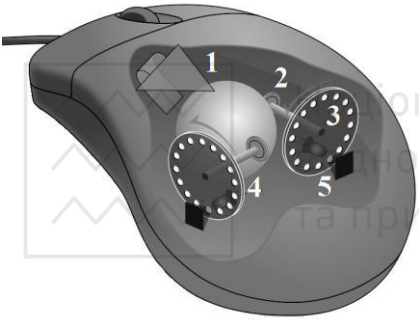


Рис. 4.3. Маніпулятор типу механічна миша

У 1982 році були запропоновані перші **оптичні мишки** (див. рис. 4.4). Всередині них знаходилось два світлодіоди: червоний та інфрачервоний. Вони випромінювали світло, яке після відбиття від спеціального килимка, вловлювалось двома відповідними фотодіодами. На поверхню килимка зі спеціального світловідбивного матеріалу наносилася дрібна сітка з синіх і перпендикулярних до них чорних ліній. Сині лінії поглинали світло червоного світлодіода, а чорні – інфрачервоного. Отже, один фотодіод «помічав» проходження над синіми лініями килимка, а інший – над чорними. В момент проходження над лінією фотодіод генерував відповідний електричний імпульс. Контролер мишки, підраховуючи імпульси, визначав напрямок і величину переміщення. Таким чином килимок виконував функцію, аналогічну тій, яку виконує кулька з коліщатками в механічній ми-

Національний університет водного господарства та природокористування

щі. До переваг перших оптичних мишок можна віднести відсутність рухомих і інерційних частин, надійність у роботі, точність позиціювання. А до недоліків, безперечно, – високої вартості килимка, який вимагав постійного догляду та чистки. До того ж, при втраті або пошкодженні килимка мишка втрачала свою працездатність.

В 1999 році фірмою Agilent Technologies була розроблена своя технологія оптичної навігації, для якої килимок був не потрібний. В цій технології оптична мишка містить мініатюрну фотокамеру, яка робить 1500 знімків за секунду. Вона здатна працювати практично на будь-якій поверхні і складається з чотирьох елементів: оптичного сенсора, лінзи, червоного світлодіода і затискача для світлодіода.

Оптичний сенсор складається з трьох функціональних блоків:

- системи зчитування зображення (IAS);
- цифрового сигнального процесора (DPS);
- послідовного інтерфейсу передачі даних.

Конструктивно оптичний сенсор є мікросхемою, на нижній частині якої розташований об’єктив. За об’єктивом розташована монохромна фотокамера, яка і фотографує невелику ділянку поверхні площею близько квадратного міліметра. Кадр поверхні розбивається на маленькі ділянки (квадрати). Для кожної такої ділянки обчислюється усереднене значення яскравості в діапазоні від 0 до 63, де значення 0 присвоюється абсолютно чорній ділянці, а 63 – абсолютно білій. Таким чином, отримується мозаїчне зображення, що складається з квадратів різної яскравості. Один такий квадрат, тобто елемент зображення, і є точкою прив’язки, а точніше, одним відліком зміщення мишки. Сенсор послідовно прочитує кадри (квадрати різної яскравості), а потім за допомогою свого процесора математично визначає напрям і величину переміщення. За зміною малюнка у низці послідовних зображень цей процесор визначає, наскільки далеко просунулася мишка і відправляє відповідні координати у комп’ютер. Комп’ютер переміщує курсор на екрані відповідно до координат, отриманих від мишки. Така процедура відбувається сотні разів за секунду, тому створюється враження, що курсор переміщується дуже плавно.

Роздільна здатність оптичної мишки визначається у відліках на дюйм (англ.: counts per inch), тобто cpi, а не dpi, як у звичайних мишок. Фірма Agilent випускає сенсори з роздільною здатністю як

Національний університет водного господарства та природокористування

400, так і 800 cpi, причому моделі з роздільною здатністю 800 cpi можуть бути запрограмовані на роботу з роздільною здатністю 400 cpi.

Оскільки мишка тісно прилягає до поверхні, то цю поверхню, яку фотографує сенсор, необхідно підсвічувати. Камера сенсора налаштована на реєстрацію довжини хвилі червоного світла ($\lambda = 639 нм$). Саме тому і використовується червоний світлодіод, головне завдання якого – навіть мінімальною кількістю випромінюваного світла забезпечувати роботу сенсора на всій робочій поверхні. Чим вища яскравість освітлення, тим на більшій кількості поверхонь працюватиме сенсор. Щоб забезпечити рівномірне освітлення поверхні, світло від світлодіода проходить по світловоду і розсіюється лінзою. Через іншу лінзу сенсор зчитує зображення поверхні. Конструктивно дві лінзи і світловод виконані як одна деталь і називаються один словом «лінза». Крім функції розсіювання і фокусування світла, лінза виконує ще одну важливу функцію – захист сенсора від розряду електростатичної напруги. Зрозуміло, що лінза повинна розташовуватися на цілком визначених відстанях від робочої поверхні і сенсора. Тому друкована плата (PCB) і опорна поверхня (англ.: base plate), на які встановлюються елементи оптичної системи, повинні мати строго певні параметри, в тому числі і за товщиною. Ну і останній елемент оптичної системи – це затискач для світлодіода (призначений для фіксації елементів оптичної системи один відносно одного).

Рис. 4.4. Фото однієї з перших оптичних мишок

Останнім часом було розроблено новий, досконаліший різновид оптичного датчика мишки, який використовує для підсвічування напівпровідниковий лазер. За використанням головного елемента такий вид маніпулятора дістав назву **лазерної мишки** (найновіший

Національний університет водного господарства та природокористування

варіант – «Mamba». Лазерний сенсор з точністю в 16000 cpi можна регулювати з кроком всього в 1 cpi). Принцип її роботи не відрізняється від принципу роботи оптичної мишки.

Різновидом мишки можна також вважати *трекбол* (англ.: trackball) та джойстик (англ.: joystick). Трекбол це фактично перевернута мишка, у якої повертання кульки здійснюється пальцем. Кулька трекболу для зручності використання за розмірами більша кульки мишки. Трекбол зручний тим, що його не потрібно переміщати по поверхні столу, якого може не бути в наявності. Тому, в порівнянні з мишкою, він займає на столі менше місця.

4.1.3. Джойстик

Джойстик – це важіль на підставці, який можна відхиляти у поздовжньому та поперечному напрямах. На рукоятці і підставці розміщені кнопки керування. Всередині джойстика розташовані датчики, що перетворюють кут і напрямок нахилу рукоятки у відповідні сигнали, які передаються операційній системі. У відповідності з цими сигналами здійснюється переміщення і керування графічними об’єктами на екрані.

Національний університет водного господарства та природокористування

4.1.4. Сканер

Сканер (англ.: scanner) призначений для переведення графічної інформації в цифрову. Отримане зображення може бути збережене як графічний або текстовий файл.

Сканери розрізняються за способом зчитування оригіналу на *ручні*, *портативно-сторінкові* та *планшетні*. В портативно-сторінкових сканерів папір рухається за допомогою транспортних коліщаток відносно головки сканера, яка є нерухомою. Ручні сканери не використовують механізму протягування. По суті, ручні сканери – це маніпулятор-«миша» великого розміру. Користувач повинен вручну (по можливості рівномірно і не занадто швидко чи повільно) протягнути над оригіналом головку сканера (див. рис. 4.5).

Основною деталлю ручного сканера є головка читання, яку користувач проносить вздовж оригіналу. При цьому, світлодіоди випромінюють світло, яке відбивається від оригіналу і через систему лінз

Національний університет водного господарства та природокористування

попадає в фотоприймач, що є найголовнішою частиною головки сканера. На сьогодні найпоширенішими є два типи фотоприймачів: ПЗЗ-матриця (прилад із зарядовим зв'язком, ПЗЗ, англ.: Couple Charged Device – CCD) і КДЗ-матриця (контактний датчик зображення, англ.: Contact Image Sensor – CIS).

Основою елементу ПЗЗ-матриць є фототранзистор, виконаний за технологією МОП (металл-оксид-напівпровідник). ПЗЗ-матриця складається з великої кількості фототранзисторів, які перетворюють падаюче на них світло в пропорційний до його інтенсивності електричний заряд. Принципової різниці між КДЗ- і ПЗЗ-матрицями немає. КДЗ-сканери відрізняються від ПЗЗ-сканерів тим, що в них матриця розтягнута на всю ширину робочої області і саме тому в них повністю відсутня оптична система. Сигнали кожної смужки зображення при протягуванні сканера з фотоприймача через аналогово-цифровий перетворювач поступають в комп'ютер, який об'єднує і обробляє зображення.

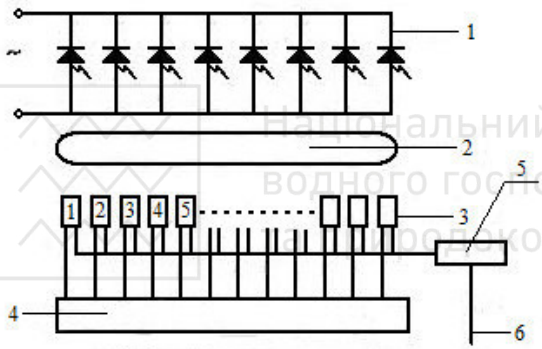


Рис. 4.5. Будова головки сканера: 1 – світлодіоди; 2 – лінзи; 3 – фототранзистори; 4 – регістр зсуву; 5 – відеопідсилювач; 6 – вихід на аналого-цифровий перетворювач

Через недостатню точність, що виникає при ручному скануванні і викликаної тремтінням руки, ручні сканери лише умовно придатні для «схоплювання» зображень. Крім того, їх роздільна здатність дуже мала.

Планшетні сканери простіші в обслуговуванні. Розглянемо принцип дії планшетних сканерів, як найбільш поширених моделей сканерів. Сканований об'єкт розміщується на склі планшета сканованою поверхнею вниз (див рис. 4.6). Під склом розташовується не лінійка світлодіодів, а рухома лампа, рух якої регулюється кроковим двигуном.

Національний університет водного господарства та природокористування

Світло лампи відбивається від оригіналу і через систему дзеркал і фокусуючих лінз потрапляє на ПЗЗ-матрицю. За кожен крок двигуна сканується смужка об'єкту, потім всі смужки об'єднуються програмним забезпеченням у загальне зображення.

Слід відмітити, що модифікацій сканерів є велика кількість. У варіантах будови сьогоднішніх сканерів, в основному, об'єднані лінійка світлодіодів з КДЗ-матрицею і лампа освітлення з ПЗЗ-матрицею.

Рис. 4.6. Принцип роботи планшетного сканера

Для сканування кольорового зображення з використанням КДЗ-матриці використовуються три світлодіода на один елемент датчика: червоний, зелений і синій, – які при скануванні включаються по черзі. Для сканування кольорового зображення з використанням ПЗЗ-матриці використовуються трьохрядна матриця ПЗЗ і підсвічування оригіналу каліброваним білим світлом. Кожний рядок матриці реєструє один із кольорів (червоний, зелений або синій). Щоб розділити кольори, використовують або призму, яка розкладає промінь білого світла на кольорові складові, або спеціальні дзеркала (див. рис. 4.7).

Якщо ж порівнювати матриці КДЗ і ПЗЗ, то, в цілому, ПЗЗ-сканери переважають в характеристиках:

1. *Краща глибина різкості*. Глибина різкості КДЗ-сканерів ± 0,3*мм*, тоді як для сканерів з ПЗЗ вона становить ± 3*мм*. Це означає, що тривимірні предмети, що знаходяться на відстані 3*мм* від головки ручного сканера або скла планшетного сканера, будуть нормально відскановані ПЗЗ-сканером, а зображення, отримане КДЗ-сканером, буде нерізким і розмитим. На практиці такими предметами найчастіше є розгорнуті товсті книги.

Національний університет водного господарства та природокористування

2. *Довший термін придатності*. Сканер на основі ПЗЗ забезпечує стабільну і незмінну якість протягом 10 000 годин роботи, тоді як у КДЗ-сканерів після 500 годин роботи відбувається падіння яскравості на величину до 30%.

3. *Краща чутливість до відтінків*. ПЗЗ-сканери розрізняють рівні відтінків з похибкою ± 20%, в той час як КДЗ-сканери – ± 40%. Відповідно, передача деталей у ПЗЗ-сканерів буде значно кращою.

4. *Менша чутливість до стороннього підсвічення*. Ця перевага пов'язана з невеликими розмірами ПЗС-лінійки, і завдяки системі дзеркал «зайве» світло на неї не проектується. У КДЗ-сканерах лінійка значно більша, оптична система практично відсутня, тому будь-яке зайве освітлення відразу значно впливає на результат сканування.

5. *Оптична роздільна здатність*. Максимальна роздільна здатність професійних ПЗЗ-сканерів на даний момент становить 3000 ppi, тоді як для КДЗ-сканерів верхня межа – 600 ppi.

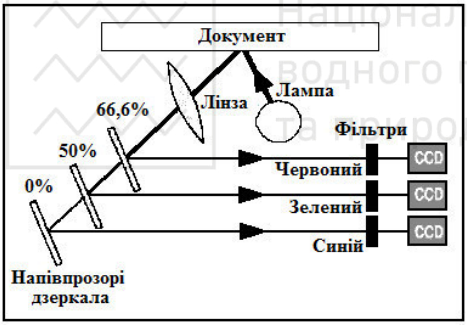


Рис. 4.7. Принцип роботи кольорового сканера на ПЗЗ-матриці

Остання характеристика є одною з основних характеристик сканера. Оптична роздільна здатність сканера – це кількість розпізнаних точок (пікселів) на дюйм, (вимірюється в ppi – pixels per inch).

Крім цієї характеристики важливими є:

- Швидкість сканування – показник швидкодії, який визначає час, що витрачається на обробку одного рядка зображення.
- Колірність сканера. Сканери бувають чорно-білі, штрихові чорно-білі та кольорові.
- Механічна роздільна здатність – це кількість кроків, які здійснює фотодіодна лінійка чи лампа освітлення, поділена на довжину пройденого шляху. Зазвичай, механічна роздільна здатність у два рази більша за оптичну.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

- Швидкість сканування – кількість відсканованих документів за одиницю часу.
- Кількість градацій сірого.

Порівняльні характеристики різних типів сканерів показані в таблиці 2.

Таблиця 2

Характеристики	Ручні сканери	Портативно-сторінкові сканери	Планшетні сканери
Роздільна здатність	400-800 ppi	600 ppi	600-1200 ppi
Кількість кольорів	2 (чорно – білі)	2 (чорно – білі)	2 (чорно – білі)
Число градацій сірого	64-256	256	256
Швидкість сканування, *арк./хв.*	3-8	до 15	до 30

Національний університет
водного господарства
та природокористування

4.1.5. Дігітайзер

Дігітайзер (англ.: digitizer, зі світловим пером) – графічний планшет, пристрій для введення графічних даних (креслення, схеми, плани) від руки безпосередньо в комп'ютер. Він складається з пера і плоского планшета, який чутливий до натиснення. Переміщуючи перо по планшету, користувач малює зображення, яке виводиться на екран.

Основними робочими характеристиками дігітайзера є:

- робоча площа (площа планшета);
- оптична роздільна здатність (вимірюється в ppi, як для сканера);
- число ступенів вільності (включає в себе не тільки кількість координат руху пера, а і інші – тиск пера, його нахил відносно площини планшета тощо).

4.1.6. Тачпад

Тачпад (англ.: touchpad – сенсорний майданчик) – це сенсорна панель, яка найчастіше застосовується в ноутбуках.

Національний університет водного господарства та природокористування

Принцип роботи тачпадів базується на вимірюванні ємності між пальцем і сенсорами. Ємнісні сенсори розташовані уздовж вертикальної і горизонтальної осей тачпада, що дозволяє визначити положення пальця з потрібною точністю. Оскільки робота пристрою базується на вимірюванні ємності, тачпад не працюватиме, якщо водити по ньому якимось непровідним предметом, наприклад, олівцем.

4.1.7. Світлове перо

Світлове перо (англ.: light pen) – один з інструментів введення графічних даних в комп'ютер, різновид маніпуляторів. Ззовні має вигляд кулькової ручки або олівця, з'єднаного провідником з з портом комп'ютера. Зазвичай на світловому пері є одна або декілька кнопок, які натискаються рукою, що утримує перо. Введення даних за допомогою світлового пера полягає в дотику або проведенні ліній пером по поверхні екрану монітора. В наконечнику пера встановлений фотоелемент, який реєструє зміну яскравості екрану в точці, до якої дотикається перо. За рахунок цього процесор обчислює позицію, вказану пером на екрані і може, в залежності від необхідності, відповідно її інтерпретувати. Зазвичай вона інтерпретується як вказівка на відображений об'єкт на екрані або як команда для малювання. Кнопки пера використовуються аналогічно кнопкам маніпулятора типу «миша» – для виконання додаткових операцій і вмикання додаткових режимів.

4.1.8. Сенсорний екран

Сенсорний екран (англ.: touch screen, тачскрін) призначений для керування пристроями комп'ютера за допомогою дотику до його екрану. Такі екрани зарекомендували себе як найзручніший засіб взаємодії користувача з комп'ютером. Застосування сенсорних екранів має ряд переваг, недоступних при використанні інших пристроїв введення: підвищену надійність, стійкість до жорстких зовнішніх впливів (включаючи вандалізм), інтуїтивно зрозумілий інтерфейс. Функціонально сенсорний екран складається з сенсора (спеціальна панель з датчиками), контролера, який керує датчиками і обчислює або готує дані для обчислення координат точки дотику,

Національний університет водного господарства та природокористування

та драйвера (програма, яка виконує необхідні перетворення даних, що надходять від контролера, проводить при необхідності додаткові обчислення і коригує роботу контролера).

В даний час існує три основних типи сенсорних екранів:

- ємнісні (поверхнево-ємнісні та проекційно-ємнісні);
- резистивні;
- хвильові.

4.1.8.1. Ємнісні сенсорні екрани

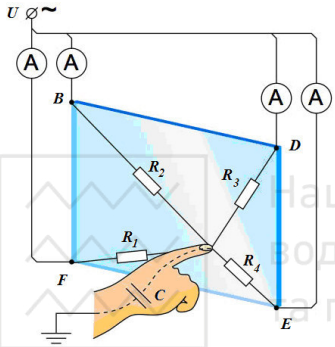


Рис. 4.8. Принцип роботи поверхнево-ємнісних сенсорних екранів

Ємнісні екрани працюють за принципом визначення ємнісного опору при протіканні змінного струму (див. рис. 4.8). На скляний екран нанесено прозорий провідний матеріал (оксид олова або оксид індію, англ.: indium tin oxide – ITO). До електродів, розміщених у чотирьох вершинах екрану, під'єднана невелика змінна напруга U частотою ν. При торканні пальцем точки на екрані від джерела на землю через послідовно з'єднані відповідний опір R_x та конденсатор C протікає змінний струму, амплітуда якого

$$I_{0x} = \frac{U_0}{\sqrt{\left(\frac{1}{2\pi\nu C}\right)^2 + R_x^2}}, \qquad (4.1)$$

де R_x – один із чотирьох опорів R_1 - R_4, C – ємність між точкою дотику і землею.

Чим ближче до вершини екрану торкається панелі палець, тим менший відповідний опір R_x і більший відповідний струм I_{0x}. Струми від відповідних електродів реєструються датчиками і дані передаються на контролер, який аналізує ці дані і визначає координати дотику.

Національний університет водного господарства та природокористування

У проекційно-ємнісних сенсорних екранів принцип роботи подібний. Відмінність полягає в колі для змінного струму. На внутрішній стороні екрану нанесена сітка прозорих електродів. При торканні пальцем екрану між цією точкою і відповідним електродом утворюється ємність (див. рис. 4.9). В результаті виникає послідовне з'єднання двох ємностей «електрод – точка на екрані» (C_1) і «точка на екрані – земля» (C_4). Сумарна ємність такої батареї конденсаторів:

$$C_Б = \frac{C_4 \cdot C_1}{C_4 + C_1}, \tag{4.2}$$

де

$$C_1 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}. \tag{4.3}$$

Тут ε_0 – електрична стала, ε – діелектрична проникність скла екрану, S – площа дотику, d – товщина екрану.

Тоді

$$C_Б = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S \cdot C_4}{\varepsilon\varepsilon_0 S + d \cdot C_4}. \tag{4.4}$$

Національний університет водного господарства та природокористування

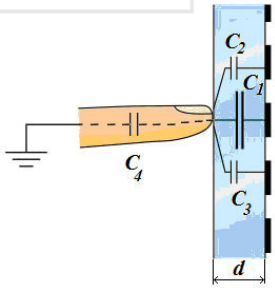


Рис. 4.9. Принцип роботи проекційно-ємнісних сенсорних екранів

Оскільки товщина екрану найменша для конденсатора C_1, то ємність батареї буде найбільшою для його електрода.

Реєстрація місця дотику в проекційно-ємнісних екранах відбувається подібно до поверхнево-ємнісних. На кожен електрод подається невелика змінна напруга U_0 частотою ν. Вимірюється змінний струм, що протікає між електродом і землею. Його амплітуда

$$I_{0x} = U_0 \cdot 2\pi\nu C_Б = \frac{U_0 \cdot 2\pi\nu\varepsilon\varepsilon_0 S \cdot C_4}{\varepsilon\varepsilon_0 S + d \cdot C_4}. \tag{4.5}$$

Згідно формули (4.5) в точці дотику він найбільший. Струми від електродів реєструються датчиками і дані передаються на контролер, який аналізує ці дані і визначає координати дотику.

Національний університет водного господарства та природокористування

Проекційно-ємнісні сенсорні екрани можуть працювати на технології *мультитач* (англ.: multi-touch). Це означає, що екран може розпізнавати декілька дотиків одночасно, тобто може розпізнавати жести: зведення двох пальців разом (зменшення зображення), розведення двох пальців в сторони (збільшення), рух декількома пальцями одночасно (прокрутка тексту, сторінки в браузері), обертання двох пальців по екрану (поворот зображення), тощо.

4.1.8.2. Резистивні сенсорні екрани

Резистивні сенсорні екрани працюють за 4-провідниковою та 5-провідниковою технологіями.

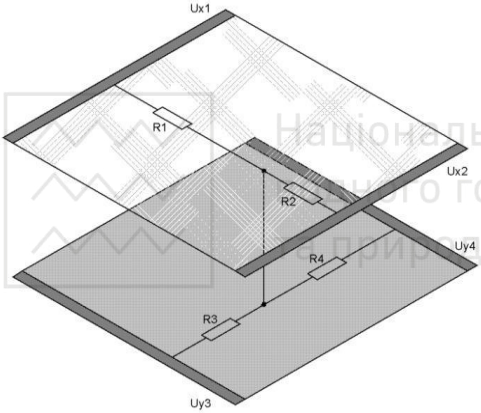


Рис. 4.10. Принцип роботи 4-провідникового резистивного сенсорного екрану

Основу конструкції 4-провідного екрану становлять дві прозорі плівки з поліестеру (polyester), майлару (maylar), пластізолу (plastisol, PL) або поліетилентерефталату (polyethylene terephtalate, PET), що знаходяться одна навпроти одної і розділені мікроскопічними кульками-ізоляторами (див. рис. 4.10). Внутрішні поверхні плівок покриті прозорим струмопровідним (резистивним) матеріалом на основі двоокису індію та олова. Будемо називати один з резистивних шарів заднім, а інший, розташований ближче до спостерігача, переднім.

Контакт з цими шарами забезпечується за допомогою двох пар металізованих смужок-електродів. Перша пара розташована вертикально на краях заднього шару, а друга – горизонтально на краях переднього шару. Електроди підключені до мікроконтролера, який послідовно визначає координати точки дотику по горизонталі і вертикалі.

Національний університет водного господарства та природокористування

Координати дотику визначаються наступним чином. При дотику два шари торкаються в одній точці. При цьому, утворюються опори R_1, R_2 між електродами верхнього шару і точкою дотику і R_3, R_4 між електродами нижнього шару і точкою дотику. Між електродами нижнього шару (U_{y3} та U_{y4}) подається постійна напруга (5*В*). Електроди (U_{x1} та U_{x2}) заземляються. Струм від джерела протікає по двох колах «$U_{y4} – R_4 – R_2 – U_{x2}$» та «$U_{y4} – R_4 – R_1 – U_{x1}$». Відношення величин цих струмів буде пропорційне відношенню опорів R_1/R_2, а значить відношенню відстаней від електрода U_{x1} до точки дотику і від точки дотику до електрода U_{x2}. Так встановлюється горизонтальна координата точки дотику.

При встановленні вертикальної координати напруга подається між електродами U_{x1} та U_{x2}, а електроди U_{y3} та U_{y4} заземлюються.

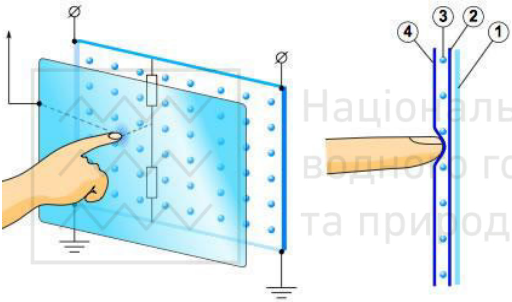


Рис. 4.11. Принцип роботи 5-провідникового резистивного сенсорного екрану: 1 – тверда прозора основа; 2 – задня провідна панель з чотирма електродами по кутках; 3 – ізоляційні кульки; 4 – передня провідна мембрана

Визначення координат точки дотику проводиться мікроконтролером з високою швидкістю – більше ста разів на секунду. Слабкою ланкою 4-провідного екрану є передня плівка з поліестеру. Багаторазові деформації натисканням приводять до руйнування провідного шару, в результаті чого зменшується точність визначення координат.

5-провідниковий варіант резистивного сенсорного екрану відрізняється більшою надійністю і підвищеною роздільною здатністю. Якщо 4-провідникові екрани витримують близько 3 млн. натискань в одну і ту ж точку, то ресурс 5-провідникових пристроїв – 35 мільйонів. П’ятипровідниковий екран надійніший за чотирьохпровідниковий за рахунок того, що внутрішнє резистивне покриття поверхні останнього замінене на повністю провідну мембрану передньої панелі (5-провідниковий екран продовжує працювати навіть з прорізаної мембраною). На задню панель нанесено резистивне покриття і під’єднано чотири електроди по кутках. Спочатку всі чоти-

ри електроди задньої панелі заземлені, а до мембрани підведено п'ятим провідником напругу до +5*В*. Значення напруги на мембрані постійно контролюється аналогово-цифровим перетворювачем контролера. Якщо немає дотику до сенсорного екрану, напруга на мембрані дорівнює 5*В*.

При натисканні екрану, мікропроцесор встановлює зміну напруги на мембрані і починає обчислювати координати дотику наступним чином:

- на два правих електроди подається напруга +5*В*, ліві заземлюються. Напруга на мембрані пропорційна X-координаті;
- Y-координата визначається підключенням до +5*В* обох верхніх електродів і заземлення обох нижніх.

Конструкція *матричних* сенсорних екранів, яких інколи називають *цифровими*, подібна до конструкції резистивних екранів. Відмінність полягає в тому, що у них замість суцільних резистивних шарів використовуються горизонтальні і вертикальні прозорі провідні смуги. При дотику до екрану передня мембрана деформується, і вертикальна смуга торкається горизонтальної. Наявність замикання фіксує мікропроцесор. Розташування всіх електродів на площині відоме, а тому перетин замкнутих електродів однозначно визначає точку дотику до екрану.

4.1.8.3. Хвильові (акустичні) сенсорні екрани

В основу акустичних екранів покладена технологія, яка використовує поверхнево-акустичні хвилі. В якості екрану в цій технології обов'язково використовується скляна панель. Мініатюрні п'єзоелектричні датчики, які розміщені по кутках екрану, поширюють акустичну хвилю по всій його поверхні. На гранях панелі розміщені приймальні датчики. Дотик до екрану змінює картину поширення акустичних коливань, що і реєструється датчиками. За зміною характеру коливань можна визначити координати збурень, внесених натисненням на екран. Крім цього, аналізуючи ступінь зміни коливань, можна обчислити силу натискання на екран.

Інша технологія акустичних екранів базується на розпізнаванні звуку, що поширюється в екрані в момент дотику до нього. Спеціальний випромінювач звукових хвиль генерує унікальний звук, який поширюється по екрану. Чотири датчики звуку, що закріплені по

Національний університет водного господарства та природокористування

кутках сенсорного екрану, приймають сигнал випромінювача. Звук оцифровується, потім передається контролеру і порівнюється зі списком раніше записаних сигналів для кожної точки екрану. Курсор миттєво переміщується в точку, відповідну точці дотику. В даній технології ігноруються звуки навколишнього середовища та будь-які зовнішні звуки, якщо вони не входять до раніше записаного списку.

До хвильових сенсорних екранів можна, також, віднести інфрачервоні та оптичні екрани.

Інфрачервоні сенсорні екрани

Такі екрани мають на двох своїх протилежних гранях лінійку світлодіодів, які випромінюють по поверхні екрану світло інфрачервоного діапазону, та на двох перпендикулярних до них гранях лінійку фотодіодів, які вловлюють це світло. Кожний фотодіод вловлює світло тільки від свого світлодіода. Будь-яка перешкода (наприклад, дотик пальця до екрану), частково або повністю перекриває світловий промінь, і призводить до зменшення або припинення електричного струму через відповідний фотодіод. Ця зміна фіксується мікроконтролером, дозволяючи вирахувати координати дотику з високою точністю. Зазвичай світлодіод (і відповідно фотодіод) в лінійці має лінійні розміри біля 2,5*мм*, тобто на кожен квадратний сантиметр панелі припадає чотири горизонтальних і чотири вертикальних скануючих променя.

Оптичні сенсорні екрани

Такі екрани мають в своєму складі скляну панель, яка з внутрішньої сторони підсвічується інфрачервоними променями. Відповідні світло діоди встановлені таким чином, щоб на границі розділу двох середовищ «скло-повітря» спостерігалось явище повного внутрішнього відбиття світла. При дотику до екрану стороннім предметом умова повного внутрішнього відбиття виконуватись не буде і світло буде розсіюватися. Залишається зафіксувати картину розсіяння. Для цього існують дві технології:

- у проекційних екранах поряд з проектором ставиться камера, яка фіксує точку розсіювання на екрані;
- світлочутливим роблять додатковий четвертий субпіксель рідкокристалічного екрану.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

4.1.8.4. Інші види сенсорних екранів

Крім вище приведених видів сенсорних екранів деяке поширення мають індукційні та тензометричні екрани.

Індукційні сенсорні екрани

У них під рідкокристалічним екраном розташована панель, в якій розміщені виконані друкарським способом котушки індуктивності. При подачі змінної напруги котушки формують на поверхні екрану електромагнітне поле. Якщо до поверхні екрану піднести спеціальний датчик (стилус), в якому знаходиться налаштований на резонанс контур, то він буде модулювати електромагнітне поле, змінюючи індуктивність розташованих під екраном котушок. Причому, чим ближче котушка до контуру стилуса, тим більша зміна її індуктивності. Мікроконтролер фіксує параметри котушок і обчислює положення стилуса. Для підвищення функціональності стилус забезпечується вбудованою схемою, яка підключає додаткові витки до контуру, тим самим дозволяючи мікроконтролеру розрізняти два різних стани датчика. Індуктивність екрану не впливає на якість зображення, екран не реагує на дотик долонею при письмі або малюванні і широко застосовується в мобільних пристроях, наприклад в планшетних комп'ютерах.

Тензометричні сенсорні екрани реагують на його деформацію.

4.1.8.5. Інші пристрої введення даних

До периферійних пристроїв введення інформації можна віднести web-камеру, кінокамеру, фотоапарат, мікрофон, тощо. Опис їх принципів роботи не входить в завдання даної книги. Бажаючі можуть легко знайти ці описи у відповідній літературі.

4.2. Пристрої виведення інформації. Монітори

Монітор (дисплей) – це пристрій для перетворення цифрової і (або) аналогової інформації у відеозображення. Спорідненим пристроєм монітора є **проектор** – оптико-механічний, або оптико-

Національний університет водного господарства та природокористування

цифровий прилад, який за допомогою джерела світла проектує зображення об'єктів на екран [1].

Перші монітори були дуже примітивні, текст у них відображався тільки в одному, зеленому кольорі. Все ж їх поява стала важливим технологічним проривом, оскільки дала можливість вводити і виводити дані в пам'ять комп'ютера в режимі реального часу. Пізніше з'явились кольорові монітори, збільшився розмір екрану, виникли різноманітні технології їх виготовлення. Технічні характеристики сучасних моніторів можуть задовольнити найвибагливішого користувача.

Монітор входить до складу відеосистеми комп'ютера. Крім нього до складу відеосистеми входить відеоадаптер (відеокарта) та програмне забезпечення (драйвери відеосистеми). Відеоадаптер посилає в монітор сигнали управління яскравістю променів і синхросигнали рядкової та кадрової розгорток. Монітор перетворює ці сигнали в зорові образи. А програмні засоби обробляють відеозображення – виконують кодування і декодування сигналів, координатні перетворення, стиснення зображень, тощо.

У перших комп'ютерах відеокарти не було. В оперативній пам'яті існувала екранна ділянка пам'яті, в яку процесор заносив дані про зображення. Контролер екрана зчитував дані про яскравість окремих точок екрана з комірок пам'яті і керував розгорткою горизонтального променя електронно-променевої гармати монітора.

При переході від монохромних моніторів до кольорових і із збільшенням роздільної здатності екрана, ділянки відеопам'яті стало недостатньо для збереження графічних даних, а процесор не встигав обробляти зображення. Всі операції, що пов'язані з керуванням екрану були відокремлені в окремий блок – відеоадаптер.

З точки зору користувача, основними характеристиками монітора є розмір по діагоналі, роздільна здатність, частота регенерації (оновлення) та клас захисту.

Розмір монітора. Екран монітора вимірюється по діагоналі у дюймах. Розміри коливаються від 9 дюймів (23*см*) до 42 дюймів (106*см*). Найпоширеними є розміри 14, 15, 17, 19 та 21 дюйми. Оптимальними для масового використання є 15- та 17-дюймові монітори.

Національний університет водного господарства та природокористування

Роздільна здатність. Це лінійний розмір мінімальної деталі, яку можна розрізнити на екрані. Даний параметр характеризується кількістю елементів розкладу – ***пікселів*** (англ.: *pixel, PICture'S Element*) – по горизонталі і вертикалі екрану. Вираз «роздільна здатність 800x600» означає, що монітор може виводити 600 горизонтальних рядків по 800 точок (пікселів) у кожному. Стандартними є такі режими роздільної здатності: 640x480, 800x600, 1024x768, 1152x864. Лінійний розмір піксела екрана сучасних моніторів не перевищує 0,28*мм*. Якість зображення також пов'язана з розміром екрана. Так, для задовільної якості зображення в режимі 800x600 на 15-дюймовому моніторі можна обмежитися розміром піксела 0,28*мм*, для 14-дюймового монітора з тим самим розміром піксела в тому самому відеорежимі якість дрібних деталей зображення буде трохи гірша.

Частота регенерації. Цей параметр також називається частотою кадрової розгортки. Він показує скільки разів за секунду монітор може повністю оновити зображення на екрані. Частота регенерації вимірюється в герцах (*Гц*). Сьогодні мінімально допустимою вважається частота в 75*Гц*, нормальною – 85*Гц*, комфортною – 100*Гц* і більше. Цей параметр залежить також від характеристик відеоадаптера.

Клас захисту. Для монітора він визначається стандартом із точки зору вимог техніки безпеки.

4.2.1. Електронно-променевий монітор, кінескоп

Електронно-променевий монітор, кінескоп (англ.: CRT – Cathode Ray Tube, ЕПТ – електронно-променева трубка). Принцип роботи цього монітора базується на *технології емісії електронів*. Отримуючи сигнал від керуючих систем комп'ютера (див. рис. 4.12), монітор електронно-променевою гарматою **П** випускає потік електронів з катода **К** через отвір в аноді **А** на екран **Е**, який складається з «тіньової маски» (для кольорових моніторів) і скляної пластини з люмінесцентним покриттям (люмінофор) **Л**. На екрані створюється зображення. Керує потоком електронів система відхилення $\mathbf{C_1}$ і $\mathbf{C_2}$, яка за допомогою електромагнітного поля змінює напрямок руху потоку електронів. Цей потік, проходячи через тіньову маску, попадає на люмінофор. Люмінофор – речовина, атоми якої випроміню-

Національний університет водного господарства та природокористування

ють світлові промені видимого діапазону при бомбардуванні її зарядженими частинками.

Отже, ЕПТ мають наступні основні елементи:

1. Електронна гармата (для чорно-білих моніторів – одна, для кольорових – три);

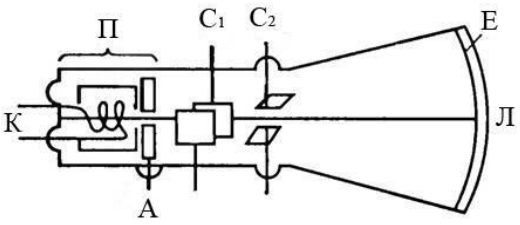


Рис. 4.12. Електронно-променевий монітор

2. Система відхилення, тобто набір електронних «лінз» для формування пучка електронів;

3. Тіньова маска, яка забезпечує точне попадання електронів від певної гармати в необхідну точку екрану;

4. Шар люмінофору, який формує зображення при попаданні електронів на екран.

В свою чергу електронна гармата складається із підігрівача, катода, що емітує потік електронів, і модулятора, що прискорює і фокусує пучок електронів.

Переваги: висока швидкодія оновлення зображення.

Недоліки: високе енергоспоживання і тепловиділення, складність отримання «ідеальної» геометрії картинки.

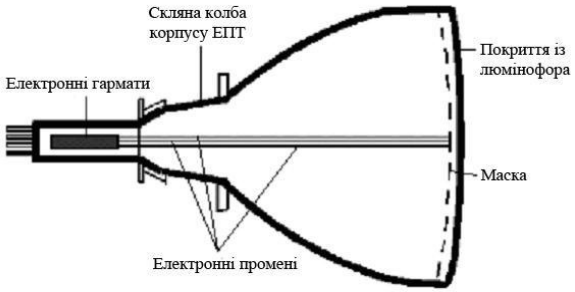


Рис. 4.13. Кольоровий електронно-променевий монітор

До недавнього часу CRT були найпоширенішими серед моніторів. Зараз їх майже витіснили рідкокристалічні монітори, крім сфери дизайну і поліграфії, де вони здали ще не всі позиції.

У **кольорових CRT** основним елементом є три електронні гармати, які формують зображення, кожна з яких відповідає за одну із складових кольору – червону, синю, або зелену (див. рис. 4.13).

Національний університет водного господарства та природокористування

Переваги: можливість якісної передачі кольору, висока роздільна здатність, достатня контрастність.

Недоліки: велика вага, складність монтажу і настроювання.

4.2.2. Монітори електростатичної емісії

Монітори електростатичної емісії (англ.: FED, Field Emission Display – дисплей на основі ефекту польової емісії електронів, з люлюмінофором). Технологія FED подібна до CRT, тому що в обох

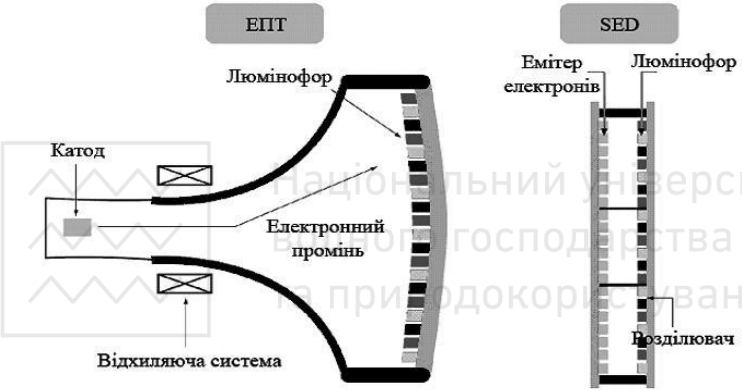


Рис. 4.14. Будова SED – монітора

випадках застосовується люмінофор. Відмінність полягає у тому, що у FED-екранах не застосовуються електронні гармати. Натомість використовується велика кількість маленьких джерел електронів, розміщених за кожним елементом екрану. Кожне джерело електронів керується окремим електронним пристроєм і кожний піксел може світитися завдяки дії електронів на люмінофор.

Національний університет водного господарства та природокористування

Один із варіантів FED – **технологія SED** (англ.: Surface-conduction Emission Display – дисплей з люмінофором на основі ефекту емісії електронів з поверхневою провідністю).

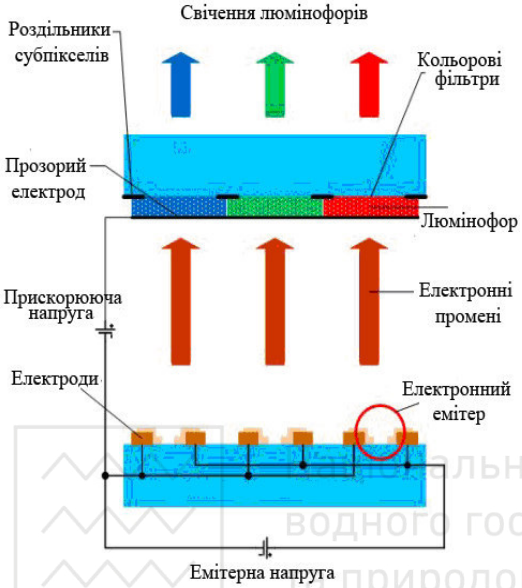


Рис. 4.15. Принцип роботи піксела SED - панелі

В основу технології SED покладено дві базові ідеї:

1. Замість трьох катодів CRT для трьох кольорів використовується індивідуальний катод для кожного субпіксела. При цьому не використовується схема розгортки – найбільш енергоспоживаючий вузол CRT;

2. Замість теплової емісії електронів використовується емісія за рахунок тунельного ефекту.

Джерелом електронів в SED-панелі на відміну від ЕПТ є плоскі мікроскопічні точки оксиду паладію, нанесені на електродну матрицю на задній скляній стінці (див. рис. 4.14).

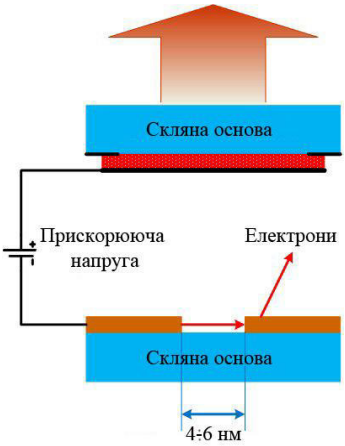


Рис. 4.16. Принцип роботи субпіксела SED-панелі

Дисплей утворюють дві скляні панелі, між якими знаходиться вакуум. На

Національний університет водного господарства та природокористування

переднє скло нанесені розділені між собою точки люмінофора трьох основних кольорів. Невелика керуюча постійна напруга прикладається між половинками електронного емітера, відстань між якими складає 4-6*нм*. Внаслідок тунельного ефекту відбувається емісія електронів з емітера. Прискорююча напруга забезпечує попадання електронів на люмінофор. Принцип роботи піксела SED-панелі показаний на рис. 4.15, а субпіксела – на рис. 4.16.

Переваги: невелике енергоспоживання, висока контрастність, широкий кут спостереження, висока швидкодія, хороша передача кольору.

4.2.3. Монітори на основі вуглецевих нанотрубок

Вуглецеві нанотрубки (англ.: CNT – Carbon NanoTubes (CNT-FED), ВНТ).

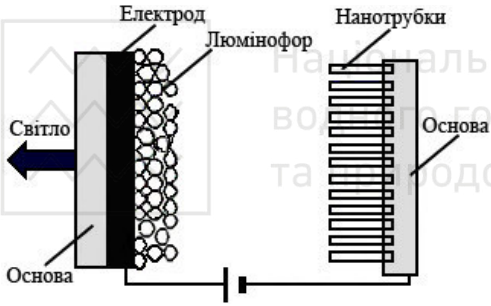


Рис. 4.17. Монітор на основі нанотрубок

Принцип дії: в якості катодів використовуються вуглецеві нанотрубки. Відомо, що вони є ефективними джерелами холодної польової емісії електронів. На рис 4.17 показана принципова схема монітора з катодом на основі ВНТ і аноду з люмінофором на основі окислу цинку. Міжелектродна відстань складає близько 0,6*мм*. Під дією прикладеної напруги з кінців ВНТ випускаються електрони, які рухаються в напрямку люмінофора і викликають свічення піксела. Отриманий таким чином піксел має лінійні розміри близько 1*мкм*. При напрузі 1,7*кВ* струм емісії складає 10*мА*.

Переваги: можливість розміщувати нанотрубки безпосередньо на основі при контрольованих відстанях, розмірах і довжині гарантує високу якість зображення при оптимальному рівні емісії електронів; малий час відгуку; широкий кут спостереження; високоякісна передача кольору; тривалий час функціонування дисплеїв.

Національний університет водного господарства та природокористування

4.2.4. Електролюмінісцентні екрани

Принцип дії електролюмінісцентних екранів (англ.: EL – Electro-Luminescent) базується на прикладанні електричного поля до багатошарової структури з двох електродів (напівпрозорого і алюмінієвого), двох шарів діелектрика, між якими знаходиться порошковий люмінофор (ZnS:Mn). На такий конденсатор подається змінна напруга звукової частоти, яка за величиною близька до напруги пробою. На поверхні частинок люмінофору під дією змінної напруги концентрується сильне електричне поле, яке прискорює вільні електрони, здатні йонізувати атоми. Утворені дірки захоплюються центрами люмінесценції, на яких при зміні напрямку поля рекомбінують електрони. Цей процес супроводжується випромінюванням світла. Принципова схема EL - панелі показана на рис. 4.18.

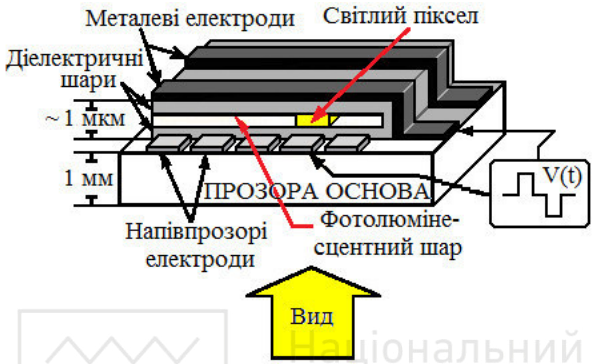


Рис. 4.18. Будова EL – панелі

Переваги: хороша роздільна здатність, контрастність, великі кути спостереження (більше 160°), невелике енергоспоживання, малий час відгуку пікселів (1*мс*).

Недоліки: кольори не такі чисті як у рідкокристалічних моніторів, зображення на яскравому світлі тьмяніє.

Як варіант електролюмінісцентної технології використовуються **товстоплівкові діелектричні люмінесцентні панелі** (англ.: Thick-Film Dielectric ElectroLuminescent, TDEL). Згідно цієї технології, зображення формується шляхом накладання електричного поля на багатошарову структуру, яка складається з двох електродів і шару діелектрика, на який нанесено плівку люмінесцентного фосфору. У стандартних зразках екранів для виникнення ефекту люмінесценції потрібно прикладати високу напругу, що зобов’язує наносити два

Національний університет водного господарства та природокористування

шари діелектрика для уникнення пробою тонкого шару фосфору. Фахівцям вдалося збільшити конструктивну надійність виконання шляхом нанесення товстішого шару діелектрика, що дозволяє виготовляти широкоформатні дисплеї.

Товщина панелі TDEL-екранів з діагоналлю 37 дюймів не перевищує 2*см*. Панель забезпечує кут огляду 170°. Максимальна яскравість зображення знаходиться на рівні 500*кд/м*^{2}, а коефіцієнт контрастності складає 500:1. Пристрій споживає менше 200*Вт*. Екран розрахований більш ніж на 40 тис. годин роботи.

4.2.5. Вакуумні флуоресцентні монітори

Вакуумні флуоресцентні монітори (англ.: Vacuum fluorescent displays – VFD) в якості піксела зображення використовують вакуумну мінікапсулу, в якої на прозорий анод нанесено високоефективне фосфорне покриття. Всі аноди розміщені в області екрану. При прикладенні напруги близької до пробою між анодом і катодом мікрокапсули відбувається збудження атомів фосфору і випромінювання ними видимого світла (так як у EL).

VFD можуть працювати при меншій потужності, ніж плазмові та електролюмінісцентні монітори. Однак ці моделі мають відносно низьку роздільну здатність, оскільки розмір піксела матриці екрану обмежується лінійними розмірами аноду з нанесеним на нього шаром фосфору. Тому найчастіше їх використовують в низькоінформаційних екранах. Ця технологія широко використовується в екранах оголошень, оскільки на таких моніторах зображення добре видно на яскравому світлі. Крім того, її можна застосовувати в широкоформатних дисплеях не дуже високої якості.

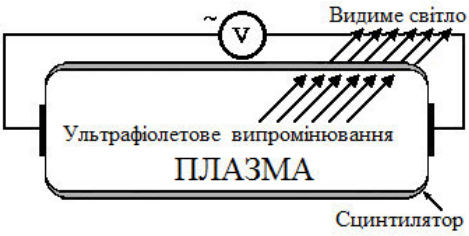


Рис. 4.19. Будова субпіксела плазмової панелі

Національний університет водного господарства та природокористування

4.2.6. Плазмові монітори

Принцип дії плазмових моніторів (англ.: PDP – Plasma Display Panel, ПМ) базується на свіченні люмінофора під дією ультрафіолетового випромінювання, яке виникає після плазмового розряду. Кожний субпіксел PDP-панелі є флуоресцентною мініампулою (200 х 200 х 100 *мкм*), яка може випромінювати світло тільки однієї довжини хвилі (див. рис. 4.19). Це забезпечується покриттям поверхонь ламп трьома видами люмінофору. На таку лампу з інертним газом (розріджена суміш газів ксенону та неону), що знаходиться між електродами, подається висока напруга, яка викликає плазмовий розряд. Горизонтальні електроди, розміщені на задній поверхні, називаються адресними (adress electrode). Вертикальні електроди – прозорі (ITO – оксид індію та олова), вони згруповані по два, розміщені на передньому склі і називаються електродами відображення (display electrode, їх також називають: скануючі, ініціюючі, розрядні). В точці перетину одного адресного і двох розрядних електродів сформована елементарна комірка – субпіксел (мініампула). Три субпіксела (червоний, зелений та синій) складають піксел зображення.

При розряді відбувається розпад інертного газу на позитивнозаряджені йони і електрони, які під дією прикладеної напруги рухаються до катода і анода відповідно. Під час руху електрони збуджують нейтральні атоми газу, які випромінюють хвилі ультрафіо-

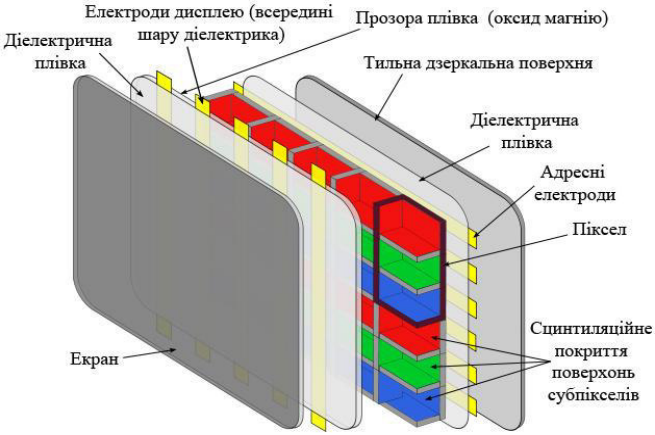


Рис. 4.20. Принципова схема PDP-екрана

Національний університет водного господарства та природокористування

летового діапазону. Ультрафіолетове випромінювання, попадаючи на основу субпіксела, покриту люмінофором, викликає свічення останнього вже у видимому діапазоні хвиль. На поверхню кожного піксела нанесений свій люмінофор для отримання світла певного кольору (510-525*нм* для зеленого, 610*нм* для червоного і 450*нм* для синього). Це світло поширюється у всі сторони. Значна його частина направлена не до спостерігача а вглиб екрану. Для використання цієї частини випромінювання адресні електроди покриваються спеціальною світловідбивною речовиною. Яскравість свічення піксела (інтенсивність випромінювання) регулюється напругою на розрядних електродах і може регулюватися лише в невеликих межах. Тому регулювання яскравості екрану проводиться не шляхом зміни інтенсивності випромінювання окремого субпіксела, а шляхом організації роботи всіх субпікселів панелі. Керуюча напруга подається на електроди таким чином, щоб «вмикати» в певний момент часу різну кількість субпікселів. Більша їх кількість «ввімкнена» в даний момент часу – більша яскравість екрану, менша кількість «працює» – менша яскравість. Принципова схема PDP-екрана представлена на рис. 4.20.

Переваги: великі кути спостереження, висока яскравість і контрастність, мала товщина.

Недоліки: велике енергоспоживання, відносно великий розмір піксела не дає можливості добитись високої роздільної здатності, високі вимоги до якості матеріалів.

4.2.7. Рідкокристалічні монітори

Головним елементом рідкокристалічних моніторів (англ.: LCD – Liquid Crystal Display, РК) є молекули цианофенілу – речовини, яка знаходиться в рідкому стані, але має властивості кристалічних тіл. Зокрема вона має властивість поляризувати світло [3,4].

LCD-екран має декілька шарів, серед яких важливу роль відіграють дві панелі, виготовлені з вільного від натрію і дуже чистого скляного матеріалу (називають субстратом або основою), між якими власне і знаходиться тонкий шар рідких кристалів (див. рис. 4.21).

Рідкі кристали складаються із видовжених молекул. Міжмолекулярна взаємодія забезпечує в певному інтервалі температур паралле-

Національний університет водного господарства та природокористування

льну орієнтацію молекул, наслідок чого в рідині утворюється виділений напрямок. Впорядкування орієнтації молекул поширюється на далекі віддалі. Здебільшого орієнтація молекул в рідкому кристалі задається їхнім напрямком на поверхні. Оскільки, на панелях основи є борозни, то вони направляють молекули рідкого кристалу, надаючи їм певної орієнтації. Борозни двох панелей основи перпендикулярні між собою. Неполяризоване світло від галогенної лампи підсвічення заднього (або бокового) освітлення, проходячи через поляризатор (плівку) потрапляє на перше скло основи поляризованим. За відсутності напруги між двома прозорими електродами (знаходяться на поверхнях пластин субпіксела) рідкі кристали повертають площину поляризації світла на 90 градусів, внаслідок чого воно проходить через скло другої основи, кольоровий фільтр і вихідний поляризаційний фільтр не послаблюючись. Подача напруги між електродами приводить до повороту осей РК. Відбувається так званий перехід Фредерікса — явище переорієнтації молекул рідкого кристалу під дією електричного поля. У матеріалах із позитивною діелектричною анізотропією молекули намагатимуться повернутись вздовж напрямку електричного поля. У матеріалі з негативною діелектричною анізотропією — впоперек напрямку поля. Кут повороту при цьому залежатиме від напруги. Характерною особливістю рідких кристалів є те, що молекули переорієнтуються при дуже малому електричному полі – достатньо напруги в декілька мілівольт.

Отже, напруга, в залежності від величини, може змінювати орієнтацію головних осей РК-молекул, регулюючи інтенсивність світла на виході з другого поляризатора завдяки повороту площини поляризації світла.

РК-матриці бувають пасивними та активними. Для керування комірок пасивної матриці використовуються прозорі паралельні смужкові електроди. Вони нанесені на панелі, між якими знаходяться рідкі кристали, причому взаємна орієнтація електродів панелей перпендикулярна. На перетині електродів знаходяться субпікселі екрану. В пасивній матриці можна керувати тільки пікселами одного рядка прикладанням напруги до відповідних електродів. При підключенні напруги до наступного рядка зображення першого поступово тьмяніє. Така матриця вимагає великого часу відновлення зображення і використовується там де не вимагається великої частоти відновлення екрану (годинники, мобільні телефони, тощо).

Національний університет водного господарства та природокористування

Будова активної РК-матриці наступна. Кожний субпіксел має свій індивідуальний прозорий електрод, тонкоплівковий (0,1-0,01*мкм*) польовий транзистор TFT (англ.: Thin Film Transistor) і конденсатор пам'яті. Транзистор стоком підключений до вертикальної лінії даних, затвором – до горизонтальної лінії даних, а витоком – до індивідуального електрода. При підключенні напруги до електродів ліній даних транзистор відкривається і по лінії «індивідуальний електрод – витік – стік – конденсатор – земля» конденсатор субпіксела заряджається. При переході до наступного рядка пікселів всі транзистори попереднього рядка закриваються, але прозорість, а значить, і яскравість пікселів залишається без змін, оскільки конденсатори зберігають заряд, величину електричного поля і кут повороту РК-молекул без змін. Яскравість комірок РК-панелі не змінюється за весь період оновлення екрану, а зображення стає не мерехтливим.

Для виведення кольорового зображення використовують три фільтри, які виділяють з білого світла лампи три основні кольори (червоний, зелений, синій). Комбінуючи їх для кожної точки (піксела) екрану можна відтворити будь-який колір.

Порівняльні характеристики LCD, PDP і CRT представлені в табл. 3.

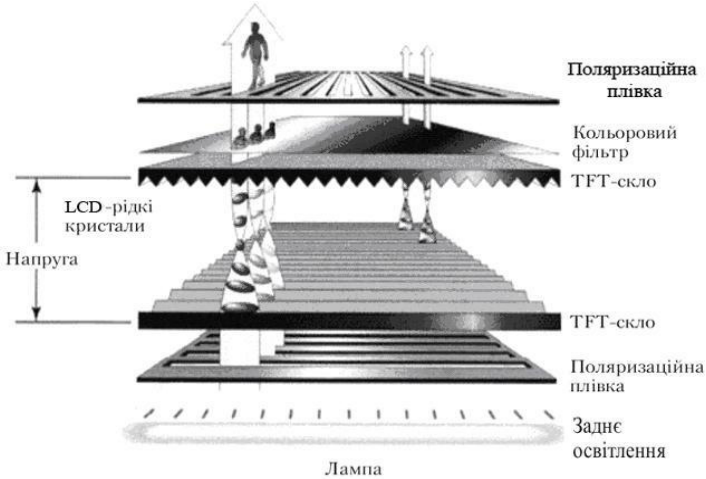


Рис. 4.21. Будова LCD – екрана

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Таблиця 3

Параметр	РК (LCD)	Плазма (PDP)	Кінескоп (CRT)
Принцип роботи	Управління світлом лампи підсвічування, яке проходить через шар рідких кристалів за рахунок зміни ними площини поляризації	Свічення люмінофора екрану під дією ультрафіолетових променів при розряді в плазмі	Свічення люмінофора екрану під дією електронного променя, який формується електронною гарматою
Ресурс роботи	60000 год. – лампа підсвічування; 250000 год. – робота екрану	25000 год.	25000 год.
Яскравість	від 170 до 500 cd/m^2 (кандела/м^2)	від 300 до 1000 cd/m^2	від 80 до 300 cd/m^2
Контрастність	від 150:1 до 600:1	від 200:1 до 3000:1	від 350:1 до 750:1
Кут огляду	від 10° до 170°	близький до 180°	близький до 180°
Час реакції піксела	від 15 до 50*мс*	не помітно оку	не помітно оку
Дефекти екрану	допускаються	допускаються	ні
Якість фокусування	ідеальна	ідеальна	від задовільного до дуже доброго
Геометричні викривлення	ні	ні	можливі

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Продовження таблиці 3

Можливі роздільні здатності	встановлені	встановлені	різні
Однорідність свічення	незначно яскравіше по краям	рівномірне	незначно яскравіше в центрі
Вплив магнітних полів	ні	ні	Так
Температура корпусу під час роботи	незначна	висока	середня
Потужність, яка використовується	мала	велика	середня
Ціна для великих розмірів екрану	найбільша	висока, але менша РК	дешевша РК та плазми
Вага та габарити	менші плазми та кінескопа	більші РК та менші кінескопа	найбільші

Переваги: мале енергоспоживання, малі маса і товщина.

Недоліки: не дуже великий кут спостереження, великий час відгуку, низька контрастність.

LCD-проектори

Як варіант РК-монітора використовують **LCD-проектори**, які використовують LCD-матриці на просвітлення, як плівку в кіноапараті і **LCOS-проектори,** що використовують LCD-матриці на непрозорій кремнієвій основі на відбиття світла.

4.2.8. Світлодіодні екрани

Принцип дії світлодіодних екранів (англ.: LED – Light Emitted Diod): екран є матрицею пікселів, зібраних із трьох напівпровідникових світлодіодів, що формують три світлових потоки (червоний,

Національний університет водного господарства та природокористування

зелений, синій). Як правило, кристали світлодіодів знаходяться в одному корпусі з лінзою, яка фокусує світловий потік.

Переваги: низьке і ефективне енергоспоживання, механічна міцність, надійність, великий кут спостереження (до 160 градусів), висока швидкодія, волого- і пилостійкість.

4.2.9. Дисплеї на органічних світлодіодах

Принцип роботи дисплеїв на органічних світлодіодах (англ.: **OLED** – Organic Light Emitting Diode/Organic Light Emitting Display) базується на властивостях світловипромінювальних полімерів, які складаються з декількох шарів наноплівок. Основою для провідних електролюмінісцентних полімерів цих матеріалів є високомолекулярні сполуки, в яких чергуються подвійні зв'язки. Для звільнення електронів застосовуються різноманітні суміші, що створюють можливість переміщення електронів і дірок вздовж молекулярного ланцюга. Такі матеріали мають всі властивості неорганічних напівпровідників, тобто утворювати p-n - перехід і, за певних умов, випромінювати світло. Перевагою над неорганічними напівпровідниками технології OLED є можливість в широких межах змінювати спектр випромінювання (видимий діапазон) шляхом зміни структури органічних молекул. OLED - екран – це матриця трикоміркових пікселів. В залежності від того, який колір потрібно отримати, регулюється напруга на кожному із субпікселів, і в результаті змішування кольорів отримується необхідний колір. Структура OLED-

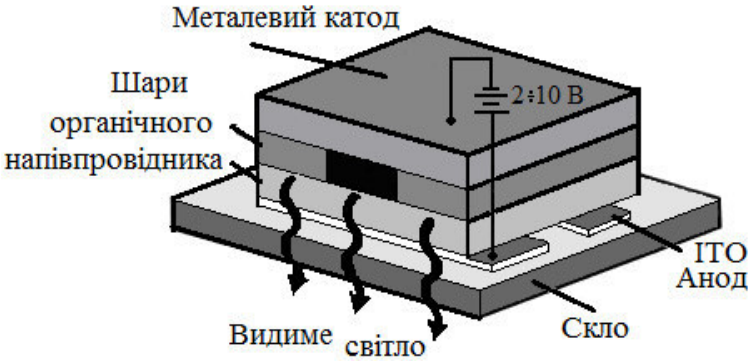


Рис. 4.22. Будова OLED-екрана

Національний університет водного господарства та природокористування

екрана багатошарова (див. рис. 4.22). Позаду панелі знаходиться металевий катод, попереду – анод (сітка із прозорого провідного матеріалу індій-оксид олова – ITO). Між ними знаходиться декілька органічних шарів світлодіода. Один шар – р-типу (див. рис. 4.23), другий є напівпровідниковим каналом дірок, у третьому відбувається заміщення дірок електронами, яке в даних полімерах супроводжується світловим випромінюванням, четвертий є напівпровідниковим каналом електронів, п'ятий – n-типу. Катод виготовлений з тонкого металевого сплаву з малою роботою виходу (алюміній покритий фторидом літію).

Управління OLED - матрицею відбувається аналогічно LCD - матриці за допомогою TFT-транзистора.

В якості основи екрану можна використовувати гнучкий прозорий пластик, що дозволяє створювати гнучкі екрани. При створенні

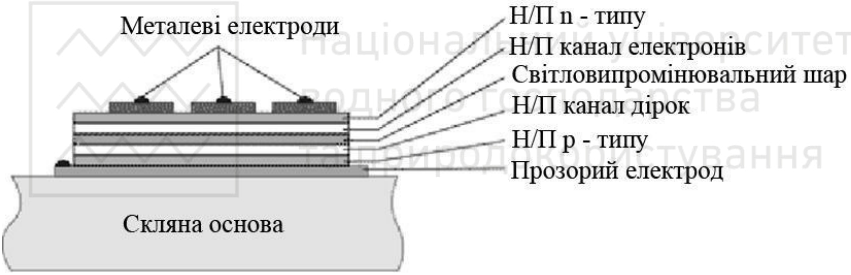


Рис. 4.23. Структура OLED-екрана

OLED - екранів застосовуються два види органічних сполук: макромолекули і полімери. Першими з'явились OLED - дисплеї на основі макромолекул, проте технологія виготовлення була занадто дорогою (застосовувалось вакуумне напилювання).

Перші світловипромінювальні полімерні дисплеї (англ.: **LEP** – Light Emitting Plastics) були створені у 1989 році. Світловипромінювальні полімери – це один з різновидів так званих спряжених полімерів, електропровідність різних представників яких знаходиться в досить широкому діапазоні. При розташуванні між електродами, полімери випромінюють світло. Ці полімери (поліфеніленвінілен (PPV) і ціано-PPV (CN-PPV)) є напівпровідниками (див. рис. 4.24, а). Будова піксела LEP-екрана показана на рис. 4.24, б.

Перший LEP-дисплей (1998р.) був монохромним (чорно-жовтим), мав роздільну здатність 800x236 пікселів і площу біля 50*мм*^{2} при товщині всього в 2*мм*. Кожним пікселем керував окремий тонкоплівковий транзистор (TFT), а світловипромінюючий полімер наносився на комутуючу матрицю в рідкому вигляді за технологією, аналогічною стандартному струменевому друку. Основа сучасних LEP-екранів може бути гнучкою з радіусом вигину менше 1*см*.

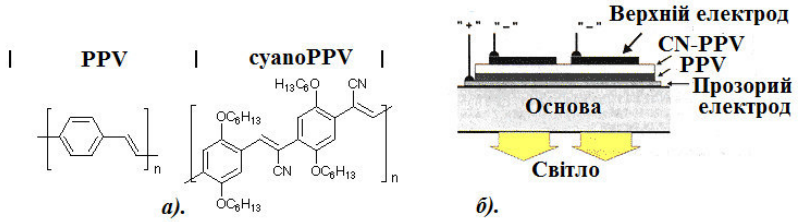


Рис.4.24. а) Будова молекул PPV і ціано-PPV; б) Будова піксела LEP-екрана

Переваги: низьке енергоспоживання, відсутність додаткової підсвітки екрану, висока контрастність і частота регенерації зображення, великі кути спостереження, малий час відгуку, робоча напруга – всього декілька вольт, малі маса і товщина, можливість створення гнучких екранів, невисока вартість при масовому виробництві.

Недоліки. Однією з головних проблем LEP-технології є низька ефективність випромінювання світла (тобто відношення інтенсивності світла до густини струму через полімерний матеріал). Спочатку це співвідношення становило 0,01%, зараз вдалося підняти цей показник до 5% при випромінюванні жовтого світла, що можна порівняти з ефективністю сучасних неорганічних світлодіодів (LED). Істотним недоліком був і досить вузький діапазон кольорів, в якому випромінювали пластики. Його межі вдалося розширити, і в даний час він поширюється від синього до ближнього інфрачервоного. Полімерний екран потребує герметизації, щоб уникнути його розшарування під дією водяної пари. Ще одна проблема полягала у вкрай низькому терміні служби LEP-моніторів через знебарвлення пластику під дією УФ-променів, однак за рахунок використання багатошарової структури та інших технічних засобів його продовжили до 5 років.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

4.2.10. 3D-монітори

3D-монітором називається пристрій, здатний вивести зображення екрану комп'ютера об'ємним, без додаткових пристроїв або за їх допомогою.

Простір, в якому можна спостерігати сформоване 3D-дисплеєм зображення називається *об'ємом відтворення*, а простір, в якому знаходиться спостерігач – *об'ємом спостереження*. Тільки перебуваючи всередині об'єму спостереження людина може розраховувати на сприйняття невикривленого об'ємного зображення, яке знаходиться в об'ємі відтворення.

Всі 3D-екрани поділяються на групи за здатністю відображення 3D-інформації:

1. *Стереоскопічні*. Вони відтворюють два ракурси зображення, один з яких призначений для лівого, а інший – для правого ока.
2. *Мультивидові*. Вони відтворюють декілька послідовних ракурсів зображення, і будь-яких два з них складають стереопару.

Стереоскопічні 3D-екрани. До них відносяться практично всі об'ємні дисплеї, які сьогодні використовуються. Принцип дії стереоскопічних систем базується на бінокулярних властивостях зорового апарату людини. Очі дивляться на зоровий об'єкт під різними кутами, мозок оцінює отриману інформацію і в результаті ми сприймаємо глибину і «тривимірність» цього об'єкту. Принцип роботи стереоскопічних 3D-екранів полягає в зніманні стереовідеосистемою об'єкту двома теле- або відеокамерами, рознесеними в просторі так, щоб позиція однієї відповідала лівому оку, а позиція іншої – правому. Обидва отриманих зображення (стереопара) відтворюються екраном, у якого об'єм відтворення поділений (сепарований) на дві частини умовною вертикальною площиною, перпендикулярною площині екрану, яка проходить через його центр. Зліва від площини спостерігається зображення для лівого ока, праворуч – для правого (див. рис. 4.25).

Очевидно, що для спостереження стереозображення людина повинна розташовуватись біля екрану так, щоб кожне око знаходилось в своєму секторі зору. Це можливо лише для одного спостерігача і для нього конфігурацію легко доповнити автоматикою, яка повертає розділову площину разом із рухом голови (tracking).

Існує два способи сепарації: окулярний та автостереоскопічний (растровий). При окулярній сепарації спостерігач дивиться на екран монітору через спеціальні окуляри (лорнети, шлеми).

Існує три види окулярної сепарації:

- анагліфічний;
- поляроїдний;
- екліпсний.

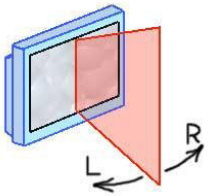


Рис. 4.25. Умовний поділ екрану при стереоскопічному зображенні

При анагліфічній сепарації обидва кадри стереопари відтворюються на екрані одночасно, але лівий кадр формується із градацій зображення зеленого кольору, а правий – із градацій червоного. Спостерігач дивиться на екран через спеціальні окуляри, у яких ліве скло зелене, а праве – червоне. В результаті, кожне око бачить своє зображення. Цей спосіб сепарації раніше реалізовувався в стереокінотеатрах.

При поляроїдній сепарації потрібний спеціальний РК-екран, на якому формуються кадри різної поляризації світла, наприклад, кадр, який сприймає ліве око має вертикальну поляризацію, а кадр, що сприймає праве око – горизонтальну. Обидва скельця окулярів також є поляроїдами взаємно перпендикуляр-

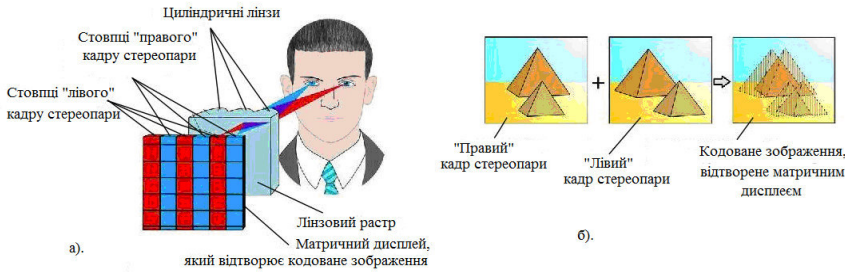


Рис. 4.26. Принцип автостереоскопічного способу сепарації: а) активні лінзові растри сепарують світловий потік; б) кадри, сформовані для правого і лівого ока

ної поляризації. Тоді при спостереженні зображення ліве око буде бачити одні кадри, а праве – інші.

Екліпсний вид сепарації найскладніший. При ньому кадри стереопари відтворюються на екрані почергово, а спостерігач дивиться

Національний університет водного господарства та природокористування

на екран через спеціальні окуляри, які в своєму складі мають світлоклапанну систему на рідких кристалах. Клапани синхронізовані з екраном і коли відтворюється зображення для лівого ока, клапан правого скла окулярів не пропускає зображення і навпаки. Для зменшення мерехтіння зображення при екліпсному виді сепарації необхідно використовувати монітори з частотою кадрової розгортки не менше 120*Гц*.

Відмінною рисою автостереоскопічного способу сепарації є відсутність будь-яких додаткових пристроїв для спостереження зображення на екрані монітору. Почергове спостереження зображень стереопари тут відбувається завдяки застосуванню спеціального оптичного растру. Під растром розуміють деяку періодичну структуру з однотипних елементів. Щодо 3D-екранів нас цікавлять *пасивні щілинні* та *активні лінзові растри*. Пасивний щілинний растр (паралакс-бар'єр) – це структура з прозорих і непрозорих смуг, що чергуються (типу дифракційної решітки). Наші очі рознесені в просторі по горизонталі, тому при спостереженні через вертикальний щілинний растр зображення екрану кожне з очей бачить різні ділянки зображення. Можна так підібрати положення і крок смуг щілинного растра, що спостерігач буде бачити однакові за шириною смуги: правим оком непарні, а лівим – парні. Якщо непарні смужки зображення будуть містити елементи, підготовлені спеціально для правого ока (правий ракурс), а парні смужки – для лівого ока (лівий ракурс), то спостерігач зможе сприйняти «об'єм» зображення, тобто відчути розташування об'єктів у просторі.

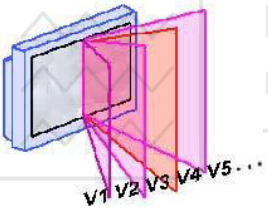


Рис.4.27. Поділ екрану в M3D

В даний час найчастіше в 3D-технологіях зображення використовується активний лінзовий растр, який складається з вертикально розміщених напівплоских циліндричних лінз, кожна з яких прикриває точно два стовпця пікселів екрану. Для отримання якісного зображення необхідно, щоб крок і розмір стовпців були точно узгоджені. Завдяки фокусучим властивостям циліндричної лінзи світлові потоки від парних і непарних стовпців матричного дисплея роз-

Національний університет водного господарства та природокористування

діляються в просторі і потрапляють, відповідно, в ліве і праве око (див. рис. 4.26).

Технічно для виготовлення стереоскопічних 3D-дисплеїв найкраще підходять LCD або PDP, оскільки пікселі в них жорстко прив'язані до місця, на відміну від CRT-моніторів, де зображення може зміщуватися і змінювати свій масштаб.

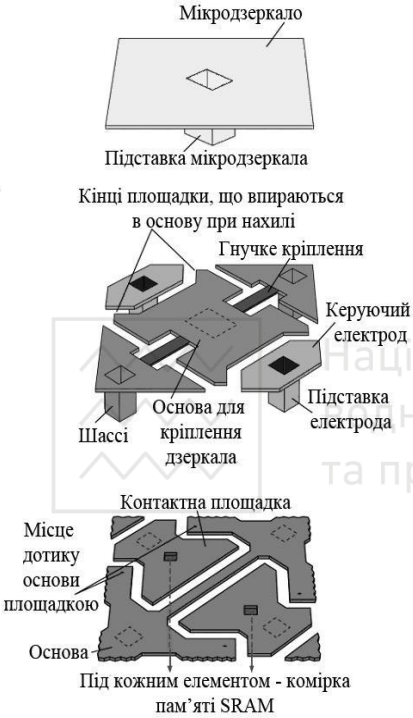


Рис. 4.28. DMD-матриця проектора

Стереоскопічне зображення на сучасних дисплеях можуть одночасно спостерігати 3-4 людини.

Мультивидові 3D-екрани (M3D) відтворюють об'ємне зображення у вигляді декількох послідовних ракурсів, будь-які два з яких складають стереопару. Принцип дії M3D базується на поділі об'єму відтворення не однією площиною, а декількома умовними вертикальними площинами, що проходять через центр екрана (див. рис. 4.27). У кожній частині відділеного площинами простору спостерігається свій вигляд (ракурс) зображення. Оскільки M3D є розвитком ідеї стереоскопічного 3D-екрану, то для його побудови застосовні ті ж технології лінзових растрів, тільки за кожною лінзою має розташовуватися стільки пікселів, скільки ракурсів зображення ми хочемо отримати. Очевидно, що об'ємне зображення M3D-екранів можна спостерігати багатьма людьми.

Національний університет водного господарства та природокористування

4.3. Проектори

4.3.1. Мікроелектромеханічні системи

Мікроелектромеханічні системи (англ.: MEMS Micro Electromechanical System) поділяються на мікродзеркальні, TMA-, GLV- та IMOD-проектори.

4.3.1.1. Мікродзеркальні проектори

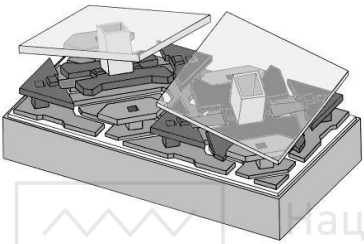


Рис. 4.29. Коливання мікродзеркал проектора

Мікродзеркальний проектор (англ.: DLP – Digital Light Processing, цифрова обробка світла). Основою даних відеопроекторів є DMD-матриця (англ.: Digital Micromirror Device), яка складається з мікродзеркал. Матриця послідовно освітлюється трьома основними кольорами і працює на відбивання світла. DMD-матриця – це кремнієва пластина, розміром близько $1 см^2$, з розміщеними на поверхні елементами для відбивання світла. Кожен такий елемент (алюмінієве дзеркало розміром приблизно $10 мкм^2$) під управлінням електронної схеми може займати два фіксованих положення. В одному – світло направляється на екран для створення зображення, в іншому – на світлопоглинач. Дзеркало знаходиться на відносно масивній основі, яка, в свою чергу, знаходиться на гнучкій, натягнутій між опорами, смужці-підвісі. В двох інших кутах основи (не за-

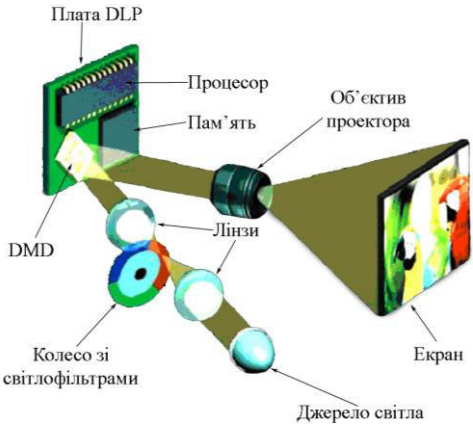


Рис. 4.30. Схема створення зображення проектором

йнятих опорами) знаходяться електроди, які за рахунок кулонівських сил можуть притягувати один край дзеркала, нахиляючи його на кут до 12 градусів (див. рис. 4.28).

Положення дзеркал відповідає темному і світлому пікселам. На рис. 4.29 показано положення одного дзеркала в «темному», а іншого в «світлому» станах. Щоб добавити відтінки сірого кольору, дзеркала примушують коливатись з різними частотами. Це дозволяє досягти 1024 градації сірого кольору.

Для забезпечення кольорового зображення на DMD-матрицю направляється біле світло через колесо кольорових світлофільтрів, яке обертається (див. рис. 4.30).

Переваги: компактність, якісне відтворення чорних відтінків.

Недоліки: мала насиченість кольорового зображення.

4.3.1.2. Проектори на основі технології ТМА

Як модифікація мікродзеркальних проекторів існують проектори, в яких застосовується **технологія ТМА** (англ.: Thin film Micromirror Array, масив тонкоплівкових мікродзеркал). У ній відхилення дзеркал здійснюється не електростатичним, а п'єзоелектричним способом.

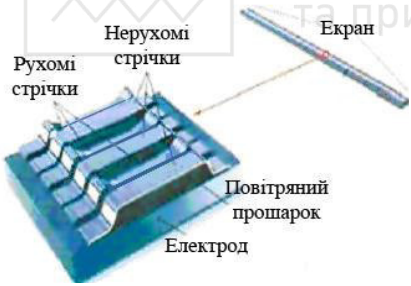


Рис. 4.31. Формування зображення мікромеханічною фазовою решіткою

4.3.1.3. Проектори на основі GLV-технології

GLV-технологія (англ.: Grating Light Valve**,** мікромеханічна фазова решітка).

Головним елементом оптичного шляху GLV-технології є кремнієвий чіп, із закріпленими на ньому паралельними стрічками з нітриду кремнію, які покриті світловідбиваючим шаром алюмінію. Кожна стрічка має довжину 100*мм*, ширину – 3*мм* і товщину

Рис. 4.32. Чіп GLV-матриці

3*фм*. Стрічки знаходяться над чіпом на висоті 650*нм*. У вимкненому стані всі стрічки одного чіпа знаходяться в одній площині, утворюючи одну суцільну дзеркальну поверхню. Вони відбивають направлений на них плоский пучок когерентного світла на екран у вигляді однієї білої смужки. Отримуючи заряд від керуючого пристрою стрічки з парними номерами деформуються і притягуються до протилежно зарядженої основи, а стрічки з непарними номерами не деформуються, оскільки електрично з'єднані з основою (див. рис. 4.31). При деформації парних стрічок на чверть довжини хвилі, відбите від поверхонь когерентне випромінювання буде зазнавати інтерференції, причому буде виконуватись умова мінімуму для інтерференції у відбитому світлі. На екрані буде спостерігатись темна смужка. На рис. 4.32 показаний чіп, який формує один темний піксел. Вибіркове керування зарядами стрічок дає можливість встановлювати бажану яскравість кожного окремого піксела.

Переваги: довговічність, висока швидкість, відсутність зернистості зображення.

4.3.1.4. Проектори на основі технології IMOD

Технологія IMOD (англ.: Reflective Interferometric Modulation, відбиваючий інтерференційний модулятор). Кожний піксел IMOD-матриці є інтерференційним модулятором. Він складається з двох елементів: напівпрозорої плівки на скляній основі і розміщеній під

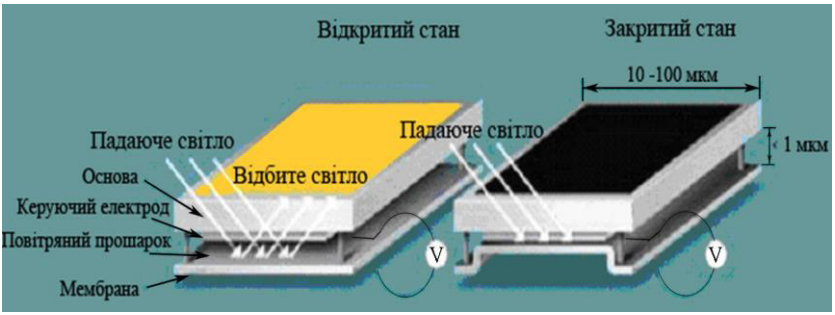


Рис. 4.33. Піксел IMOD-матриці

нею відбиваючої мембрани, яка може знаходитись в двох станах: відкритому і закритому. У вимкненому стані мембрана дотикаючись до плівки повністю закриває піксел. При подачі напруги мем-

Національний університет водного господарства та природокористування

брана зміщується на задану відстань від основи і між плівкою і мембраною утворюється невеликий прошарок повітря. Світло, відбите від мембрани проходить назад через плівку, інтерферуючи з падаючим. Змінюючи товщину повітряного прошарку можна формувати будь-який колір піксела. Чорний колір формується при закритому стані елемента (див. рис. 4.33).

Переваги: довговічність, мале енергоспоживання, висока швидкість, відсутність зернистості зображення.

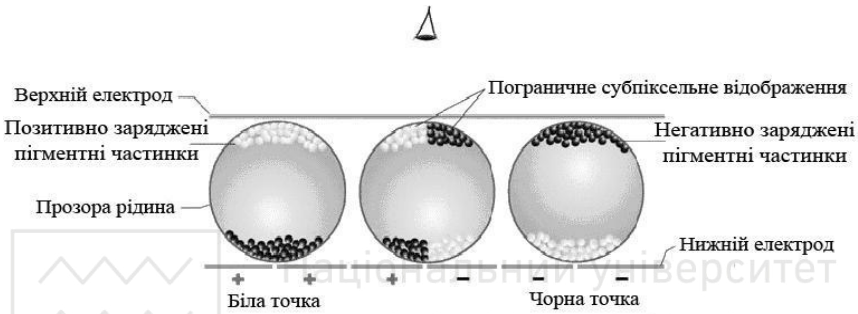


Рис. 4.34. Піксели електронного паперу

Національний університет водного господарства та природокористування

4.4. Електронний папір

Електронний папір (англ.: electronic ink display, EID, електронне чорнило) на відміну від моніторів не випромінює світло, а формує зображення у відбитому світлі (так само як у друкованих виданнях).

Вперше **технологія E-Ink** була застосована у 1997 році в Масачусетському технологічному інституті. Головним елементом електронного паперу є мікрокапсули розміром до 0,1*мм*, в яких знаходиться деяка кількість частинок пігменту двох кольорів (див. рис. 4.34). Білі частинки (двоокис титану) заряджені позитивно, а чорні (фарба) – негативно. Частинки пігменту вільно плавають в рідині. Такі мікрогранули знаходяться між двома електродами, прозорим верхнім і непрозорим нижнім. При прикладенні до електродів відповідної напруги, одні частинки пігменту можуть підніматись всередині мікрокапсули, а інші опускатись і навпаки. Керуючи зміною полярності можна формувати написи і малюнки чорного кольору на поверхні електронного паперу (див рис.4.35). Завдяки си-

Національний університет водного господарства та природокористування

лам міжмолекулярної взаємодії, а також силам електростатичного притягання і відштовхування часточки суспензії не можуть змінити своє положення в мікрокапсулах. Це означає, що сформовані на поверхні паперу зображення зберігаються і при відсутності електроживлення.

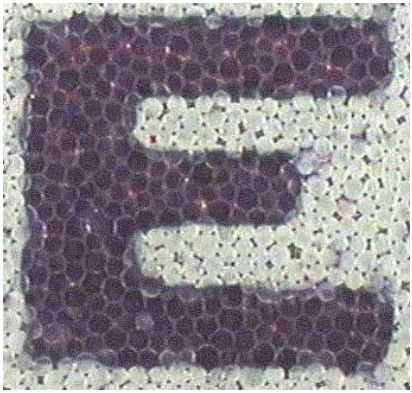


Рис. 4.35. Зображення на електронному папері

Переваги:

1. Велика стабільність частинок пігменту в мікрокапсулах (зображення може зберігатись декілька тижнів);
2. Мале енергоспоживання;
3. Мала вага;
4. Мала товщина (частини міліметра);
5. Велика ударостійкість;
6. Гнучкість (в робочому стані може бути скрученим в трубку діаметром до 1,5*см* без втрати якості зображення);
7. Великий кут огляду (близько 180 градусів);
8. Довговічність;
9. Дешевизна при масовому виробництві.

Недоліки:

1. Інерційність (близько 250*мс*, що відповідає зміні приблизно 4 кадрів в секунду);
2. Неможливість зображення великої кількості відтінків сірого кольору (до восьми).

3. Якщо використовувати EID в якості дисплея, то його яскравість, контраст і світлопередача дуже залежить від умов зовнішнього освітлення (як і у звичайного паперу).

4.4.1. Електронний папір на основі технології Gyricon

Як різновид технології E-Ink можна виділити **технологію Gyricon** розроблену ще у 1970 році Н. Шеридоном (США).

Сторінкою «паперу» Gyricon є прозорий лист пластика, запаяного зі всіх сторін, з масивом декількох мільйонів кулястих порожнин

Національний університет водного господарства та природокористування

всередині. Кожна порожнина заповнена рідиною з консистенцією рідкого масла, в якій вільно плаває, на відміну від технології E-Ink, лише одна двокольорова кулька діаметром від 20 до 100*мкм*. Одна сторона кульки темна, інша – світла (колір не важливий, головне – досягти контрастності) (див. рис. 4.36). Кожна із половинок кулі заряджена різнополярним зарядом. Керуючи потенціалами на електродах, кульку можна повернути до поверхні екрана світлою, або темною стороною і сформувати контрастну картинку (див. рис. 4.37).

4.4.2. Електронний папір на основі технології електрозмочування

Ще одна технологія електронного паперу – технологія електрозмочування (англ.: electrowetting). Інша назва – **технологія HEOS.** Вона з'явилася у 2003 році. Ефект «електричного змочування» базується на керуванні краплиною масляної фарби, яка знаходиться в мікрокапсулі, заповненій водою (див. рис. 4.38). Кожна з мікрокапсул є одним пікселем електронного паперу. В звичайних умовах краплина масла розтікається по всій поверхні комірки, утворюючи під дією сил поверхневого натягу плівку на воді. Якщо створити між електродами електричне поле достатньої величини, масло почне збиратись в краплину, звільняючи при цьому більшу частину поверхні. Основа-електрод виготовляється з водовідштовхуючого матеріалу, тому масло прилипає до

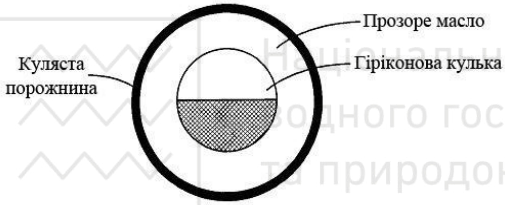


Рис. 4.36. Кулька зображення в технології Gyricon

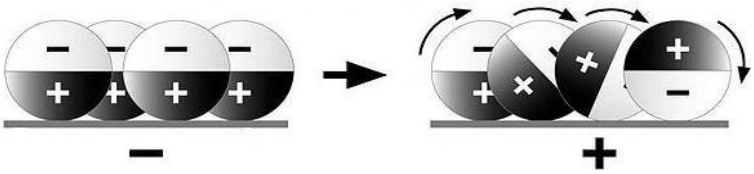


Рис. 4.37. Формування зображення за допомогою технології Gyricon

Національний університет водного господарства та природокористування

неї, а після зникнення напруги, знову розтікається по поверхні. Мікрокапсули розділені перегородками товщиною близько 5*мкм*, а зверху вся конструкція герметично закрита шаром скла з напиленим на нього електродом (поки що це одна з причин рсткості дисплея).

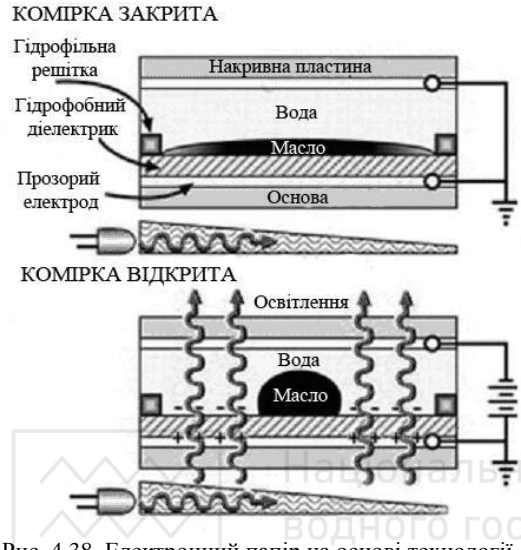


Рис. 4.38. Електронний папір на основі технології HEOS

Малий розмір піксела дозволяє отримати високі контрастність і яскравість елементів, які перемикаються. Час перемикання між білим і кольоровим пікселами (швидкодія) становить приблизно 12*мс*, тому такий «папір» можна застосовувати для відеозображень. Товщина і енергоспоживання таких дисплеїв також невеликі. Таким чином, технологія електрозмочування дозволяє створювати повноцінні дисплеї високої яскравості (у чотири рази вищої ніж у РК - дисплеїв відбивного типу і в два рази – ніж у нових дисплеїв на застосуванні інших фізичних принципів).

Існує декілька модифікацій реалізації мікрокапсули. Одна з них зображена на рис. 4.38 – з підсвіченою прозорою основою.

Такі дисплеї використовуються в mp-3 плеєрах, телефонах, DVD-плеєрах, GPS-приймачах та інших подібних пристроях.

4.4.3. Електронний папір на основі нанотехнологій

Технологія запропонована ірландською компанією Ntera, яка представляє свій продукт під назвою NanoChromics Display (NCD). Зображення, яке формується на дисплеї, подібне малюнку чорнилом на папері. Кут огляду для даного екрану складає 180 градусів, а

швидкість відгуку може забезпечити частоту 60 кадрів за секунду. Енергоживлення NCD-екрана складає лише 10% від живлення РК-дисплея такого ж розміру. Робоча напруга NCD не перевищує 1*В*.

Для відображення висококонтрастної картинки на дисплеї використовують властивість електрохромних провідних полімерних з'єднань змінювати свої оптичні характеристики (в тому числі і колір) при зміні рівня окислення. Якщо цей рівень регулюється потенціалом електрода, на який нанесений цей полімер, то оптичними характеристиками полімеру можна керувати за допомогою електри-

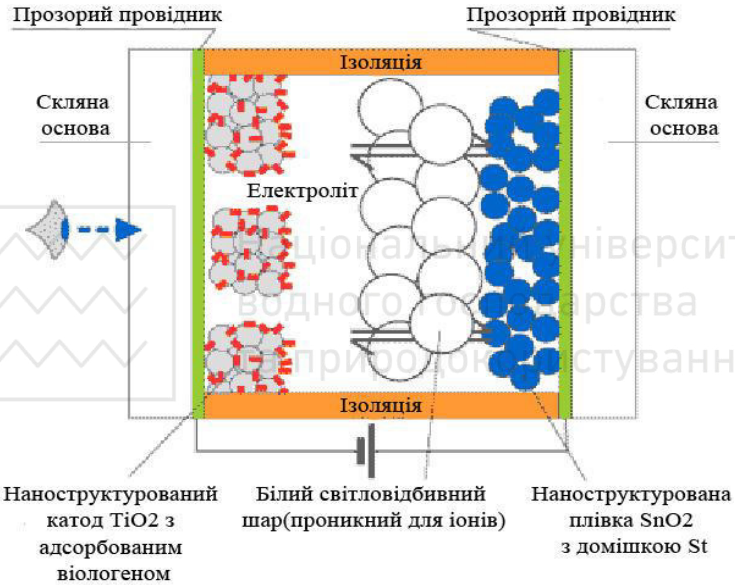


Рис. 4.39. Принцип роботи NCD-екрана

чного сигналу (електрохромний ефект). В NCD-екранах на тонкий шар наночастинок діоксиду титану (хімічна сполука, яка надає паперу білого кольору) наноситься прозорий полімер – віологен з нанопористою структурою, який при зміні прикладеного до нього потенціалу може втрачати прозорість, досягаючи при цьому рівня насиченого чорного кольору. Простір між діоксидом титану і віологеном заповнений спеціальним електролітом.

Принцип роботи дисплея NanoChromics представлений на рис. 4.39.

Національний університет водного господарства та природокористування

Екран складається із декількох шарів, два із яких формують зображення: зовнішній – із наночастинок діоксиду титану і електрохромного шару віологену. При відсутності потенціалу між прозорими електродами екран виглядає абсолютно білим, оскільки світло відбивається від наночастинок діоксиду титану. При подачі напруги на електроди віологен зміщується ближче до діоксиду титану, адсорбується ним і зафарбовується в близький до чорного колір. Це дає можливість змінювати колір екрану.

На сьогодні випускаються тільки монохромні дисплеї, але ведуться інтенсивні роботи зі створення кольорових дисплеїв. Ще однією перевагою даної технології є незалежність від температури. Пристрої можуть ефективно працювати в температурному діапазоні від -35 до +80 градусів за Цельсієм.

4.3.4. Електронний папір на основі електрофлюїдної технології

Національний університет водного господарства та природокористування

Електрофлюїдна технологія (англ.: ElectroFluidic Display, EFD). Для формування зображення використовуються мініконтейнери з електрочутливою водною дисперсією кольорового пігменту. При прикладенні напруги між двома електродами пігмент виливається з контейнера і прилипає до поверхні піксела. При зміні полярності напруги фарба ховається назад. Оскільки видима площа контейнера не перевищує 5% площі піксела, то в ньому вона майже не помітна (див. рис. 4.40).

Діаметр такого піксела становить 300*мкм*, при товщині 15*мкм*.

Рис. 4.40. Електронний папір на основі електрофлюїдної технології

Національний університет водного господарства та природокористування

4.4. Інші пристрої виведення інформації на екран

Існує багато інших пристроїв виведення інформації на екран:

1. **Оверхед-проектори:** (кодоскопи, графопроектори);
2. **Документ-камери**;
3. **Інтерактивні дошки;**
4. **Лазерні проектори**.

Одні з них втратили актуальність, а вивчення інших не передбачено програмою даного курсу.

4.5. Принтери

Завдання виведення інформації, представленої в графічній формі, виникло одночасно з появою обчислювальних систем. Пристрої, що виконують функції виведення графічної інформації на паперовий та деякі інші носії, називаються **принтерами** (англ.: print - друк) [5]. Розглянемо основні технології принтерів, переваги та недоліки різних типів принтерів та деякі їх характеристики. Характеристиками, які визначають переваги одних принтерів над іншими є:

1. *Швидкість друку*. Одиницею виміру швидкості друку є число знаків, які принтер переносить на папір за одну секунду, - cps (з англ. characters per second).
2. *Об'єм пам'яті*. Визначається внутрішньою пам'яттю принтера (буфером), в якій зберігаються дані, отримані від комп'ютера.
3. *Рівень шуму* в режимі друку.

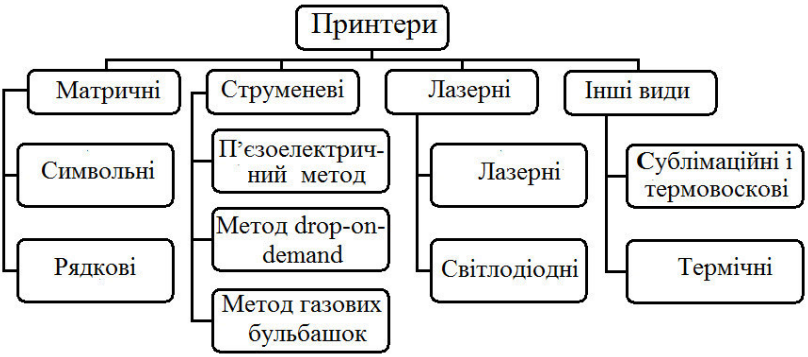


Рис.4.41. Класифікація принтерів

Національний університет водного господарства та природокористування

4. *Роздільна здатність*, яка визначається кількістю точок, які друкуються на одному дюймі довжини (з англ. dots per inch, dpi).

Крім того, для матричних принтерів істотну роль відіграють і інші чинники: точність позиціювання головки принтера, частота ударів голок, якість фарбувальної стрічки, тощо.

За фізичним принципом роботи (див. рис. 4.41) принтери поділяються на різні типи.

4.5.1. Матричні (голчасті) принтери

Голчасті (матричні) принтери (англ.: Dot Matrix Printer) довгий час використовувалися як стандартні пристрої виведення даних з комп'ютера. Вони часто застосовуються і сьогодні. Переваги цих принтерів визначаються, в першу чергу, їх невибагливістю до якості паперу, а також низькою вартістю друку і можливістю одночасного друку декількох копій [6].

На відміну від типового або «головкового» принтера, в якому встановлюються різні типи знаків (букви, цифри, розділові знаки – як у типографських машинах), голчастий принтер формує знаки декількома голками, розташованими в головці принтера. Механіка подачі паперу загалом мало змінилася – папір втягується за допомогою валу; між папером і головкою принтера розташовується фарбувальна стрічка. При ударі голки по цій стрічці на папері залишається слід фарби. Голки, які розташовані всередині головки, приводяться в дію електромагнітами. Головка переміщується по горизонтальним направляючим за допомогою крокового двигуна.

У перших голчастих принтерах в головці принтера знаходилося 9 голок, потім з'явилися 18-голкові принтери. Нині більшість фірм-виробників перейшли на виробництво 24-голкових принтерів, де використовується технологія послідовного розташування голок в два ряди по 12 голок.

Завдяки горизонтальному руху головки принтера і активізації окремих голок надрукований знак утворює матрицю, причому окремі букви, цифри і знаки записані в пам'ять принтера (ПЗП) у вигляді бінарних кодів. Тому головка принтера «знає», які голки і в яких комбінаціях необхідно активізувати, щоб, наприклад, створити за 10 кроків головки букву «К» (див. рис. 4.42).

Національний університет
водного господарства
та природокористування

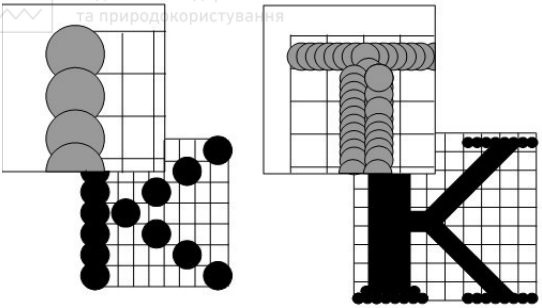


Рис. 4.42. Матриця для букви «К» в залежності від кількості голок в головці принтера і режиму

Оскільки вані знаки зовні є трицею, а відтворює цю матрицю голчастий принтер, то часто його називають матричним принтером.

***Переваги*:** невибагливість до якості паперу; друк на нестандартному папері; можливість друку під копірку; простота та надійність; дешевизна витратних матеріалів.

***Недоліки*:** не друкують графіку; високий рівень шуму; низька швидкість друку; низька якість друку (150 dpi); монохромний друк.

4.5.2. Рядкові принтери

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Як варіант голчастого принтера було запропоновано рядковий принтер. У нього відсутня головка, але є друкуюча планка, яка по всій довжині забезпечена голками. Під час друку зображення, матриця, яка відповідає рядку, повністю переноситься на папір.

Істотно зростає швидкість друку, оскільки головка принтера не рухається і рядок друкується одночасно. Такі принтери випускаються фірмами Genicom і Dataproducts. Швидкість друку досягає 1500 рядків за хвилину (приблизно 20 сторінок формату А4 за хвилину).

4.5.3. Кольорові голчасті принтери

Порівняно невелика кількість голчастих принтерів має можливість кольорового друку. Це пояснюється тим, що до моменту появи на ринку перших моделей 24-голкових принтерів, здатних друкувати кольорові зображення, ціна на кольорові струменеві принтери вже істотно знизилася. А якість друку 24-голкового принтера за допомогою багатокольорової фарбувальної стрічки суттєво гірша в порівнянні з якістю друку на струменевому принтері.

Національний університет водного господарства та природокористування

4.5.4. Струменеві принтери

Якість друку струменевого принтера (англ.: Ink Jet) не поступається якості друку лазерних принтерів. Ці принтери прості в обслуговуванні, мають низький рівень шуму, тому вони широко використовуються в домашніх умовах.

У струменевих принтерах для формування зображення використовуються спеціальні сопла, через які на папір подається фарба. Тонкі сопла знаходяться на головці принтера, де встановлений резервуар з рідкою фарбою, яка у вигляді мікрокрапель переноситься через сопла на матеріал носія. Число сопел залежить від моделі принтера та його виробника і складає від 16 до 64 сопел. Деякі моделі мають набагато більше число сопел, наприклад, головка принтера Deskjet 1600 має 300 сопел для чорної фарби і 416 – для кольорових.

Зберігання фарби в принтері здійснюється двома способами:

1. головка принтера є складовою частиною патрона з фарбою, заміна патрона з фарбою є одночасною із заміною головки;
2. використовується окремий змінний резервуар, який через систему капілярів забезпечує фарбою головку принтера.

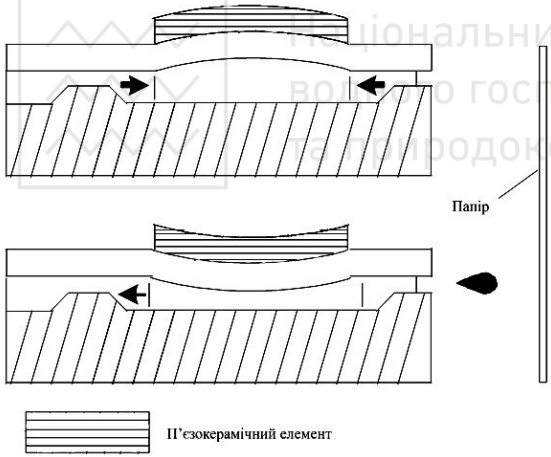


Рис. 4.43. Подача фарби через сопло з п'єзоелементом

Фірми-виробники реалізують різні способи нанесення фарби на папір:

1. **П'єзоелектричний метод;**
2. **Метод газових бульбашок;**
3. **Метод drop-on-demand.**

П'єзоелектричний метод. Для реалізації цього методу в кожне сопло встановлюється плоский п'єзокристал, який приклеюється до

Національний університет водного господарства та природокористування

діафрагми (див. рис. 4.43). Під дією електричного поля п'єзоелемент деформується. Стискаючи і розтягуючи трубку він наповнює капілярну систему фарбою. Фарба, яка відтискається назад, перетікає в резервуар, а фарба, яка «витіснилася» назовні, залишає на папері крапку. Подібні пристрої випускають компанії Epson, Brother та ін.

Метод газових бульбашок. Цей спосіб базується на термічному методі і більше відомий під назвою Bubblejet (інжектовані бульбашки). При використанні методу кожне сопло принтера обладнане нагрівальним елементом, який при пропусканні через нього струму за декілька мікросекунд нагрівається до температури близько 500°*C* (див. рис. 4.44). Газові бульбашки (bubbles), що виникають при різкому нагріванні, виштовхують через вихідний отвір сопла порцію (краплю) рідкої фарби, яка переноситься на папір. При відключенні струму нагрівальний елемент охолоджується, бульбашка пари зменшується і через вхідний отвір в сопло поступає нова порція фарби. Подібну технологію використовує фірма Canon.

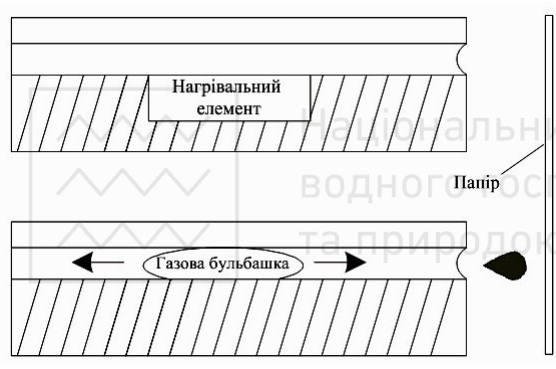


Рис. 4.44. Подача фарби за допомогою газових бульбашок

Завдяки тому, що в механізмах друку, реалізованих з використанням методу газових бульбашок, менше конструктивних елементів, такі принтери надійніші в роботі і термін їх експлуатації триваліший. Крім того, використання цієї технології дозволяє добитися високої роздільної здатності принтерів. Хоча даний метод забезпечує високу якість, він має недоліки при друці областей суцільного заповнення: вони виходять дещо розпливчастими.

Застосування методу газових бульбашок доцільне при друці графіків, гістограм і т. п., тоді як друк напівтонових графічних зображень виходить якіснішим при використанні методу drop-on-demand.

Національний університет водного господарства та природокористування

Метод drop-on-demand. Цей метод розроблений фірмою Hewlett-Packard. Подібно до методу газових бульбашок, при подачі фарби із резервуару на папір використовується нагрівальний елемент. При цьому додатково використовується спеціальний механізм (див. рис. 4.45).

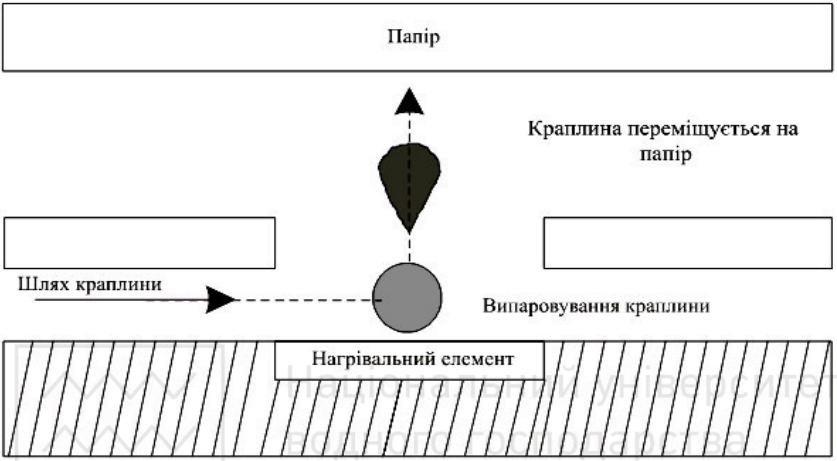


Рис. 4.45. Подача фарби за методом drop-on-demand

Національний університет водного господарства та природокористування

4.5.5. Кольорові струменеві принтери

Здатність струменевих принтерів створювати кольорове зображення сприяла їх широкому застосуванню. Кольоровий друк за допомогою голчастих принтерів не забезпечує бажаної якості. Використання для цієї мети інших типів принтерів, лазерних або термічних, обмежене для загалу користувачів через відносно високу вартість. Тому застосування кольорових струменевих принтерів є недорогою, але все ж якісною альтернативою.

При друці звичайне кольорове зображення формується накладанням трьох основних друкарських кольорів: *блакитного, пурпурного і жовтого*. Теоретично, накладання цих кольорів повинне створювати зображення чорного кольору. На практиці в більшості випадків отримують зображення сірого або коричневого кольору. Тому четвертим основним кольором використовують чорний. Таку колірну модель називають CMYK.

Національний університет водного господарства та природокористування

З цієї причини в нових моделях струменевих принтерів застосовується не три, а чотири кольорові патрони для створення кольору (додають додатковий патрон з чорнилом чорного кольору). Завдяки цьому з'явилася можливість широкого використання таких принтерів для звичайного друку текстів і чорно-білих графічних зображень з одночасною економією кольорової фарби.

Переваги:

1. Рівень шуму складає близько 40*дБ*, що на 15*дБ* менше ніж у голкових принтерів;
2. При чорновому друці (англ.: Draft Mode) струменевий принтер має значно більшу швидкодію ніж голковий;
3. Вирішальна перевага струменевого принтера, в порівнянні з матричним полягає в зображенні шрифту. Для моделей з великим числом сопел характерне досягнення параметрів якості лазерного принтера.

Недоліки:

1. На відміну від голчастого принтера не може використовувати рулонний папір;
2. При друці з підвищеною якістю (L) швидкість друку значно менша ніж у голкового принтера;
3. Важливим недоліком струменевого принтера є небезпека засихання фарби всередині сопла;
4. Низька економічність, витрати на фарбу при тривалому використанні перевищують вартість пристрою;
5. Низька ємність картриджів;
6. Вимогливість до паперу;
7. Низька стійкість відбитків (швидко вицвітають та змиваються);
8. Відносно низька надійність.

4.5.6. Термічні принтери

Технологія термічних принтерів базується на використанні механізму друку факсимільних апаратів. Фактично більшість термічних принтерів працюють як факсимільні апарати. Головка друку термічного принтера конструктивно подібна аналогічному вузлу матричного принтера. Для таких принтерів необхідний папір із спеціа-

Національний університет водного господарства та природокористування

льним термочутливим покриттям. Керовані електричним струмом голки нагрівають папір, залишаючи на ньому відмітки.

Завдяки чіткості графіки і тонових зображень при оформленні проектно-конструкторської документації технологія прямого перенесення знайшла широке застосування в проектно-конструкторських і науково-дослідних роботах. Ця технологія також застосовується в широкоформатних графопобудівниках (англ.: plotter, плотер), що дозволяють друкувати зображення шириною 36 дюймів.

4.5.7. Сублімаційні та термовоскові принтери

Для отримання кольорового зображення з якістю, близькою до фотографічного, або для виготовлення допечатних кольорових проб використовують сублімаційні і термовоскові принтери (кольорові принтери високого класу). Є принтери, які поєднують в собі технологію сублімаційного і термовоскового друку. Такі принтери дозволяють друкувати на одному пристрої як чорнові, так і чистові відтиски.

Загальним для сублімаційної і термовоскової технологій є нагрів барвника і перенесення його на папір (плівку) в рідкій або газоподібній фазі. Багатоколірний барвник, як правило, нанесений на тонку лавсанову плівку товщиною 5*мкм*. Плівка переміщується за допомогою стрічкопротяжного механізму, який конструктивно схожий на аналогічний вузол голкового принтера. Матриця нагрівних елементів за 3-4 проходи формує кольорове зображення.

Відмінність термовоскового друку від сублімаційного полягає в тому, що в першому випадку плівка покривається воскоподібною мастикою, а в другому – спеціальним барвником. Термовоскові принтери, нагріваючи стрічку з кольоровим воском, переносять розчинений у воску барвник на папір. Як правило, для подібних принтерів необхідний папір із спеціальним покриттям. Термовоскові принтери зазвичай використовуються для друку ділової графіки.

При сублімаційному друці здійснюється переведення фарбника в газоподібний стан шляхом нагрівання стрічки. Цей газ потім поглинається полістирольним покриттям спеціального паперу. Дифузійне перенесення фарбника забезпечує отримання високоякісного кольорового зображення без видимих тональних переходів. Будучи одні-

Національний університет водного господарства та природокористування

єю з найпрогресивніших технологій кольорового друку, кольорова сублімаційна технологія є ідеальним засобом забезпечення фотографічної якості зображення.

4.5.8. Лазерні технології друку

Домінуючими для лазерних принтерів є електрофотографічна та світлодіодна (англ.: LED, Light Emitting Diode) технології [7,8]. Електрофотографічна технологія подібна до технології, яка використовується в копіювальних апаратах. У світлодіодній технології в якості оптичного пристрою, що формує зображення, використовуються світлодіоди (історично світлодіодні принтери відносяться до класу лазерних). Світлодіодна технологія, як правило, застосовується в широкоформатних принтерах (до 36 дюймів). Електрофотографічна технологія використовується в настільних і офісних лазерних принтерах. Лазерні принтери (англ.: Laser Jet) формують зображення шляхом позиціювання точок на папері (растровий метод). Спочатку сторінка формується в пам'яті принтера і лише потім передається в

Національний університет водного господарства та природокористування

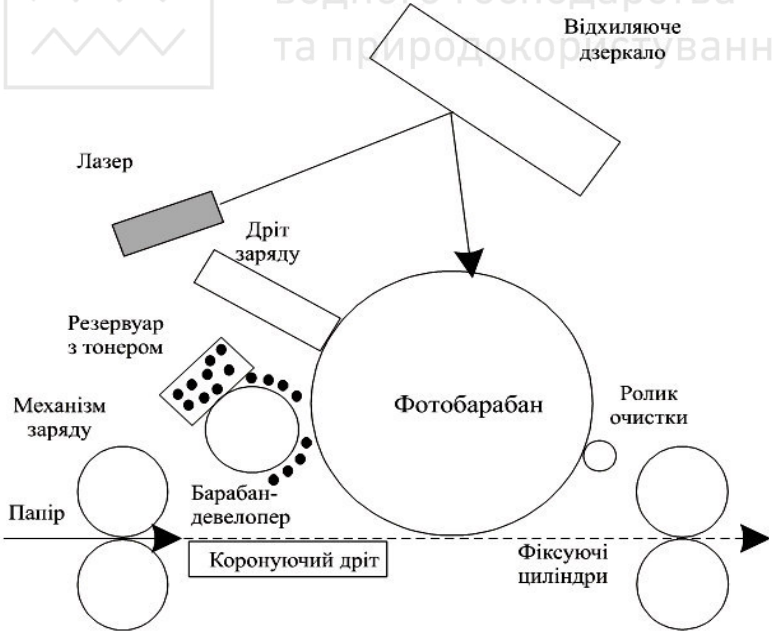


Рис. 4.46. Функціональна схема лазерного принтера

Національний університет водного господарства та природокористування

механізм друку. Растрове представлення символів і графічних образів здійснюється під управлінням контролера принтера. Кожний образ формується шляхом відповідного розташування точок у комірках матриці.

Найпоширеніші лазерні принтери використовують технологію фотокопіювання, яку називають ще електрофотографічною. Вона полягає в точному позиціюванні точки на сторінці за допомогою зміни електричного заряду на спеціальній плівці з фотопровідного напівпровідника. Подібна технологія друку застосовується в ксероксах. Принтери фірм HP і MS, наприклад, використовують механізм друку ксероксів фірми Canon. Найважливішим конструктивним елементом лазерного принтера є обертовий фотобарабан, за допомогою якого відбувається перенесення зображення на папір. Фотобарабаном є металевий циліндр, на якому закріплена тонка плівка з фотопровідного напівпровідника. По поверхні барабана рівномірно розподіляється статичний заряд. На тонкий дріт (сітку), який називається коронуючим дротом (коронуючою сіткою), подається висока напруга, яка створює йонізовану область (корону).

Лазер, керований мікроконтролером, генерує тонкий світловий промінь, який відбивається від рухомого дзеркала. Цей промінь, потрапляючи на фотобарабан, засвічує на ньому елементарні площадки (точки), і в результаті фотоефекту в цих точках змінюється електричний потенціал. Для деяких типів принтерів потенціал поверхні барабана зменшується від -900 до -200*В*. Таким чином, на фотобарабані виникає копія зображення у вигляді потенціального рельєфу (див. рис. 4.46).

За допомогою іншого барабана, який називається девелопером (англ.: developer), на фотобарабан наноситься тонер - найдрібніший фарбувальний пил. Під дією статичного заряду дрібні частинки тонера легко притягуються до поверхні барабана в точках, що піддалися дії променя, і формують на ньому зображення (див. рис. 4.47).

Аркуш з лотка подачі паперу за допомогою системи валиків переміщується до барабана. Йому надається статичний заряд, протилежний по знаку заряду засвічених точок на барабані. При дотику паперу до барабана частинки тонера з барабана переносяться (притягуються) до паперу.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

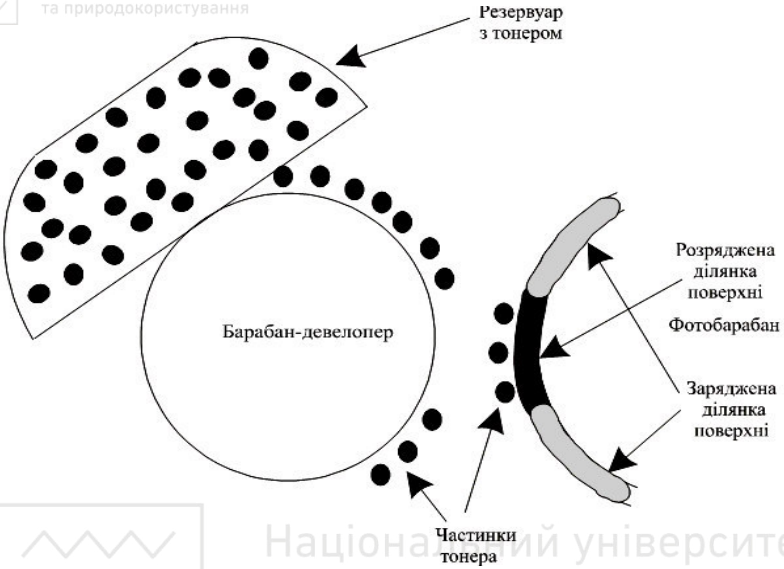


Рис. 4.47. Створення копії зображення на фотобарабані

Для фіксації тонера на папері аркуш пропускається між двома роликами, які нагрівають його до температури близько 180°-200°*C*. Нагрівання забезпечує закріплення фарби тонера на папері. Після процесу друку барабан повністю розряджається, очищається від частинок тонера і готується до нового циклу друку. Описана послідовність дій відбувається дуже швидко і забезпечує високу якість друку.

4.5.9. Лазерні кольорові принтери

При друці на кольоровому лазерному принтері використовуються дві технології. Відповідно до першої, яка широко використовувалась до недавнього часу, револьверний барабан (див. рис. 4.48) повертає по черзі кожен кольоровий картридж (Cyan, Magenta, Yellow, Krimson) до фотовалу. На ньому формується однокольорове зображення, після чого кожен колір збирається транспортною стрічкою, а з неї вже повнокольорове зображення переноситься на папір.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

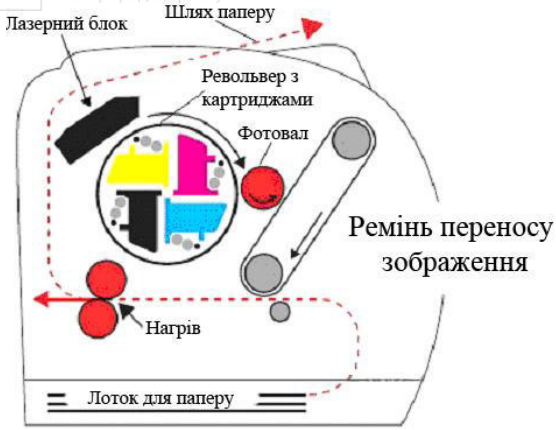


Рис. 4.48. Схема реалізації методу отримання зображень в лазерному принтері

Аркуш друкувався за чотири проходи, що, природно, чалося на швидкості і якості друку.

У сучасних моделях в результаті 4-х послідовних прогонів на фотобарабан наноситься тонер кожного з 4-х кольорів. Потім при дотику паперу до барабану на нього наносяться всі 4 фарби одночасно, утворюючи потрібні поєднання кольорів на відбитку. В результаті досягається передача відтінків кольорів майже така, як і при друці на кольорових принтерах з термопресом фарбника.

***Переваги*:**

1. висока надійність;
2. відносно невисока вартість копії;
3. висока швидкість друку (до 19*стор./хв.*);
4. висока якість друку (300-1200 dpi).

Недоліки:

Монохромний друк (висока вартість принтера та копії для якісної кольорової копії).

4.5.10. Світлодіодні принтери

У світлодіодному принтері для засвічування барабана замість лазерного променя, керованого за допомогою системи дзеркал, використовується нерухомий світлодіодний рядок (лінійка), який складається з 2500 світлодіодів. Ним формується не кожна точка зображення, а цілий рядок (див. рис. 4.49). Подібно працюють лазерні принтери фірми OKI.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

4.5.11. Твердочорнильні принтери

Твердочорнильні принтери в своєму складі містять елементи як струменевого так і лазерного принтерів. Як у струменевих принтерів у них соплами головки викидаються краплі розплавлених барвників, але ці краплі потрапляють не прямо на папір. Спочатку вони потрапляють на нагрітий металевий барабан (чимось подібний до барабана-девелопера лазерного принтера), з якого вже переносяться на папір, де і застигають. Завдяки цьому досягається, з одного боку, висока швидкість друку, властива лазерним принтерам, а з іншого – якість виведення зображень, що наближається до офсетного друку.

«Чорнило» в початковому стані – це невеликі тверді воскоподібні забарвлені бруски, кожен – одного з кольорів CMYK (див. рис. 4.50). Брусок кожного кольору має унікальну форму, яка відповідає формі отвору в призначеному для нього відділенні контейнера для чорнила. Таке «формове кодування» практично повністю виключає можливість помилки при заправці принтера чорнилом. У кожне відділення «заряджається» до чотирьох брусків, причому закладати їх можна в будь-який час, навіть у процесі друку. При закриванні кришки контейнера бруски підтискаються пружинами так, щоб головний брусок в кожному відділенні був щільно притиснутий до керамічної плавильної пластини.

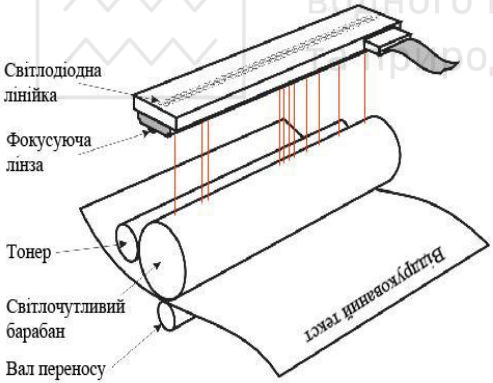


Рис. 4.49. Формування зображення за допомогою LED-технології

Розплавлене гарячими пластинами чорнило стікає в нагрітий резервуари друкуючої головки, де підтримується в розплавленому стані. Після заповнення резервуару чорнилом певного кольору відповідна плавильна пластина відключається. З витратою чорнила пластини включаються, підтримуючи необхідний рівень барвників в резервуарах головки.

Національний університет водного господарства та природокористування

П’езоструменева головка з нержавіючої сталі має 1236 сопел і перекриває, на відміну від головок струменевих принтерів, всю ширину друкованої сторінки. Досягнута в сучасних моделях твердочорнильних принтерів роздільна здатність 2400 dpi забезпечується шляхом невеликого (на відстань між сусідніми соплами) горизонтального переміщення головки. П’єзоелементи сопел здатні викидати до 30 млн. крапель в секунду. Завдяки такій конструкції досягається набагато вища, ніж у струменевих принтерів, швидкість друку (до 30 сторінок за хвилину).

Викинуті головкою краплі барвників потрапляють на нагрітий до нижчої, ніж головка, температури обертовий барабан з нержавіючої сталі, на який попередньо за допомогою спеціального валика, що входить до складу комплекту техобслуговування, наноситься тонкий шар силіконового масла. На барабані барвники переходять з

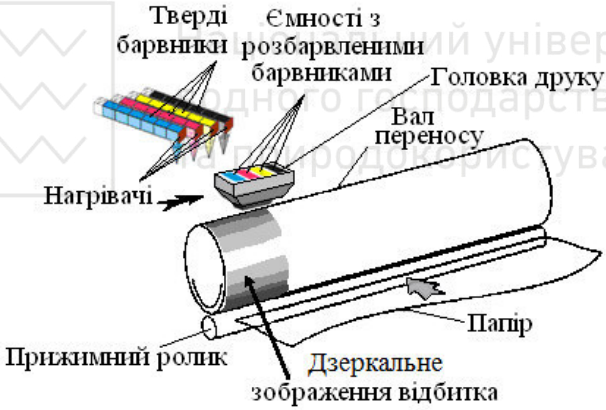


Рис. 4.50. Принцип роботи твердочорнильних принтерів

рідкого в проміжний еластичний стан.

Коли на барабані сформована приблизно третина зображення сторінки, з нижнього касетного або багатофункціонального переднього лотка подається лист паперу (або іншого носія). Пройшовши через щілину підігрівача, нагрітий лист притискається валиком перенесення до барабана, і барвники, що мають більшу адгезію до паперу, ніж до змащеному олією гладкого барабану, переходять на лист, де і остаточно застигають. Наявний в комплекті техобслугову-

Національний університет водного господарства та природокористування

вання скребок очищує барабан від забруднень і крапель барвників, які на ньому залишилися, після чого процес повторюється.

Переваги:

Простіша конструкція ніж у лазерного принтера з меншою кількістю оптичних, механічних, електронних компонентів, а значить більша надійність в роботі.

Набагато менша кількість витратних матеріалів і простота їх заправляння і заміни.

Стабільно висока якість друку, не змінюється з часом і не залежить від кількості надрукованих на принтері сторінок.

Недоліки. Тривалий в часі процес підготовки принтера до роботи з холодного (тобто повністю вимкненого) стану. Один з етапів цього тривалого (до 15 хв.) процесу – вакуумне очищення сопел головки, при якому частина розплавленого чорнила зливається в лоток для відходів і там застигає. Саме тому твердочорнильний принтер рекомендується не вимикати ніколи.

Національний університет водного господарства та природокористування

4.5.12. 3D-принтери

3D-принтер – це спеціальний пристрій для виведення тривимірних даних. На відміну від звичайного принтера, який виводить двовимірну інформацію на аркуш паперу або спеціальну гладку поверхню, 3D-принтер дозволяє виводити тривимірну інформацію у вигляді реальних фізичних об'єктів. В основі технології 3D-друку лежить принцип пошарового створення (вирощування) твердої моделі.

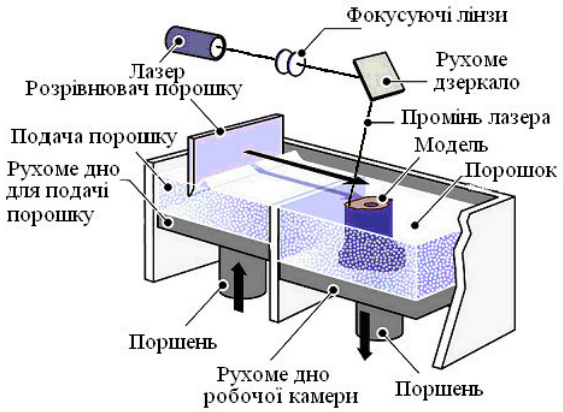


Рис. 4.51. Технологія SLS в 3D-принтері

За аналогією з пристроями для традиційного друку, існуючі на сьогодні технології 3D-друку можна

Національний університет водного господарства та природокористування

поділити на дві категорії – лазерні та струменеві. Лазерні 3D-технології, в основному використовуються при роботі з різноманітними порошками (полімерними та металевими) та рідкими фотополімерами. Струменеві 3D-технології використовуються при друці розплавленим пластиком та порошком. Приведемо приклади деяких із них.

Технологія SLS (англ. : Selective Laser Sintering, селективне лазерне спікання) – технологія 3D-друку, що базується на пошаровому спіканні порошкових полімерних матеріалів. В якості таких матеріалів використовують інженерний пластик, який має відмінні механічні властивості. Ця технологія може успішно застосовуватися як для створення формовок для пластмасового та металевого лиття, так і для виготовлення повнофункціональних моделей.

Характерною особливістю застосування цієї технології є використання двох камер з рухомими платформами (робочої камери та камери для подачі порошку). Герметична робоча камера принтера протягом всього процесу друку заповнена інертним газом. Особливість інертних газів полягає в тому, що вони не вступають в хімічну реакцію з матеріалами деталі, яка друкується. Тому використання інертного газу дозволяє запобігти хімічним реакціям повітря з матеріалом заготовки, що істотно покращує її фізичні і механічні властивості.

Принцип створення моделей за технологією SLS наступний (див. рис. 4.51):

1. Тонкий шар порошкоподібного робочого матеріалу, що знаходиться у відповідній камері, переноситься на робочу платформу рівномірним тонким шаром за допомогою спеціального ролика – розрівнювача порошку.
2. Лазерний промінь, спрямування якого варіюється рухомим дзеркалом, окреслює на нанесеному шарі порошку перший переріз моделі. Оскільки лазерний промінь є сфокусованим джерелом тепла, відбувається спікання гранул матеріалу, в результаті якого на тому місці, де проходив лазерний промінь, утворюється твердий полімер. Таким чином, на цьому етапі формується перший шар майбутньої деталі.
3. Рухома платформа робочої камери опускається вниз (як правило, на декілька десятих міліметра) для того, щоб можна було нанести наступний шар матеріалу поверх затверділого.

Національний університет водного господарства та природокористування

Одночасно рухоме дно в камері для подачі порошку піднімається вгору.

4. За допомогою розрівнювача рівномірно наноситься наступний шар порошку в робочій камері поверх попереднього. Під дією лазера новий шар твердіє і спікається з попереднім.
5. Весь процес повторюється доти, доки не буде готова вся модель. Таким чином, роздрукована деталь ніби вирощується знизу вверх.

Переваги: відсутність необхідності в підтримуючому матеріалі, оскільки незатверділий порошок, який оточує модель, підтримує всі її частини протягом всього процесу 3D-друку.

Недоліки: порошок, що використовується при друці, не сплавляється, а спікається, тому поверхня і структура моделі пориста. Однак сучасні матеріали для SLS-друку досить дрібнодисперсні, тому до помітного погіршення якості моделі та її поверхні це не призводить.

Технологія SLM (англ.: Selective Laser Melting, селективне лазерне плавлення) – технологія 3D-друку, що дозволяє створювати металеві моделі практично будь-якої складності та геометрії шляхом пошарового плавлення порошків або пудр металів і сплавів. До подібних матеріалів відносяться титан, нержавіюча сталь, хром, інструментальна сталь і сплави кобальту та хрому.

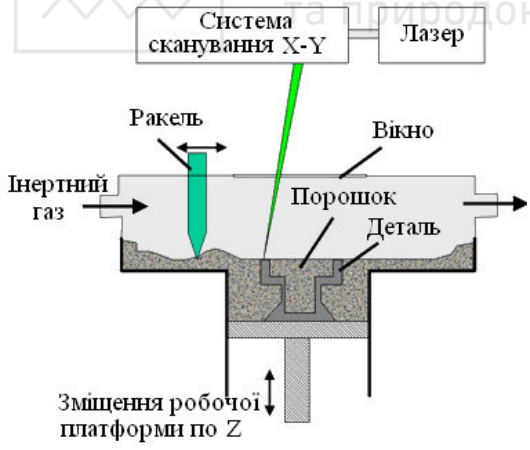


Рис. 4.52. Технологія SLM в 3D-принтері

Робоча область виробничих SLM 3D-принтерів є герметичною камерою, заповненою в процесі друку інертним газом.

Принцип створення моделей за технологією SLM наступний (див. рис. 4.52):

1. На робочу платформу за допомогою ракеля рівномірно тонким шаром наноситься металевий порошок.

Національний університет водного господарства та природокористування

2. Потужний (біля 400*Вт*) лазерний промінь, керований спеціальною системою сканування, окреслює на нанесеному шарі перший переріз моделі. Під дією лазерного променя частинки порошку сплавлюються при температурі близько 1000°*С*, в результаті чого утворюється перший сплавлений шар майбутньої деталі.
3. Робоча платформа опускається вниз на величину товщини одного шару моделі, яка може становити 0,025*мм*.
4. На робочу платформу поверх створеного шару наноситься наступний шар металевого порошку. Лазерний промінь окреслює на нанесеному шарі наступний переріз деталі і процес повторюється.
5. Дії продовжуються доти, доки процес «вирощування» металевої деталі не буде завершений. Після друку останнього шару, нерозплавлені частинки порошку видаляються за допомогою газу під високим тиском. У результаті на виході отримують металеву деталь, повністю готову до використання і яка не вимагає пост-обробки.

***Переваги*:**

- як і в технології SLS, відсутня необхідність в підтримуючому матеріалі;
- сплавлювання дозволяє отримувати суцільні деталі без пористих ділянок;
- значно підвищується продуктивність процесу виготовлення металевих деталей з одночасним зниженням їх собівартості;
- відсутність дефектів лиття і необхідності пост-обробки.

Технологія SLA – це технологія фотополімерного друку. За цією технологією рідкий фотополімер під дією світлового випромінювання лазера змінює свої фізичні властивості і твердне, утворюючи тверду поверхню в точці проекції лазера (див. рис. 4.53).

В робочу ванну з рідким фотополімером поміщається сітчаста платформа, на якій вирощується деталь. Спочатку платформа знаходиться на такій глибині, щоб її покривав найтонший шар полімеру товщиною від 0,05 до 0,15*мм* – це і є приблизна товщина шару в стереолітографії. Далі вмикається лазер, який освітлює ті ділянки полімеру, які відповідають першому перерізу деталі, викликаючи їх затвердіння. Після цього першого етапу вся платформа за допомогою механізму опускання занурюється в рідкий полімер

на глибину, що дорівнює товщині шару. Глибину занурення контролює датчик товщини шару. Також в цей момент спеціальна щітка зрошує верхні ділянки моделі, які могли залишитися сухими внаслідок поверхневого натягу рідини. Процес повторюється для наступного перерізу моделі.

Після завершення друку об'єкт занурюють у ванну зі спеціальними розчинами для очищення готової моделі. І, нарешті, після цього відбувається фінальне опромінення світлом для остаточного затвердіння. Як і багато інших методів, SLA вимагає зведення підтримуючих структур моделі, які вручну видаляються після завершення друку.

Через складність процесу твердіння фотополімерів накладаються жорсткі двосторонні обмеження на компоненти і технологію процесу. Наприклад, чим густіша смола спочатку, тим легше її перевести в полімерний стан, і тим гірші її гідромеханічні властивості. Чим більша концентрація в смолі фотоініціатора, тим менше часу потрібно малопотужному лазеру для засвічення, але тим менший час життя у всього об'єму смоли, оскільки він схильний до фоново-

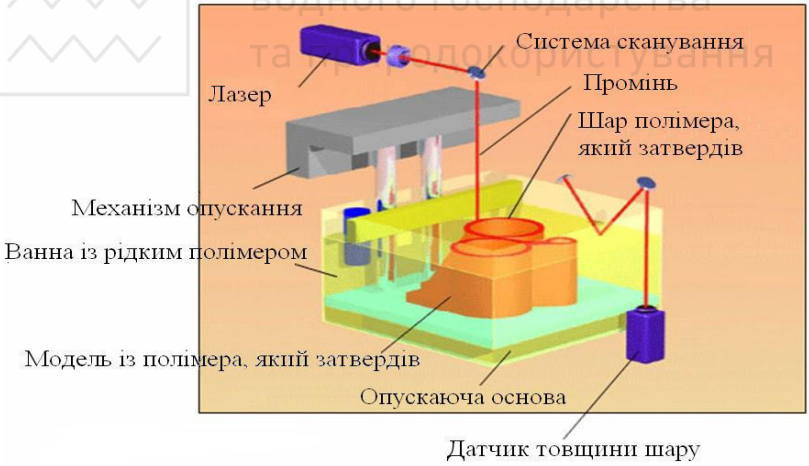


Рис. 4.53. Технологія SLA в 3D-принтері

го засвічення. Саме золота середина в технології та компонентах є «ноу-хау» кожного виробника принтерів.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

***Переваги*:**

- виготовлення моделей будь-якої складності (тонкостінні деталі, дрібні деталі);
- легка обробка виготовленої деталі;
- висока точність друку та висока якість поверхні деталі;
- широкий спектр матеріалів для застосування в технології.

***Недоліки*.** Необхідність використання в технології кінцевого ультрафіолетового опромінення деталі. Надруковану деталь необхідно промити, після чого помістити в ультрафіолетову камеру для остаточного затвердіння.

Технологія 3DP. Ця технологія відноситься до струменевих 3D-технологій. В якості будівельного матеріалу для створення або «вирощування» тривимірної моделі використовується композитний порошок, подібний до гіпсу. Технологія 3DP подібна до SLS, але з використанням струменевої (виробництва Hewlett Packard), а не лазерної, головки. Замість чорнила така головка використовує клейову суміш (часто з добавкою барвника для отримання кольорових моделей) як зв'язуючу речовину. Клей виготовляється на водній основі, так як і звичайне чорнило для термоструменевого друку. Принцип роботи такого принтера наступний:

1. Тонкий шар композиту, що знаходиться у камері подачі матеріалу, переноситься на робочу платформу рівномірним тонким шаром за допомогою спеціальної осі принтера.
2. Головка переміщується над шаром порошку і наносить на поверхню малюнок поперечного перерізу майбутньої тривимірної моделі. Процес фактично ідентичний звичайному струменевого друку, з тією відмінністю, що роль паперу відіграє порошок, а замість чорнила використовується клей.
3. Після друку одного поперечного перерізу моделі дно камери опускається на товщину шару порошку для підготовки наступного шару, після чого процес повторюється: засипається новий шар порошку, по якому клеєм друкується малюнок наступного перерізу моделі.
4. Клей скріплює частинки порошку, формуючи в камері об'ємну фігуру, створену з віддрукованих поперечних перерізів вихідної тривимірної моделі. Коли останній шар-переріз видрукований, принтер спочатку нагріває камеру з порошком, щоб висушити клей, потім незакріплений клеєм порошок відкачуєть-

Національний університет водного господарства та природокористування

ся назад в ємність, з якої він подавався. Результат друку у вигляді завершеної моделі залишається на дні камери.

Після завершення друку необхідно виконати друкарську обробку моделі: видалити залишки незакріплених частинок порошку струменем повітря, а з важкодоступних ділянок – пензликом, потім просочити поверхню спеціальною клеєвою сумішшю для заповнення раковин на поверхні і наданню моделі більшої твердості (або інших властивостей в залежності від призначення моделі). В якості клеєвої суміші для просочення виробу найчастіше використовується ціаноакрилат («суперклей»), водний розчин гептагідрату сульфату магнію («англійська сіль»), або суміш на основі епоксидної смоли. Для отримання гнучкої моделі для післяпечатного просочування поверхні застосовується поліуретановий еластомір. В результаті застосування цього матеріалу модель отримується міцною і гнучкою одночасно (що важливо, наприклад, при друці взуття).

Екструзійна технологія FDM (англ.: Fused deposition modeling, моделювання осадженням розплаву) використовує пластик марок ABS (акрилонітрил-бутадієн-стирол, як в конструкторі LEGO) або PLA (полімолочна кислота, матеріал одноразового посуду). Пластик для друку поставляється у вигляді котушки з намотаною (на цю котушку) ниткою, товщина якої варіюється від 1,75*мм* до 3*мм*. Котушка кріпиться на самому принтері. Нитка подається з котушки в головку друку.

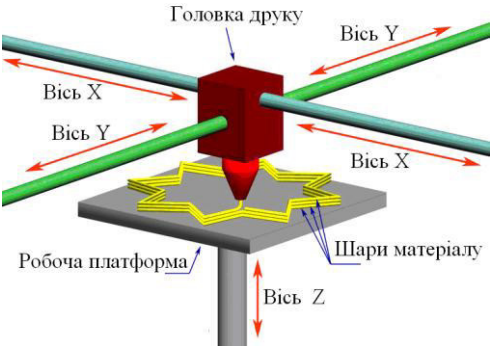


Рис. 4.54. Принцип роботи екструзійного 3D-принтера

Процес виготовлення деталі виглядає наступним чином (див. рис. 4.54): над робочою областю по напрямним рейкам переміщується головка друку, на якій закріплені дві основні деталі – екструдер (англ.: wade's extruder) і гарячий наконечник (англ.: hot end). Таких головок друку може бути і декілька, якщо друк проводиться декількома кольорами. Нитка пластику певного кольору кріпиться

Національний університет водного господарства та природокористування

на вході кожної головки і редуктор протягує нитку через неї. Перед видавлюванням (екструзією) через сопло діаметром 0,25 - 0,75*мм*, нитка проходить по гарячому наконечнику і розплавлюється. Видавлюваний пластик розміщується шарами. Товщина кожного шару становить приблизно 0,1*мм*, тобто друк відбувається пошарово. Робота такої головки аналогічна роботі клеєвого пістолета. Пластик миттєво сплавляється з раніше накладеними шарами і утворює з ними міцну конструкцію. Надрукувавши поточний шар, принтер змінює координату Z (опускає платформу/піднімає головку) і друкує наступний шар.

Подібна технологія друку отримала назву адитивної (від англ.: add, добавити), і виробництво подібних виробів називається *адитивним виробництвом*. Це означає, що один шар пластику накладається за один прохід головки і скріплюється з попереднім шаром.

Слід відмітити, що сьогодні існують зразки 3D-принтерів, які за екструзійною технологією друкують об'єкти не тільки з PLA і ABS. Існують принтери, які в якості робочого матеріалу використовують латунь, кераміку, сталь і пластик 5 видів.

Національний університет водного господарства та природокористування

Застосування 3D-технологій.

Друк деталей на 3D-принтерах чекає надзвичайно широкого вжитку в майбутньому. Перш за все ці технології застосовні в *медицині*. 3D-принтери вже сьогодні застосовуються для виготовлення зубних протезів, за формою близьких до ідеалу, а в майбутньому є можливість виготовляти протези органів.

Друга за значущістю сфера застосування 3D-принтерів – *космічні дослідження*. Не так давно було прийнято рішення встановити 3D-принтер на Міжнародній космічній станції. Такий підхід дозволив космонавтам, які перебувають на МКС, оперативно отримувати необхідні для їх експериментів деталі, а не чекати їх із Землі, як це було раніше. В майбутньому за допомогою 3D-технологій можна буде вирощувати поселення на Місяці і Марсі, використовуючи в якості матеріалів місцевий ґрунт.

Архітектура. За допомогою 3D-принтера можна виготовити макет окремої будівлі, або відразу макет цілого мікрорайону, котеджного селища з дорогами і деревами.

Національний університет водного господарства та природокористування

Геоінформаційні системи. Використовуючи 3D-принтери, можна створювати кольорові об'ємні карти, які точно повторюють ландшафт місцевості або показують рівні залягання різних порід.

Промислова продукція і машинобудування. У даній області 3D-принтер можна використовувати для створення прототипів і концепт-моделей майбутніх споживчих виробів або їх окремих деталей.

Чекають свого застосування 3D-технології в освіти для виготовлення наочних посібників, художній та театральній областях, поліграфії, тощо.

4.6. Інші пристрої виведення даних

До інших периферійних пристроїв виведення інформації можна віднести модем, плотер, вбудований динамік, колонки, навушники, тощо.

Модем (абревіатура слів модулятор та демодулятор) – пристрій, що застосовується в системах зв'язку і у випадку ПК використовується для зв'язку між комп'ютерами через телефонну мережу (телефонний модем) або кабельну мережу (кабельний модем).

Плотер (графічний пристрій) – пристрій для автоматичного нанесення з великою точністю малюнків, схем, складних креслень, карт та іншої графічної інформації на папір розміром до А0 або кальку.

Вивчення принципу їх дії не входить в завдання даного курсу.

Бібліографічний список до розділу 4

1. Флорес А. Внешние устройства ЭВМ М [Текст] / А. Флорес – М. : Мир, 1977.
2. Мюллер С. Модернизация и ремонт ПК, 17-е издание [Текст] / С. Мюллер. – М. : ООО «И. Д. Вильямс», 2008. – 1360 с.
3. Мухин И. А. Развитие жидкокристаллических мониторов [Текст] / И. А. Мухин // Журнал «BROADCASTING Телевидение и радиовещание». – 2005. – №2(46). – С. 55-56, – №4(48). – С. 71-73.
4. Мирошниченко С. П. Методическое пособие по курсу «Персональная электроника». Жидкокристаллические мониторы

Національний університет
водного господарства
та природокористування

[Текст]/ С. П. Мирошниченко, П. В. Серба. – Таганрог : Изд-во ТРТУ, 2005. – 24 с.
5. Холидей К. М. Секреты ПК [Текст] / К. М. Холидей. – Киев : Диалектика, 1995. – 413 с.
6. Платонов Ю.М. Ремонт зарубежных принтеров [Текст]/ Ю. М. Платонов, А. А. Гапеенков. – М. : Солон - Р, 2000. – 272 с.
7. Синдеев Ю.Г. Принтеры: ремонт, обслуживание [Текст]/ Ю. Г. Синдеев. – Ростов на Дону : Феникс, 2001. – 224 с. – (сер. Техномир).
8. Кичак В.М. Друкувальні та копіювальні пристрої. Лабораторний практикум [Текст]/ В.М. Кичак, Г.Г. Бортник – Вінниця: ВДТУ, 1999.
9. Бортник Г.Г. Засоби оргтехніки [Текст] : навч. посіб. / Г.Г. Бортник, В. М. Кичак, О.В. Стальченко. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 198 с.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Національний університет
водного господарства
та природокористування

РОЗДІЛ 5
ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ В РЕАЛІЗАЦІЇ СКЛАДОВИХ ЧАСТИН КЛАСИЧНОГО КОМП'ЮТЕРА

5.1. Перспективні технології елементної бази

Елементи сучасної комп'ютерної техніки – транзистори, діоди, інтегральні мікросхеми, фотоприймачі, світлодіоди і лазери є «класичними» приладами. Визначення «класичний» відображає ту обставину, що фізичні величини, які визначають роботу приладів (наприклад, струми та напруги на електродах) описуються законами класичної фізики. Звичайно, внутрішні процеси в приладах, що відбуваються на атомному рівні, є квантовими. Такими процесами є утворення енергетичних зон, тунелювання в тунельно-резонансних діодах, розсіювання електронів у напівпровідниковій структурі транзисторів, випромінювання і поглинання фотонів в активному середовищі лазерів, тощо. Ці внутрішні процеси описуються квантово-статистичним методом.

Відомо [1], що продуктивність класичного комп'ютера пропорційна кількості транзисторів на одиницю площі інтегральної схеми. Виробництво уніполярних транзисторів, як основної бази класичного комп'ютера, в традиційному вигляді, тобто зі стоком, витоком і затвором, можливо лише до 2030 року. До того часу розміри всіх елементів транзистора досягнуть атомарних розмірів і зменшувати їх далі буде просто неможливо. Наприклад, вже сьогодні товщина діелектричного шару (оксид кремнію) між затвором і провідним каналом уніполярного транзистора становить 0,13*мкм*. У перспективі, можливо, вдасться досягти товщини 0,09*мкм*. Незважаючи на те що технології виробництва ізолюючого шару оксиду кремнію удосконалюються і він стає тоншим, у нього існує фізична межа – не більше 4-5 молекул (1,5-2*нм*). У тонших шарах починаються неконтрольовані процеси тунелювання електронів і перегріву, які порушують роботу транзисторів і обчислювальної системи в цілому. Крім того, формування інтегральної схеми з меншими розмірами транзисторів неможливе на базі стандартної техніки фотолітографії. В силу квантових законів травлення не можна здійснити на меншому масштабі, ніж половина довжини хвилі світла, а вже зараз у фотолі-

Національний університет водного господарства та природокористування

тографії використовують жорстке ультрафіолетове випромінювання.

Отже, 2030 рік – це фактично та границя, коли закон Мура (у тому вигляді, в якому він існує сьогодні) перестане діяти, а кремній втратить свою актуальність як основний матеріал мікроелектроніки.

В цьому сенсі, для підвищення ефективності обчислювальної техніки необхідно здійснювати пошук кардинально нових ідей реалізації елементної бази класичного комп'ютера, а також розробки обчислювальних пристроїв, які працюють на інших принципах: молекулярного, оптичного, квантового комп'ютерів, тощо.

5.1.1. Транзистори на основі нанотрубок

Однією з перспективних є ідея створення транзистора на основі карбонових (вуглецевих) нанотрубок (англ.: Carbon Nanotube) [2].

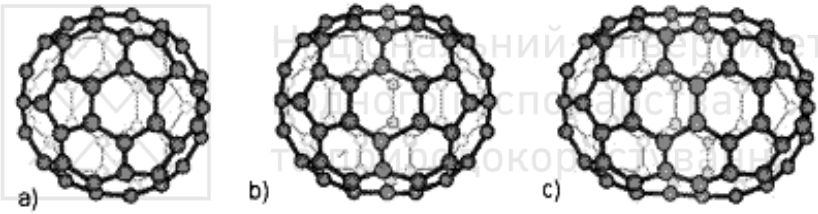


Рис. 5.1. Деякі представники родини фулеренів: a) C_{60}, b) C_{70}, c) C_{80}

Карбонові каркасні структури – це великі за розмірами молекули, які складаються виключно з атомів вуглецю. Інколи говорять, що це нова алотропна форма вуглецю (інші форми: алмаз і графіт), в якої атоми знаходяться в вершинах правильних п'яти- та шестикутників. Головна особливість даних молекул – їх каркасна форма: молекули є замкнутими, порожніми всередині «оболонками». Найвідоміша з карбонових каркасних структур – це фулерен C_{60} (див. рис. 5.1). Наприкінці 80-х рр.. після розробки методики отримання фулеренів в

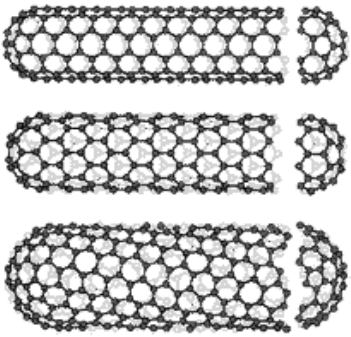


Рис. 5.2. Приклади нанотрубок

Національний університет водного господарства та природокористування

макроскопічних кількостях, було виявлено безліч інших, як легших, так і важчих фулеренів: починаючи від C_{20} (мінімально можливого з фулеренів) і до C_{70}, C_{82}, C_{96}, і вище (деякі з них показані на рис. 5.1).

Після відкриття фулеренів у 1991 році були відкриті довгі, циліндричні карбонові утворення, що одержали назви нанотрубок (див. рис. 5.2). Візуально структуру таких нанотрубок можна уявити собі так: беремо графітову площину, вирізаємо з неї смужку і «склеюємо» її в циліндр (застереження: таке згортання графітової площини – це лише спосіб уявити собі структуру нанотрубки; реально нанотрубки ростуть зовсім по-іншому).

У поперечному перерізі розмір таких «циліндрів» зазвичай становить декілька нанометрів, в той час як по довжині вони можуть досягати гігантських розмірів – аж до міліметра. Такі нанотрубки демонструють цілий спектр найнесподіваніших механічних, електричних, магнітних, оптичних властивостей. Наприклад, в залежності від конкретного виду згорнутої графітової площини (див. рис. 5.2), нанотрубки можуть бути і провідниками, і напівпровідниками. Ступінь такого скручення визначає зонну структуру нанотрубки і взаємне розташування валентної зони та зони провідності. Ширина забороненої зони нанотрубки у стані напівпровідника становить величину від декількох десятих до одиниць *еВ* і залежить від діаметру нанотрубки. Чим менший її діаметр, тим більша ширина забороненої зони. Крім того, виявляється, що ступенем скручення нанотрубок можна керувати зовнішнім електричним полем, а значить і провідністю такої трубки.

Такі властивості нанотрубок можна використати для створення польових транзисторів, в яких нанотрубка виконує роль каналу провідності. Принцип дії польового транзистора на основі нанотрубки подібний до принципу дії традиційного транзистора.

У найпростішому випадку транзистор з нанотрубкою виглядає так, як показано на рис. 5.3. На кремнієву основу, яка є керуючим електродом (затвором), наноситься тонка плівка захисного шару – оксиду кремнію (SiO_2). На цій плівці розташовані стік і витік у вигляді тонких платинових (Pt) електродів, між якими розташовується нанотрубка з напівпровідниковою провідністю. У звичайному стані концентрація вільних носіїв зарядів (дірок і електронів) в нанотрубці мала, тобто вона є діелектриком. Ширина забороненої зони становить декілька електрон-вольт. Однак при розміщенні нанотрубки

Національний університет водного господарства та природокористування

в електричному полі ширина забороненої зони змінюється і концентрація вільних носіїв зарядів збільшується. У таких умовах нанокарбонова трубка стає провідником з дірковим типом провідності. Аналіз характеристик напівпровідникового транзистора свідчить про те, що дірки, які беруть участь в процесі перенесення заряду, присутні саме в нанотрубці, а не інжектуються на контактах між електродом і нанотрубкою, і, отже, можна чекати високу однорідність розподілу дірок вздовж трубки незалежно від напруги на затворі.

Електричне поле, яке керує провідністю нанокарбонової трубки, створюється затвором, яким, як уже зазначалося, є кремнієва основа. При потенціалі на затворі порядку 6*В* концентрація вільних носіїв заряду в валентній зоні досягає максимуму і нанотрубка стає хорошим провідником. Таким чином, змінюючи напругу на затворі, можна керувати провідністю нанотрубки і відповідно відкривати або закривати транзистор.

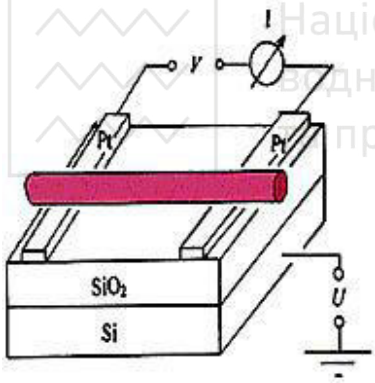


Рис. 5.3. Польовий транзистор на основі нанотрубки

Першою компанією, яка виготовила у 2001 році транзистор на нанотрубках, стала IBM. З того часу було розроблено багато альтернативних схем транзисторів з нанотрубками. Наприклад, в компанії Samsung була створена схема транзистора з вертикальним розташуванням нанотрубок.

Звичайно, пройде ще деякий час, перш ніж транзистори на основі нанотрубок будуть впроваджені в масове виробництво, проте вже зараз стає очевидним, що вони мають масу переваг в порівнянні з традиційними і будуть витребувані в найближчому майбутньому.

Крім застосування транзисторів на основі нанотрубок як електронного елемента класичного комп’ютера, нанотрубки набули поширення в моніторах (див. розділ 4) та як комірка пам’яті Nano-RAM (див. розділ 5).

5.1.2. Тривимірні транзистори

Національний університет
водного господарства
та природокористування

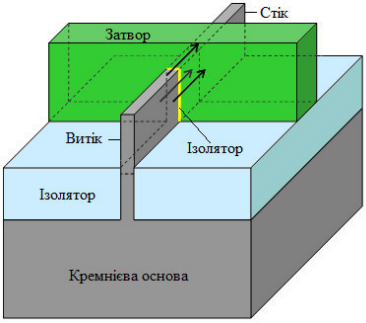


Рис. 5.4. Будова трьохзатворного польового транзистора

З метою реалізації ідеального тривимірного транзистора компанія Intel ще у вересні 2002 року розробила трьохзатворні Tri-gate-транзистори, які стали основою для 22-*нм* технологічного процесу 2012 року. У транзисторі типу Tri-gate використана нова тривимірна структура, в якій затвори ніби обгортають з трьох сторін кремнієвий провідний канал (див. рис. 5.4). Така структура транзистора дозволяє пропускати електричний струм по трьох площинах каналу. Завдяки подібній схемі розподілу струму ефективно збільшується площа, доступна для його перенесення, отже, знижується його щільність, а разом з нею зменшується і «струм стікання» (він можливий лише через нижню грань каналу в кремнієву основу). Потрійний затвор будується на ультратонкому шарі повністю збідненого кремнію, що забезпечує ще більше зниження «струму стікання» і дозволяє транзистору швидше вмикатися і вимикатися при значному зниженні енергоспоживання. Особливістю цієї конструкції також є підняті витік і стік – в результаті знижується опір, що дозволяє транзистору працювати при струмі меншої потужності.

Тривимірні транзистори Tri-Gate забезпечують на 37% вищу продуктивність у порівнянні зі звичайними пластинчастими транзисторами, виготовленими на базі 32-*нм* технології. Такий ріст продуктивності робить нові чіпи ідеальними для кишенькових пристроїв, які через економію місткості батареї живлення змушені постійно переходити з одного режиму енергоспоживання в іншій. Процесори з новими транзисторами використовуватимуть для штатного режиму роботи лише 50% потужності від потужності елементів з двомірною структурою, маючи той же рівень продуктивності.

3D-структура дозволяє продовжити розвиток напівпровідникової промисловості попередніми темпами – за «законом Мура».

5.2. Перспективні види оперативної пам’яті

Національний університет
водного господарства
та природокористування

5.2.1. Оперативна пам’ять на основі напівпровідників

FeRAM

Комірка пам’яті FeRAM (англ.: Ferroelectric Random Access Memory – сегнетоелектрична пам’ять з довільним доступом) може випускатись в чотирьох модифікаціях [3]:

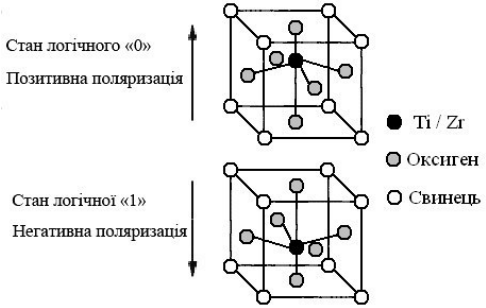


Рис. 5.5. Молекула PZT

1. Комірка має структуру DRAM, лише замість конденсатора з діелектриком між пластинами використовується сегнетоконденсатор (конденсатор з сегнетоелектриком між пластинами, позначається 1T-1C FeRAM).

2. Комірка є МДН транзистором, з тією різницею, що замість діелектрика між управляючим затвором і провідним каналом знаходиться сегнетоелектрик і лінії біт підводяться до витоку і стоку (1T FeRAM).

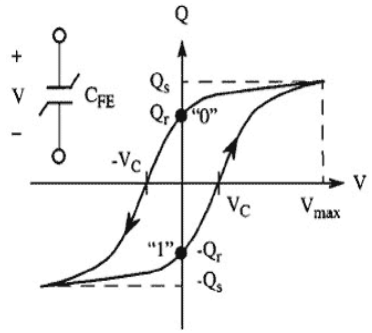


Рис. 5.6. Петля гістерезису для сегнетоелектриків

3. Комірка є сегнетоконденсатором (1C FeRAM).

4. Комірка складається з двох транзисторів і двох сегнетоконденсаторів (2T-2C FeRAM).

В якості матеріалу сегнетоелектрика використовуються змішані поліметалічні оксиди, що спікаються в сегнетоактивні кераміки. Найбільш поширеними є PZT (Perovskite lead Zirconate Titanate) з загальною формулою $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$ (рис. 5.5), або SBT – $SrBi_2Ta_2O_9$. До цієї основи додається деяка кількість легуючих добавок з платини, золота, срібла або гафнію.

Національний університет водного господарства та природокористування

При подачі напруги на пластини такого конденсатора дипольні моменти атомів сегнетоелектрика орієнтуються в одному із двох стійких напрямів. Для сегнетоелектриків, як і для феромагнетиків, характерна гістерезисна залежність поляризації Q сегнетоелектрика від прикладеної напруги V (див. рис. 5.6).

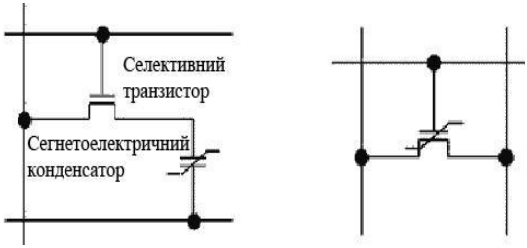


Рис. 5.7. Комірки пам'яті 1T-1C FeRAM і 1T FeRAM

Сегнетоелектрик поляризується і в залежності від напрямку цієї поляризації стан комірки пам'яті можна інтерпретувати як логічний «0» або «1».

Час процесу переполяризації дуже малий (менше 1*нс*) і сам процес вимагає енергоспоживання наполовину меншого ніж у флеш-пам'яті. Кількість циклів перезапису досягає декількох мільярдів.

Комірки типу 1T-1C FeRAM і 1T FeRAM показані на рис. 5.7.

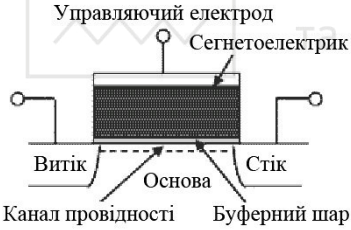


Рис. 5.8. Внутрішня будова транзистора з сегнетоелектриком

Внутрішня будова транзистора із сегнетоелектриком показана на рис. 5.8. В якості сегнетоелектрика у ньому використовується $SrBi_2Ta_2O_9$. Розглянемо принцип дії 1T FeRAM. При подачі на управляючий електрод позитивного потенціалу, а на електроди стоку/витоку негативного – сегнетоелектрик поляризується. В такому стані транзистор закритий, струм через нього не йде, це інтерпретується як логічна «1». Якщо змінити полярність напруги на електродах, то можна змінити напрямок поляризації сегнетоелектрика і закодувати логічний «0».

Принцип читання відрізняється від реалізації в DRAM. Між стоком і витоком подається позитивна напруга (+6*В*). Якщо в транзисторі був закодований «0», він не відкривається і струму на виході немає. Якщо була закодована «1», то сегнетоелектрик переполяризовується і виштовхує в канал провідності з буферного шару електрони. На короткий час виникає імпульс струму, який і інтерпрету-

Національний університет водного господарства та природокористування

ється як «1». Слід відмітити, що процес читання перезаписує вміст комірки пам'яті і тому необхідно після нього відновлювати дані.

Основною особливістю 1T FeRAM є надійність зберігання заряду. В кращих зразках вона становить 50-60 діб.

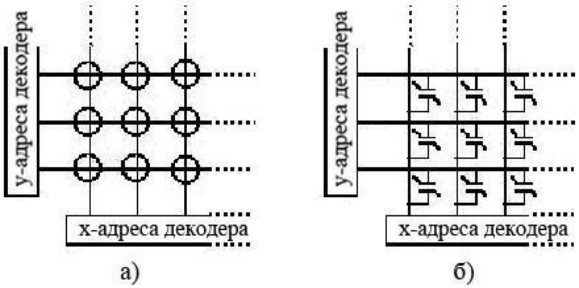


Рис. 5.9. Пам'ять 1C FeRAM

Пам'ять 1C FeRAM нагадує пам'ять на магнітних осердях (див. рис. 5.9 та параграф 2.3.3)).

Як видно з малюнка, для запису «0» або «1» необхідно прикласти напругу відповідної полярності до кожної комірки між лініями X і Y.

1C FeRAM (зараз називають **SFRAM**) в майбутньому замінить SRAM. Вважається, що це відбудеться в найближчі декілька років.

Будова комірки пам'яті 1T-1C FeRAM подібна до комірки пам'яті DRAM з тою відмінністю, що у комірки DRAM одна обкладка конденсатора заземлена (див. рис. 1.66), а у конденсатора комірки 1T-1C FeRAM вона підключена до однієї з двох розділених ліній даних (див. рис. 5.7). Принцип запису біта в комірку 1T-1C FeRAM відрізняється від DRAM. На керуючу лінію (лінію слів) подається потенціал, який відкриває транзистор. Підключаючи напругу різної полярності до сегнетоконденсатора між двома лініями даних (ліній біт), можна по різному поляризувати сегнетоелектрик, що відповідає логічним «0» і «1» на графіку рис. 5.6.

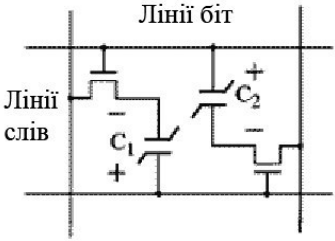


Рис. 5.10. Експериментальна схема комірки пам'яті 2T-2C FeRAM

Схем з двома транзисторами і двома сегнетоконденсаторами 2T-2C RAM запропоновано декілька. На рис. 5.10 показана одна із них експериментальних схем. чно це є два 1T-1C FeRAM, об'єднаних в одну групу для щення інтеграції компонентів в чіпі і більшої стабільності роботи. За собом підключення таку схему

Національний університет водного господарства та природокористування

вають схемою з WL/PL-архітектурою.

Реалізовану схему комірки пам'яті 2T-2C FeRAM, показано на рис. 5.11. В ній комірка пам'яті 2T/2C підключена до лінії слів (wordline) затворами транзисторів. Однією своєю обкладкою обидва сегнетоконденсатори підключені до передавальної лінії (plateline), а відповідно інші обкладки підключені до двох окремих розділених ліній даних (bitline і complement bitline). В наслідок такого підключення запис/читання на кожен конденсатор проводиться окремо. Дані, що записуються в ці конденсатори, дублюються, що визначає подвійну надійність зберігання даних. При цьому напругу між шинами даних bitline і complement bitline ($V_x = V_0 - V_1$) визначають за формулами:

$$V_x = \begin{cases} V_0 = \dfrac{C_0}{C_0 + C_ш} V_н, \cdot якщо \cdot зберігається \cdot "0". \\ V_1 = \dfrac{C_1}{C_1 + C_ш} V_н, \cdot якщо \cdot зберігається \cdot "1". \end{cases},$$

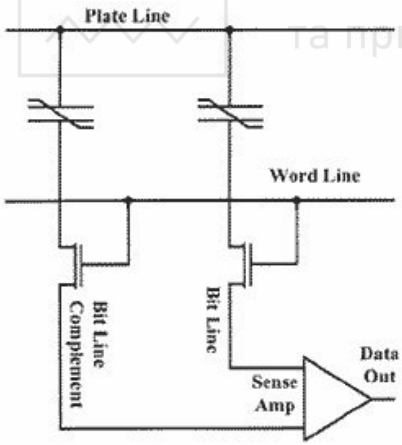


Рис. 5.11. Реалізована схема комірки пам'яті 2T-2C FeRAM

де V_0 і V_1 – напруга між лінією bitline і землею, а також між лінією complement bitline і землею відповідно; C_0 і C_1 – ємність відповідних конденсаторів; $C_ш$ – паразитна ємність шини даних; $V_н$ – позитивна напруга живлення.

Логічні значення на конденсаторах завжди протилежні. Знак V_x залежить від того де зберігається «1», в першому чи другому конденсаторі.

Крім конденсаторів у схемі є підсилювач, необхідний для зчитування даних з комірки 2T-2C. Підсилювач і два елементи 1T-1C суттєво збільшують вартість цього виду пам'яті. Крім того, головний недолік 2T-2C FeRAM – це великий розмір її комірки в порівнянні навіть з 1T/1C, не кажучи вже про мініатюрні розміри 1T та 1C структур. Перевага 2T-2C

Національний університет водного господарства та природокористування

структури полягає у підвищеній стабільності зберігання даних і абсолютній несприйнятливості до зовнішніх впливів. Справді, пам'ять 2T/2C FeRAM є стійкою до впливів магнітних та електричних полів, не втрачає інформацію під дією йонізуючих випромінювань, ударостійка і здатна зберігати дані надзвичайно великий період часу. Всі перераховані вище властивості життєво необхідні для функціонування комп'ютерних пристроїв у місцях, де є всі ці шкідливі чинники (в першу чергу – в космосі та жерлах вулканів).

Порівняльні характеристика різних типів ОП представлена в таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльні характеристики FeRAM, SRAM, EEPROM і FlashROM

Параметр	FeRAM	SRAM	EEPROM	FlashROM
Збереження даних при відключеному живленні	+	–	+	+
Час запису блока даних	7*мс*	<10*мс*	~1*с*	~1*с*
Середній струм споживання при запису, *мкА*	100	<60	4000	4000
Кількість циклів перезапису	~10^{15}	Не обмежено	~100 000	~10 000
Можливість побітного програмування	+	+	–	–

Національний університет водного господарства та природокористування

Крім того, вважається, що сегнетоелектрик комірки пам'яті FeRAM практично не деградує. Розробники гарантують для них до 10^{10} циклів перезапису.

Модулі пам'яті FeRAM для мікроконтролерів виготовляються компаніями Fujitsu і Texas Instruments. В даний час вартість зберігання одного біта інформації занадто висока, тому цей вид пам'яті досі використовується тільки в пристроях управління подушками безпеки автомобілів, а також в медичній техніці.

PCRAM

Національний університет водного господарства та природокористування

PCRAM (англ.: phase-change random access memory – оперативна пам’ять зі зміною фазових станів) базується на властивості халькогенідів (сплав GeSbTe із стехіометричним складом 2:2:5) змінювати під дією нагрівання або електричного струму свій фазовий стан від кристалічного до аморфного. В літературі [4] зустрічаються інші

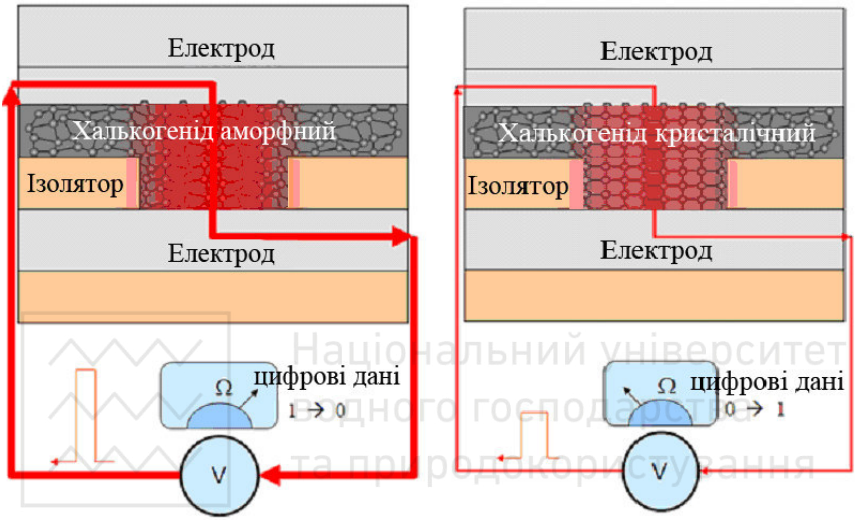


Рис. 5.12. PCRAM – пам’ять

назви цього виду пам’яті – **PCM**, **PRAM**,**OUM**.

В кристалічному стані цей матеріал є електропровідним і прозорим для широкого діапазону світлових хвиль, в аморфному стані – непровідним і непрозорим. До цього часу використовувались лише оптичні властивості халькогенідів в технологіях запису і стирання інформації на CD-RW і DVD-RW диски.

В пам’яті PCRAM використовуються його електропровідні властивості. Двом фазовим станам речовини можна поставити у відповідність логічні «0» і «1». Дана речовина знаходиться між двома твердими металічними електродами. При подачі короткочасного імпульсу струму великої потужності для випадку ОП (див. рис. 5.12) халькогенід плавиться. Швидке охолодження внаслідок вентиляції не призводить до відновлення його кристалічної структури. В результаті халькогенід закріплює аморфну структуру і, відповідно, великий опір (логічний «0»).

Національний університет водного господарства та природокористування

Для запису «1» використовується довгий по часу імпульс струму невеликої потужності. Під дією цього струму матеріал розігрівається, молекули халькогеніду перебудовуються в кристалічну структуру (процес «відпалення») і відновлюють свої електропровідні і оптичні властивості.

В практичному застосуванні пам'ять PCRAM подібна до PROM, в якій розміщені халькогенідні вставки (див. рис. 5.13).

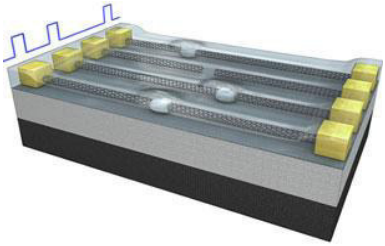


Рис. 5.13. Модель пам'яті на нанотрубках з халькогенідними вставками

Переваги:

1. Висока щільність зберігання інформації (декілька атомів необхідно для створення комірки зберігання інформації. Реально можна розміри комірки довести до 5*нм*);
2. Малий час перепрограмування (1*нс*).

Недоліки:

1. Необхідність нагріву халькогеніду до декількох сотень градусів за Цельсієм (значне енергоспоживання);
2. Відносно невисока швидкодія.

Samsung, Intel і Hynix вже виробляють запам'ятовуючі елементи з чіпами PCRAM для накопичувачів невеликої ємності (до 64*Мбайт*), що використовуються в мобільних телефонах.

ReRAM

Інколи пам'ять ReRAM (англ.: resistive random access memory – резистивна пам'ять з довільним доступом) називають пам'яттю організованою на мемрісторі (англ.: memristor, від memory – «пам'ять», і resistor – «електричний опір») Схематичне позначення приведене на рис. 5.14.

Рис. 5.14. Мемрістор

За принципом дії ReRAM подібна до PCRAM, однак замість зміни фазового стану під дією нагрівання тут використовується електрохімічна реакція. Матеріалом для резистивної пам'яті є непровідний для електричного струму оксид-діелектрик, наприклад, $SrTiO_3$ (позначається - STO) або сполука Ta_2O_{5-x}–TaO_{2-x}. Він знаходиться у вигляді тонкої (5*нм*) двошарової плівки між двома платиновими

електродами, до яких може прикладатись напруга різної полярності (див. рис. 5.15). Один із шарів збіднений киснем. Завдяки прикладеній високій напрузі певної полярності, у кристалі кисневі вакансії можуть мігрувати між шарами. Ці вакансії (дірки) формують вузькі електропровідні канали, які приводять до зменшення опору кристалу між електродами. Зворотна напруга повертає в шар кисень, знову перетворюючи матеріал в діелектрик з великим опором. Такі переходи створюють стійкі стани пам'яті, які змінюються тільки під дією високих значень напруги певної полярності.

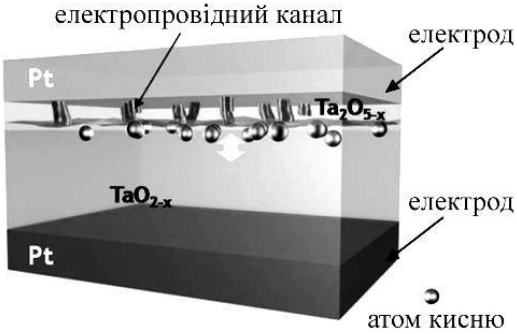


Рис. 5.15. Будова мемрістора на основі Ta_2O_{5-x}–TaO_{2-x}

Перемикання станів відбувається за декілька наносекунд, а потрібна для цього енергія вимірюється пікоджоулями, що становить соту частину від необхідної для флеш-пам'яті. Розміри комірки біта пам'яті становлять близько 1*нм*. Проблемою застосування ReRAM сьогодні є нестабільність її роботи. Поки що не вдається зафіксувати біт інформації в пам'яті. Якщо біт з високим опором знаходиться зразу за бітом з низьким опором, то електричний струм може вплинути на нього і змінити його стан.

CBRAM

CBRAM-пам'ять (conductive bridging random access memory, англ.: пам'ять з провідним мостом) за своєю будовою подібна до ReRAM-пам'яті. Відмінність полягає в використовуваних матеріалах. У цьому виді пам'яті один з двох електродів складається з електрохімічно активного матеріалу, наприклад срібла, а інший – з неактивної речовини, наприклад, вольфраму. Електроди відокремлені один від одного шаром електроліту, який виступає в якості ізолятора. Таким чином, струм читання блокується, в результаті чого комірка пам'яті приймає значення «0». Для запису «1» контролер подає високу напругу на вольфрамовий електрод. Завдяки цьому

між електродами виникає не декілька провідних каналів, а одна нанотрубка. Вона знижує опір комірки, в результаті чого та виводить значення «1». Для переведення комірки пам'яті CBRAM в стан «0» струм тече в протилежному напрямку і руйнує нанотрубку.

Основними перевагами ReRAM і CBRAM в порівнянні з флеш-пам'яттю є вища швидкість роботи, тривалий термін використання і можливість зменшення площі комірок до розміру наноструктур. Дослідник компанії HP С. Уільямс оголосив про те, що технологія ReRAM досягне своєї ринкової зрілості вже до 2015 року.

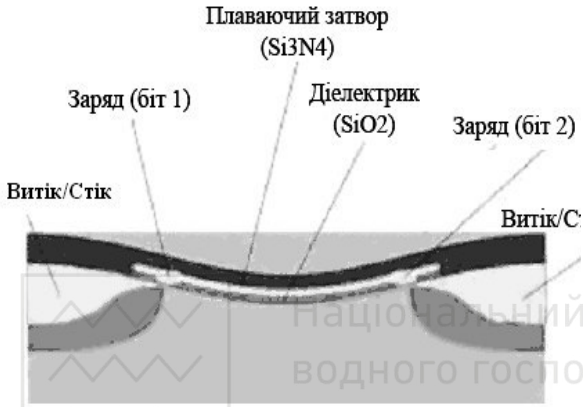


Рис. 5.16. Електронне фото комірки NROM-пам'яті

NROM (Nitrid ROM) – SONOS-пам'ять

Комірка NROM-пам'яті за своєю структурою є також транзистором з плаваючим затвором. Управляючий затвор підключається до лінії слів, а витік і стік до двох незалежних ліній біт (архітектура пам'яті описана в параграфі 1.12.1). Плаваючий затвор виконаний не з металу чи кремнію, а з нітриду кремнію Si_3N_4, розробки фірм Philips и Spansion (див. рис. 5.16). Цей матеріал володіє більш рівномірною молекулярною структурою, що дозволяє міцно утримувати електрони. Тому ізолятор між управляючим затвором і провідним каналом може бути тоншим і мати менш складну будову. Це забезпечує високу компактність і простоту технології виробництва.

Нітрид кремнію локалізує заряд в обмеженому просторі плаваючого затвору, не дозволяючи електронам «розтікатись» по всьому його об'єму. Фактично це дозволяє зберігати два інформаційних біта в одному транзисторі. Запис бітів проводиться за допомогою інжекції «гарячих» електронів на двох стоках/витоках. Електрони, інжектуючись в плаваючий затвор, локалізуються там в області близькій до відповідного стоку/витоку. Видалення заряду з плаваючого

затвору відбувається шляхом інжекції дірок, для чого на стік/витік подається позитивна напруга. Дірки тунелюють в плаваючий затвор, рекомбінуючись там з електронами.

Запис інформації вимагає напруги живлення в два рази нижчої ніж у флеш-пам'яті (від 5 до 8*В*). Це дає можливість накопичувачу на основі SONOS витримувати в 1000-10000 разів більше циклів перезапису ніж у флеш-пам'яті.

Для масового ринку розміри і вартість виробництва чіпів SONOS ще не досягли оптимальних значень, але, коли подальше зменшення розмірів флеш-чіпів стане неможливим, настане час SONOS.

Nano-RAM

Nano-RAM (інша назва – NRAM) – відносно новий проект, розробка американської компанії Nantero. В ньому замість електричних ланцюгів передбачають використання традиційних механічних схем перемикання. На даний час існує лише прототип чіпу пам'яті, що базується на цьому принципі.

Рис. 5.17. Будова комірки пам'яті Nano-RAM

В запропонованому чипі на кремнієву підкладку наноситься тонка ізолююча плівка оксиду кремнію, уздовж якої розміщені струмопровідні електроди шириною 130*нм* (4 на рис. 5.17), відокремлені один від одного ізолюючими шарами. Над електродами перпендикулярно до них розташовані масиви нанотрубок (3), які замикаються з обох сторін на провідні контакти (витік – 1 і стік – 2) транзистора. У звичайному стані (стан OFF) нанотрубки не торкаються електрода (4) і знаходяться над ним у вигляді суспензії на висоті близько 13*нм*. Якщо до нижнього електроду прикласти напругу, то

Національний університет водного господарства та природокористування

нанотрубка під впливом електричного поля почне вигинатися і торкнеться нижнього електрода. Такий стан (стан ON) виявляється стійким за рахунок балансу між виникаючою механічною напругою і силами Ван-дер-Ваальса. У результаті навіть після зникнення напруги форма нанотрубки не зміниться. Отже, змінюючи напругу на електроді, можна здійснювати переходи між двома стабільними механічними станами нанотрубок, в одному з яких є контакт з електродом, а в іншому – немає. Один з цих станів відповідатиме логічному «0», а інший – логічній «1».

Для того щоб прочитати вміст елементарної комірки пам'яті, між нижнім електродом і контактом, до якого приєднані нанотрубки, що відповідають вибраній комірці пам'яті, подається напруга. Якщо комірка пам'яті знаходиться в стані OFF, при якому немає фізичного контакту між електродом і нанотрубкою, то електричний ланцюг виявляється розімкнутим і напруга буде високою, що відповідає логічній «1». Якщо ж комірка пам'яті знаходиться в стані ON, тобто є контакт між нанотрубкою і нижнім електродом, то ланцюг замикається і напруга буде низькою, що відповідає логічному «0».

За наявною інформацією Nano-RAM забезпечує високу щільність інформації, притаманну DRAM-пам'яті.

Національний університет водного господарства та природокористування

PFRAM – полімерна пам'ять

PFRAM (англ.: Polimer Memory, Polimer Ferroelectric RAM) – є полімерною сегнетоелектричною енергонезалежною пам'яттю, яка базується на властивості сегнетоелектричних полімерів під дією електричного поля отримувати два стабільних стани поляризації (подібно до застосовуваної у FeRAM) [4]. Це дозволяє програмувати пам'ять шляхом зміни поляризації плівки, укладеної між взаємно перпендикулярними металевими шинами. Плівка полімеру може містити й тонкоплівкові транзистори схем управління. Вказану властивість було відкрито фахівцями Thin Film Electronics (дочірньої фірми шведської компанії Opticom) і вперше запропоновано у вигляді полімерної пам'яті ще в 1994 році.

Можливість формувати багатошарові структури полімерної пам'яті дозволяє отримати раніше недосяжні об'єми пам'яті та забезпечувати оптимальне використання комірок пам'яті. За оцінками аналітиків фірми Web-Feet Research, щільність комірок пам'яті PFRAM майже в 20 разів вища, ніж у звичайної флеш-пам'яті.

Національний університет водного господарства та природокористування

Вважається, що PFRAM знайдуть застосування в картах пам'яті цифрових фотокамер та іншому побутовому обладнанні. Основна технологічна проблема, що затримує масове виробництво PFRAM, пов'язана з обробкою термочутливого матеріалу в умовах напівпровідникового виробництва, тому початок масового виробництва цього виду пам'яті очікується не раніше 2015 року.

T-RAM

T-RAM (англ.: thyristor-RAM – тиристорна пам'ять з довільним доступом) – розробка компаній GlobalFoundries і T-RAM Semiconductor. Вона базується на використанні комірок пам'яті, які називаються Thin-Capacitively-Coupled-Thyristor (TCCT, англ.: мала ємність, під'єднана до тиристора) і складаються з одного диністора та одного конденсатора. T-RAM поєднує в собі сильні сторони DRAM і SRAM: високу швидкість роботи і великий об'єм пам'яті на одиницю площі ОП.

Згідно схеми рис. 1.31 область p_2 диністора p_1-n_1-p_2-n_2 служить однією мікрообкладкою конденсатора C_g. Інша мікрообкладка підключена до лінії слів (див. рис. 5.18, а). При підключенні до диністора напруги більше 1*В* струм через диністор зростає, підключена ємність $C_g << C(П_2) + C(П_3)$, де $C(П_2)$ і $C(П_3)$ – ємності переходів $П_2$ та $П_3$ на рис.1.31. В результаті база p_2 насичується дірками (див. параграф 1.6.2.4) і напруга на конденсаторі C_g різко зростає. Комірка пам'яті переходить в стан логічної «1» (див. рис. 5.18, б).

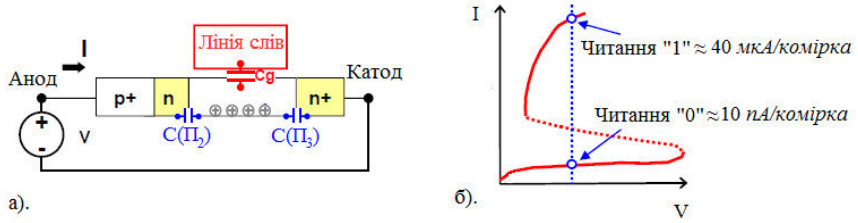


Рис. 5.18. а) Будова комірки пам'яті T-RAM; б) Вольт-амперна характеристика комірки пам'яті T-RAM

При підключенні до диністора напруги менше 0,5*В* струм через диністор практично припиняється, ємність $C_g >> C(П_2) + C(П_3)$. В результаті база p_2 збіднюється дірками і напруга на конденсаторі C_g

різко падає. Комірка пам'яті переходить в стан логічного «0» (див. рис. 5.18, б).

Розробники обіцяють довести до 10^6 кількість перезаписів в комірку пам'яті T-RAM і швидкість запису в 1000 разів більшу ніж у DRAM.

Пам'ять HP

HP є розробкою Hewlett-Packard. Ця фірма продемонструвала 64-бітний чіп незалежній пам'яті, в якому роль елементів пам'яті відіграють окремі молекули. Цей чіп поміщається на площі в 1*мкм*^{2}. Крім того, в HP вдалося поєднати запам'ятовуючі і керуючі елементи в одному молекулярному пристрої. Пам'ять HP виготовляється наступним способом: спочатку створюється форма-прес з восьми паралельних ліній, кожна шириною 40*нм*, після чого прес притискається до полімерного шару на напівпровідниковій пластині для створення заглиблень, які потім заповнюються платиною і відіграють роль провідників. На поверхню такої заготовки наноситься мономолекулярний шар молекул, валентність яких може змінюватися прикладанням зовнішніх електричних полів. Після цього, поверх наносяться провідники під прямим кутом до вже створених. В результаті, в кожній з 64 точок перетину паралельних і перпендикулярних провідників між ними знаходиться близько 1000 молекул, що відіграють роль комірки пам'яті (див. рис. 5.19, D,E,F).

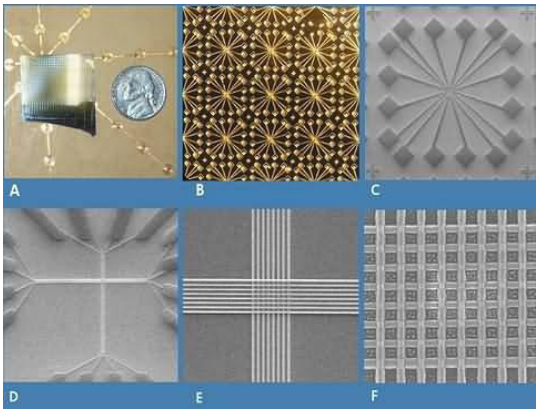


Рис. 5.19. Схема та електронні фото нанопам'яті HP

Запис логічної «1» відбувається імпульсом струму, який змінює опір комірки. Читання проводиться вимірюванням опору при прикладанні різниці потенціалів, меншої рівня запису логічної «1».

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Логічні керуючі пристрої для зв'язку комірок пам'яті з електронною інфраструктурою вносяться пізніше (складаються з молекулярних ключів на перетині провідників) і відіграють роль демультиплексорів.

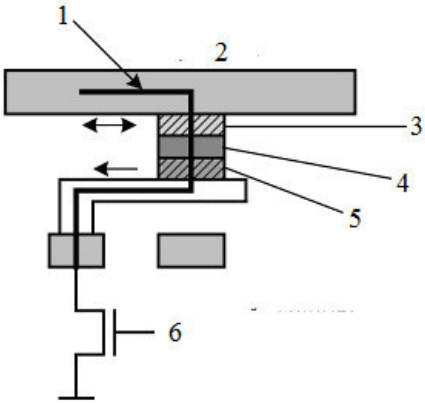


Рис. 5.20. Електронна схема MRAM. 1 – Напрямок протікання струму запису. 6 – Керуючий транзистор

Описані наноструктури можуть бути використані як одноразові носії інформації, замінивши звичні CD-ROM диски. Однак перспективи технології високі, і нічого не заважає виготовити перезаписуючий привод зі змінними носіями, ємність яких при менших розмірах буде значно вищою будь-яких оптичних пристроїв.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

5.2.2. Магнітна оперативна пам'ять

MRAM

MRAM (англ.: Magnetoresistive Random Access Memory – магніторезистивна пам'ять з довільним доступом) базується на використанні магніторезистивного ефекту (докладніше про явище магніторезистивного ефекту і матеріалу надрешіток див. параграф 2.4) або на явищі магнітного тунелювання MTJ (англ.: Magnetic Tunnel Junction).

Електронна схема MRAM відрізняється від DRAM (див. рис. 1.66) присутністю замість конденсатора елемента, що складається з двох розділених тонким шаром діелектрика (4) магнітних шарів [4].

Один із феромагнітних шарів (5) є постійним магнітом з визначеним напрямком магнітного моменту (паралельно границі розділу між ними). Напрям вектору намагнічення іншого шару (3) може змінюватись на 180˚ шляхом прикладання зовнішнього магнітного поля. Якщо вектори намагнічення обох шарів співнапрямлені, елек-

Національний університет водного господарства та природокористування

тричний опір між магнітними шарами MTJ, який визначається струмом через тунельний перехід, малий, це відповідає стану логічної «1». Якщо вектори намагнічення протилежно напрямлені – опір великий, це відповідає стану «0» (див. рис. 5.20). Різниця опорів для станів «0» і «1» може складати 20-40%. Напрямок векторів намагнічення шарів можна змінювати пропускаючи струм великого значення по шинах (2) з якими контактують магнітні шари. Як відомо, навколо таких провідників із струмом виникає магнітне поле, яке і перемагнічує відповідний феромагнітний шар.

MRAM має короткий час відгуку – теоретично він може досягати 1*нс*. Завдяки цьому MRAM забезпечує до 1000 разів більш високу швидкість запису, ніж флеш-пам'ять. Копіювання образу DVD розміром 8*Гбайт* на носій MRAM зайняло б не 21, а 0,02*с*. На практиці, проте, існує проблема взаємного впливу феромагнітних шарів при робочій частоті понад 400*МГц*. У рамках дослідницького проекту в Браунгшвейзькому фізико-технічному інституті ця проблема була вирішена шляхом об'єднання кількох MRAM-комірок в один елемент пам'яті. Завдяки цьому продуктивність MRAM зросла в п'ять разів. Як і у випадку з іншими можливими наступниками технології флеш-пам'яті, виробництво чіпів MRAM вже налагоджено, проте вони знаходять застосування лише в спеціальних областях – наприклад, космонавтиці. Проте активність таких гігантів IT, як Toshiba, IBM і NEC, свідчить про те, що MRAM – пам'ять має хороші шанси бути запущеною в серійне виробництво в найближчі роки. Продемонстровані в 2004 р. прототипи MRAM мають мікроархітектуру 1T-1MTJ (1 транзистор і 1 перехід на комірку пам'яті); розмір магніторезистивного тунелю одного елемента – TMRE (Tunnel Magneto-Resistance Element) тоді становив 0,26 х0, 44*мкм*²; розмір комірки пам'яті – 0,81*мкм*².

Переваги:

1. Енергонезалежність.
2. Простота контролю намагнічення.
3. Висока швидкість доступу (декілька *нс*).

Недоліки:

1. Необхідність великого струму перемагнічування.
2. Вплив перезапису біта на сусідні комірки.

Саме ці недоліки поки що гальмують широке впровадження MRAM.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

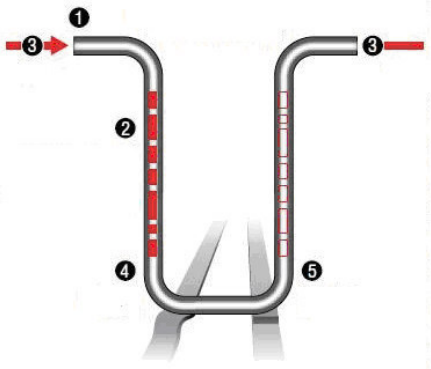


Рис. 5.21. Принцип роботи трекової пам'яті.

Racetrack memory (трекова пам'ять)

У трековій пам'яті біти зберігаються у вигляді циліндричних магнітних доменів (ЦМД) у нанопровіднику товщиною 30*нм* подібно до намистинок нанизаних на нитку. Так як намистинки можуть рухатись по нитці, так і ЦМД можуть змінювати своє положення в нанопровіднику за рахунок руху доменних стінок (див параграф 2.3.8 і рис. 2.23).

Електричний струм (3, див. рис. 5.21) рухає домени (2) по нанопровідникові (1). При цьому русі вони проходять через головки читання (5) та запису (4), які рознесені в різні місця нанопровідника. Швидкість процесу досягає 200*м/с*, що еквівалентно часу читання в десятки наносекунд. Це відповідає швидкості сьогоднішніх видів пам'яті, але перевага трекової полягає в її великій ємності. Плоский провідник мікрометрового розміру здатний зберігати дані з такою ж щільністю, як і флеш-пам'ять, проте справжній потенціал криється у зміні конфігурації нанопровідників з двовимірної на тривимірну. При такій конфігурації трекова пам'ять зможе зберігати в сотні разів більше бітів у порівнянні з флеш-пам'яттю на тій же площі.

5.2.3. Механічна оперативна пам'ять

Millipede

В пам'яті Millipede (англ.: багатоніжка) окремі біти зберігаються на поверхні пластикового диска у вигляді найдрібніших заглиблень. Над диском на мікроприводах розміщується масив V- подібних силіконових важелів довжиною 70*мкм* і товщиною всього 0,5*мкм*. На кінці підвісу кожного важеля знаходиться повернена донизу голка довжиною менше 2*мкм*. Представлена фірмою IBM експериментальна установка має масив з 1024 таких мікроприводів (32 ряди по

32 елементи). Розміри такого масиву становлять 3×3*мм* (див. рис. 5.22).

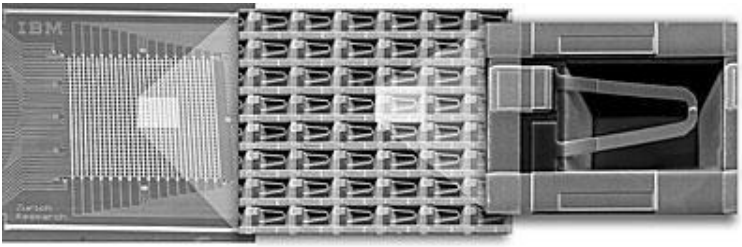


Рис. 5.22. Електронна фотографія масиву мікроприводів і однієї комірки Millipede

Керуюча електронна схема, аналогічна використовуваній в чіпах DRAM-пам'яті, дозволяє одночасно посилати індивідуальні команди кожному з мікроприводів, забезпечуючи їх злагоджену спільну роботу. Кожна голка обслуговує область розміром 100×100*мкм*; точне переміщення носія інформації у двох напрямках здійснює прецизійний електромагнітний привід. Завдяки малому ходу носія енергоспоживання системи невелике.

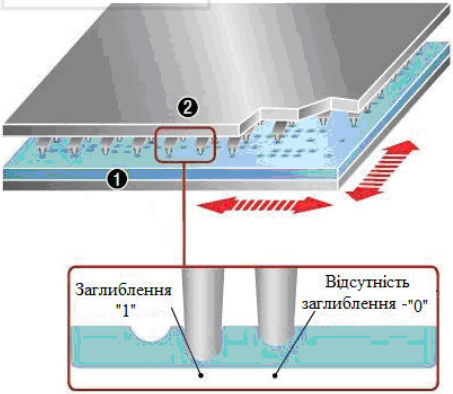


Рис. 5.23. Принцип роботи пам'яті Millipede: 1. Масив мікроприводів; 2. Диск

Для запису логічної «1» резистор, вбудований в кінець голки, розігрівається до високої температури (400°*С*). Голка розм'якшує при цьому матеріал диску і, в результаті короткочасного занурення в нього, формує поглиблення діаметром 10*нм*. (див. рис. 5.23). Для запису логічного «0» голка розігріває тільки матеріал і переходить в пасивний стан. За рахунок поверхневого натягу матеріал диску відновлює початкову форму. Для зчитування біта крихітні приводи (див. рис. 5.3.2) розташовують диск таким чином, щоб над відповідною областю знаходився

Національний університет водного господарства та природокористування

датчик. Резистор голки нагрівається до меншої температури (300°*C*), яка недостатня для розм'якшення полімерного матеріалу диску. Завдяки високій теплопровідності полімеру голка при зануренні в заглиблення охолоджується, в результаті чого змінюється опір резистора, який відстежується керуючою схемою.

Окремий блок Millipede забезпечує швидкість читання/запису на рівні 50-150*Мбіт/с*. Завдяки тому, що безліч подібних блоків здатні працювати паралельно, технологія забезпечує продуктивність практично на рівні електронних накопичувачів при дуже високій щільності запису (10^{12}*біт/дюйм*^{2}), оскільки нанозаглиблення займають значно менше місця, ніж електронні елементи.

5.3. Перспективні технології магнітного зберігання інформації

5.3.1. Система магнітного теплового зберігання даних

Національний університет водного господарства та природокористування

Таку систему запису ще називають **термоасистованою системою запису** (англ.: HAMR – Heat Assisted Magnetic Recording, запис з попереднім нагріванням за допомогою лазера). Цей метод передбачає короткочасний (1*пс*) нагрів ділянки, на яку проводиться запис, до температури 380-400*К* (близької до точки Кюрі). В HAMR-головку вбудований лазер (див. рис. 5.24).

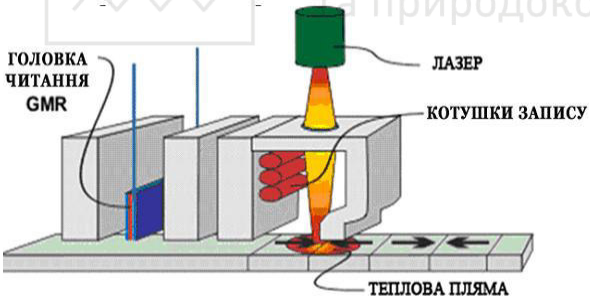


Рис. 5.24. Головка HAMR (лазер для підігріву носія інтегрований в головку запису)

При проходженні такої головки над робочим шаром він нагрівається променем лазера, внаслідок чого зменшується магнітна сприйнятливість феромагнетика робочого шару. Відбувається зменшення площі петлі гістерезису. Це зменшення дає можливість переводити магнітний стан індукції зі стану «0» в «1» і навпаки при менших значеннях індукції зовнішнього магнітного поля. Після проходжен-

Національний університет водного господарства та природокористування

ня головки над нагрітою ділянкою її температура відновлюється до норми і петля гістерезису відновлює свою попередню форму. Такий спосіб зберігання інформації дозволяє досягнути її щільності до 20*Тбіт/дюйм*^{2}. Впровадження цієї технології потребує ня в якості магнітного робочого шару принципово нових матеріалів з високою анізотропією. Це, перш за все, дорогі сплави $Fe_{14}Nd_2B$, CoPt, FePt і Co_5Sm.

5.3.2. Система структурованого (патернованого) зберігання даних

Система патернованого зберігання даних (Patterned Magnetic Media) є перспективною технологію зберігання даних на магнітному носієві [3]. Вона використовує для запису даних впорядкований масив однакових магнітних комірок, кожна з яких може зберігати ізольовано один біт інформації, на відміну від сучасних технологій магнітного запису, в яких біт записується на багатьох магнітних доменах, які не мають чіткої механічної границі між собою.

Як відомо, для підвищення щільності інформації на магнітному носієві необхідно зменшувати геометричні розміри області запису одного біту даних. В записаному стані ця область повинна бути стійкою до зовнішніх чинників і зберігати цей стан достатньо довго. Якщо розмір такої магнітної області дуже малий, можливе виникнення *суперпарамагнітного ефекту* (див. параграф 2.1).

В сучасних носіях один біт даних записується на 70-100 магнітних доменів (див. рис. 5.25, зліва). Але теоретично кожне з таких структурних «зерен» може виконувати функцію домену і вміщувати в себе 1*біт* даних. В результаті з'являється можливість зменшити суперпарамагнітну межу: збільшити розміри одного «зерна» і зберігати одну одиницю інформації в меншій їх кількості.

В технології патернованого запису сотні маленьких магнітних доменів замінені одним великим зерном. Така концепція проста, але масове виробництво дисків за розумною їх ціною є проблематичним. Необхідно створювати структури субмікронних розмірів: при щільності запису 100*Гбіт/дюйм*^{2} острівці повинні мати розміри 86*нм*, для 1*Тбіт/дюйм*^{2} потрібні розміри 27*нм*, а 10*Тбіт/дюйм*^{2} – 9*нм*.

Для вирішення такого складного завдання пропонується (IBM, Стенфордський університет) використовувати додаткову обробку

Національний університет
водного господарства
та природокористування

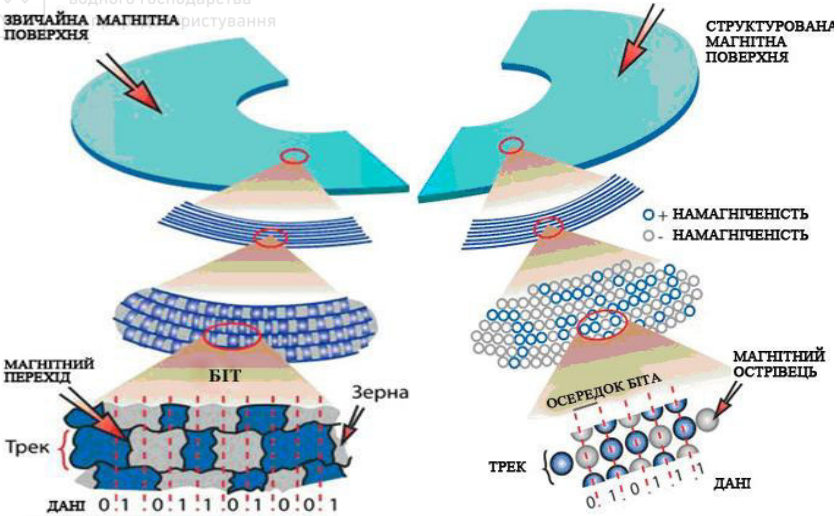


Рис. 5.25. Звичайна та патернована магнітні поверхні

Національний університет
водного господарства
та природокористування

поверхні методом літографії, при якій під дуже великим тиском полімер приштамповується на основу диску з оксиду кремнію і далі складним чином обробляється. В результаті, кожне велике «зерно» розміщується на деякому магнітоізольованому підвищенні (магнітний острівець на рис. 5.25, справа). Розміщення області одного біту даних на підвищенні дає можливість зменшити вплив теплового руху на стійкість намагніченого стану.

Другий шлях обрали компанії Hitachi і Seagate. У Hitachi нова технологія називається Patterned Magnetic Media , а в Seagate – Self-Ordered Magnetic Array (SOMA). В останньому випадку ідея полягає в створенні носія, у якого структура задавалася б властивостями самоорганізації матеріалу. У Seagate працюють зі сплавом FePt, що дозволяє отримувати ідеально рівномірну структуру з розміром комірки в декілька нанометрів.

У такій структурі може бути досягнута поверхнева щільність запису більш 256*Тбіт/дюйм*², а комірка для запису 1біта буде мати розміри 2,7×2,2*нм* – всього 12 атомів.

Спін-поляризаційна скануюча тунельна спектроскопія дозволяє визначити напрямок намагніченості окремих атомів – прочитати інформацію, закладену в комірку пам’яті.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Перспективи розвитку нових методів запису і їх фізичні обмеження відображені на рис. 5.26. Видно, що фізичні обмеження перпендикулярного запису фактично досягнуті і на зміну йому повинні прийти термоасистована пам'ять та структуровані носії. На даному малюнку не відображені перспективи розвитку альтернативних методів зберігання даних (флеш, голографічних), які в досяжному майбутньому можуть скласти серйозну конкуренцію магнітним носіям.

Рис. 5.26. Перспективи розвитку магнітної пам'яті

5.3.3. Технологія AFC

У 1990 році спеціалістами компанії IBM була розроблена технологія AFC (англ.: antiferromagnetically coupled, система антиферомагнітного запису інформації) – покриття поверхні дисків вінчестера подвійним антиферомагнітним шаром. В 2001 році вийшли в продаж перші накопичувачі Deskstar GXP ємністю 80 і 120*ГБ*, створені за цією технологією [5].

За допомогою технології AFC вдалося суттєво збільшити густину робочого шару, що, в свою чергу, дозволило зменшити товщину магнітного шару диску. Суть цієї технології базується на явищі GMR (див. параграф 2.3.4.3): між 2 шарами феромагнітного матеріалу робочого шару наноситься надзвичайно тонкий шар (товщиною 2-3 атоми) рутенію, який отримав жартівливу назву *пилок ельфа* («pixie dust») (див. рис. 5.27). Подібна багатошарова структура утворює антиферомагнітне з'єднання, яке складається з верхнього і

Національний університет водного господарства та природокористування

нижнього магнітних шарів. Тонкий шар рутенію, розміщений між двома магнітними робочими шарами, дозволяє зорієнтувати намагнічення доменів відповідних шарів в протилежних напрямках. Протилежна магнітна орієнтація шарів дозволяє ущільнити інформацію на диску до 1000*Гбіт/дюйм*^{2} і збільшити ємність жорстких дисків до 16000*ТБ*.

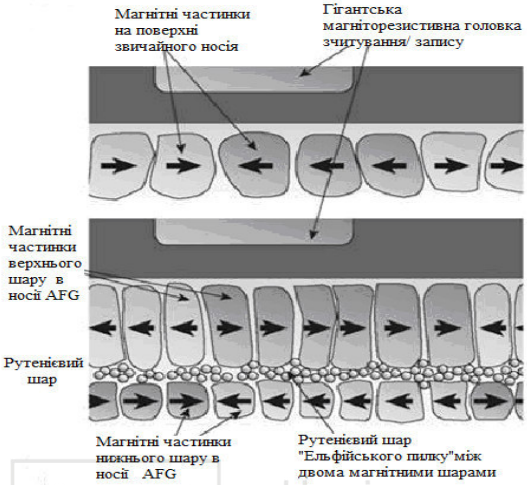


Рис. 5.27. Будова диску, виготовленого за технологією AFC

5.4. Перспективні оптичні технології в комп'ютерній техніці

5.4.1. Флуоресцентні технології

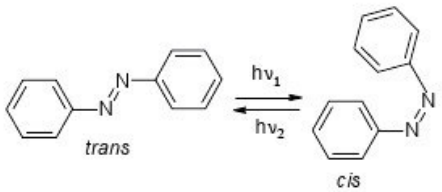


Рис. 5.28. Типовий фотохромний процес – оборотна транс-цис фотоізомеризація азобензолу

Відомо, що низка речовин (наприклад, фульгіди) можуть оборотно або необоротно змінювати будову молекули та оптичні властисті (заломлення, поглинання, пропускання, флуоресценцію) під дією оптичного опромінення (див. рис. 5.28). Це явище називається *фотоізомеризація*, а речовини – *фотоініціатори*.

Національний університет водного господарства та природокористування

Впливаючи світлом певної довжини хвилі на них, можна керувати процесом запису інформації на фотоініціатори. Використання флуоресценції для зчитування інформації з цифрових оптичних дисків дозволяє виключити з їх конструкції відбиваючі шари, а значить і інтерференцію відбитих променів. Під флуоресценцією тут розуміємо поглинання речовиною світла певної довжини хвилі і випромінювання його вже іншої (більшої) довжини хвилі. На фотоприймач (оптична система читання) попадає не відбитий зондуючий промінь, а світло, що випромінюється розміщеними в товщі диску скупченнями фотоініціатора (пітами). Флуоресцентні піти (0,3*мкм* х 0,3*мкм*) можуть бути як внесені в задані точки диску при заводському виготовленні (подібно до CD-ROM), так і утворені при фотохімічній трансформації речовини під дією лазерного променя під час запису (див. рис. 5.29).

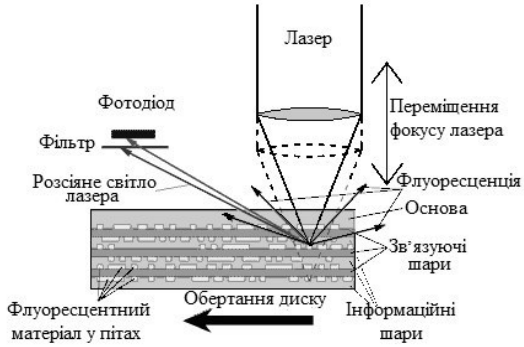


Рис. 5.29. Принцип читання інформації з флуоресцентних дисків

Записування інформації на диск може здійснюватися двома способами:

1. *Одноразовий запис заводського виготовлення* (FMD-ROM, аналог CD-ROM). У цьому випадку піт диску заповнюється фотоініціатором при заводському виготовленні. При опроміненні такого піта світлом з певною довжиною хвилі виникає полімеризація його складу. Утворений при цьому полімер має флуоресцентні властивості з необхідними для роботи диску характеристиками. Отже, після заповнення всіх пітів диску фотоініціатором, залишається тільки опромінити їх світлом лазера, і диск записаний. Але, оскільки полімеризація фотоініціатора є незворотньою, – перезаписати такий диск після заводського записування вже не вдасться.

Національний університет водного господарства та природокористування

2. FMD-диск одноразового запису (англ.: WORM, Write Once-Read Many – одноразовий запис, багаторазове читання, аналог CD-R). В цьому виді запису пропонується відразу два варіанти:

а). У першому (термічному) в незаписаному стані всі піти диску володіють флуоресцентними властивостями. При записі лазер нагріває потрібні піти до температури, при якій молекули фотоініціатора втрачають флуоресцентні властивості. Цей варіант добре розроблений, і менш вимогливий до лазера – в документах компаній-розробників повідомляється про розробку пристроїв запису з червоними, зеленими та блакитними лазерами.

б). *Одноразовий індивідуальний запис* WORM FMD. Тут використовується інше явище – порогова фотохімічна реакція. При записі інформації реалізується двофотоннний механізм запису. У цьому випадку зміна оптичних властивостей фотоініціатора відбувається тільки в тому випадку, якщо потужність випромінювання, що діє на піт, досягає певного порогового значення. При менших потужностях випромінювання світло проходить крізь фоточутливий матеріал, не змінюючи його властивостей. Це можливо реалізувати використовуючи два лазера з потужностями меншими порогової і розміщеними під кутом один до одного. В тих точках речовини, де їх промені перетинаються, сумарна потужність перевищує порогове значення і фізичні властивості фотоматеріалу змінюються.

У другому випадку вимоги до потужності лазерів менші, ніж у першому, тому лазер може бути заміненим OLED-технологією (див. параграф 4.29).

Переваги флуоресцентних дисків очевидні:

1. Можливість багатошарового запису. Саме це дозволяє істотно підвищити ємність диску. Завдяки прозорості шарів для флуоресценції, в запропонованих зразках дисків компанії C3D використовується 10-15 інформаційних шарів. У майбутньому компанія обіцяє наростити кількість шарів до 300 і більше, що доведе ємність диска до 1*ТБ*.

2. Надійність запису і зчитування інформації. Оскільки довжина хвилі флуоресцентного випромінювання піта відрізняється від довжини хвилі лазера, всі завади, створені потужним лазерним променем, можуть бути відсіяні оптичним фільтром на датчику читання. Крім того, флуоресцентне випромінювання не когерентне. Це озна-

Національний університет водного господарства та природокористування

чає, що не відбувається інтерференції променів від різних шарів диску.

3. Використання флуоресценції дозволяє зчитувати інформацію з декількох шарів паралельно. Для цього достатньо «змусити» різні шари випромінювати різні довжини хвиль флуоресценції. Для цього можна використовувати відповідні оптичні фільтри і набір (лінійку) відповідних фотодіодів. Таким шляхом можна досягнути швидкості зчитування більшої 1*Гбіт/с*.

4. Очевидна близька спорідненість нової технології з CD дає можливість зробити нове обладнання сумісним зі старими CD-дисками. Також, нові диски можна робити на обладнанні для виробництва звичайних CD- і DVD-дисків після невеликої реконструкції. В офіційних документах C3D підкреслюється, що нова технологія менш чутлива до неточностей виготовлення диску, ніж CD і DVD і не вимагає деяких технологічних стадій, необхідних для CD – таких, як нанесення відбиваючого шару. Отже, крім великої ємності і високої швидкості читання з FMD-диску виробники обіцяють відносно легкий перехід від виробництва CD до виробництва FMD, а також забезпечення сумісності нових приводів читання і запису з CD і DVD (а це важливо для покупців).

5. Попередня обставина також обумовлює і іншу важливу перевагу нової технології – низьку вартість. Виробництво одного диску ємністю 50*ГБ*, за оцінками експертів компанії C3D, становитиме всього 0,76 доларів. Слід зазначити, що одним з факторів, що стримують досі широке поширення DVD-Відео – це висока вартість диску (30 доларів). FMD-диск при набагато більшій ємності обіцяє коштувати практично як звичайний CD-R.

Недоліки флуоресцентних дисків скоріше всього є продовженням їх переваг. А вони такі, що їх масове поширення негайно «вб'є» і CD-, і DVD-технології. Слід відмітити, що доходи виробників у цій області ще далеко не вичерпані. Мабуть тому, багато гігантів виробництва CD- і DVD-носіїв – Toshiba, Hitachi, Mitsubishi, Philips, Pioneer, Sony, хоча і виступають в списках потенційних виробників FMD, але не поспішають приступати до їх масового виробництва.

Сьогодні розроблені варіанти флуоресцентних багатошарових дисків відомі під назвами **HyperCDROM** (10-100*ТБ*), **FMD** (англ.: Fluorescent Multilayer Disk), **DMD** (англ.: Digital Multilayer Disk)

Національний університет водного господарства та природокористування

(22-32, потенційно – до 100*ГБ*). Характеристики 12-ти шарового FMD наведені в таблиці 2 в порівнянні з характеристиками DVD.

5.4.2. Голографічна система запису та зберігання інформації

Таблиця 2

	DVD-ROM	FMD-ROM
Інформаційна ємність, ГБ	5/9/17	50
Швидкість читання, *Мб/с*	10	1000
Кількість шарів	1/2/4	12
Крок доріжки, *мкм*	0,74	0,8
Довжина хвилі лазера, *мкм*	0,65	0,53

Оптичне випромінювання теоретично може бути сфокусоване в пляму діаметром $\lambda/2$, де λ – довжина хвилі випромінювання. Це означає, що максимальна щільність інформації, записаної оптичним методом може бути порядку $4/\lambda^2$, тобто досягати 10^9 *біт/см*^{2}, що далеке від реалізації в сучасних носіях. Пошук нових можливостей збільшення інформаційної щільності запису і швидкості читання інформації ведеться в багатьох напрямках, в тому числі і в області голографії, яка є найперспективнішою в плані створення високоефективних систем запису та зберігання інформації [5, 6].

Національний університет водного господарства та природокористування

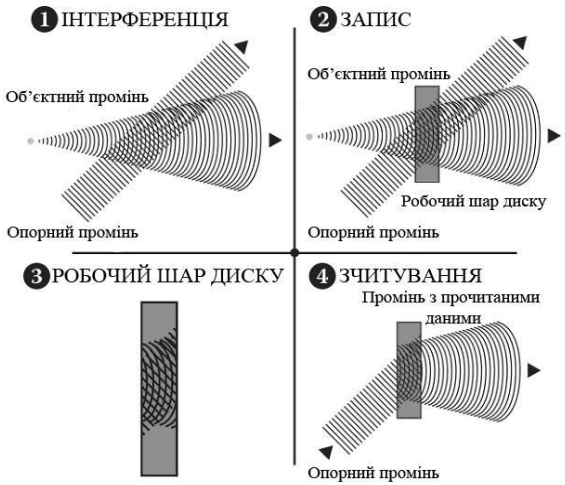


Рис. 5.30. Принцип роботи голографічної системи запису/читання

Голографічний принцип

Національний університет водного господарства та природокористування

запису полягає в реєстрації одночасно об'єктної (яка несе інформацію про об'єкт) і опорної хвиль (див. параграф 3.1.6). При цьому в результаті накладання цих двох когерентних хвиль відбувається перетворення фазових співвідношень в амплітудну структуру інтерференційної картини. Реєстрація цієї інтерференційної картини в об'ємі фоточутливого шару голографічного оптичного диску і приводить до запису голограми (див. рис. 5.30). Зміни в матеріалі такого диску можуть бути у вигляді модуляції поглинання, показника заломлення або товщини. В якості такого фоточутливого шару голографічного диску можна використовувати ніобіт літію ($LiNbO_3$).

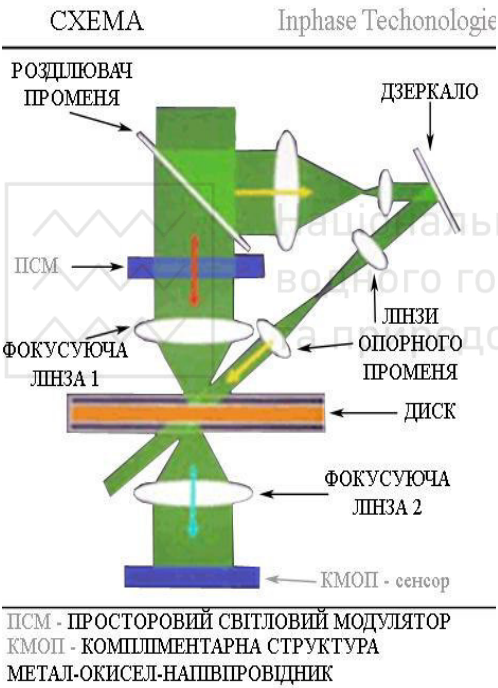


Рис. 5.31.Технологія запису на HVD

Голографічна система запису та зберігання інформації на даний час реалізується в **HVD** (англ.: Holographic Versatile Disk – багатоцільовий голографічний диск). Технічні характеристики таких дисків приведені в таблиці 3.

Функціонування системи голографічної пам'яті відбувається наступним чином (див. рис. 5.31).

На початковому етапі в цьому пристрої відбувається поділ променя синьо-зеленого аргонового лазера за допомогою напівпрозорого дзеркала на дві когерентні складові – однаково поляризовані опорний і предметний промені (останній є носієм даних). Предметний промінь розфокусовується, щоб він міг цілком висвітлювати просторовий світловий модулятор (ПСМ, англ.: SLM – Spatial Light Modulator), який є простою рідкокристалічною (LCD) панеллю (див.

параграф 4.2.7), на якій сторінка даних відображається в вигляді матриці, що складає зі світлих (відповідають логічній «1») і темних пікселів («0»). В якості ПСМ можна також використовувати мікромеханічні модулятори на основі мікродзеркал (див. параграф 4.3.1). Обидва промені направляються всередину світлочутливого робочого шару диску, де і відбувається їх накладання. Внаслідок інтерференції променів в об'ємі фоточутливого шару утворюються точки максимумів і мінімумів інтерференції. В точках максимумів амплітуди і інтенсивності променів нагрів фоточутливого шару приводить до його деструкції і зміни коефіцієнта відбивання та показника заломлення. Змінюючи довжину хвилі променя, кут його падіння і положення диску можна записувати інформацію на одну і ту ж ділянку диску. Такий спосіб, який дозволяє зберігати багато голограм в одному і тому ж місці отримав назву *мультиплексування*. Він дозволяє значно підвищити щільність запису даних.

При читанні даних робочий шар висвітлюється опорним променем тієї ж довжини хвилі і спрямування, що і при запису. Взаємо-

Таблиця 3

Технічні характеристики голографічних дисків

Об'єм, *ТБ*	до 1
Щільність запису, *Гбіт/дюйм*^{2}	до 515
Швидкість запису та зчитування, *Мбіт/с*	до 960 (сторінкою, ємність якої до 10^6 біт)
Діаметр диска, *мм* (*дюйм*)	130 (5,25)
Товщина диска, *мм*	3,5
в т. ч.: основи, *мм*	1
робочого шару, *мм*	1,5
захисного шару, *мм*	1
Довжина хвилі лазера, *нм*	405
Вартість диска, доларів	100 (на даний час)
Вартість привода, доларів	3000
Додаткове обладнання	захисний пластмасовий картридж

діючи зі збереженою в робочому шарі об'ємною структурою точок зі зміненими оптичними характеристиками, він відтворює записану сторінку з тильної сторони диску у виді образу – «шахівниці» зі світлих і темних пікселів (голограма перетворить опорну хвилю в ко-

Національний університет водного господарства та природокористування

пію предметної). Потім цей образ фокусується лінзою на матричний детектор всією сторінкою даних. Основою матричного детектора служить прилад із зарядовим зв'язком (ПЗЗ, англ.: CCD, Charge - Coupled Device), який охоплює всю сторінку даних. При читанні даних опорний промінь повинний падати на робочий шар під тим же самим кутом, при якому проводився запис цих даних, і допускається зміна цього кута не більше ніж на градус.

Слід відзначити, що при мультиплексуванні додаткові голограми змінюють властивості матеріалу. Це приводить до того, що образи голограм стають тьмяними і при читанні з диску можлива втрата деякої кількості записаних даних, або вони можуть прочитатися з помилками. Тому додаткових голограм може бути тільки фіксована кількість. Цим і пояснюється обмеження обсягу реальної пам'яті, яким володіє фоточутливий матеріал диску. Динамічна область середовища визначається кількістю сторінок пам'яті, які вона може реально поміщати, тому дослідники інтенсивно займаються вивченням обмежень на світлочутливість матеріалів голографічних дисків.

Традиційно використовуються наступні методи мультиплексування:

- за кутом падіння опорного пучка;
- за довжиною хвилі;
- за фазою.

На жаль, вони вимагають складних оптичних систем і товстих (товщиною в декілька міліметрів) носіїв, що робить їх непридатними для комерційного застосування, принаймні, у сфері обробки інформації. Однак зовсім недавно компанією Bell Labs були винайдені три нових методи мультиплексування:

- зсувне;
- апертурне;
- кореляційне.

Вони базуються на використанні зміни положення носія щодо світлових пучків. При цьому зсувне і апертурне мультиплексування використовують сферичний опорний пучок, а кореляційне – пучок ще більш складної форми. Крім того, оскільки при кореляційному і зсувному мультиплексуванні задіяні механічні рухомі елементи, час доступу при їх застосуванні буде приблизно таким же, як і у звичайних оптичних дисків. Bell Labs вдалося побудувати експериментальний носій на основі того ж ніобіту літію, що використовує тех-

ніку кореляційного мультиплексування зі щільністю запису близько 226*ГБ/дюйм*^{2}.

Більшість досліджень в області голографії проводилися з використанням фотореактивних матеріалів (головним чином, згадуваного вище ніобіту літію), однак якщо вони годяться для запису голографічних зображень ювелірних прикрас, то цього ніяк не можна сказати відносно запису інформації: вони дорогі, слабочутливі і мають обмежений динамічний діапазон (частотну смугу пропускання). Тому був розроблений новий клас фотополімерних матеріалів (отримали назву Tapestry), які мають непогані перспективи з погляду комерційного застосування. В якості матеріалу для робочого шару диску пропонується використовувати суміш двох сумісних хімічних компонентів, які можуть полімеризуватися незалежно один від одного. Диски формуються шляхом природної полімеризації одного з компонентів, в результаті чого утворюється молекулярна решітка, яка виступає як підтримуюче середовище для другого світлочутливого компонента, який не проходить стадію полімеризації і розчиняється в цій решітці. Завдяки цьому досягається геометрична стабільність при запису даних і довговічність диску. Під ді-

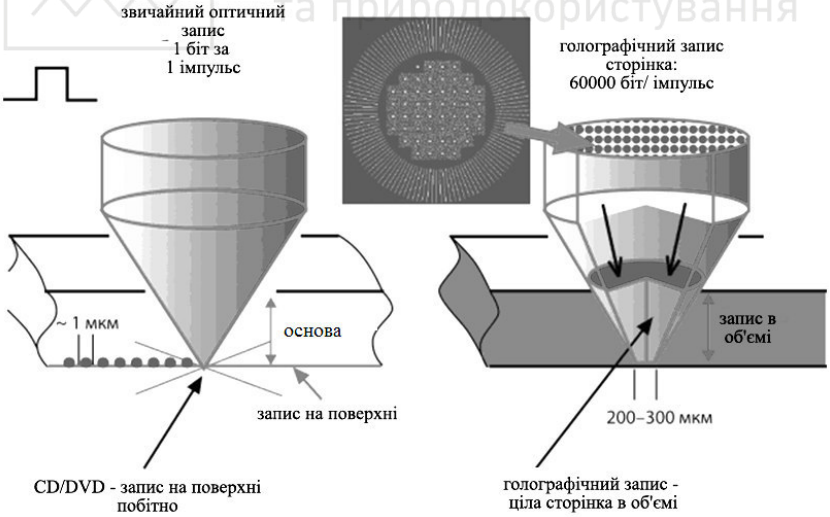


Рис. 5.32. Структура зберігання даних на CD/DVD і HVD

Національний університет водного господарства та природокористування

єю світла другий компонент полімеризується, внаслідок чого виникає градієнт його концентрації. Результатом його дифузії є утворення структури зі змінним коефіцієнтом відбивання, коливання якого якраз і несуть в собі записану інформацію.

Створені матеріали мають триваліший життєвий цикл (у плані зберігання записаної на них інформації) і стійкі до впливу температур, а також відрізняються поліпшеними оптичними характеристиками, загалом, підходять для однократного запису даних (WORM).

Проблемою голографічного методу запису залишається складна оптична система. Так, для голографічної пам'яті не підходять світлодіоди на базі напівпровідникових лазерів, застосовувані в традиційних оптичних пристроях, оскільки вони мають недостатню потужність, дають пучок з високою розбіжністю і, нарешті, напівпровідниковий лазер, який генерує випромінювання в середньому діапазоні видимої області спектра, одержати дуже складно. Для голографічних же дисків необхідний потужний лазер, що дає якнайбільше тонкий паралельний пучок світла.

Оскільки інтерференційні сторінки однорідно заповнюють весь матеріал робочого диску, це наділяє голографічну пам'ять іншою корисною властивістю – високою достовірністю записаної інформації. У той час як дефект на поверхні магнітного диску або магнітної стрічки руйнує важливі дані, дефект в голографічному середовищі не приводить до втрати інформації, а викликає всього лише «потемніння» голограми.

Підсумовуючи вищесказане, можна виділити основні *особливості голографічного методу запису*:

1. Створення об'ємного зображення об'єкта, що не може бути реалізованим іншими методами;

2. Використання для зберігання інформації не тільки поверхні диску, а і всього об'єму, що суттєво збільшує щільність інформації;

3. Реєстрація прозорих об'єктів, в яких окремі частини відрізняються показниками заломлення або товщиною, що впливає на зміну довжини оптичного ходу;

4. Можливість отримати максимальну роздільну здатність при зчитуванні інформації з диску не тільки в поперечному напрямі, а і в поздовжньому;

5. Запис голограм об'єктів, що змінюється в часі;

Національний університет водного господарства та природокористування

6. Реалізація так званого розподіленого запису інформації, що підвищує надійність запису та зчитування.

Переваги голографічної пам'яті перед іншими видами пам'яті (в тому числі і оптичними) полягають в наступному:

1. Висока щільність запису (теоретично до 10^{12}*біт/см*^{2}). На даний час в лабораторіях отримані значення до 40*Гбіт/см*^{2}.
2. Висока швидкість запису та читання (на даний час – до 10*Гбіт/с*, а з врахуванням переведення інформації в електронний вигляд – до 1*Гбіт/с*);
3. Паралельний запис інформації (не послідовно по одному біту, а цілими сторінками (див. рис. 5.32);
4. Висока точність відтворення сторінки;
5. Низький рівень шуму при відновленні даних;
6. Неруйнуюче читання;
7. Тривалий термін зберігання (50 років і більше).

5.4.3. Перспективні 3D-технології

Національний університет водного господарства та природокористування

До перспективних 3D-моніторів відносять:

1. *Волюметричні*. Вони відтворюють зображення у вигляді набору точок (вокселів) або ліній, фізично рознесених в обмеженому робочому просторі дисплея (об'ємі відтворення).
2. *Голографічні*. Вони відтворюють неперервне світлове поле, відповідне світловому полю реального об'ємного зображення.

Волюметричні 3D-екрани (V3D) відтворюють кольорові точки або лінії в об'ємі монітора. Це виглядає приблизно так, як показано

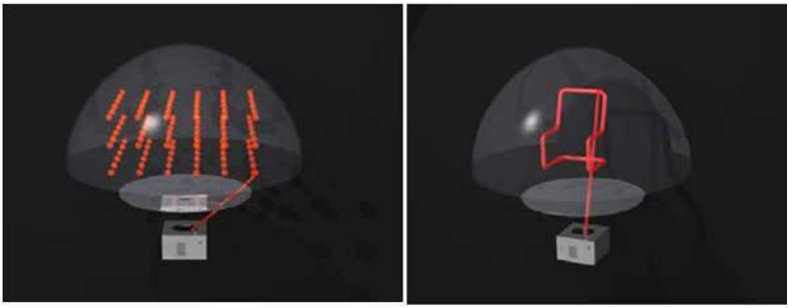


Рис. 5.33. Волюметричні 3D-екрани

Національний університет водного господарства та природокористування

на рис. 5.33. Для створення такого зображення в об'ємі відтворення за допомогою вокселів або ліній існує два способи:

- помістити в цю точку речовину, здатну розсіювати світло і освітити її;
- помістити в цю точку речовину, здатну випромінювати світло і змусити її світитися.

Для реалізації V3D було запропоновано безліч варіантів. Всі ці варіанти можна поділити за використанням в конструкції (див. табл. 4):

- рухомих елементів;
- пристроїв, що формують зображення вокселів;
- пристроїв, що знаходяться в об'ємі відтворення.

Можна з деякою впевненістю говорити, що V3D-екрани, які в своєму складі мають механічні рухомі елементи, не отримають поширення в найближчому майбутньому через складність узгодження механічної і оптичної складової такого монітору.

Таблиця 4

Варіанти реалізації V3D

Рухомі елементи	Зображення формує	В об'ємі відтворення знаходиться
В конструкції наявні рухомі елементи	Стаціонарний проектор	Екран, що обертається
		Екран, що коливається
	Електронно-променева гармата (ЕЛТ)	Електролюмінісцентний, екран, що обертається всередині ЕЛТ
	Матриця світлодіодів	Світлодіодна панель, що обертається
	Рухомий монітор	ЕЛТ, що коливається
Всі елементи конструкції нерухомі	Стаціонарний проектор	Пакет рідкокристалічних прозорих екранів
	Інфрачервоні лазери з променями, що перетинаються	Флуоресцентне скло
		Пари рубідію
	Стаціонарний проектор з виходом у оптоволоконний канал	Кульки, які засвічуються через оптоволоконний канал
	Матриця світлодіодів	Тривимірна матриця світлодіодів

Національний університет водного господарства та природокористування

Приведемо приклади V3D-технологій, які, на наш погляд є найбільш перспективними. Це, в першу чергу, використання стаціонарного проектора з пакетом рідкокристалічних прозорих екранів, прозорість яких може змінюватись під дією прикладеної напруги (див. рис. 5.34). Пакет складається з 20 пластин, розмір яких по діагоналі становить 20 дюймів. В певному стані кожна з пластин прозора і

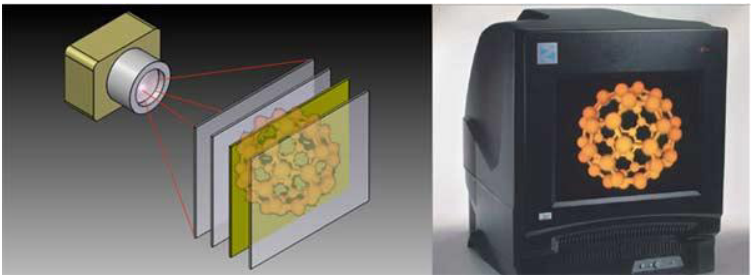


Рис. 5.34. Приклади V3D-технологій на основі рідкокристалічних прозорих екранів

Національний університет водного господарства та природокористування

пропускає світло, в іншому мутніє і деяку частину світла розсіює, а деяку – пропускає. Встановлений за пакетом DLP-проектор формує зображення «зрізів» 3D-картинки синхронно з перемиканням прозорості пластин. Накладання таких «зрізів-томограм» в очах дає об'ємне зображення. Згладжування зображення по глибині при переході від «зрізу» до «зрізу» досягається спеціальною програмною обробкою.

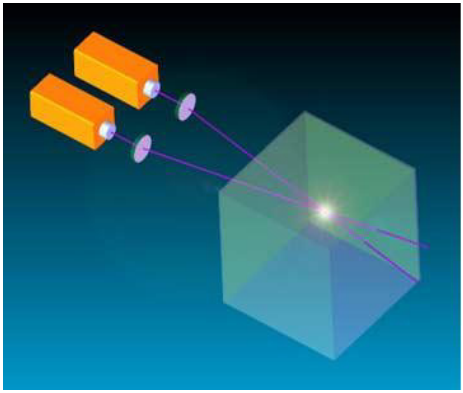


Рис. 5.35. Приклади V3D-технологій на основі люмінесценції

Інший приклад – це використання люмінесценції. Промені двох інфрачервоних напівпровідникових лазерів відхиляються так, що перетинаються в певній точці об'єму відтворення, заповненого активною речовиною (транслюмінофором). Транслюмінофори – це речовини, які поглинають світло інфрачервоного діапазону, а випромінюють – видимого. Відомо, що транс-

Національний університет водного господарства та природокористування

люмінофори мають певний енергетичний поріг збудження. Потужності лазерів підбирають таким чином, щоб енергія одного променя була меншою цього порогу і не викликала світіння, а сумарна гія двох променів перевищувала цей поріг. Таким чином, свічення виникає тільки в точці перетину променів (див. рис. 5.35). Керуючи відхиленням променів за допомогою дзеркал або акустооптичних елементів, домагаються сканування всього об'єму відтворення, а модулюючи один з променів засвічують потрібні вокселі.

Голографічні 3D-екрани (H3D) імітують просторове розміщення світлових хвиль у такому вигляді, як вони розташовувалися б при відбитті світла від реального тривимірного об'єкта.

Принцип роботи H3D базується на використанні об'єктного і опорного когерентних променів, накладання яких переводить фазові характеристики об'єктного променя в амплітудні. Відтворення фазових характеристик в моніторі відбувається аналогічно відтворенню даних в голографічних дисках.

Національний університет водного господарства та природокористування

Бібліографічний список до розділу 5

1. Лебедь О.О. Основи квантового комп'ютера та квантової інформатики [Текст] / О.О. Лебедь, О.Ю. Дейнека, А.В. Рибалко, В.І. Гаращенко // Рівне: Видавництво НУВГП, 2014. – 151 с
2. Сухно И.В. Углеродные нанотрубки. Часть 1. Высокотехнологичные приложения. Учебное пособие [Текст] / И.В. Сухно, В.Ю. Бузько // Краснодар, КубГУ, 2008. – 55 с.
3. Лебедь О.О. Фізичні основи інформаційних систем [Текст]/ О.О. Лебедь, В.Ф. Орленко, О.Д. Кочергіна. – Рівне: НУВГП, 2013. – 182 с.
4. Угрюмов Е.П. Цифровая схемотехника [Текст] / Е.П. Угрюмов. – Петербург, 2004. – 528 с. : ил.
5. Мюллер С. Модернизация и ремонт ПК, 17-е издание [Текст] / С. Мюллер. – М. : ООО «И. Д. Вильямс», 2008. – 1360 с.
6. Чемес Е.А. Оптическая запись и воспроизведение цифровой информации / Е.А. Чемес // Одесса: Наука и техника, 2006. – 316 с.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

РОЗДІЛ 6
ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ КОМП'ЮТЕРІВ

6.1. Молекулярний комп'ютер

Молекулярний комп'ютер – це пристрій, в якому замість напівпровідникових елементів на основі кремнію та германію, що застосовуються в класичних комп'ютерах, використовуються молекули і молекулярні ансамблі. В основі нової технологічної ери молекулярного комп'ютера знаходяться так звані «інтелектуальні молекули». Такі молекули (або молекулярні ансамблі) можуть існувати у двох термодинамічно стійких станах, кожний з яких має свої особливі фізичні та хімічні властивості. Переводити молекулу з одного стану в інший («перемикати») можна за допомогою світлового випромінювання, нагрівання, хімічних агентів, електричного і магнітного полів, тощо. Фактично такі бістабільні молекули – це нанорозмірні двобітові системи, що відтворюють на молекулярному рівні функцію класичного тригера.

Особливо важливі ті перетворення бістабільних молекул, після яких суттєво змінюється конфігурація електронних оболонок молекули. Наприклад, відомо, що у деяких молекул після ізомеризації електрони можуть вільно рухатись вздовж ізомерного ланцюжка, отже, з'являється здатність проводити електричний струм. Можуть змінюватися і інші властивості молекули: спектри поглинання зміщуватись у видиму область, виникати нелінійні оптичні властивості і, що особливо важливо, флуоресценція.

Створення молекулярного комп'ютера можливе лише на базі молекулярного транзистора.

Молекулярні транзистори. У найзагальнішому вигляді під молекулярним транзистором розуміють транзистор розміром в одну молекулу. Ідея молекулярних транзисторів не нова. Ще в 1959 році американський фізик Р. Фейнман висловив ідею, згідно з якою молекули з певними властивостями, можуть працювати як тригери. Розміри молекулярного транзистора будуть в 100 разів меншими наймініатюрніших кремнієвих транзисторів, а його ефективність може бути в 100 млрд. разів вищою в порівнянні з сучасним кремнієвим транзистором (див. табл. 1).

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Таблиця 1

Порівняння характеристик транзистора молекулярного та класичного комп'ютера

Характеристика	Молекулярний комп'ютер	Класичний комп'ютер
Розміри, *нм*	1-10	до 100
Щільність елементів, $см^{-2}$	10^{13}	10^{7}
Час відгуку, *мс*	10^{-9}	10^{-3}
Ефективність	10^{11}	1

Сьогодні розробка молекулярного комп'ютера просувається у напрямку паралельної розробки молекулярного процесора, молекулярної пам'яті та молекулярної шини.

Молекулярний процесор

Робота молекулярного процесора базується на роботі молекулярного тригера. Найбільш ефективні молекулярні тригери побудовані на фотохромних з'єднаннях, які ізомеризуються при переході до вищих збуджених електронних станів. Це може бути процес цис-транс - ізомеризації, періциклічних перетворень, фотопереносу протона, тощо. Після перемикання кардинально перебудовується електронна конфігурація оболонок молекули, а її геометрія залишається практично незмінною. Перспективні також топологічні ізомери супрамолекули – наприклад, перемикач, описаний Д.Ф. Стоддардом і Д. Хісом, (див. рис. 6.1). Моношар молекул катена (на рисунку – переплетені кругла і прямокутна частини молекули) поміщають між металевим і кремнієвим електродами. Після електрохімічного окиснення супрамолекули на одній з її частин (круглій) з'являється додатковий позитивний заряд. Після окиснення молекула перегруповується (кругла частина молекули провертається всередині прямокутної, $A^0 \rightarrow B^0$). Утворюється друга стабільна форма молекули, і змінюється її електричний опір. Головна перевага такого тригера – його виключно висока стійкість. Цикл окиснення-відновлення катена можна здійснювати 10-20 тисяч разів без помітного руйнування супрамолекулярної системи [1].

У 2001 році дослідницька група з «Лабораторій Белла», яка вивчала властивості так званих тіонів – органічних речовин з властивостями напівпровідників, отримала органічну молекулярну структу-

ру, що могла переводити логічні «0» в «1» і назад. Розмір каналу даного органічного транзистора дорівнює довжині однієї молекули, тобто 1-2*нм*. Молекулярний транзистор з тіонів в 10 разів менший всіх напівпровідникових приладів, створених за самими досконалими технологіями. Група вчених приступила до створення модулів процесора з молекулярних транзисторів на основі тіонів.

Молекулярна пам'ять

Для запам'ятовування цифрових бітів інформації можна викори-

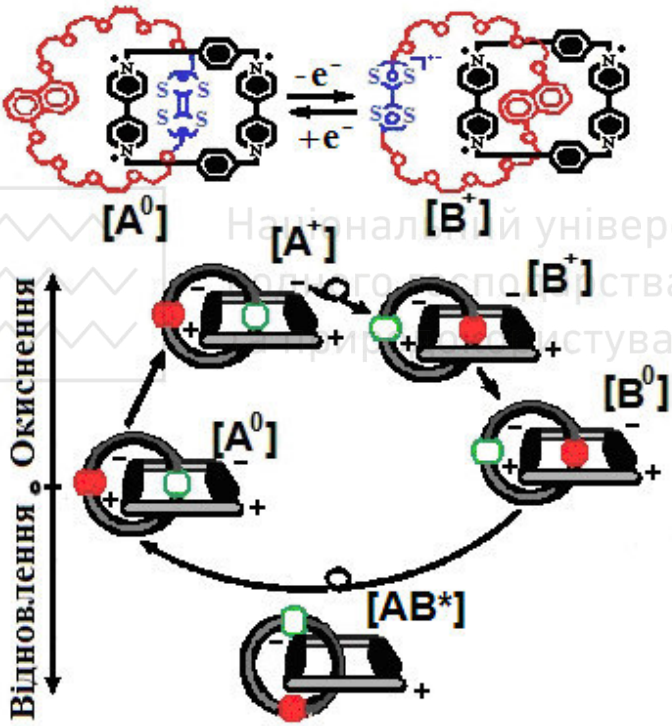


Рис. 6.1. Молекулярний тригер. Перемикання відбувається під дією прикладеної напруги (+2*В*; -2*В*), а зчитування – вимірюванням опору

стовувати молекули протеїну – бактеріородопсину (bacteriorhodopsin) [2]. Він має пурпурний колір, поглинає світло і є

Національний університет водного господарства та природокористування

присутнім у мембрані мікроорганізму, що називається halobacterium halobium. Цей мікроорганізм «мешкає» у соляних болотах, де температура може досягати +150°*C*. Коли рівень вмісту кисню в навколишньому середовищі настільки низький, що для одержання енергії неможливо використовувати окиснення, мікроорганізм для фотосинтезу використовує протеїн. Бактеріородопсин було вибрано тому, що фотоцикл (послідовність структурних змін, які молекула здійснює під дією світла) робить цю молекулу ідеальним логічним запам'ятовуючим елементом типу «І» або тригером.

Як показали дослідження Бірга, bR-стан молекули (логічне значення біта «0») і Q-стан (логічне значення біта «1») є проміжними станами молекули і можуть залишатися стабільними протягом багатьох років. Ця властивість, зокрема, забезпечує дивну стабільність протеїну, і її було надбано мікроорганізмом еволюційним шляхом у боротьбі за виживання в суворих умовах соляних боліт. За оцінками Бірга, дані, записані на бактеріородопсин запам'ятовуючим пристроєм, повинні зберігатися приблизно п'ять років. Іншою важливою особливістю бактеріородопсину є те, що ці два стани помітно відрізняються спектрами поглинання. Це дозволяє легко визначити стан молекули за допомогою лазера, налаштованого на відповідну частоту.

Був побудований прототип системи пам'яті, у якому бактеріородопсин запам'ятовує дані в тривимірній матриці. Така матриця виготовляється у вигляді кювети (прозора посудина), заповненої поліакридним гелем, в який поміщено протеїн. Кювета має форму паралелепіпеда розміром 1x1x2 дюйми. Протеїн, який знаходиться в bR-стані, фіксується в просторі при полімеризації гелю. Кювету оточує батарея лазерів і детектуюча матриця, побудована на базі приладу, що використовує принцип зарядової інжекції (англ.: CID – Charge Injection Device), яка служить для запису і читання даних.

При записі даних спочатку включається лазер жовтого світла, який сканує певну площину кювети («сторінку»), переводячи молекули цієї сторінки у Q-стан (див. рис. 6.2). Просторовий світловий модулятор (SLM), який є LCD-матрицею, створює маску на шляху променя, викликаючи виникнення активної (збудженої) площини в матеріалі всередині кювети. Ця енергоактивна площина є сторінкою даних, що може вміщати масив 4096x4096*біт*.

Національний університет водного господарства та природокористування

Перед поверненням протеїну в стан спокою (bR-стан, у якому він може знаходитися досить тривалий час) вмикається червоний, записуючий лазер, розташований перпендикулярно до жовтого. Його промінь проходить через інший SLM, у якому записані двійкові дані у вигляді темних і світлих пікселів. Таким чином, створюється відповідна інформаційна маска на шляху променя. Під дією червоного світла, молекули, до яких воно доходить через маску, залишаться у Q-стані («закріплюються») і будуть представляти двійкові «1». Інші ж молекули цієї сторінки, повернуться в початковий bR-

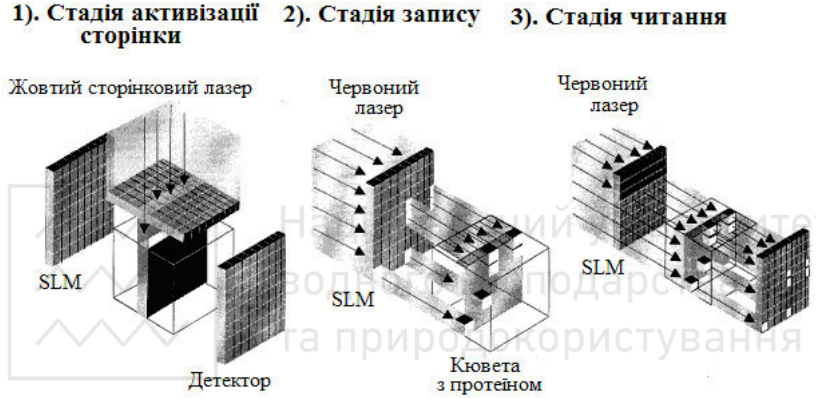


Рис. 6.2. Прототип системи молекулярної пам’яті

стан і представлятимуть двійкові «0».

При читанні записаних даних з певної сторінки, потрібно знову її активувати. Для цього знову вмикається сторінковий лазер жовтого світла над необхідною сторінкою. Ті молекули сторінки, які були в bR-стані почнуть переходити в Q-стан. Це доволі тривалий процес. Через 2*мс* після вмикання жовтого лазера вмикається низькоінтенсивний червоний лазер. Молекули, що переходять з bR-стану в Q-стан і представляють двійковий «0», поглинають червоне світло, а молекули, що знаходяться в «закріпленому» стані і представляють двійкову «1» пропускають промінь через сторінку. Світло, яке пройшло через кювету створить інформаційний малюнок світлих та темних пікселів на детекторній LCD-матриці, який може розшифрувати комп’ютер. Сторінка даних може бути прочитана без руйнувань до 5000 разів.

Національний університет водного господарства та природокористування

Для стирання даних досить короткого імпульсу синього лазера, щоб повернути молекули з Q-стану у вихідний bR-стан. Синє світло не обов'язково повинне йти від лазера: можна стерти всю інформацію, записану в кюветі за допомогою звичайної ультрафіолетової лампи.

Враховуючи, що молекула змінює свої стани в межах декількох *мс*, сумарний час для виконання операції читання/запису становить приблизно 10*мс*. Однак, за аналогією з системою голографічної пам'яті, цей пристрій здійснює паралельний доступ у циклі читання/запису, що дозволяє розраховувати на швидкість до 10*МБ/с*. Передбачається, що, якщо об'єднати по вісім запам'ятовуючих бітових комірок в байт з паралельним доступом, то можна досягти швидкості до 80*МБ/с*, але для такого способу необхідна відповідна схемотехнічна реалізація підсистеми пам'яті.

Дана система за швидкодією близька до напівпровідникової пам'яті, доки не зустрінеться сторінковий дефект. При виявленні такого дефекту необхідно перенаправляти промінь для доступу до сторінок з іншого боку. Теоретично, кювета може вмістити 1*ТБ* даних. Обмеження по ємності пов'язані, в основному, з проблемами лінзової системи, яка формує лазерні промені і здійснює засвічення кювети, і з якістю протеїну (однорідність характеристик в об'ємі і наявність сторонніх домішок).

Подібний вид молекулярної пам'яті запропонував П. Рентцепіс (Каліфорнійський університет) ще наприкінці 80-х років XX століття. Він використовував для запису даних фотохромну спіропіранову систему і в якості записуючої системи – два лазера. Поглинувши два фотони з двох лазерів, які наводяться в певну точку кювети зі спіропіраном, молекули спіропірану перегруповуються в забарвлені молекули мероцианіну. Зчитування записаної таким чином інформації відбувається при реєстрації флуоресценції молекули мероцианіну, яка також збуджується двоквантовим переходом. Флуоресценція – не єдиний, але в силу особливо високої чутливості найбільш привабливий метод зчитування записаної інформації.

Інтенсивні дослідження зі створення органічної тривимірної пам'яті ведуться в Японії під керівництвом М. Іріє. Як об'єкт вибрано інші молекули – диарілетени, але принцип їх роботи подібний.

Переваги молекулярної пам'яті:

Національний університет водного господарства та природокористування

- вона може бути побудована на протеїні, який виготовляється у великих кількостях і за невисокою ціною, чому сприяють досягнення генної інженерії;
- система може функціонувати у ширшому діапазоні температур, ніж напівпровідникова пам’ять;
- для збереження даних не потрібне джерело живлення;
- кювети з даними мають незначні розміри, однак містять гігабайти інформації, тому їх можна використовувати для архівного збереження копій (як магнітні стрічки). Оскільки кювети не містять рухомих частин, їх використовувати зручніше, ніж портативні жорсткі диски або картриджі з магнітною стрічкою.

Молекулярна шина

Третій компонент молекулярного комп’ютера – молекулярна шина, що забезпечує сполучення між його складовими. Розробку такої шини вчені ведуть за трьома основними напрямками. Перший – це провідні полімери: доповані поліацетилени (Нобелівська премія 2000 року), політіофен, поліанілін, тощо. Другий – органічні провідники, які мають досить високу питому провідність (до 10^2-10^3 *См/м*). Всі вони є довгими з’єднаними молекулами, в яких електрон переноситься по ланцюгу π-зв’язків (див. рис. 6.3).

Якщо до кінців такого ланцюга приєднати групи молекул, що в

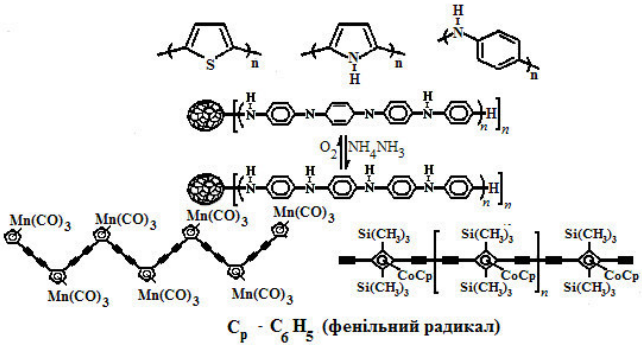


Рис. 6.3. Приклади реалізації молекулярних провідників

Національний університет водного господарства та природокористування

своєму складі мають метали, то окиснення або відновлення однієї з них забезпечить достатню провідність вздовж всього ланцюгу. Комбінуючи доповані (провідні) і недоповані (з властивостями ізоляторів або напівпровідників) ділянки полімерів, можна отримувати електричні кола із заданими властивостями.

Особливі надії покладаються на третій тип шини – системи нанотрубок. Це чудовий матеріал для молекулярної електроніки. Нанотрубки з одношаровими або багатошаровими стінками можна отримати пропускаючи електричний розряд між двома графітовими електродами. Довжина нанотрубок з одношаровою стінкою може досягати мікрометрів (діаметр близько 1*нм*), причому на відрізках по 150*нм* зберігаються металічні властивості.

Карбонові або боронітрогенні нанотрубки можна заповнювати металами і отримувати таким чином одномірні провідники, що складаються з ланцюжків атомів металів.

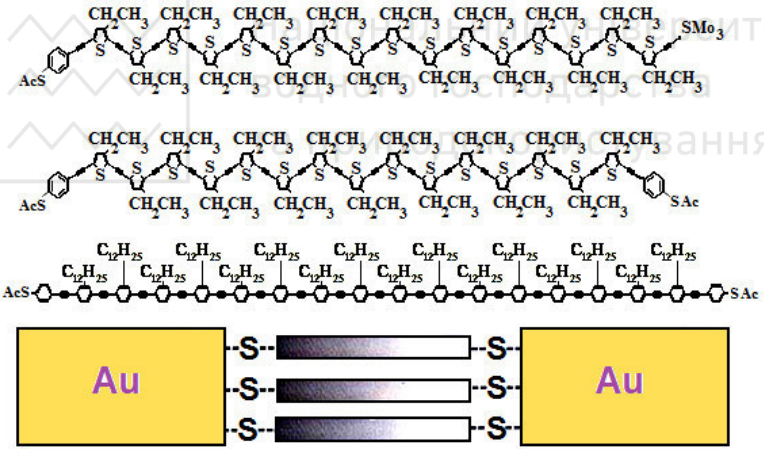


Рис. 6.5. Гібридний пристрій: молекулярний провідник і золоті електроди

Молекулярні процесор, пам’ять і шина – три складові частини майбутнього молекулярного комп’ютера, і в їх створенні є значні перспективи. Та найскладніше завдання – зібрати всі компоненти в працюючий пристрій. До її вирішення ще далеко. Поки ця задача не вирішена, вчені пропонують робити гібридні пристрої, що поєднують переваги молекулярного підходу з найбільш успішними технологічними варіантами, знайденими для кремнієвих технологій. Гіб-

Національний університет водного господарства та природокористування

ридні пристрої можна зробити, наприклад, використовуючи підвищену спорідненість атомів Сульфуру в органічних молекулах до важких металів (див. рис. 6.5), особливо до золота. Так створюються контакти між металевими електродами і молекулярними провідниками.

6.2. Оптичний комп'ютер

Час використання потоку носіїв заряду (електричного струму) для запису інформації в обчислювальних системах, як було показано в параграфі 5.1, підходить до кінця. Експоненціальний ріст кількості інформації і необхідність її обробки ставить перед науковцями завдання пошуку нових обчислювальних технологій. Ідея використання світла (фотонів) в принципових вузлах обчислювальних машин з'явилася одночасно з винайденням лазерів і вже декілька десятиліть дослідники і конструктори успішно створюють окремі вузли електронно-обчислювальних систем з використанням оптичних технологій. Фотони, які є основними носіями інформації в оптичному комп'ютері, за своїми фізичними характеристиками принципово відрізняються від електронів. Польова природа світла обумовлює численні переваги оптичних технологій для задач передачі, запису, обробки та зберігання інформації:

- частота оптичного випромінювання становить 10^{12}-10^{16}*Гц*, що дозволяє створити до 10^5 інформаційних каналів зі спектральною шириною 100*ГГц*;
- передача інформації фотонами відбувається зі швидкістю світла $c = 3 \cdot 10^8\ м/с$, в той час як швидкість поширення електричного імпульсу в вузлі класичного комп'ютера визначається часом перезарядки елементів електричних кіл і реально становить величину в 20-30 разів меншу *c*;
- велика кількість світлових пучків можуть вільно проходити через один прозорий для них об'єм, перетинатися і, через відсутність у фотонів електричного заряду, не взаємодіяти;
- Світлові потоки можуть бути локалізовані в поперечному перерізі до нанометрових розмірів і передаватися через простір, а не провідники;

Національний університет
водного господарства
та природокористування

- використання двовимірного (зображення) і тривимірного (голограми) характеру світлових полів дозволяє значно збільшити щільність і швидкість передачі інформації;
- можлива когерентна обробка інформації з використанням фазових співвідношень;
- взаємодія світлових потоків з нелінійними середовищами розподілена по всьому середовищі, що дає нові ступені вільності (у порівнянні з електронними системами) в організації зв'язку та створенні паралельних архітектур;
- за допомогою поляризації світлового променя можна збільшувати об'єм інформації, яка переноситься світловою хвилею;
- оптична система практично не випромінює в зовнішнє середовище, забезпечуючи захист від перехоплення інформації і нечутлива до електромагнітних перешкод.

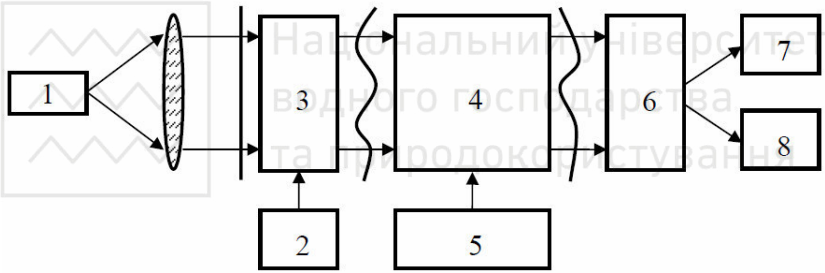


Рис. 6.6. Структурна схема оптичного комп'ютера: 1 – джерело світла; 2 – джерело інформації; 3 – пристрій введення інформації (керований транспарант); 4 – оптичний процесор; 5 – пристрій оптичної пам'яті (постійної та оперативної); 6 – пристрій виведення інформації (наприклад, на основі ПЗЗ); 7 – класичний комп'ютер; 8 – дисплей

Слід звернути увагу на той факт, що сучасний класичний комп'ютер скоріше не електронно-обчислювальна машина, а електронно-оптична обчислювальна машина. В попередніх розділах можна знайти, що в склад ПК входять наступні оптичні вузли та елементи: пристрої введення інформації – оптичний сканер, оптична миша, web-камера; пристрої обміну інформацією – інфрачервоний порт, оптоволокно; пристрої виведення інформації – лазерний принтер, дисплей, голографічний (об'ємний) дисплей; пристрої пам'яті – пам'ять на оптичних, магнітооптичних, голографічних дисках, привід CD-ROM з лазером.

Національний університет водного господарства та природокористування

Оптичний комп'ютер – це комп'ютер, який отримує, зберігає і обробляє інформацію за допомогою світлового випромінювання (фотонів), яке генерується лазерами або світлодіодами. Структурна схема оптичного комп'ютера показана на рис. 6.6. Інколи 1-4 елементи структурної схеми об'єднують в загальний блок «оптичний процесор». Як видно з рисунка, оптичний комп'ютер, також можна вважати оптично-електронним.

Як і класичний комп'ютер, побудований за архітектурою фон Неймана, оптичний комп'ютер повинен містити в своєму складі оптичний процесор, оптичну пам'ять та оптичну шину. Щодо оптичної пам'яті і оптичної шини, то вони успішно реалізовуються в складі класичного комп'ютера. Труднощі викликає конструювання оптичного процесора.

Оптичний процесор

Оптична обробка інформації здійснюється в оптичному процесорі – аналоговому оптичному або оптоелектронному пристрої, який певним чином змінює амплітуду і фазу просторово-модульованого оптичного сигналу, який містить інформацію про об'єкт. Він складається з набору оптичних елементів (лінз, діафрагм, спеціальних фільтрів, дифракційних решіток, голограм, дзеркал, хвилеводів, резонаторів, тощо), розташованих певним чином в просторі.

Розробка сучасного оптичного процесора реалізується в декількох напрямках:

1. Аналоговий оптичний процесор.
2. Електронно-оптичний цифровий процесор.
3. Оптичний цифровий процесор.

Оптичні методи дозволяють проводити як аналогову так і цифрову обробку інформації. Більшість класичних комп'ютерів не пристосовані для безпосередньої обробки інформації, яка знаходиться в аналоговій формі: у вигляді картинки, графіка, зображення. Якщо аналогова інформація все ж повинна бути оброблена на ЕОМ, попередньо цю інформацію треба перевести в двійковий код. Саме для обробки аналогової інформації найбільш перспективні оптичні та оптоелектронні системи. Однак такі обчислювальні машини (так як і електронні аналогові обчислювальні машини) мають малу точність обчислень – порядку 1%; інший їх недолік – це відсутність гнучкос-

Національний університет водного господарства та природокористування

ті, яка притаманна електронній техніці (перетворити оптичний процесор під вирішення іншої задачі важко). Оптичні аналогові обчислювальні машини – спеціалізовані пристрої.

Кожний вид оптичного комп'ютера обов'язково в своєму складі має:

- набір (матрицю) випромінювачів світла;
- транспарант (просторово-часовий модулятор світла – ПЧМС) – матрицю дії на світлові потоки;
- набір (матрицю) фотоприймачів.

Ці оптронні тріади матриць дуже зручні при виконанні операцій над багатовимірними векторними величинами. Найпростіший вид транспаранта – оптичний. Оптичним транспарантом (ОТ) називається оптичний пристрій (наприклад, діапозитив, діафрагма, поляроїд, фазова пластинка), який встановлюється на шляху пучка світла і виконує задане перетворення амплітуди і/або фази світлової хвилі. Дія ОТ характеризується комплексною функцією пропускання $t(x,y)$, при цьому:

$$B(x,y) = t(x,y) \cdot A(x,y), \tag{6.1}$$

де $A(x,y)$ і $B(x,y)$ – розподіл амплітуди світлового поля перед транспарантом і після транспаранта відповідно.

Розрізняють амплітудні (наприклад, щілини, сітки, діафрагми), фазові (призми, лінзи) і амплітудно-фазові (світлофільтри, голограми, лінзи з амплітудною маскою) оптичні транспаранти.

Особливий інтерес викликають керовані ОТ. Керований оптичний транспарант є двокоординатною матрицею елементарних комірок, оптичні властивості яких можуть змінюватися незалежно одна від одної і обернені в часі (реверсивні) під впливом зовнішньої дії. Транспарант служить для керованої зміни характеристик падаючого на нього потоку випромінювання. Керуючий вплив може бути у формі електричного, електронно-променевого, оптичного збудження. Найбільш широкого вжитку набули електрично і оптично керовані транспаранти (ЕКТ і ОКТ). При електричному керуванні інформація перетворюється з електричної форми в оптичну, при оптичному – форма інформації залишається тією ж самою, але може мати місце зміна інтенсивності, спектрального складу і, що найголовніше, перехід від некогерентного випромінювання до когерентного.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

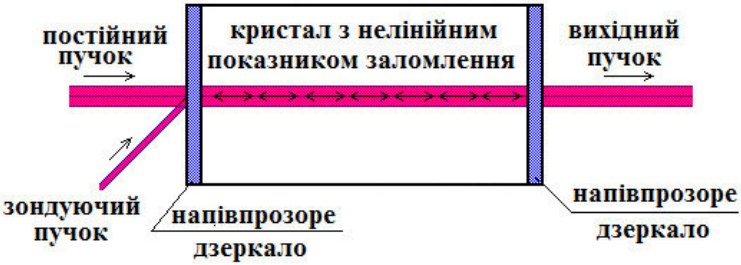


Рис. 6.7. Резонатор Фабрі-Перо

Як приклад ЕКТ можна привести рідкокристалічну матрицю. Раніше в параграфі 4.2.7 детально описувалась робота рідкокристалічного монітора, матриця якого модулює потік світла від лампи освітлення і, по суті, є амплітудним оптичним транспарантом.

Цифрова оптична обробка інформації передбачає заміну елементної бази, логічних елементів і функціональних вузлів ЕОМ на оптичні аналоги. Для створення пристроїв оптичних обчислювальних машин, що здійснюють послідовно-паралельну обробку оптичної інформації, потрібна наявність порогових елементів, що мають два стійких стани; набору логічних елементів, що реалізують функціонально повну систему логічних функцій; запам'ятовуючих пристроїв, що дозволяють записувати, зберігати і зчитувати інформацію і ряду інших компонентів.

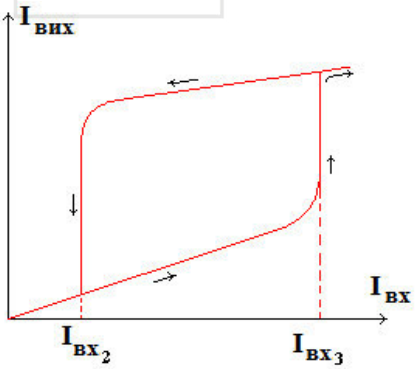


Рис. 6.8. Залежність $I_{вих}$ від $I_{вх}$ для резонатора Фабрі-Перо

В основі роботи елементів цифрового оптичного процесора лежить явище оптичної бістабільності.

Оптична бістабільність [3] – це один із проявів взаємодії світла з речовиною в нелінійних системах зі зворотним зв'язком, при якому певній інтенсивності і поляризації падаючого на речовину випромінювання відповідають два (аналог «0» і «1» в напівпровідникових

системах) можливих стаціонарних стани світлової хвилі, що пройшла через речовину, які відрізняються амплітудою і (або) параметрами поляризації хвилі.

Весь набір повністю оптичних логічних пристроїв для синтезу складніших блоків оптичних комп'ютерів можна реалізувати, наприклад, на основі нелінійних резонаторів-інтерферометрів. Як приклад пристрою з оптичною бістабільністю можна привести інтерферометр Фабрі-Перо (див. рис. 6.7) [4], заповнений речовиною з нелінійними оптичними характеристиками (наприклад антимонід індію – InSb). Показник заломлення n цієї речовини залежить від інтенсивності світла I і змінюється за законом:

$$n = n_0 + n_1 I \,. \qquad (6.2)$$

Такий інтерферометр складається з двох паралельних напівпрозорих дзеркал, які дуже добре відполіровані (з точністю до $10^{-2}\lambda$, λ – довжина хвилі світла інтерферометра). У такій системі дзеркал відбувається багаторазове відбивання і інтерференція світла. Можна показати, що в інтерферометрі Фабрі-Перо з показником заломлення, що змінюється за законом 6.2, коефіцієнт пропускання світла $T = I_{вих}/I_{вх}$ буде залежати від набігання фази Φ між дзеркалами, яка, в свою чергу, – від $I_{вх}$:

$$\Phi = \Phi_0 + \alpha I_{вх} T \,, \qquad (6.3)$$

($\alpha \sim n_1$).

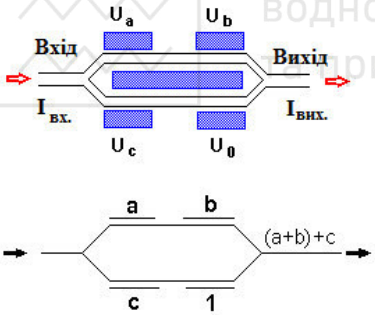


Рис. 6.9. Хвилеводний модулятор та його умовне позначення: $I_{вх.}$ та $I_{вих.}$ – інтенсивність вхідного та вихідного світла, U_a, U_b, U_c, U_0 – прикладені напруги до віток хвилеводу, a, b, c – логічні «0» або «1», (a+b)+c – результат логічної операції

Графік залежності $I_{вих}$ від $I_{вх}$ для такого резонатора має два чітких стабільних стани $I_{вих}$ (див. рис. 6.8) з високим та низьким коефіцієнтом пропускання.

Оптичні елементи різних варіантів оптичних комп'ютерів повинні виконувати основні оптичні логічні операції «І», «АБО», «НЕ», або їх комбінації.

Елементи процесора аналогового оптичного комп'ютера здатні виконувати лише операції додавання та множення. Логічні операції

значно складніше реалізувати даним комп'ютером. Зосередимося на логічних операціях, що реалізовуються в цифрових оптичних комп'ютерах.

Оптичні логічні елементи

Базисні логічні операції мають безліч оптичних реалізацій. Наприклад, їх можна здійснювати за допомогою хвилеводів. Розглянемо основні принципи побудови оптичних логічних елементів електронно-оптичного цифрового комп'ютера, які здійснюють ці операції.

а). Логічні елементи на основі хвилеводів

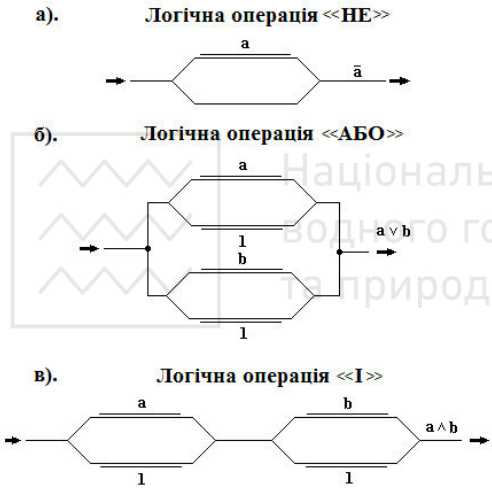


Рис. 6.10. Приклад реалізації логічних операцій на хвилеводах

Хвилеводний модулятор – це інтерференційний прилад, який здійснює амплітудну модуляцію вхідного лінійно поляризованого світлового випромінювання лазера. Вхідний хвилевод модулятора розгалужується на два паралельні канали, які потім знову зливаються, утворюючи вихідний хвилевод (див. рис. 6.9). Хвилевід виготовляється з матеріалу, що володіє електрооптичним ефектом Керра або ефектом Поккельса. Характеристикою першого ефекту є прямопропорційна залежність показника заломлення середовища хвилеводу від квадрату прикладеної напруженості електричного поля $\vec{E}$, а другого – її першій степені. Обидві гілки хвилеводу симетричні, тому вхідний світловий сигнал на розгалуженні ділиться на дві рівні за амплітудою хвилі, які поширюються вздовж паралельних каналів з відносним зсувом фаз, який залежить від $\vec{E}$. Відповідно, варіюючи величину прикладеної напруги (а значить – $\vec{E}$) до вітки хвилеводу можна

змінювати різницю фаз променів, які проходять по двох вітках модулятора, так щоб на вихід вони приходили у фазі, або протифазі. Отже, різниця фаз хвиль променів двох віток буде визначатися електричною напругою, прикладеною до керуючих електродів. Логічна «1» ототожнюється зі значенням напруги U_0, а двійковий «0» – з нульовою напругою.

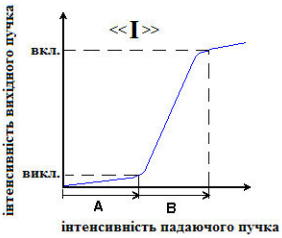


Рис. 6.11, а. Реалізація логічної схеми «І» на трансфазорі на основі інтерферометра Фабрі-Перо

Розглянемо логічний елемент «НЕ» (див. рис. 6.10, а). Якщо до електроду прикладена напруга U_0 (логічна «1»), вона зсуває фазу хвилі у вітці на π. На вихід хвилеводу дві половини світлового потоку приходять у протифазах і при інтерференції гасять одна одну. В результаті такої інтерференції інтенсивність вихідного потоку світла стає рівною нулю, що відповідає логічному «0». Якщо напруга до електроду не прикладається (логічний «0»), зсуву фаз світлових потоків віток немає і при інтерференції на виході інтенсивність вихідного потоку дорівнює інтенсивності вхідного (логічна «1»).

Отже, даний логічний пристрій працює згідно таблиці істинності «НЕ» параграфу 1.7.2 (таблиця 2). Можна впевнитись, що хвилеводи, представлені на рис. 6.10, б і в працюють згідно таблиць істинності «АБО» та «І» відповідно.

б). Оптичні логічні елементи на основі оптичного тригера (трансфазора)

Трансфазор – це оптичний аналог тригера. Він є оптично бістабільним приладом, який може знаходитися в одному з двох стабільних станів, причому час переходу з одного стану в інший становить пікосекунди. Трансфазор може мати такі ж малі розміри, як і електронний тригер. Для підтримки бістабільного стану в трансфазорі потрібна потужність порядку 10*мВт*, а енергія його перемикання становить ~10*фДж*. В якості трансфазора можна використовувати, наприклад, інтерферометр Фабрі-Перо. На його основі реалізується функціонально повна система логічних елементів, з яких можна будувати будь-які логічні схеми і функціональні вузли обчислювальних машин.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Рис. 6.11, б. Реалізація логічної схеми «АБО» на трансфазорі на основі інтерферометра Фабрі-Перо

Один і той же трансфазор може служити як елементом «І», так і елементом «АБО», в залежності від підведених до нього оптичних пучків. Якщо два падаючих пучка підібрані так, що жоден з них сам по собі не здатний переключити трансфазор, а обидва разом мають достатню інтенсивність для його перемикання, то утворюється оптичний елемент «І» (див. рис. 6.11, а). Якщо ж падаючі пучки підібрані так, що будь-який з них може переключити трансфазор, утворюється оптичний елемент «АБО» (див. рис. 6.11, б). Елемент «НЕ» можна створити, використовуючи в якості вихідного сигналу відбитий пучок світла. Оскільки він є інверсією падаючого пучка, то підвищення інтенсивності падаючого пучка призводить до зниження інтенсивності на виході і навпаки (див. рис. 6.11, в).

в). Оптичні логічні елементи на основі SEED

Основу повністю оптичного процесора розробленого фірмою «Лабораторії Белла» в 1990 році складали двовимірні матриці бістабільних елементів (розміром 4х8) на основі квантоворозмірних напівпровідникових структур, які мають нелінійні електро-оптичні властивості (англ.: self-electro-optic-effect devices, SEED). SEED був розроблений в 1986 році і є спеціальним *p-i-n*-фотодіодом. *p-i-n* -діод – це напівпровідниковий діод, у якого між сильнолегованими *p*-областю і *n*-областю знаходиться широка область напівпровідника з власною провідністю (*i*-область). За рахунок широкої *i*-області збільшується об’єм напівпровідника, де можуть бути утворені електронно-діркові пари під дією випромінювання (наприклад, оптичного).

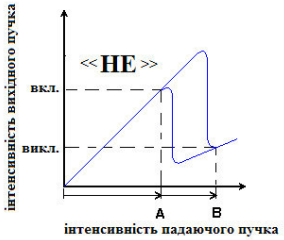


Рис. 6.11, в. Реалізація логічної схеми «НЕ» на трансфазорі на основі інтерферометра Фабрі-Перо

Національний університет водного господарства та природокористування

В елементі SEED зворотний зв'язок здійснюється за рахунок накладання електричного поля на квантоворозмірні структури більше 100 шарів надрешітки GaAs і GaAlAs товщиною по 95*нм* кожен, причому дане електричне поле виникає при проходженні через структуру світлового випромінювання. SEED характеризується двома стабільними станами при заданому рівні потужності падаючого випромінювання, вмикання яких визначається засвіченням фотодіода, яке проводилося раніше. У симетричному SEED (S-SEED, див. рис. 6.12), що складається з двох послідовно з'єднаних *p-i-n* - фотодіодів, при освітленні одного з них в колі виникає струм, який викликає падіння напруги на структурі надрешітки і приводить до збільшення пропускання світла через другий фотодіод. Таким чином, виникає позитивний зворотній зв'язок, і сукупність таких елементів може створити логічний елемент «АБО-НЕ», «І-НЕ», тощо.

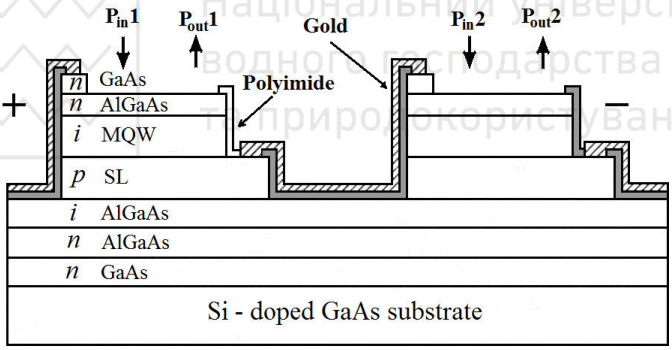


Рис. 6.12. Оптичний логічний елемент S-SEED

Оптична пам'ять

В якості оптичної пам'яті можлива реалізація багатьох варіантів, але особливий інтерес представляють голографічні пристрої пам'яті. Про них докладно розповідалось в розділі 5. Така пам'ять має ряд переваг. Голограма зберігає інформацію не тільки про інтенсивність, а й про фазу світлової хвилі, що в оптиці принципово важливо, а з утилітарної точки зору – дозволяє підвищити об'єм записаної інформації. Крім того, інформацію можна записувати в

Національний університет водного господарства та природокористування

одне і те ж місце робочого об'єму, використовуючи його весь, а не тонкий шар поверхні (як у випадку звичайної оптичної або магнітної пам'яті). За оцінками фахівців, об'ємна щільність запису інформації може перевищувати величину 10^{11}*біт/см*^{3}, а швидкість введення інформації з голограмм – кілька гігабіт за секунду.

Крім того, голограма сама може використовуватися як вузол оптичного процесора, виступаючи одночасно в ролі буферної пам'яті і обробляючого елемента.

Оптична шина

В якості оптичної шини для з'єднання вузлів оптичного комп'ютера пропонується використовувати оптоволокно. Структура оптоволоконного кабелю дуже проста і схожа на структуру коаксіального електричного кабелю, тільки замість центрального мідного дроту тут використовується тонке (діаметром порядку 1 - 10*мкм*) скловолокно (осердя, див. рис. 6.13), а замість внутрішньої ізоляції – скляна або пластикова оболонка, що не дозволяє світлу виходити за межі скловолокна. Світло, яке поширюється вздовж скловолокна, зазнає повного внутрішнього відбиття на границі двох середовищ з різними коефіцієнтами заломлення (у скляної оболонки коефіцієнт заломлення значно менший, ніж у центрального волокна). Металева ізоляція кабелю зазвичай відсутня, оскільки екранування від зовнішніх електромагнітних впливів не потрібне, однак іноді її все-таки застосовують для механічного захисту від впливу навколишнього середовища (такий кабель іноді називають броньованим, він може об'єднувати під однією оболонкою декілька оптоволоконних кабелів). Більшість пристроїв волоконної оптики використовують

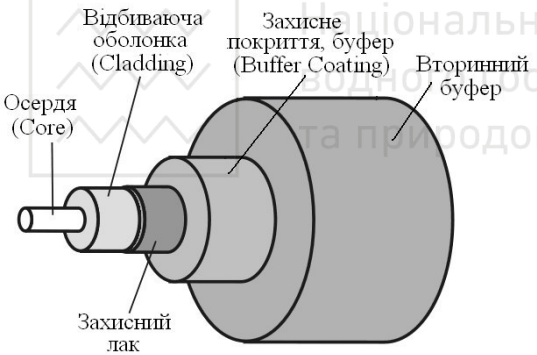


Рис. 6.13. Будова оптичного волокна

область інфрачервоного спектра в діапазоні від 800 до 1600*нм* в основному в трьох вікнах прозорості: 850, 1310 і 1550*нм*.

Практична реалізація оптичного комп'ютера

У 1984 році Б. Дженкінс з Університету Південної Каліфорнії (США) продемонстрував перший цифровий оптичний комп'ютер, який виконував досить складну послідовність команд. Основним елементом комп'ютера був рідкокристалічний просторовий модулятор, на задню поверхню якого було нанесено фоторезистор. При падінні світла на фоторезистор локально змінюється потенціал, що впливає на рідкі кристали і приводить до зміни пропускання елемента. Використовуючи керуючий промінь з одного боку пристрою і зчитуючий промінь з іншого боку, можливе створення бістабільного логічного елемента і реалізація булевої логіки. Слід зазначити, що швидкодія даного пристрою визначалася інерційністю рідких кристалів, і гранична частота проходження імпульсів становила ~1*МГц*.

У 80-ті роки минулого століття інтенсивно працювали над створенням повністю оптичних комп'ютерів нового покоління. Значні зусилля, спрямовані на створення оптичного комп'ютера, привели до певних успіхів. У 1990 році фірма «Лабораторії Белла» створила макет оптичного пристрою і продемонструвала виконання логічних і арифметичних операцій з дуже високою швидкодією. Процесор оптичного пристрою був побудований на логічному елементі на основі SEED [5]. Перший оптичний комп'ютер складався з 4 каскадів і розміщувався на оптичній плиті розміром (1x1)$м^2$. Просторовий розподіл випромінювання на виході кожного з каскадів комп'ютера визначався станом керованої класичним комп'ютером рідкокристалічної маски, що входить до його складу, і розподілом світла на вході каскаду. Оптичні елементи освітлювалися напівпровідниковим лазером через голографічну решітку. Параметри системи були наступні: розрядність – 32 біта (масив 4x8); логіка – бінарна; тактова частота – 1,1 МГц (визначалася швидкодією РК-маски); число перемикань за секунду – 40*Мбіт/с*. Одним з досягнень даного процесора була величина затраченої енергії на одне перемикання, яке становила 20*фДж* і була на 6 порядків меншою величини енергії перемикання в електронних комп'ютерах того часу.

Національний університет водного господарства та природокористування

В 2003 році компанія Lenslet створила перший в світі аналоговий оптичний процесор, причому це була не демонстраційна модель, як в 1990-му році, а комерційний продукт, який можна було купити. Процесор називався EnLight256, його продуктивність складає 8 тераоп (трильйонів арифметичних операцій в секунду).

Друге покоління оптичних цифрових комп'ютерів представлено комп'ютером DOC-II (англ.: digital optical computer), розробленого в науково-дослідній фірмі США Opticomp Corporation (див. рис. 6.13) [6]. У DOC-II використаний принцип векторно-матричного множення, проте вектор і матриця є булевими логічними. У цьому пристрої вхідний потік даних створювався випромінюванням лінійки 64 незалежно модульованих напівпровідникових лазерів. Світло від кожного лазера лінійки падало на один рядок матричного просторового модулятора світла з розміром 64x128 елементів. Окремий елемент матриці представляв собою акустично-оптичну брегівську комірку на основі напівпровідника GaP. Світло, що виходить з рядків просторового модулятора, потрапляло на лінійку з 128 лавинних фотодіодів.

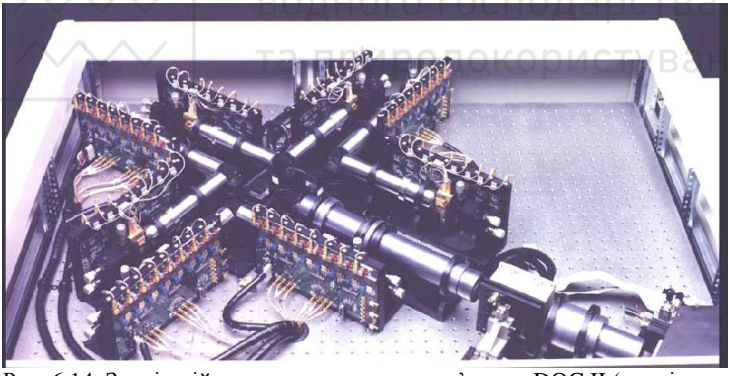


Рис. 6.14. Зовнішній вигляд оптичного комп'ютера DOC II (розмір 48x36*см*)

DOC-II мав 64×128=8192 з'єднань і працював на частоті передачі даних 100*Мбіт/с*, що відповідало $0{,}8192\times10^{12}$ перемикань за секунду. Енергія на одне перемикання становила 7,15*фДж* (~30 000 фотонів). Для ілюстрації швидкодії уявімо, що потрібно знайти якесь слово в тексті. Типовий сучасний персональний комп'ютер на пошук слова в документі Win Word, що складається з 953 сторінок

Національний університет водного господарства та природокористування

тексту, витрачає трохи більше трьох секунд. Оптичний комп'ютер DOC-II переглядає за 1 секунду 80000 сторінок звичайного ASCII-тексту.

Вартість оптичного комп'ютера досить висока. Головні області його використання – військова техніка, кримінологія, захист інформації, банківська сфера, а також наукові дослідження. Основні роботи за кордоном ведуться в США, Японії, Західній Європі. У США одним з провідних координаторів робіт є відоме Агентство з передових оборонних дослідницьких проектів (англ.: Defence Advanced Research Projects Agency – DARPA). Саме воно стояло у витоків Bitnet, прототипу Інтернету. Дослідження і розробки ведуться також в інтересах ВПС, ВМС, НАСА, Організації СОІ, тощо. Завдання, які вирішуються оптичним комп'ютером, який розробляють ці організації наступні: машинний зір, штучний інтелект, розпізнавання і одночасний супровід сотень і тисяч цілей, навігація, контроль земної поверхні, зв'язок.

Національний університет водного господарства та природокористування

6.3. Нейрокомп'ютер

Нейрокомп'ютинг – це науковий напрямок, який займається розробкою обчислювальних систем шостого покоління – нейрокомп'ютерів, які складаються з великої кількості паралельно працюючих, пов'язаних між собою, простих обчислювальних елементів (нейронів), які створюють, так звану, нейронну мережу. Нейрони виконують однакові обчислювальні дії і не вимагають зовнішнього управління. Велика кількість паралельно працюючих обчислювальних елементів забезпечують високу швидкодію.

В даний час розробкою нейрокомп'ютерів займаються вчені більшості науково розвинених країн світу.

Нейрокомп'ютери дозволяють з високою ефективністю вирішувати низку інтелектуальних завдань: розпізнавання образів, адаптивного управління, прогнозування, діагностики, тощо.

Нейрокомп'ютери відрізняються від класичного комп'ютера не просто великими можливостями, принципово змінюється спосіб використання комп'ютера. Функцію програмування комп'ютера замінює його навчання, нейрокомп'ютер вчиться розв'язувати задачі.

Навчання комп'ютера можна означити як визначення ваги зв'язків між досліджуваними об'єктами, в результаті якого кожний

Національний університет водного господарства та природокористування

вхідний вплив на об'єкт призводить до формування відповідного вихідного сигналу. Нейрокомп'ютер розраховує результат дії на об'єкт з врахуванням ваги цієї дії і прогнозує реакцію об'єкту на дію. Після навчання мережа може застосовувати отримані навички до нових вхідних сигналів. При переході від програмування до навчання підвищується ефективність вирішення інтелектуальних завдань.

Обчислення в нейронних мережах істотно відрізняються від традиційних: через високий паралелелізм їх можна розглядати як колективне явище. У нейронної мережі немає локальних областей, в яких запам'ятовується конкретна інформація. Вся інформація запам'ятовується у всій мережі.

Поштовхом до розвитку нейрокомпьютинга послужили біологічні дослідження. За даними нейробіології нервова система людей і тварин складається з окремих клітин – нейронів. У мозку людини їх кількість досягає 10^{10}-10^{12}. Кожний нейрон знаходиться у зв'язку з 10^3-10^4 іншими нейронами і виконує порівняно прості дії. Час спрацювання нейрона – 2-5*мс*. Сукупна робота всіх нейронів обумовлює складну роботу мозку, який в реальному часі вирішує складні завдання. Відмінності нейрокомп'ютера від класичного комп'ютера:

- паралельна робота великого числа простих обчислювальних пристроїв забезпечує велику швидкодію;
- нейронна мережа здатна до навчання, яке здійснюється шляхом налаштування параметрів мережі;
- висока завадо- і відмовостійкість нейронних мереж;
- проста будова окремих нейронів дозволяє використовувати нові фізичні принципи обробки інформації для апаратних реалізацій нейронних мереж.

Розробки в області нейрокомп'ютинга ведуться за наступними напрямками:

- розробка нейроалгоритмів;
- створення спеціалізованого програмного забезпечення для моделювання нейронних мереж;
- розробка спеціалізованих процесорних плат для імітації нейромереж;
- електронні реалізації нейронних мереж;
- оптоелектронні реалізації нейронних мереж.

Національний університет водного господарства та природокористування

В даний час наймасовішим напрямком нейрокомп'ютингу є моделювання нейронних мереж на класичних комп'ютерах, насамперед – персональних. Моделювання мереж виконується для їх наукового дослідження, для вирішення практичних завдань, а також при визначенні значень параметрів вузлів електронних і оптоелектронних нейрокомп'ютерів.

Штучна нейронна мережа

В основі штучних нейронних мереж лежать наступні риси живих нейронних мереж, які дозволяють їм добре справлятися з нерегулярними завданнями:

- відносно простий біологічний елемент, який високоефективно обробляє вхідні сигнали – нейрон;
- велика кількість нейронів, що бере участь у обробці інформації;
- розгалужені зв'язки нейронів між собою (глобальні зв'язки);
- змінні інтенсивність і частота обміну сигналами (вага зв'язків) між нейронами;
- паралельність обробки інформації.

Прототипом для створення нейрона став біологічний нейрон головного мозку. Біологічний нейрон має тіло, сукупність відростків – дендритів, через які в нейрон надходять вхідні сигнали, і відросток – аксон, що передає вихідний сигнал нейрона іншим клітинам (див. рис. 6.15). Точка з'єднання дендрита і аксона з тілом нейрона називається синапсом. Спрощено функціонування нейрона можна представити наступним чином (див. рис. 6.16):

- нейрон отримує від дендритів набір (вектор) вхідних сигналів (x_1, x_2, x_3,… x_n);
- в тілі нейрона оцінюється сумарне значення вхідних сигналів. Однак входи нейрона нерівнозначні. Кожний вхід характеризується ваговими коефіцієнтами w_1, w_2 w_3… w_n, що визначає важливість вхідної інформації. Таким чином, нейрон не просто підсумовує значення вхідних сигналів, а обчислює скалярний добуток вектора вхідних сигналів і вектора вагових коефіцієнтів $S = \sum_{i=1}^{n} w_i x_i$;

Національний університет
водного господарства
та природокористування

- нейрон формує вихідний сигнал $Y = F(S)$, інтенсивність якого залежить від значення обчисленого скалярного добутку. Якщо воно не перевищує деякого заданого порогу, то вихідний сигнал не формується зовсім – нейрон не видає сигналу;
- вихідний сигнал надходить на аксон і передається дендритам інших нейронів.

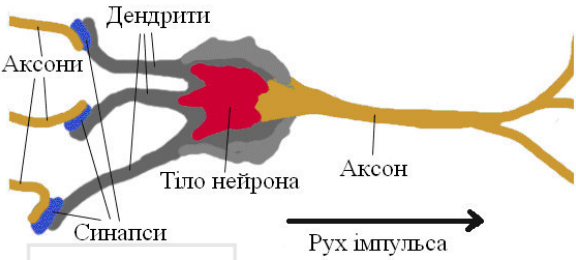


Рис. 6.15. Будова нейрона

Поведінка штучної нейронної мережі залежить як від значення вагових параметрів, так і від функції збудження нейронів. Відомі три основних види штучних нейронів, у яких функції збудження поділяються на *порогову*, *лінійну* і *сигмоїдальну*.

Для *порогових* функцій нейронів вихід сигналу з нейрона відбувається тоді, коли сумарний сигнал на вході нейрона більший деякого порогового значення: Y=1 при $S \geq 0$ і Y=0 при S<0.

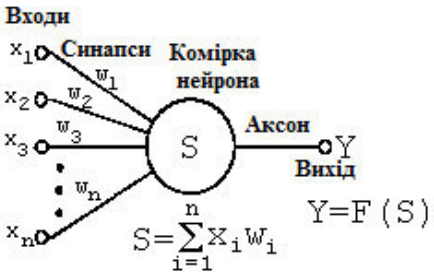


Рис. 6.16. Математична модель нейрона

Для *лінійних* функцій нейронів вихідна активність нейрона пропорційна сумарному зваженому сигналу на вході нейрона: Y=кS+b.

Для *сигмоїдальних* функцій нейронів, в залежності від вхідного сигналу, вихідний сигнал варіюється неперервно, але не лінійно, а у вигляді деякої складної функції: $Y = \dfrac{1}{1+e^{-\sigma S}}$, ($\sigma$ – деяка стала). Сигмоїдальні функції більше, ніж лінійні або порогові, схожі на реальні функції нейронів, але будь-який з цих трьох видів

Національний університет водного господарства та природокористування

функцій нейронів можна розглядати лише як модель деякого наближення до реального функціонування нейронної мережі мозку.

Тип з'єднань нейронів залежить від вибраної нейронної мережі. Щоб створити нейронну мережу для вирішення конкретного завдання, необхідно визначити спосіб з'єднання нейронів і відповідним чином підібрати значення вагових параметрів на цих зв'язках. Можливість взаємного впливу елементів, залежить від встановлених з'єднань. Ваговий коефіцієнт з'єднання визначає силу такого впливу.

Моделі штучних нейронних мереж

а). Модель Маккалоха

У 1943 році У. Маккалох і У. Піттс сформулювали основні положення теорії діяльності головного мозку. Вони розробили модель нейрона, як найпростішого процесорного елемента, який виконує обчислення перехідної функції (Y) від скалярного добутку вектора вхідних сигналів і вектора вагових коефіцієнтів (S), запропонували конструкцію мережі таких елементів для виконання логічних і арифметичних операцій. Ними було зроблено основоположне припущення про те, що така мережа здатна навчатися, розпізнавати образи, узагальнювати отриману інформацію.

Більшість тверджень Маккалоха залишаються актуальними і сьогодні. Зокрема, при великій різноманітності моделей нейронів принцип їх дії, запропонований Маккалохом і Піттсом, залишається незмінним. Недоліком даної моделі є використання порогової функції збудження нейронів. У формалізмі У. Маккалоха і У. Піттса нейрони мають стани «0» та «1» і порогову логіку переходу зі стану в стан. Кожний нейрон в мережі визначає зважену суму станів всіх інших нейронів і порівнює її з порогом, щоб визначити свій власний стан. Пороговий вид перехідної функції не надає нейронній мережі достатньої гнучкості при навчанні та налаштуванні на задану задачу. Якщо значення обчисленого скалярного добутку, навіть незначно, не досягає до заданого порогу, то вихідний сигнал не формується зовсім і нейрон «не спрацьовує». Це означає, що втрачається інтенсивність вихідного сигналу (аксона) даного нейрона і, отже, формується невисоке значення рівня на зважених входах в наступному шарі нейронів.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

б). Модель перцептрона Розенблатта

У 1958 році Ф. Розенблатт запропонував свою модель нейронної мережі. Розенблатт увів у модель Маккаллоха і Піттса можливість модифікації зв'язків, що зробило нейронну мережу здатною до навчання. Ця модель була названа *перцептроном* (лат.: perceptio – сприйняття).

За Розенблаттом перцептроном називається нейронна мережа, яка складається з трьох шарів [7]:

- S-шар (сенсори). У цьому шарі знаходяться елементи, через які в перцептрон надходить вхідна інформація. Вони утворюють чутливу матрицю, подібну до рецепторів у сітківці ока. Кожний рецептор активізується тим сильніше, чим сильніше зовнішній подразник (наприклад, світло) на нього діє. Сигнали від кожного S-рецептора поступають у наступний А-шар. Чим сильніше активізований рецептор, тим потужніший сигнал від нього поступає.
- А-шар (асоціативний шар). Це шар нейронів. У кожного А-елемента багато вхідних зв'язків і всього лише один вихідний. Саме тому цей елемент називається асоціативним, бо він може бути зв'язаним з групою (асоціацією) сенсорів. Нейрон постійно підсумовує всі сигнали, які в нього надходять через вхідні зв'язки, і якщо сума досягає певного порогу, він активізується і передає сигнал по вихідному зв'язку.
- R-шар (класифікаторний шар). Це також нейрони, але вони аналогічні ефекторним (моторним) нейронам мозку, які передають команди м'язам та залозам.

Простий перцептрон має п'ять ознак:

1. У мережі є тільки один R-нейрон, який з'єднаний зв'язками зі змінними вагами з усіма А-нейронами.
2. У мережі є тільки послідовні зв'язки від S- до А-елементів і від А- елементів до R-елемента.
3. Вагові коефіцієнти зв'язків між S- і А-елементами є постійними.
4. Час передачі сигналів вздовж кожного зв'язку дорівнює нулю (або сталій величині).
5. Вихідні сигнали всіх нейронів мережі формуються у вигляді:

$Y_i(t) = F(a_i(t))$, де $a_i(t)$ – алгебраїчна сума всіх сигналів, що надходять одночасно на вхід елемента Y_i.

В бінарній логіці сенсорний елемент (S-елемент) може знаходитися в стані збудження («1») або спокою («0»). Сигнали («1» або «0») надходять в шар асоціативних елементів (А-елементів), які є нейронами моделі Маккалоха з пороговою функцією активації (див. рис. 6.17). А-елемент видає сигнал, якщо сума сигналів від S-елементів на його вході буде перевищувати деяке порогове значення $\psi > 0$.

R-елемент має біполярно-порогову функцію активації. Сигнали від А-елементів проходять в суматор R, причому сигнал від *i*-го асоціативного елемента передається з ваговим коефіцієнтом w_i. Так само як і А-елементи, R-елемент підраховує суму добутків значень вхідних сигналів і вагових коефіцієнтів. R-елемент, а разом з ним і елементарний перцептрон, видає «1», якщо ця сума перевищує або дорівнює пороговому значенню ψ, в іншому випадку – на виході буде «-1». Математично, функцію, яку реалізують R-елементом, можна записати у вигляді:

$$F(x) = sign\left(\sum_{i=1}^{n} w_i x_i - \psi\right). \qquad (6.3)$$

З сучасної точки зору, формальний нейрон є математичною моделлю простого процесора, який має декілька входів і один вихід. Вектор вхідних сигналів, які надходять через дендриди, перетвориться нейроном у вихідний сигнал, який поширюється по аксону, з використанням трьох функціональних блоків: локальної пам'яті, суматора і блоку нелінійного перетворення.

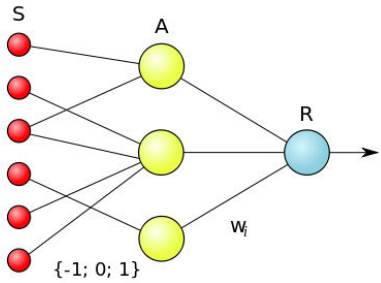


Рис. 6.17. Логічна схема елементарного перцептрону. Вагові коефіцієнти S-A зв'язків можуть мати значення -1, -1 або 0 (тобто відсутність зв'язку). Вагові коефіцієнти A-R зв'язків w_i можуть мати будь-яке значення

Модель перцептрону виявилась ефективною при класифікації об'єктів (зокрема, геометричних – кругів, квадратів, тощо). Щоб «навчити» перцеп-

трон класифікувати образи, був розроблений спеціальний ітераційний метод навчання проб і помилок, який нагадує процес навчання людини – метод корекції помилки.

Навчання елементарного перцептрона [8] відбувається за наступною схемою (див. рис. 6.18).

В початковий момент часу вагові коефіцієнти зв'язків S-A і значення порогів A-елементів вибираються випадковим чином і не змінюються з часом, а вагові коефіцієнти зв'язків A-R (w_i) встановлюються рівними нулю. Навчання мережі полягає в підстроюванні вагових коефіцієнтів w_i. Нехай на вхід перцептрону з бази даних поступає вектор $\vec{x}$ з елементами ($x_1, x_2, x_3, \ldots, x_n$) – приклад, де n – кількість S-елементів. Такий приклад називають навчальною вибіркою. Будемо називати нейронну мережу навченою на даному прикладі, якщо при подачі на входи мережі вектора $\vec{x}$ на виході завжди отримується скаляр y (для простого перцептрона). Для випадку перцептрона з декількома R-елементами на виході буде вектор $\vec{y}$ з елементами ($y_1, y_2, y_3, \ldots, y_m$), де m – кількість R-елементів.

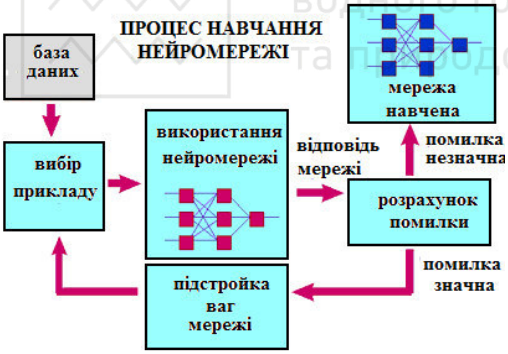


Рис. 6.18. Навчання елементарного перцептрона

На входи мережі подається вектор даних $\vec{x}$ і отримується на виході R-елемента значення $\tilde{y} \neq y$. Обчислюється величина похибки $\delta_1 = |\tilde{y} - y|$. Вагові коефіцієнти змінюються певним чином так, щоб при новій подачі на вхід мережі вектора $\vec{x}$ величина похибки δ_2 була меншою δ_1. Ітерації повторюються до досягнення похибкою деякої наперед заданої величини ε. При такому ітераційному методі модифікуються тільки вагові коефіцієнти тих A-елементів, на вході яких є хоча б один ненульовий сигнал від S-елементів.

Серйозним недоліком перцептрона є те, що не завжди існує така комбінація вагових коефіцієнтів, при якій величина похибки буде

Національний університет водного господарства та природокористування

весь час зменшуватись. Виходом є використання багатошарового перцептрона (декілька шарів А-елементів). Теоретично число А-шарів і число нейронів у кожному шарі може бути довільним, однак фактично воно обмежене ресурсами комп'ютера, у разі програмної реалізації, або можливостями спеціалізованих мікросхем, на яких зазвичай реалізуються нейронні мережі. Чим складніша нейронна мережа, тим масштабніші завдання, які вона може виконати.

в). Модель Хопфілда

Дж. Дж. Хопфілд в 1982 році сформулював математичну модель асоціативної пам'яті, побудовану на нейронній мережі. В модель перцептрона Розенблатта Хопфілд ввів зворотній зв'язок (див. рис. 6.19). Кожний А-елемент під дією S-елементів мережі формує сигнал, який може впливати на інші А-елементи, причому матриця вагових коефіцієнтів симетрична ($w_{ij}=w_{ji}$), тобто *i*-тий А-елемент діє на *j*-тий так само, як *j*-тий на *i*-тий. Діагональні елементи матриці (w_{ii}) дорівнюють нулю (А-елемент сам на себе не впливає).

В процесі роботи динаміка таких мереж прямує до одного з положень рівноваги. Ці положення рівноваги є локальними мінімумами функціоналу, який називається *енергією мережі*. Іншими словами, штучна нейронна мережа Хопфілда працює до досягнення рівноваги, при якому наступний стан мережі точно дорівнює попередньому: початковий стан є вхідним образом, а при рівновазі отримують вихідний образ.

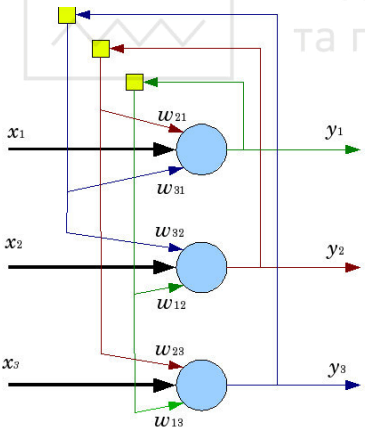


Рис. 6.19. Нейронна мережа Хопфілда

Навчання мережі Хопфілда ефективніше перцептрона і відбувається за меншу кількість ітерацій.

Розвитком моделі Хопфілда стали машина Больцмана та модель мережі зі зворотнім поширенням. Активно різноманітні моделі штучних нейронних мереж розвиваються і сьогодні.

Національний університет водного господарства та природокористування

Апаратна реалізація нейрокомп'ютера

Перцептрон був вперше змодельований в 1958 році, причому його навчання вимагало близько півгодини машинного часу на одній з найпотужніших у той час ЕОМ IBM-704. Апаратний варіант нейрокомп'ютера («Mark I Perceptron») було реалізовано у Корнельській авіаційній лабораторії в 1960 році і призначався він для розпізнавання зорових образів. В своєму складі Mark I мав 8 вихідних R-елементів і 512 А-елементів, які можна було з'єднувати в різних комбінаціях (див. рис. 6.20). На цьому перцептроні була проведена серія експериментів з розпізнавання букв алфавіту і геометричних образів.

Продовженням апаратного та програмного підходу до реалізації нейрокомп'ютера є програмно-апаратний підхід. Цей підхід отримав, на даний час, найбільшого розвитку та застосування. Існуючі класичні комп'ютери доповнюються спеціальними нейроплатами. Так, наприклад, фірмою TRW (США) в 1985 році був розроблений комп'ютер «Mark3», який був реалізований у вигляді додаткової багатопроцесорної плати до міні-комп'ютерів серії VAX. Подальшим розвитком системи «Mark3» була система «Mark4».

Найяскравішими прикладами нейрокомп'ютерів є: нейро-

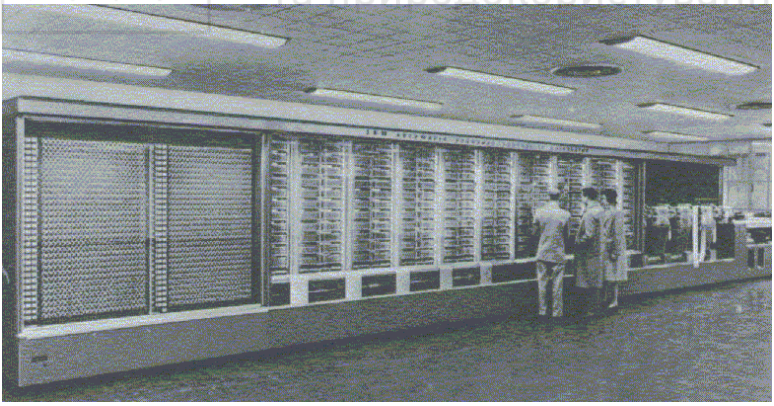


Рис. 6.20. Перцептрон «Mark1». Перший перцептрон Розенблата в 1960 році. Зліва дві панелі по 256 А-елементів

комп'ютер «Synaps1» (Siemens, Германія), нейрокомп'ютер «Силіконовий мозок», створений у США за програмою «Електронний мозок», призначений для обробки аерокосмічних зображень,

Національний університет водного господарства та природокористування

продуктивністю 80 петафлоп (80х1015 операцій в секунду, споживана потужність 20*Вт*), нейрокомп'ютер «Ембріон» (Росія).

Фірма NEC (Японія) в 1988 році запропонувала нейрокомп'ютер «Neuro Engine» у вигляді одноплатного співпроцесора до персонального комп'ютера IBM PC. Фірмою Adaptive Solutions була розроблена паралельна система SNAPS на 256 процесорах, що дозволяє виконувати до 10^9*операція/сек* для вирішення задач обробки зображень та реконструкції об'єктів.

Апаратний підхід пов'язаний зі створенням нейрокомп'ютерів у вигляді нейроподібних структур (нейромереж) електронно-аналогового, оптоелектронного і оптичного типів. Для таких комп'ютерів розробляються спеціальні надвеликі інтегральні системи – HBIC (нейрочіпи). У 1988 році фірма Havard виготовила HBIC на 256 аналогових елементах, що включає 25 тисяч транзисторів та 100 тисяч резисторів.

Поки що немає вагомих підстав вважати, що саме штучні нейронні мережі стануть основою майбутніх мислячих систем, здатних до гнучкої поведінки. Дослідження нейронних мереж – лише перший етап на шляху до таких систем. У найближчій перспективі слід очікувати появи більш незвичайних моделей, про які поки можна лише фантазувати. Ці моделі повинні поєднувати просту і універсальну схему функціонування, характерну для моделей нейронних мереж, з можливостями систем штучного інтелекту: логічний висновок, планування дій, побудову та використання моделей навколишнього середовища.

6.4. Квантовий комп'ютер

Квантовий комп'ютинг – це нова галузь науки і технології, що надзвичайно швидко розвивається. Вона повинна забезпечити використання квантових систем для реалізації принципово нових методів передачі повідомлень, обчислень і технологій (квантові канали зв'язку, квантова криптографія, квантовий комп'ютер).

Функціональна обмеженість класичних комп'ютерів у розв'язку складних задач квантової фізики, криптографії, статистики привела в середині 80-их років XX ст. до висунення ідеї обчислень на кардинально новій основі – квантових обчислень. Вперше ідея квантових обчислень була висловлена Ю. І. Маніним в 1980 році [9], але

Національний університет водного господарства та природокористування

активно ця проблема стала обговорюватися після появи статей американського фізика-теоретика Р. Фейнмана [10, 11]. У цих роботах було запропоновано використовувати для обчислень операції не з числами (як у класичному комп'ютері), а зі станами квантової системи і було доведено, що це є основною перевагою квантового комп'ютера над класичним. В 1930 році П. А. М. Дірак [12] запропонував постулат: кожній квантовій системі ставиться у відповідність комплексний векторний простір – **простір станів**. Стан замкнутої квантової системи можна описувати вектором в гільбертовому просторі H, який позначається як $|\Psi\rangle$ («кет-вектор»). Кожному кет-вектору $|\Psi\rangle$ ставиться у відповідність бра-вектор $\langle\Psi|$ із простору H^*, спряженому до H. Стани квантової системи на відміну від класичної можуть знаходитися в суперпозиції між собою. **Принцип суперпозиції** станів є одним із найважливіших принципів квантової механіки. Він є аналогом інтерференції когерентних хвиль у класичній фізиці.

Національний університет водного господарства та природокористування

Суть квантово-механічного принципу суперпозиції полягає в тому, що квантова система з можливих станів обирає не «той або той» стан, а всі відразу, тобто «і той, і той». В літературі найбільш популярна спроба пояснення суперпозиції станів приводиться на прикладі спіна електрона в експериментах ядерного магнітного резонансу. Спін електрона часто зображають у вигляді стрілки, спрямованої вгору або вниз. Спін вгору можна прийняти за логічний «0», спін вниз – за логічну «1». Але можна показати математично, що електрон може також знаходитися в «примарному» подвійному стані – стані суперпозиції, *в якому спін одночасно напрямлений і вгору і вниз*. Це означає що цей стан є одночасно логічним «0» і «1». Якщо тепер здійснювати обчислення за допомогою цього електрона, то вони будуть виконуватися з одночасним використанням нуля і одиниці, тобто відбуваються дві обчислювальних дії одночасно!

Поняття суперпозиції квантових станів є наріжним каменем в реалізації квантових обчислень.

Ще одним дуже важливим поняттям в теорії квантових обчислень є поняття **сплетених станів**.

Сплетеність (англ.: entanglement) – це особлива властивість квантових систем, яка проявляється в тому, що вони певним чином пов'язані між собою, навіть знаходячись на значній відстані одна

Національний університет
водного господарства
та природокористування

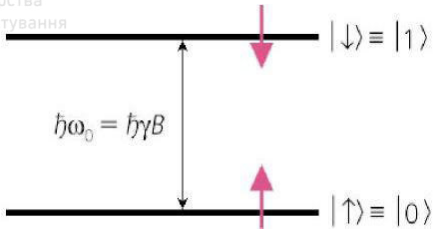


Рис. 6.21. Стани ядерного спіна $I = \pm 1/2$ частинки з гіромагнітним відношенням $\gamma > 0$ її рівні у зовнішньому магнітному полі з індукцією B представляють логічні стани кубіта $|0\rangle$ і $|1\rangle$. ω_0 – частота переходу між станами, $\hbar$ – стала Дірака

від одної. Якщо стан однієї з систем змінюється, то одночасно змінюється і стан інших. Ця особливість дозволяє спостерігачеві визначати стан всіх сплетених систем, проводячи виміри лише для однієї з них. Сплетеність квантових станів мікрочастинок обов'язково необхідна для реалізації логічних операцій у квантовому комп'ютері.

На відміну від звичайних квантові комп'ютери оперують так званими **кубітами** (англ.: quantum bit або qubit) – квантовими аналогами бітів, які можуть набувати більше двох значень. В якості прикладів реалізації кубітів можна вказати на:

1. дворівневі атоми;
2. частинки зі спіном **½** (див. рис. 6.21);
3. фотон з двома можливими поляризаціями.

В квантових комп'ютерах кубіти, так як і в класичних комп'ютерах біти, об'єднані в регістри. Звичайний трьохбітовий регістр у певний момент часу може зберігати лише **одне** з восьми значень – логічні 000, 001, 011, 010, 100, 101, 110, 111. А в трьохкубітовому регістрі, внаслідок суперпозиції станів, одночасно знаходяться **всі** вісім можливих значень. (Взагалі в регістрі розміром N кубітів одночасно «живуть» всі можливі 2^N значень.)

Щоб зробити наочною принципову різницю між класичним бітом та кубітом, приводять [13] наступну аналогію. Елемент зображення (піксел), який відповідає класичному бістабільному елементу, може бути лише або чорним, або білим. А піксел, що відповідає кубіту, може мати будь-який колір. І як кольоровий піксел несе набагато більше інформації, ніж чорно-білий, так і кубіт зберігає в со-

Національний університет водного господарства та природокористування

бі набагато більше інформації, ніж 1 класичний біт.

Якщо потрібно провести якусь дію над кожним з 4 можливих чисел в регістрі з 2 бітів на класичному комп'ютері, то потрібно виконати 4 кроки послідовно, оскільки в 2 звичайних бітах в кожний момент часу записано лише 1 з 4 можливих чисел. Потрібно їх послідовно перебрати і над кожним виконати певну операцію. У квантовому комп'ютері з регістром з 2 кубітів завдання буде вирішено за один крок, адже операція проводиться відразу над всіма числами, які одночасно зберігаються в регістрі. Це називається «**квантовим паралелізмом**». Саме квантовий паралелізм дозволяє зробити деякі обчислення набагато ефективнішими в порівнянні з обчисленнями на класичному комп'ютері [14,15].

Рис. 6.22. Квантовий комп'ютер складається з *n* кубітів і дозволяє проводити одно- і двокубітні операції над будь-яким з них (або будь-якою парою). Ці операції виконуються під впливом імпульсів зовнішнього поля, керованого класичним комп'ютером

Подібно до класичного комп'ютера доведено, що обчислення на квантовому комп'ютері зводяться до дії обмеженої кількості операторів над кубітами. Такі операції ще називаються гейтами (gates). Вважається, що достатньо лише трьох гейтів для здійснення квантових обчислень – двох однокубітних («NOT» і «оператор Адамара») та двокубітного («контрольоване НЕ» – «CNOT»). Між кубітами квантового комп'ютера для реалізації двокубітний гейтів необхідно створити сплетеність. Докладно про квантові логічні операції можна прочитати, наприклад, у [16].

Національний університет водного господарства та природокористування

Щоб виконати необхідні операції на кубітах, на них, наприклад, діють імпульсами зовнішнього резонансного поля. Квантова еволюція стану кубіта $|\Psi\rangle$ здійснюється згідно рівняння Шредінгера, де оператор Гамільтона $H_i(t)=-\mu\varepsilon_0 cos(\omega t+\varphi)$ – це енергія взаємодії дипольного моменту μ кубіта і зовнішнього резонансного поля (наприклад, лазера). При цьому необхідно мати можливість впливати вибірково на будь-який обраний кубіт.

При виборі конкретної схеми квантового комп'ютера, необхідно, ***по-перше***, вибрати фізичну систему – елементну базу, яка забезпечить можливість створення в комп'ютері достатньої кількості керованих кубітів; ***по-друге***, визначити фізичний механізм, який відповідає за взаємодію кубітів між собою і з оточенням; ***по-третє***, визначити механізми вибіркового управління кубітами і вимірювання їх станів на виході. Все це разом і визначає так зване апаратне забезпечення квантового комп'ютера.

Схематично структура квантового комп'ютера показана на рис. 6.22.

Національний університет водного господарства та природокористування

Робота квантового комп'ютера може бути представлена як послідовність трьох операцій:

1. «ЗАПИС» (приготування) початкового стану;
2. «ОБЧИСЛЕННЯ» (унітарні перетворення початкових станів);
3. «ВИВЕДЕННЯ» результату (вимірювання, проектування кінцевого стану).

Також сюди слід віднести допоміжну операцію «СКИДАННЯ», що переводить регістр в початковий стан ($|0\rangle$).

Основні роботи над апаратним забезпеченням квантового комп'ютера просуваються в тих же напрямах як і для інших перспективних видів комп'ютерів:

1. Створення квантового процесора;
2. Створення пристроїв для зберігання квантової інформації (квантова пам'ять);
3. Розробка квантової шини для обміну інформацією.

Слід відзначити, що це лише аналоги відповідних пристроїв класичного комп'ютера, які істотно від них відрізнятимуться.

Національний університет водного господарства та природокористування

Квантовий процесор

Вважається, що при розробці квантового комп'ютера необхідно, перш за все, вибрати фізичну систему, тобто таку його основу, яка б відповідала вимогам так званих п'яти «критеріїв Ді Вінченцо» [17]:

1. Фізична система, що є процесором квантового комп'ютера, повинна містити значне число ($N \approx 1000$) добре розпізнаваних кубітів для виконання відповідних квантових операцій, бо лише у цьому випадку економічно виправдовуються витрати на його реалізацію порівняно з сучасними класичними комп'ютерами;
2. Необхідно забезпечити умову для приготування вхідної комірки пам'яті (регістра) у вихідному основному базисному стані. Тобто повинна існувати можливість ініціалізації регістра і переведення кубітів, що реалізовуються, в початковий стан;
3. Необхідно обмежити процес спонтанної зміни квантових станів, зумовлений взаємодією системи кубітів з навколишнім середовищем, що призводить до руйнування суперпозицій квантових станів і робить неможливим виконання квантових алгоритмів (декогеренція). Час спонтанної зміни квантових станів повинен, принаймні, в 10^4 раз перевищувати час виконання основних квантових операцій (час такту). Для цього система кубітів повинна слабо взаємодіяти з оточенням;

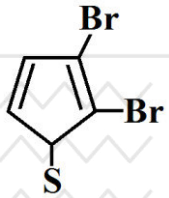


Рис. 6.23. Будова молекули 2,3-дибромотіофену

4. Необхідно забезпечити за час такту виконання необхідної сукупності однокубітних та двокубітних квантових логічних операцій, що визначають унітарні перетворення.
5. Необхідно впливати на кожен кубіт окремо, а також мати можливість вимірювати стан квантової системи на виході, тобто при отриманні результату. Отже, вибір фізичної основи квантового процесора має бути узгоджений з досить простим пристроєм введення-виведення інформації.

В даний час ведуться роботи над наступними основними варіантами фізичної основи квантового процесора:

1. ***Використання*** в якості квантового процесора ***посудини з органічною рідиною***, де кубітами є ядра окремих атомів із спінами 1/2, пов'язаних непрямими спін-спіновими взаємодіями (розчин хлороформу $^{13}CHCl_3$ в дейтерієвому ацетоні $(CD_3)_2CO$ або 2,3-

Національний університет водного господарства та природокористування

дибромотіофен (див. рис. 6.23). Органічна рідина в пробірці поводиться як одна молекула цієї речовини, точніше, всі молекули поводяться однаково. Таким чином, з'являється можливість застосувати до макроскопічних об'ємів рідини відпрацьованих методик і техніки ядерного магнітного резонансу (ЯМР). Індивідуальне звернення до окремих кубітів замінюється зверненням до відповідних кубітів одночасно у всіх молекулах. Логічні операції над кубітами (за допомогою радіочастотних імпульсів) і виведення результату здійснюється стандартними методами ЯМР. Комп'ютер такого роду отримав назву *ансамблевого квантового комп'ютера* (англ.: *bulk-ensemble quantum computer*). Він може працювати при кімнатній температурі. Час самовільної зміни квантових станів ядер внаслідок взаємодії з навколишнім середовищем у такій системі складає декілька секунд, цього достатньо для проведення обчислювальних операцій. Вже реалізовано семикубітний процесор на основі органічних рідин.

Проте, не дивлячись на всі переваги квантового процесора в «пробірці», його потенціал практично вичерпаний, оскільки вимірюваний на виході сигнал експоненціально зменшується із зростанням числа кубітів (гранична кількість10–13 кубітів). Крім такого технічного, існують і чисто фізичні обмеження. Річ у тому, що непряма спін-спінова взаємодія, яка необхідна для організації основних логічних операцій, сама по собі дуже слабка. В результаті час виконання логічних операцій виявляється надзвичайно великим, а створюваний комп'ютер має невелику швидкодію. В цьому випадку перспективнішими виявляються твердотільні квантові комп'ютери на основі ядерного магнітного резонансу. Молекула такого комп'ютера (5 атомів фтору і 2 атомів вуглецю) показана на рис. 6.24. Вона створена фірмою IBM і працює як семикубітний ре-

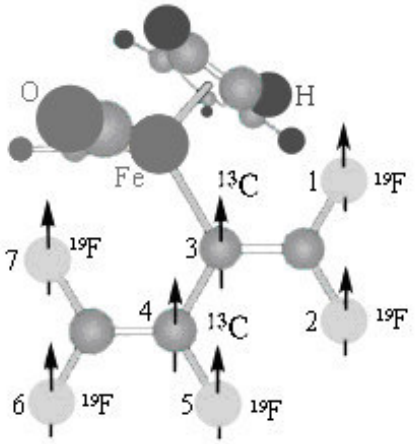


Рис. 6.24. Молекула квантового комп'ютера, синтезована на фірмі IBM

Національний університет водного господарства та природокористування

гістр. Атоми можуть знаходитись в станах «спін вверх» і «спін вниз». Управління спінами здійснюється за допомогою радіочастотних імпульсів.

Твердотільний квантовий комп'ютер, що працює на основі ЯМР, має ряд важливих переваг:

1. Ядерні спіни самі по собі є кубітами.
2. При низьких температурах вони характеризуються дуже великим часом релаксації в порівнянні з електронними спінами.
3. Технологічні структури нанометрового масштабу в напівпровідникових (ЯМР) квантових комп'ютерах призначені не для створення самих кубітів, як у випадку надпровідникових пристроїв, а лише для завдань управління кубітами і вимірювання їх станів.
4. Диполь-дипольна взаємодія ядерних спінів в декілька тисяч разів більша за непряму спін-спінову взаємодію.

2. ***Використання*** в якості кубітів рівнів енергії ***йонів, захоплених йонними пастками***, що створюються у вакуумі змінним електричним полем певної конфігурації в умовах лазерного охолоджування пасток до температур в декілька мікрокельвінів (див. рис. 6.25). Взаємодія між зарядженими йонами в одновимірному ланцюжку цих пасток здійснюється за допомогою збудження їх колективного руху, а індивідуальне управління ними — за допомогою лазерів інфрачервоного діапазону.

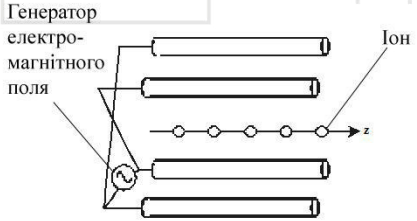


Рис. 6.25. Йонна пастка як квантовий процесор

У лінійній структурі завдяки взаємному відштовхуванню йони знаходяться на відстані ~20*мкм*. Кожен йон (кубіт) адресується парою лазерних променів.

Основними недоліками цього типу квантових комп'ютерів є необхідність створення наднизьких температур, забезпечення стійкості станів йонів в ланцюжку, а також обмеженість можливого числа кубітів значенням $N < 40$. На сьогоднішній день встановлений практично повний контроль над квантовим станом одиничного йона в пастці, проводяться експерименти над системами, що складаються з декількох йонів з контрольованими взаємодіями між ними.

Національний університет водного господарства та природокористування

Дія квантових логічних схем базується в даному випадку на квантовій сплутаності внутрішніх ступенів свободи йонів (електронні збудження) і колективного руху (коливального збудження) замкнутих у пастці йонів.

Нещодавно [18] було запропоновано модифікувати пастку Пауля таким чином, щоб у ній було лише кілька досить коротких ланцюжків, що взаємодіють один з одним. Наприклад, їх частини або окремі йони могли б переміщатися з «квантового процесора» в «квантову пам'ять» (див. рис. 6.26).

В такій пастці Пауля з великою кількістю кубітів використовується схема «квантового ПЗЗ» (квантовий пристрій з зарядовим зв'язком), архітектура якого містить велику кількість йонних зон, які перетинаються. Змінюючи напругу в зоні, можна пересувати по ній кілька йонів.

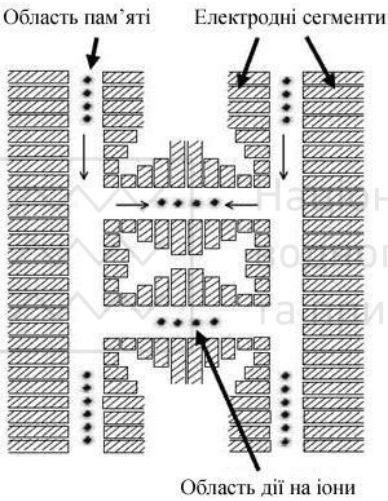


Рис. 6.26. Будова пастки Пауля з рухомими кубітами

Йони в пастках, які несуть квантову інформацію, утримуються в зоні пам'яті. Для виконання гейта можна пересувати вибрані йони в зону перетину шляхом подачі напруги на електродні сегменти. В зоні перетину йони групуються. Лазери фокусуються крізь зону для управління елементом. Після цього йони рухаються знову для виконання наступної операції.

3. ***Використання*** в якості кубітів ***зарядових станів куперівських пар в квантових точках***. Одним з головних кандидатів на роль кубіта вважається квантова точка – обмежений фрагмент напівпровідникового матеріалу, який настільки малий, що в ньому можуть існувати квантові ефекти. Ці елементи містять єдиний додатковий електрон, що і дає можливість зберігати цілі лінійні послідовності з логічного «0» або «1». Історично першими квантовими точками бу-

Національний університет
водного господарства
та природокористування

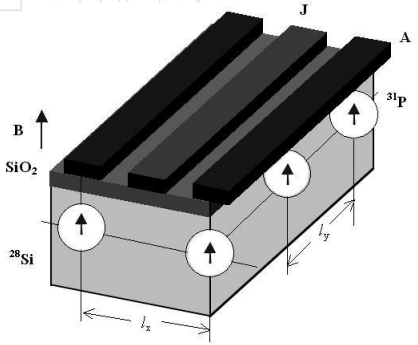


Рис. 6.27. Схематичне зображення чотирьох комірок Кейна

ли мікрокристали селеніду кадмію CdSe. Електрон у такому мікрокристалі поводить себе як електрон в тривимірній потенціальній ямі.

Подібні квантові точки дуже нестабільні – щонайменші коливання магнітного поля, що випромінюється атомним ядром, можуть змусити кубіт втратити збережені дані. Це пов'язано з тим, що в більшості відповідних напівпровідникових матеріалів (наприклад, арсеніті іридію) відбувається сильна взаємодія вільних електронів з атомами речовини. Час життя інформації в кубіті не перевищував декількох мільярдних часток секунди. Такої нестабільності можна уникнути використовуючи лазерне випромінювання. Лазерним променем можна заблокувати вплив зовнішніх магнітних полів на квантову точку. Його дія змушує електрон підніматися на вищий енергетичний рівень, залишаючи після себе позитивно заряджену «дірку».

«Дірка» володіє власним магнітним полем, яке врівноважує дію ядра атома і дозволяє зберігати систему надалі без зовнішнього впливу лазерного випромінювання. Лазерна стабілізація магнітного поля кубіта значно продовжує час його стабільного стану (до тисячі разів).

Передбачається, що перспективність цього напряму полягає в можливості створювати електронні квантові пристрої високого ступеню інтеграції на одному кристалі, при цьому для управління кубітами не будуть потрібні громіздкі лазерні або ЯМР-установки.

4. ***У напівпровідникових кристалах*** безспінового моноізотопного кристалу Силіцію ^{28}Si, в якому атоми Фосфору ^{31}P (кубіти) розташовані в лінійному ланцюжку (модель Кейна) на деякій відстані (близько 20*нм*) від ізолятора SiO_2. На рис. 6.27 схематично зображено чотири комірки Кейна в кремнієвій матриці з ядерними спінами-кубітами донорних атомів Фосфору. При температурах менших

Національний університет водного господарства та природокористування

1K ядерні спіни мають дуже великий час (години і дні) збереження вихідних квантових станів.

Автори дослідження використовували кремній з домішками атомів Фосфору. Спіни ядер домішкових атомів Фосфору сплутувались із спінами електронів. Значення спінів ядер атомів і електронів виступали в ролі кубітів.

Кожен донорний атом з ядерним спіном – кубіт у напівпровідниковій структурі розміщувався регулярним чином з достатньою точністю під «своїм» управляючим металевим затвором (затвор А), відокремленим від поверхні кремнію тонким діелектриком (наприклад, окислом кремнію завтовшки порядку декількох нанометрів). Ці затвори утворюють лінійні решітки довільної довжини з періодом l_x (l_x =20$нм$).

За допомогою електричного поля, що створюється потенціалом затворів А, можна змінювати розподіл електронної густини поблизу ядра в основному стані, змінюючи резонансну частоту кожного ядерного спіну. Ця частота визначається надтонкою взаємодією ядерного спіну з електронним спіном. Таким чином, здійснюється індивідуальне управління квантовими операціями шляхом селективної дії резонансних радіочастотних імпульсів на ядерні спіни певних донорів.

Затвори J, які розташовані між затворами А, керують величиною непрямої взаємодії між ядерними спінами сусідніх донорів, яка забезпечує виконання двокубітних операцій. Це можливо, якщо характерні розміри напівпровідникової структури знаходяться в нанометровій області.

При охолоджені кремнію з домішками Фосфору до температури 3 K і опроміненні радіохвилями, було досягнуто сплутування 10 мільярдів кубітів.

Розвиток цього напряму, що визнається надзвичайно перспективним, визначається швидкістю розвитку нанотехнологічних розробок, необхідних для створення структур з потрібними параметрами.

5. Кубіти на надпровідникових мезоструктурах. Серед твердотільних реалізацій кубітів виділяються **надпровідні кубіти,** побудовані **на квантових надпровідних ланцюгах**, що містять джозефсонівські контакти [19, 13].

За певних умов (низькі температури, малі розміри) системи з джозефсонівськими контактами є макроскопічними квантовими

Національний університет водного господарства та природокористування

дворівневими системами, тобто вони можуть бути використані в якості надпровідних кубітів. Проте дворівневими їх можна вважати, якщо існує достатньо великий енергетичний зазор Δ, що відокремлює основний і перший збуджений енергетичні стани від всіх інших. Базисними станами такого кубіта будуть стани надпровідного контакту зі струмом, циркулюючим або за годинниковою стрілкою, або проти неї. Стан джозефсонівських кубітів керується ззовні магнітним потоком.

Основною перевагою джозефсонівських кубітів є масштабованість, можливість нарощування їх числа (що необхідно для реально діючого квантового комп'ютера) з використанням існуючого високого рівня технології створення інтегральних мікросхем. Перевагою цих кубітів в порівнянні з мікроскопічними кубітами (спінами, йонами) є і розвиненість контролюючих засобів. Надпровідні структури можуть забезпечувати мінімальний рівень декогеренції таких кубітів.

Джозефсонівські кубіти виконуються у вигляді інтегральних схем (електричних кіл), що містять джозефсонівські контакти. Для того щоб поведінка кола була квантовомеханічною, необхідно виконання ряду умов:

1. Відсутність дисипації, тобто всі металеві частини кола повинні складатися з надпровідників (реально використовуються ніобій або алюміній). При цьому в надпровіднику повинні бути «заморожені» квазічастинкові збудження, тобто коло повинне знаходитися при температурі меншій T_c.

2. Енергія теплових флуктуацій κT повинна бути мала в порівнянні з відстанню між рівнями енергії станів кубіта $|0\rangle$ і $|1\rangle$. Для надпровідних кубітів величина частоти переходу між цими рівнями ω становить порядку $10 ГГц$, що відповідає ~ $0{,}5 K$. Робоча температура (включаючи «електромагнітну» температуру зовнішніх наводок) у результаті повинна складати ~ $10^{-3} - 10^{-2}\, K$.

3. Нелінійна індуктивність. Для реалізації кубіта необхідно виділення двох близько розташованих енергетичних рівнів, для того щоб рештою вище розташованими рівнями можна було б знехтувати. Це досягається за рахунок істотної нелінійності джозефсонівської індуктивності.

Джозефсонівські кубіти вже експериментально реалізовані і активно вивчаються.

Національний університет водного господарства та природокористування

Крім вище означених і реалізованих існує також низка перспективних ідей:

1. Двомірний електронний кристал в потенціальній пастці (ямі) поблизу поверхні рідкого гелію.
2. Двомірна атомна решітка в оптичній пастці, утвореній стоячою хвилею інтерферуючих лазерних пучків.
3. Аніони в двомірному електронному газі в напівпровідниках в умовах дробового квантового ефекту Холла.
4. Квантові клітинні автомати у феромагнітних (антиферомагнітних) структурах в кристалах.

Квантова пам'ять

Квантові комп'ютери не можуть працювати без засобів зберігання інформації – квантової пам'яті. Вона використовується для зберігання інформації при проведенні квантових обчислень.

Найбільш зручними для використання кубітами квантової пам'яті є фотони. Привабливість фотонів як кубітів квантової пам'яті полягає, *по-перше*, в можливості легко ізолювати їх від навколишнього середовища. *По-друге*, поширюючись зі швидкістю світла, електромагнітне поле ідеально підходить для передачі інформації на великі відстані. *По-третє*, фотони відносно дешеві. Якщо остання властивість – безперечна перевага, то перші два зручні частково – для передачі квантової інформації. Через швидке поширення, електромагнітне поле слабко підходить для довготривалого зберігання квантової інформації. Довгі лінії затримки призводять до декогеренції, а значить, до втрати квантової інформації.

Завдання створення квантової пам'яті зводиться до реалізації ефективного квантового інтерфейсу між світлом і речовиною. Проблема в тому, що наскільки просто ізолювати фотони від навколишнього середовища, настільки ж складно організувати досить ефективну взаємодію електромагнітного поля і речовини. Це може бути реалізованим, наприклад, при пропусканні лазерних імпульсів через оптично щільні домішкові кристали, що стають непрозорими під дією випромінювання лазера. Зчитування інформації можна здійснювти за допомогою явища електромагнітно-наведеної прозорості.

Використання цього явища дозволило значно знизити швидкість поширення світла у середовищі. В деяких випадках світло залишалося на місці чекаючи відновлення відповідних умов для продов-

Національний університет водного господарства та природокористування

ження руху. На даний час розроблено методику зупинки світла в газовому середовищі, а також в твердому тілі — кристалі ітрію силікату ($Y_2O_3 \cdot SiO_2$), збагаченому атомами Празеодиму. Ключову роль в зберіганні інформації тут відігравали домішки в кристалі – йони Празеодиму, фізичні властивості яких дозволяють тривалий час

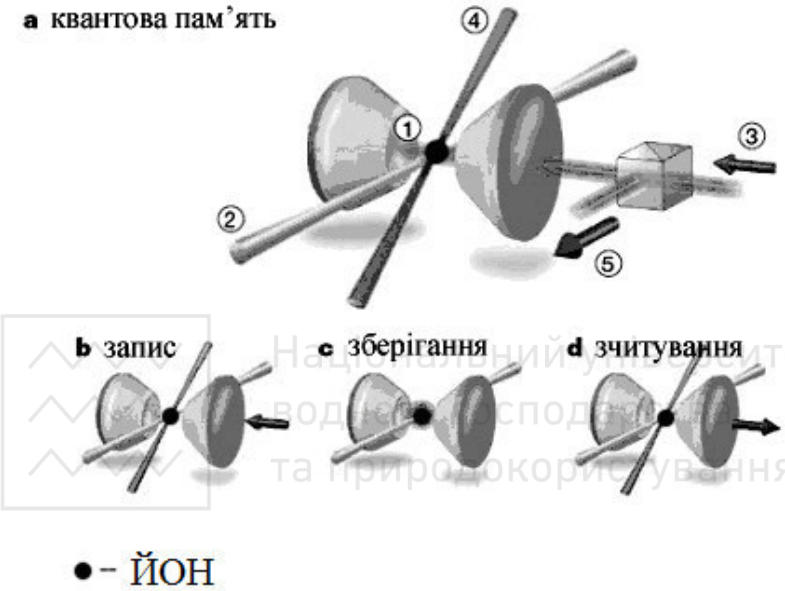


Рис. 6.28. Ілюстрація роботи одноатомної квантової пам'яті:

1. атом ^{87}Rb, захоплений в оптичний резонатор, який формується двома конічними дзеркалами;
2. дипольна пастка;
3. поглинається фотон;
4. π-поляризований лазерний промінь;
5. випромінений фотон.

зберігати визначений квантовий стан. Це дозволяє реалізувати когерентність оптичної пам'яті.

Оскільки більшість електронних компонентів комп'ютера є твердотільними пристроями, цей метод може використовуватись при створенні квантових пристроїв зберігання інформації.

Слід зауважити, що при тривалій подорожі фотонів у середовищі стан їх кубіта може поступово деградувати, тобто відбувається декогеренція їх стану. Щоб уникнути втрат інформації застосовують

Національний університет водного господарства та природокористування

квантові ретранслятори, які «ловлять» згасаючий сигнал, розшифровують його і знову випускають. Короткочасне зберігання і повторне випускання фотона якраз і відбувається в квантовій пам'яті.

Конструкції квантової пам'яті, що існували до цього часу, передбачали роботу при дуже низьких температурах. Крім того, вони були придатні лише для вузького інтервалу довжин хвиль фотонів і утримували їх нетривалий час. У 2004 році була створена квантова пам'ять, яка функціонує при температурі близькій до кімнатної. Основним компонентом приладу була скляна посудина з парами спінполяризованих атомів цезію. Атоми цезію опромінювались лазером, у яких інформація була закодована у фізичних властивостях фотонів. В результаті дії фотонів на атомні стани кубіта зберігалися в спінах електронів і ядер атомів. При потребі повторне лазерне опромінювання (з іншими характеристиками) дозволяло отримати інформацію у вигляді фотонів, що генерувалися атомами цезію і передати на фотоприймач.

Зараз в якості квантової пам'яті пропонується також одноатомна квантова пам'ять, для реалізації якої розміщують єдиний атом у високоякісному резонаторі і таким чином домагаються ефективного обміну квантовими станами між атомом і фотонами (див. рис. 6.28, a) [20]. При цьому інформація спочатку «переписується» з поглиненого фотона в когерентну суперпозицію атомних станів (рис. 6.28, b), зберігається (рис. 6.28, c), а потім передається іншому фотону при його випромінюванні (рис. 6.28, d). Потрапивши в атом, «летючий кубіт» зберігає когерентність протягом ≈ 2*мс*. Одноатомну пам'ять можна використовувати, зокрема, для сплетення віддалених один від одного атомних кубітів.

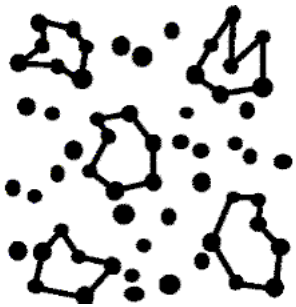


Рис. 6.29. Поширення світла через середовище з неоднорідним показником заломлення

Німецьким вченим нещодавно вдалося продемонструвати ефект, коли світло, що йде крізь оптично неоднорідне середовище, надовго «застрягає» в ньому, потрапляючи на замкнуті орбіти руху (див. рис. 6.29).

Для спостереження описаного ефекту потрібно приготувати таке

Національний університет водного господарства та природокористування

середовище, в якому розподіл коефіцієнта заломлення був би максимально хаотичним (іншими словами, довжина вільного пробігу молекул не перевищувала б довжини хвилі світла) і відсутнє поглинання світла. Таким середовищем може бути, наприклад, суспензія TiO_2 (діоксид Титану). Затримані фотони можуть довго кружляти всередині зразка TiO_2 по замкнутих орбітах, перш ніж вийти із середовища. При виготовленні речовини з дуже дрібними зернами діоксиду Титану можливий ефект повної локалізації світла.

Вважається, що для розвитку квантових обчислювальних систем є важливим досягнення 50%-го рівня ефективності зберігання інформації, тоді як на даний момент найвищий показник складає 45%. Розробники квантової пам'яті на основі монокристалу $Y_2O_3 \cdot SiO_2$ показали, що ефективність розробленого ними пристрою становить 69% і може бути в подальшому збільшена за рахунок зміни геометричних розмірів цього кристалу.

Квантова шина

Ще одним необхідним пристроєм квантового комп'ютера є квантова шина для обміну інформацією. «Віртуальна шина», по якій курсують біти інформації, може стати наріжним каменем в архітектурі квантових комп'ютерів. У працюючому комп'ютері жоден кубіт не відокремлений. Кубіти пам'яті повинні взаємодіяти один з одним, а

Таблиця 2

Квантові комп'ютери компанії D-Wave systems

Назва	Кількість кубітів	Дата
Orion	16	13.02.2007
Leda	28	7.11.2008
D-Wave I	128	11.05.2011

також з блоками вводу/виведення, пам'яті і управління. Для полегшення зв'язку між ними пропонують замість квантової шини використовувати «літаючі» кубіти, що курсують всередині комп'ютера і зближуються для обміну інформацією. Модель перетворення стаціонарних кубітів в «літаючі», (найімовірніше – це фотони) може бути ще одним можливим вирішенням проблеми. Проте розробка необхідного з'єднання між речовиною і фотонами, або стаціонарними і «літаючими» кубітами пов'язана з багатьма труднощами.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Поки що неясно, який спосіб побудови квантового комп'ютера виявиться кращим. Сучасний етап досліджень характеризується пошуком можливостей їх побудови, використовуючи різноманітні області фізики. Оптимісти вважають, що серед різноманітних пропозицій можуть знайтися «проривні» ідеї, які наблизять день побудови повномасштабного квантового комп'ютера.

На думку багатьох учених, що працюють в області розробки квантового комп'ютера, результати наукових розробок наблизяться до стадії комерційного використання приблизно в 2030 році. До цього ж часу буде досягнута межа в існуючій напівпровідниковій технології, на якій базуються класичні комп'ютери. Відомо, що сьогодні доріжки, по яких в процесорі поширюється електричний сигнал, мають ширину близько сотні атомів. Подальше їх звуження

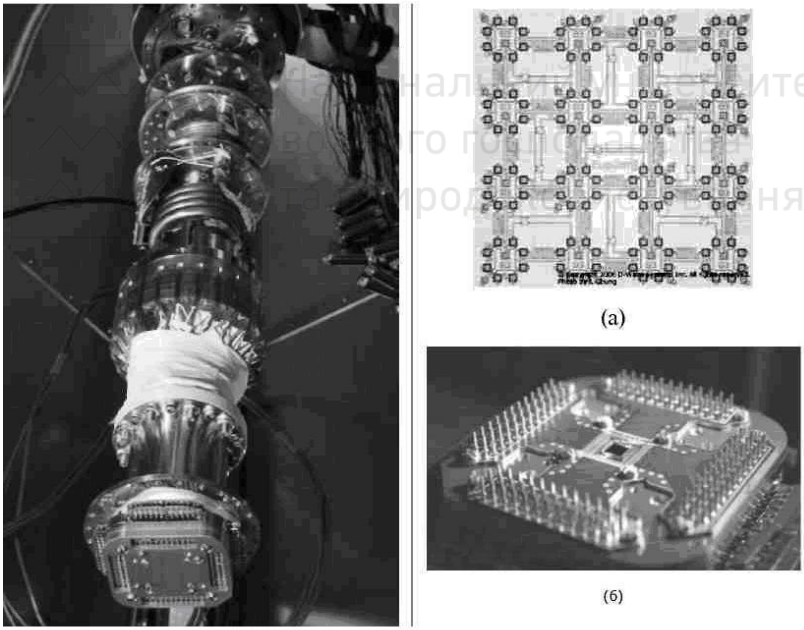


Рис. 6.30. Елементи квантового комп'ютера компанії D-Wave: (а). Мікрофотографія 16-кубітного квантового процесора «Оріон» (б). Надпровідна частина комп'ютера у зборі. Ліворуч – процесор, закріплений на кріогенному носії

Національний університет водного господарства та природокористування

можливе лише до певної межі.

Починають з'являтися фірми (наприклад, D-Wave), які планують пов'язати свою основну діяльність з квантовими комп'ютерами. Квантові комп'ютери цієї фірми представлені в таблиці 2.

Квантовий комп'ютер Orion (див. рис. 6.30) – це перша практична реалізація технології, що дозволяє здійснювати одночасно до 65536 обчислювальних потоків. Найновіший комп'ютер D-Wave I побудований на кремнієвому чипі містить 128 кубітів [21]. Кубіти в D - Wave I виконані у вигляді надпровідних джозефсонівських контактів (SQUID). В якості надпровідника використовується ніобій, охолоджений до декількох мілікельвінів, розміщений в котушці індуктивності. Електричний струм, що протікає по котушці, генерує магнітне поле, а воно, у свою чергу, викликає зміну стану кубіта. Оскільки відомо, як ніобій реагує на магнітні поля, і параметри магнітних полів можна легко виміряти, то їх зміни, викликані ніобієм, можуть бути переведені в результат, який і є розв'язком задачі.

За своїми геометричними характеристиками D-Wave I є шафою, яка вільно розміщується в добре екранованій кімнаті розмірами 10 $м^2$. Основну частину даного об'єму займає система охолодження. Як випливає з табл. 2, регістр комп'ютера D-Wave I містить 128 кубітів. Щоб точніше уявити собі його можливості, оцінимо обсяг пам'яті регістра D-Wave I. Сто двадцять вісім кубітів квантового регістра можуть містити 2^{128} різних 128-розрядних двійкових чисел ($2^{128} \approx 3{,}4 \times 10^{38}$). Одне 128-розрядне число записується у 16 байтах оперативної пам'яті (ОП) класичного комп'ютера. Тоді, якщо використати ОП класичного комп'ютера, для зберігання 2^{128} таких чисел знадобиться:

$$16 \times 3{,}4 \times 10^{38} = 5{,}44 \times 10^{39}\, байт = 5{,}44 \times 10^{36}\, Кб\ .$$

Таким чином, ємність квантового регістра комп'ютера D-Wave I в $2{,}72 \times 10^{25}$ разів більша, ніж ємність ОП сучасного суперкомп'ютера, такого, наприклад, як Roadrunner (IBM). Його ОП складає приблизно 200*ТБ* (2×10^{14} *байт*). Підкреслимо, що вартість суперкомп'ютера Roadrunner перевищує $110 млн., тоді як вартість D-Wave I – $10 млн. При цьому Roadrunner займає площу порівняну з площею баскетбольного майданчика і споживає стільки електроенергії, скільки споживає невелике місто з населенням 10-20 тис. чоловік.

В 2012 році співробітники фірми D-Wave провели перевірку ро-

Національний університет водного господарства та природокористування

боти квантового комп'ютера D-Wave I. В якості перевірочної обчислювальної задачі була вибрана задача побудови двокольорового графа чисел Рамсея. Розв'язок цієї задачі для комп'ютера є неймовірно складним завданням з точки зору ресурсів та обчислювальної потужності. На виконання цього завдання звичайному комп'ютеру середньої потужності знадобилося б **10^{250} років**.

Для розв'язку задачі Рамсея в обчисленнях було задіяно 28 кубітів комп'ютера D-Wave I, 56 кубітів використовувалися для пошуку і усунення помилок. І оскільки задача Рамсея була розв'язана математиками раніше іншими методами, видані комп'ютером результати збіглися з одним з восьми правильних розв'язків. Процес знаходження правильного розв'язку зайняв **270 мілісекунд**.

6.5. Біокомп'ютер

Труднощі з розвитком класичного комп'ютера заставили низку дослідників звернутися до екзотичних, на наш погляд, технологій обробки інформації. Природний інтерес ряду дослідницьких груп (серед них Оксфордський і Техаський університети, Массачусетський технологічний інститут, лабораторії Берклі і Рокфеллера) викликали способи зберігання і обробки інформації в біологічних системах. Підсумком їх досліджень з'явився (або, точніше, ще тільки має з'явитися) гібрид інформаційних і молекулярних технологій та біохімії – біокомп'ютер. Йдуть розробки декількох типів біокомп'ютерів, які базуються на різних біологічних процесах. Це, в першу чергу, клітинні і ДНК-біокомп'ютери, які знаходяться в стадії розробки.

а). ДНК-комп'ютер

Як відомо, в живих клітинах генетична інформація закодована в молекулі ДНК (дезоксирибонуклеїнової кислоти). ДНК – це полімер, що складається з субодиниць, які називаються нуклеотидами, а нуклеотид, в свою чергу, – комбінація цукру (дезоксирибози), фосфату і однієї з чотирьох азотистих основ: аденіну (A), тиміну (T), гуаніну (G) і цитозину (C). Молекула ДНК утворює подвійну спіраль, що складається з двох ланцюгів, об'єднаних водневими зв'язками, причому відстань між ланцюгами становить 2*нм*. Основа A одного ланцюга може з'єднуватися водневими зв'язками

Національний університет водного господарства та природокористування

тільки з основою T іншого ланцюга, а основа G – тільки з основою C. На відміну від класичного комп'ютера, в якому використовується двійкова логіка (логічні «0» та «1») молекула ДНК (одинарний ланцюжок) може мати, наприклад, такий вигляд: ATTTACGGCC, в якому використовується четвіркова логіка. І подібно до того, як в двійковій логіці будь-яку інформацію можна закодувати у вигляді послідовності логічних нулів та одиниць, в молекулах ДНК можна кодувати будь-яку інформацію шляхом поєднання чотирьох базових основ. Базові основи в молекулах ДНК знаходяться на відстані 0,34*нм* одна від одної, що обумовлює їх величезну інформативну ємність – лінійна щільність становить 18*Мбіт/дюйм*. Якщо ж говорити про поверхневу щільність інформації, припускаючи, що на одну базову основу приходиться площа в 1$нм^2$, то вона становить більше мільйона гігабіт на квадратний дюйм.

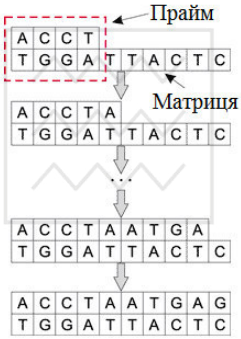


Рис. 6.31. Процес доповнення ланцюжка ДНК при впливі на вихідну молекулу полімерази

Маючи один з ланцюгів ДНК, завжди можна відновити будову іншого. Завдяки цій фундаментальній властивості ДНК, яка отримала назву *комплементарності*, генетична інформація може точно копіюватися і передаватися від материнських клітин до дочірніх.

Для маніпуляцій над ДНК-молекулами використовуються різні ензими (ферменти). Так само, як сучасні мікропроцесори мають набір базових операцій типу додавання, зсуву, логічних операцій, ДНК-молекули під впливом ензимів можуть виконувати такі базові операції, як розрізання, копіювання, вставка, тощо. Причому всі операції над ДНК-молекулами можна проводити паралельно і незалежно від інших операцій, наприклад доповнення (*реплікація*) ланцюжка ДНК здійснюється при впливі на вихідну молекулу ферментів-полимераз. Цей фермент ковзає уздовж ДНК і синтезує на її основі нову молекулу, в якій всі основи замінені на відповідні комплементарні. Наприклад, якщо послідовність S записується як ATTACGTCG, то доповнююча її послідовність S' буде мати вигляд TAATGCAGC. Фермент починає працювати тільки тоді, коли до ДНК прикріпився

Національний університет водного господарства та природокористування

коротенький шматочок-затравка (прайм). Прайм – це невелика дволанцюжкова ділянка ДНК. Процес доповнення ланцюжка ДНК показаний на рис. 6. 31.

Існують полімерази, яким не потрібні матриці для подовження ланцюжка ДНК. Наприклад, термінальна трансфераза додає одинарні ланцюжки ДНК до обох кінців дволанцюжкової молекули. Таким чином можна конструювати довільний ланцюг ДНК (рис. 6.32). За вкорочення і розрізання молекул ДНК відповідають ферменти – нуклеази. Вони можуть вкорочувати і одноланцюгові і дволанцюжкові молекули з одного або з обох кінців (рис. 6.33). Розрізання молекул ДНК можливо під впливом однієї із специфічних нуклеаз – рестриктазою, які розрізають їх у певному місці, закодованому послідовністю нуклеотидів (*сайтом впізнавання*). Розріз може бути прямим або несиметричним і проходити по сайту впізнавання або поза ним. Рестриктази руйнують внутрішні зв'язки в молекулі ДНК (рис. 6.34).

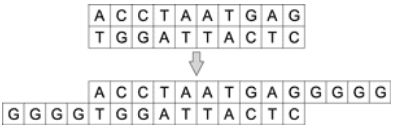


Рис. 6.32. Процес подовження ланцюжка ДНК

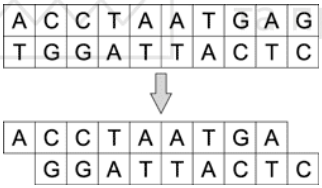


Рис. 6. 33. Процес вкорочування молекули ДНК під дією нуклеази

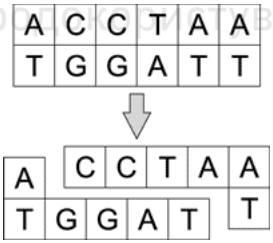


Рис. 6.34. Процес розрізання молекули ДНК під дією рестриктази

Зшивання – операція, зворотна розрізанню, відбувається під впливом ферменту – лігаза. «Липкі кінці» з'єднуються разом з утворенням водневих зв'язків. Лігази служать для того, щоб закрити насічки, тобто сприяти утворенню в потрібних місцях фосфодиефірних зв'язків, що з'єднують базові основи одну з одною у межах одного ланцюжка (рис. 6.35).

Національний університет водного господарства та природокористування

Ще одна цікава операція над ДНК-молекулами, яку можна віднести до числа базових, – це модифікація. Вона використовується для того, щоб рестриктази не змогли знайти певний сайт і не зруйнували молекулу. Існує декілька типів модифікуючих ферментів – метилаза, фосфатази, тощо.

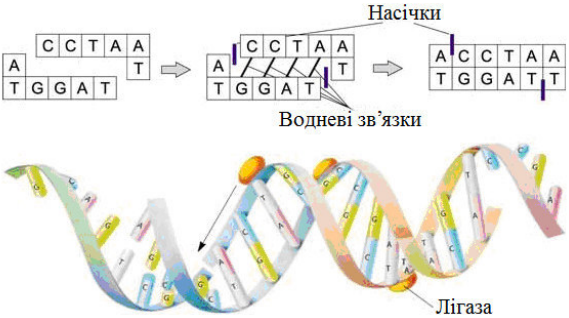


Рис. 6.35. Зшивання ДНК-молекули під дією лігазів

Національний університет водного господарства та природокористування

Метилаза має той же сайт впізнавання, що і відповідна рестриктаза. При знаходженні потрібної молекули метилаза модифікує ділянку з сайтом так, що рестриктаза вже не зможе ідентифікувати цю молекулу.

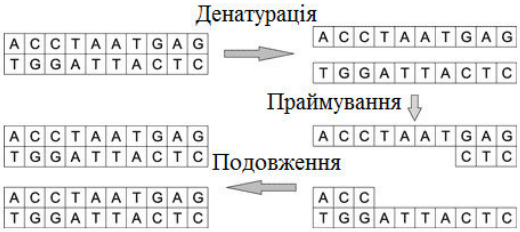


Рис. 6.36 .Процес копіювання ДНК-молекули

Копіювання, або розмноження, ДНК-молекул здійснюється в ході полімеразної ланцюгової реакції (англ.: Polymerase Chain Reaction, PCR), представленої на рис. 6.36. Процес копіювання можна розділити на декілька стадій: денатурація, праймування і подовження. Він відбувається лавиноподібно. На першому кроці з однієї молекули утворюються дві, на другому – з двох молекул – чотири, а після *n* кроків отримується вже 2*n* молекул.

Ще одна операція, яку можна здійснювати над ДНК-молекулами, – це *секвенування*, тобто визначення послідовності

Національний університет водного господарства та природокористування

нуклеотидів в ДНК. Для секвенування ланцюжків різної довжини застосовують різні методи. За допомогою методу праймер-опосередкованої прогулянки вдається на одному кроці секвенувати послідовність у 250-350 нуклеотидів. Після відкриття рестриктаз стало можливим секвенувати довгі послідовності за їх частинами.

Дуже важливою методикою в ДНК-експериментах є гель-електрофорез, який використовується для розділення молекул ДНК за довжиною. Якщо молекули помістити в гель і прикласти постійне електричне поле, то вони будуть рухатися у напрямку до анода, причому коротші молекули будуть рухатися з більшою швидкістю. Використовуючи дане явище, можна реалізувати сортування ДНК-молекул за довжиною.

У клітинах крім ДНК знаходиться також споріднена їй молекула матричної рибонуклеїнової кислоти (m-РНК), яка виконує роль проміжного креслення або матриці. Нова пропозиція m-РНК синтезується спеціальним ферментом, який використовує в якості зразка один із ланцюгів ДНК. Саме на молекулі m-РНК в клітині, як на матриці, за допомогою спеціальних ферментів і допоміжних факторів відбувається синтез білків. Молекула РНК хімічно стійкіша, ніж ДНК, тому експериментаторам з нею працювати зручніше. Послідовність нуклеотидів у ланцюгу ДНК/РНК визначає генетичний код. Одиницею генетичного коду (*кодоном*) – є послідовність із трьох нуклеотидів.

ДНК-обчислення

ДНК-молекули зі своєю унікальною формою будови і можливістю реалізувати паралельні обчислення дозволяють по-іншому поглянути на проблему комп’ютерних обчислень. Вони можуть використовуватись в якості і ДНК-процесора і ДНК-пам’яті. Так як і процесор класичного комп’ютера, ДНК-процесор характеризується структурою і набором команд. У нашому випадку структура процесора – це структура молекули ДНК. А набір команд – це перелік біохімічних операцій з молекулами. Вчені спробували за прикладом природи використовувати ДНК-молекули в цій якості [22].

Першим з них був Л. Едлмен з Університету Південної Каліфорнії, який зумів розв’язати задачу гамільтонового шляху («задача комівояжера»). Суть її полягає в тому, що потрібно знайти маршрут руху з заданими точками старту і фінішу між декількома містами (у

Національний університет водного господарства та природокористування

випадку експерименту Едлмена – сімома), в кожному з яких дозволяється побувати тільки один раз. «Дорожня мережа» є односпрямованим графом.

Ця задача вирішується прямим перебором, однак при збільшенні кількості міст складність її зростає експоненціально (для десяти вершин графа – 106 варіантів, для 100 вершин – 10100). Для прикладу розглянемо спрощену «задачу комівояжера» для чотирьох міст: Рівне, Львів, Луцьк та Дубно. Перед туристом ставиться завдання вибрати маршрут із Рівного у Львів, щоб побувати в кожному із цих міст, але всього один раз, причому кількість маршрутів жорстко задана (див. табл. 3). Не важко переконатися, що єдиний гамільтонів маршрут, в такому випадку буде: Рівне – Дубно – Луцьк – Львів.

Таблиця 3

Таблиця ДНК-кодів міст та маршрутів

Місто	ДНК-код міста	Комплементарний ДНК-код міста	Маршрут	ДНК-код маршруту
Рівне	ACTT GCAG	TGAA CGTC	Рівне-Дубно	GCAG TCGG
Дубно	TCGG ACTG	AGCC TGAC	Рівне-Львів	GCAG CCGA
Луцьк	GGCT ATGT	CCGA TACA	Дубно-Луцьк	ACTG GGCT
Львів	CCGA GCAA	GGCT CGTT	Дубно-Львів	ACTG CCGA
–	–	–	Луцьк-Львів	ATGT CCGA
–	–	–	Дубно-Рівне	ACTG ACTT

Едлмен ідентифікував кожне місто одним ланцюжком ДНК із 20 нуклеотидів. Ми будемо кодувати місто ланцюжком із 8 базових основ (див. табл. 3). Далі необхідно скласти ДНК-код всіх маршрутів. Маршрут між будь-якими двома містами буде складатися з другої половини коду міста виїзду і першої половини коду міста прибуття. Сучасна молекулярна апаратура дозволяє дуже швидко синтезувати такі послідовності.

Національний університет водного господарства та природокористування

Після того як підготовлені коди міст і можливих маршрутів між ними, можна безпосередньо переходити до обчислення гамільтонового шляху. Процес обчислення складається з чотирьох етапів:

1. Згенерувати всі можливі маршрути.
2. Відібрати маршрути, які починаються в Рівному і закінчуються Львовом.
3. Вибрати маршрути, довжина яких відповідає кількості міст (у нашому випадку довжина маршруту становить чотири міста).
4. Вибрати маршрути, в яких кожне місто присутнє тільки один раз.

Для виконання п.1 в пробірку поміщалось 10^{14} молекул ДНК, які містять всі можливі 20-нуклеотидні послідовності, що кодують міста та шляхи між ними. Але замість того, щоб застосовувати одинарні ДНК-ланцюжки, відповідні назвам міст, необхідно використовувати комплементарні їм ДНК-ланцюжки, тобто замість ДНК-ланцюжка ACTT GCAG, який відповідає Рівному, будемо застосовувати комплементарний ДНК-ланцюжок TGAA CGTC і т.д., оскільки ДНК-код міста та комплементарний йому код абсолютно рівноправні. При внесенні в пробірку лігазів почнеться утворення ДНК-кодів маршрутів. Цей процес виглядає так. Розглянемо, наприклад, ланцюжок GCAG TCGG, що відповідає за маршрут Рівне – Дубно. Внаслідок високої концентрації молекул ДНК, даний лан-

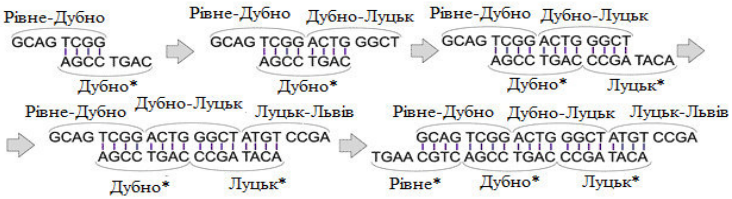


Рис. 6.37. Процес утворення ДНК-ланцюжка, що відповідає маршруту Рівне – Дубно – Луцьк – Львів (* – комплементарні коди міст)

цюжок обов’язково зустрінеться з комплементарним ДНК-ланцюжком AGCC TGAC, який відповідає місту Дубно. Оскільки групи TCGG і AGCC комплементарні одна одній, то за рахунок зшивання лігазами ланцюжки зчепляться один з одним (рис. 6.37).

Національний університет
водного господарства
та природокористування

У підсумку послідовність ДНК з розв'язком гамільтонового шляху складе 48 нуклеотидів (3 маршрути по 8 нуклеотидів у двох

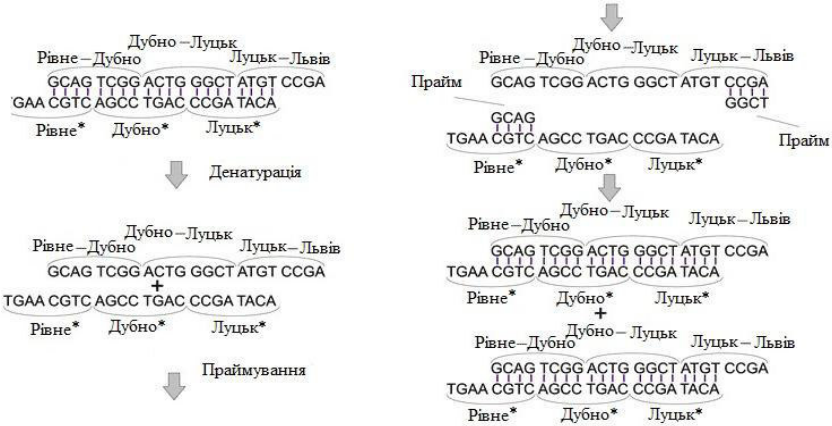


Рис. 6.38. Процес копіювання ДНК-молекул в ході PCR-реакції

Національний університет
водного господарства
та природокористування

ланцюжках). У Едлмена розв'язок склав 240 нуклеотидів (6x20x2).

Аналогічним чином синтезуються молекули ДНК, які відтворюють і всі інші можливі маршрути (наприклад, Рівне – Дубно – Рівне – Львів). Важливо, що всі маршрути формуються одночасно, тобто паралельно. Причому час, необхідний для створення всіх можливих маршрутів в даній задачі і всіх маршрутів в задачі з 10 або 20 містами, абсолютно однаковий (аби вистачило вихідних ДНК-молекул). Власне, саме в паралельному алгоритмі ДНК-обчислень і полягає основна перевага в порівнянні з фоннеймановскою архітектурою.

Для виконання п.2 процесу обчислень із всіх можливих ДНК-кодів маршрутів необхідно відібрати гамільтонів шлях. Едлмен вирішив цю задачу біохімічними методами, послідовно видаливши спочатку ланцюжки, які не починалися з першого міста (точки старту) і не закінчувалися місцем фінішу, потім ті, що містили більше семи міст або не містили хоча б одного. Легко зрозуміти, що після такого відбору будь-яка з решти молекула ДНК є розв'язком задачі.

Сепарація молекул, які починаються кодом Рівного і закінчуються кодом Львова здійснюється за допомогою полімеразної ланцюгової реакції (PCR), в результаті якої синтезується безліч копій тільки

Національний університет водного господарства та природокористування

тих ДНК-ланцюжків, які починаються з коду Рівного і закінчуються кодом Львова.

Для реалізації PCR застосовуються два прайми: GCAG і GGCT. Процес копіювання ДНК-модекул, що починаються з ДНК-коду Рівного і закінчуються ДНК-кодом Львова, показаний на рис. 6.38. В присутності праймів GCAG і GGCT будуть копіюватися і ті ДНК-молекули, які починаються з ДНК-коду Рівного, але не закінчуються ДНК-кодом Львова (під дією прайму GCAG) , а також ДНК-молекули, які закінчуються ДНК-кодом Львова, але не починаються з ДНК-коду Рівного (під дією прайму GGCT). Зрозуміло, що швидкість копіювання таких молекул буде набагато нижчою швидкості копіювання ДНК-молекул, що починаються з ДНК-коду Рівного і закінчуються ДНК-кодом Львова. Отже, після PCR-реакції ми отримаємо переважну більшість ДНК-молекул у формі регулярної подвійної спіралі, яка відповідає маршруту, що починається в Рівному і закінчується у Львові.

Для реалізації п.3 необхідно виділити молекули необхідної довжини (ті, що містять ДНК-коди чотирьох міст). Для цього використовується гель-електрофорез, що дозволяє розділити молекули по довжині. В результаті ми отримуємо молекули потрібної довжини (рівно чотири міста), що починаються з коду Рівного і закінчуються кодом Львова.

Тепер необхідно переконатися, що у відібраних молекулах код кожного міста присутній тільки один раз. Ця операція реалізується із застосуванням процесу, відомого як affinity purification.

Для даної операції використовується мікроскопічна магнітна кулька діаметром біля 1*мкм*. До кульки притягаються комлементарні ДНК-коди тих міст, які виконують функцію проби. Наприклад, якщо потрібно перевірити, чи присутній у досліджуваному ДНК-ланцюжку код міста Дубно, то необхідно спочатку помістити магнітну кульку в пробірку з ДНК-молекулами, в яких є тільки молекули з комплементарними ДНК-кодами Дубна. В результаті ми отримаємо магнітну кульку, обліплену потрібними нам пробами. Потім ця кулька поміщається в пробірку з досліджуваними ДНК-ланцюжками. В результаті – до такого ланцюжка (за рахунок утворення водневих зв’язків між комплементарними групами) притягнуться ДНК-ланцюжки, в яких присутній код Дубна. Далі кульку з відсортированими молекулами виймають і поміщають в новий роз-

Національний університет водного господарства та природокористування

чин, який потім підігрівається. При підігріві ДНК-молекули відвалюються від кульки. Дана процедура (сортування) повторюється послідовно для кожного міста, і в результаті ми отримуємо тільки ті молекули, в яких містяться ДНК-коди всіх міст, а значить, і маршрути, що відповідають гамільтоновому шляху. Фактично завдання вирішене – залишилося лише прорахувати відповідь.

Задачі, подібні до знаходження гамільтонового шляху за допомогою ДНК, розв'язували і інші вчені. Л. Сміт з Університету Вісконсін розв'язав задачу доставки чотирьох сортів піци за чотирма адресами, що мала 16 варіантів розв'язків. Вчені з Прінстонського університету розв'язали комбінаторну шахову задачу: за допомогою РНК знайшли правильний хід шахового коня на дошці з дев'яти клітин (всього 512 варіантів).

Р. Ліптон з Прінстонського університету першим показав, як, використовуючи ДНК, кодувати двійкові числа і вирішувати проблему задоволення заданого логічного виразу. Суть її полягає в тому, що, маючи деякий логічний вираз, який включає n логічних змінних, потрібно знайти всі комбінації значень змінних, що роблять вираз істинним. Задачу можна розв'язати тільки перебором $2n$ комбінацій. Ці комбінації легко закодувати за допомогою ДНК, а далі діяти за методикою Едлмена. Ліптон запропонував також спосіб декодування шифру DES (американський криптографічний), що трактується як своєрідний логічний вираз. Першу модель біокомп'ютера у вигляді механізму з пластмаси, в 1999 році створив І. Шапіро з Вейцманівського інституту природничих наук (Ізраїль). Модель імітувала роботу «молекулярної машини» у живій клітині, яка збирає білкові молекули за інформацією з ДНК, використовуючи РНК в якості посередника між ДНК і білком.

А в 2001 році Е. Шапіро вдалося реалізувати модель в реальному біокомп'ютері, який складався з молекул ДНК, РНК і спеціальних ферментів. Розроблена у Вейцманівському інституті установка кодує вхідні дані і програми в двох ланцюгах молекули ДНК і змішує їх з двома ферментами. Молекули ферменту виконували роль апаратного, а молекули ДНК – програмного забезпечення. Один фермент розщеплює молекулу ДНК з вхідними даними на відрізки різної довжини в залежності від коду, який у ній міститься. А інший рекомбінує ці відрізки відповідно до їх коду і коду молекули ДНК з програмою. Процес продовжується вздовж вхідного

Національний університет водного господарства та природокористування

ланцюга, і, коли доходить до кінця, отримується вихідна молекула, відповідна кінцевому стану системи. При цьому в одній пробірці поміщалося близько трильйона елементарних обчислювальних модулів. У результаті швидкість обчислень могла досягати мільярда операцій на секунду, а точність – 99,8%.

Біокомп'ютер Шапіро може застосовуватися лише для вирішення найпростіших завдань, видаючи всього два типи відповідей: «TRUE» або «FALSE». У проведених експериментах за один цикл всі молекули ДНК паралельно вирішували єдине завдання. Однак, потенційно вони можуть трудитися одночасно над різними завданнями, в той час як традиційні ПК є, по суті, однозадачними.

Наприкінці лютого 2002 року з'явилося повідомлення, що фірма Olympus Optical претендує на першість у створенні комерційної версії ДНК-комп'ютера, призначеного для генетичного аналізу. Машина була створена у співпраці з доцентом Токійського університету А. Тояма.

Комп'ютер, побудований Olympus Optical, має молекулярну і електронну складові. Перша здійснює хімічні реакції між молекулами ДНК, забезпечує пошук і виділення результату обчислень. Друга – обробляє інформацію і аналізує отримані результати.

Аналіз генів зазвичай виконується вручну і вимагає багато часу: при цьому формуються численні фрагменти ДНК і контролюється хід хімічних реакцій. Коли ДНК-комп'ютер буде використовуватися для генетичного аналізу, завдання, які раніше виконувалися протягом декількох днів, можна буде вирішувати за шість годин.

У компанії сподіваються поставити технологію генетичного аналізу на основі ДНК-комп'ютера на комерційну основу. Вона знайде застосування в медицині і фармацевтиці. Вчені планують в майбутньому впроваджувати молекулярні нанопристрої в тіло людини для моніторингу стану його здоров'я і синтезу необхідних ліків.

Група вчених на чолі з І. Бененсон з Вейцманівського інституту природничих наук (Ізраїль) виявила, що молекула ДНК може віддати всю свою енергію на управління процесом обчислень. На цій основі вдалося розробити проект ДНК-комп'ютера, який не вимагає зовнішнього живлення та володіє надзвичайно високою продуктивністю.

Національний університет водного господарства та природокористування

Отриманий на цій основі процесор настільки малий, що в об'ємі однієї краплі води могло б поміститися до трьох трильйонів таких ДНК-комп'ютерів, які можуть виконувати до 66 мільярдів операцій у секунду, з точністю до 99,8%. Це перша програмована автономна обчислювальна машина, в якій блоки введення, виведення, програмне забезпечення та апаратні засоби ЕОМ були зроблені з молекул ДНК.

Найважливіше те, що новий проект ДНК-комп'ютера включає в себе раніше невідомий біохімічний процес, що виробляє достатньо енергії для того, щоб ДНК-комп'ютер міг працювати без зовнішнього джерела живлення. Біохімічні комп'ютери можуть зберігати значний масив інформації в малому об'ємі носія, а всі операції робити на рівні клітини. Було оцінено, що 1*г* висушеної ДНК, яка містить повний генетичний код живої істоти, може увібрати в себе стільки інформації, скільки міститься в трильйоні компакт-дисків. Взагалі інформаційний потенціал ДНК-комп'ютерів становить 10^{21}*біт/грам*, тобто один 1*біт/нм*^{3}, тоді як у класичного комп'ютера він становить 1*біт* на10^{12}*нм*^{3}. Комп'ютери ДНК зберігають інформацію подібно тому, як зберігають її гени, тільки в операціях бере участь більш широкий спектр хімічних речовин, що розташовуються у подвійній спіралі молекули ДНК різних хімічних сполук і в різній послідовності.

Дещо раніше пропонувалися аналогічні проекти по створенню біокомп'ютерів, але всі вони опиралися на використання в якості джерела енергії циклу перетворення аденінтрифосфату (АТФ) – молекули, яка використовується клітинами для перенесення енергії.

Новий проект Шапіро побудований на основі біологічних принципів природних схем апаратних засобів ЕОМ. Кожний обчислювальний крок вимагає двох додаткових молекул ДНК, – одна працює на введення інформації, а інша виконує роль програмного забезпечення. Ці молекули спонтанно перебувають поряд, і в момент задіяння однієї з них, вони обмінюються енергією. У підсумку, процес практично не вимагає постійного живлення.

У перспективі подібні комп'ютери розміщені на площі 25*см*^{2} за своєю продуктивністю і об'ємом пам'яті могли б бути порівняними з сотнею найсучасніших суперкомп'ютерів разом узятих. І живлення такого комп'ютера могло б здійснюватись від тепла людського тіла.

Національний університет водного господарства та природокористування

Можливостями біокомп'ютерів зацікавилися і військові. Американське агентство з досліджень у галузі оборони DARPA виконує проект, що отримав назву BioComp (англ.: Biological Computations, біологічні обчислення). Програма розрахована на п'ять років. Її мета – створення потужних обчислювальних систем на основі ДНК. Попутньо дослідники сподіваються навчитися керувати процесами взаємодії білків і генів. Для цього планується створити потужний стимулятор Bio-SPICE, здатний засобами машинної графіки візуалізувати біомолекулярні процеси. Bio-SPICE планується розвивати на принципах відкритих джерел (open source).

б). Клітинні комп'ютери

Ще одним цікавим напрямком біокомп'ютинга є створення клітинних комп'ютерів. Для цієї мети ідеально підійшли б бактерії, якби в їх геном вдалося б вбудувати логічні схеми, які могли б активізуватися в присутності певної речовини. Такі комп'ютери були б дешеві у виробництві. Їм не потрібна стерильна атмосфера, така як при виробництві напівпровідників. Одноразово запрограмувавши клітину, можна було б легко і швидко вирощувати тисячі клітин з такою ж програмою.

У 2001 році американські вчені створили трансгенні мікроорганізми (тобто мікроорганізми зі штучно зміненими генами), клітини яких можуть виконувати логічну операцію «І». Фахівці лабораторії Оук-Рідж (штат Теннессі), використовували здатність генів синтезувати певний білок під впливом хімічних подразників. Вчені змінили генетичний код бактерій Pseudomonas putida так, що їх клітини отримали здатність виконувати прості логічні операції. Наприклад, при виконанні операції «І» в клітину подаються дві речовини (по суті – вхідні операнди), під впливом яких ген продукує певний білок. Тепер вчені намагаються створити на базі таких клітин складніші логічні елементи, а також намагаються створити клітини, що виконують паралельно декілька логічних операцій.

Потенціал біокомп'ютерів дуже високий. У порівнянні із класичними комп'ютерами вони мають ряд унікальних особливостей. *По-перше*, вони використовують не бінарний, а тернарний код (тому що інформація в них кодується кодоном). *По-друге*, оскільки обчислення виконується паралельно трильйонами молекул ДНК, вони можуть виконувати до 10^{14} операцій в секунду (правда, розшифру-

Національний університет водного господарства та природокористування

вання результатів обчислень передбачає декілька етапів дуже ретельного біохімічного аналізу і здійснюється набагато повільніше). *По-третє*, обчислювальні пристрої на основі ДНК зберігають дані зі щільністю, яка в трильйони разів перевищує відповідні параметри оптичних дисків. І, *по-четверте*, ДНК-комп'ютери мають виключно низьке енергоспоживання.

Однак у розробці біокомп'ютерів вчені зіткнулися з цілою низкою серйозних проблем. Перша пов'язана зі зчитуванням результату – сучасні способи секвенування (визначення коду послідовності нуклеотидів у ланцюзі ДНК) недосконалі: не можна за одне визначення секвенувати ланцюжок довжиною хоча б у декілька тисяч базових основ. Крім того, це дуже вартісна, складна і трудомістка процедура.

Друга проблема – похибка обчислень. Для біологів точність в 1% при синтезі і секвенуванні основ вважається прийнятною. Для інформаційних технологій вона значна: розв'язки задачі можуть втратитися у випадку, коли молекули просто прилипають до стінок пробірки; немає гарантій, що не виникнуть точкові мутації в ДНК, тощо. Крім того, ДНК-молекули не стійкі в часі і результати обчислень (ДНК-молекули результату) можуть просто розпастись. Недоліком клітинних комп'ютерів є невисока швидкість виконання операцій та висока ймовірність збоїв при обчисленнях. З усіма цими проблемами вчені активно борються. Наскільки успішно – покаже час.

Біокомп'ютери не розраховані на широкі маси користувачів. Але вчені сподіваються, що вони знайдуть своє місце в медицині і фармацевтиці. У перспективі ДНК-наномашини зможуть взаємодіяти з клітинами людини, здійснювати спостереження за потенційними змінами на біологічному рівні і синтезувати ліки для профілактики, приймати рішення про терапію і адресно доставляти ліки на клітинному рівні.

Нарешті, за допомогою клітинних комп'ютерів стане можливим об'єднання інформаційних і біотехнологій. У майбутньому вони зможуть управляти цілими хімічними заводами з виробництва біорегуляторів, гормонів, вітамінів, ферментів. Усередині людського організму вони зможуть контролювати його діяльність і здійснювати необхідну корекцію для сталого (здорового) функціонування.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

6.6. Інші розробки комп'ютерів

В літературі зустрічаються посилання на розробки нано-комп'ютерів (надмініатюрні електронні комп'ютери), фононних комп'ютерів (носіями інформації є теплові коливання кристалічної решітки – фонони), хімічних комп'ютерів (базуються на автоколиваннях Жаботинського-Бєлоусова), гідравлічних та пневматичних комп'ютерів, але всі вони здаються авторам на даний момент гіпотетичними і такими, що не мають відповідних технологій для реалізації.

Бібліографічний список до розділу 6

1. Минкин В.И. Теория строения молекул. Изд. 2-е [Текст] / В.И. Минкин, Б.Я.Симкин, Р.М.Миняев., Ростов-на-Дону, «Феникс», 1997, 558 с.
2. Oesterhelt D., Stoeckenius W. // Nature. 1971. V. 233. N 89. P.149-160.
3. Сороко Л.М. Основы голографии и когерентной оптики. - М.: Наука, 1971. – 616 с.
4. Исихара С. Оптические компьютеры: Новая эра науки. - М.: Наука, 1992. – 96 с.
5. Carts Y.A. Optical computing nears reality. // Laser Focus World, 1990, V. 26, P. 53-54.
6. Guilfoyle P.S., Rudokas R.S., Stone R.V., Roos E.V. Digital optical computer II: performance specifications. // Optical Computing Technical Digest, 1991, P. 203-206.
7. Розенблатт Ф. Принципы нейродинамики. - М.: Мир, 1965.
8. Саймон Хайкин, «Нейронные сети. Полный курс», 2-е изд., испр. : пер. с англ. – М.: ООО «И. Д. Вильямс», 2006. - 1104с.
9. Манин Ю. И. Вычислимое и невычислимое [Текст] / Ю. И. Манин. – М.: Сов. Радио. 1980. – 128 с.
10. Feynman R. Simulating physics with computers [Text] / R. Feynman // International Journal of Theoretical Physics. – 1982. – Vol. 21, No. 6/7. – P. 467–488.

Національний університет водного господарства та природокористування

11. Feynman R. Quantum mechanical computers [Text] / R. Feynman // Foundations of Physics. – 1986. – Vol. 16, P. 507–531. (Originally appeared in Optics News, February 1985.)
12. Дирак П. А. М. Принципы квантовой механики [Текст] / П. А. М. Дирак. – М.: Наука, 1979. – 408 с.
13. Войтович І.Д. Перспективи квантових обчислень з використанням надпровідності [Текст] / І. Д. Войтович, В. М. Корсунський // Математичні машини і системи. – 2008. – №4. – С. 23–56.
14. Шор П. Полиномиальные по времени алгоритмы разложения числа на простые множители и нахождение дискретного алгоритма для квантового компьютера [Текст] / П. Шор // Сборник: «Квантовый компьютер и квантовые вычисления». Вып.2. Ижевск. – 1999. – С. 200–247.
15. Zalka C. Simulating quantum systems on a quantum computer [Text] / C. Zalka // Proc. Roy. Soc. London. – 1998. – P. 313–322.
16. Лебедь О.О. Основи квантового комп'ютера та квантової інформатики [Текст] / О.О. Лебедь, О.Ю. Дейнека, А.В. Рибалко, В.І. Гаращенко // Рівне: Видавництво НУВГП, 2014. – 151 с.
17. Loss D. [Text] / D. Loss, D. P. Di Vincenzo // Phys. Rev. – 1998. – A57. – P. 120.
18. Leibfried D. Transport quantum logic gates for trapped ions [Text] / D. Leibfried E. Knill, C. Ospelkaus D. J. Wineland // Phys.Rev. – 2007. – A 76, 032324.
19. Омельянчук А. Н. Квантовые компьютеры и джозефсоновские кубиты [Текст] / А. Н. Омельянчук, М. А. Оболенский // Университеты: наука и просвещение / Харьковский национальный университет. – Харьков: Империал. – 2005. – № 2 (22) – С. 10–17; № 3 (23). – С. 12–19.
20. Specht H. P. [Text] / H. P. Specht et al. // Nature 473, 190 (2011).
21. Правильщиков П. А. Квантовый параллелизм и квантовые D – алгоритмы [Електронний ресурс] / pavelp@ipu.ru.
22. Малинецкий Г.Г., Науменко С.А. Вычисление на ДНК. Эксперименты. Модели. Алгоритмы. Инструментальные средства. // Москва: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2005.

Національний університет
водного господарства
та природокористування

Зміст

ПЕРЕДМОВА.....3

РОЗДІЛ 1

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИСТРОЇВ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ.....10

1.1. Елементи зонної теорії напівпровідників.....10
1.2. Власна провідність напівпровідників.....14
1.3. Домішкова провідність напівпровідників.....15
1.4. Електронно-дірковий перехід.....17
1.5. Принцип дії напівпровідникового діода.....18
1.5.1. Використання напівпровідникового діода.....19
1.6. Транзистори.....24
1.6.1. Біполярні транзистори.....24
1.6.1.1. Принцип дії біполярного транзистора.....25
1.6.2. Польові транзистори.....26
1.6.2.1. Принцип дії польового транзистора з управляючим p-n переходом.....27
1.6.2.2. Принцип дії польового транзистора з ізольованим затвором.....28
1.6.2.3. Польовий транзистор з плаваючим затвором.....30
1.6.2.4. Тиристори.....31
1.7. Основні логічні елементи комп'ютера.....33
1.7.1. Основна «угода» цифрової електроніки.....33
1.7.2. Логічні базиси.....35
1.7.3. Найпростіші елементи, складені з елементів логічного базису.....39
1.7.3.1. Тригер.....40
1.7.3.2. Мультиплексор (комутатор, селектор).....44
1.7.3.3. Демультиплексор (дешифратор, декодер).....45
1.7.3.4. Регістри.....45
1.7.3.5. Суматор.....49
1.7.3.6. Арифметико-логічний пристрій (АЛП).....52
1.7.3.7. Багаторозрядні селектори та зсувачі.....53
1.8. Процесор.....54
1.9.1. Основні складові частини процесора.....57
1.9.2. Розрядність та система команд процесора.....59
1.9.3. Структура процесора та керування ним.....61
1.9.4. Мікрокоманди і мікропрограми.....65
1.9.5. Висновки.....67

Національний університет водного господарства та природокористування

1.10. Оперативні запам'ятовуючі пристрої (ОЗП) на базі напівпровідникової техніки 68
1.10.1. Постійний запам'ятовуючий пристрій (ROM) 69
1.10.1.1. Будова і принцип дії ROM з можливістю перезапису 73
1.10.1.2. Будова і принцип дії МНОН і ЛІЗМОН 74
1.10.1.3. Будова і принцип дії SST 78
1.10.1.4. Будова і принцип дії MLC 79
1.10.2. Пам'ять типу RAM 79
1.10.2.1. DRAM 79
1.10.2.2. Кеш-пам'ять – SRAM 81
1.11. Зовнішні запам'ятовуючі пристрої на базі напівпровідникової техніки 84
1.11.1. Твердотільні накопичувачі 84
1.11.2. Флеш-пам'ять 86
1.11.3. Карти пам'яті 89
Бібліографічний список до розділу 1 90

РОЗДІЛ 2

МАГНІТНІ МЕТОДИ, ЗАСТОСОВАНІ В ОБЧИСЛЮВАЛЬНІЙ ТЕХНІЦІ **91**

2.1. Магнетики 91
2.2. Фізичні основи принципу запису на магнітний носій та зчитування з нього 95
2.3. Зовнішні запам'ятовуючі пристрої (ЗЗП), засновані на магнітному принципі запису, читання та зберігання даних 97
2.3.1. Пам'ять на магнітній дротині 97
2.3.2. Пам'ять на магнітній стрічці 98
2.3.3. Пам'ять на магнітних осердях 104
2.3.4. Пам'ять на магнітних дисках 107
2.3.4.1. Жорсткий диск 110
2.3.4.2. Механічна система і сервосистема 113
2.3.4.3. Головки запису/читання 117
2.3.4.4. Блок електроніки 126
2.3.4.5. Корпус жорсткого диску 126
2.3.5. Накопичувач на гнучких магнітних дисках 127
2.3.6. Накопичувач на змінних жорстких дисках 128
2.3.7. Пам'ять на циліндричних магнітних доменах (ЦМД) 128
2.4. Сучасні технології магнітного зберігання інформації 131
Бібліографічний список до розділу 2 134

РОЗДІЛ 3

ОПТИЧНІ ПРИСТРОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ ТЕХНІКИ **135**

Національний університет водного господарства та природокористування

3.1. Елементи оптики 135
3.1.1. Хвильові процеси *135*
3.1.2. Інтерференція світла *138*
3.1.3. Дифракція світла *138*
3.1.4. Поляризація світла *139*
3.1.5. Фотоефект *139*
3.1.6. Лазер і принцип його роботи *141*
3.1.7. Поняття про голографію *143*
3.2. Оптичні технології в комп'ютерній техніці 144
3.3. Принцип зчитування інформації з компакт-диску 146
3.4. Технології запису даних на компакт-диски 148
3.4.1. Технології запису інформації на CD *148*
3.4.2. Технології запису даних на DVD *153*
3.4.3. Технології запису даних на BD *158*
3.4.4. HD DVD *160*
3.5. Принцип роботи оптичного приводу читання/запису 160
3.6. Магнітооптичні (МО) технології в комп'ютерній техніці 163
3.7. Тривалість зберігання інформації на компакт-дисках 165
Бібліографічний список до розділу 3 ..... *167*

РОЗДІЛ 4

ПРИСТРОЇ ВВЕДЕННЯ ТА ВИВЕДЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ 168

4.1. Пристрої введення інформації 169
4.1.1. Клавіатура *169*
4.1.2. Маніпулятор типу «мишка» *172*
4.1.3. Джойстик *176*
4.1.4. Сканер *176*
4.1.5. Дігітайзер *180*
4.1.6. Тачпад *180*
4.1.7. Світлове перо *181*
4.1.8. Сенсорний екран *181*
4.1.8.1. Ємнісні сенсорні екрани *182*
4.1.8.2. Резистивні сенсорні екрани *184*
4.1.8.3. Хвильові (акустичні) сенсорні екрани *186*
4.1.8.4. Інші види сенсорних екранів *188*
4.1.8.5. Інші пристрої введення даних *188*
4.2. Пристрої виведення інформації. Монітори *188*
4.2.1. Електронно-променевий монітор, кінескоп *190*
4.2.2. Монітори електростатичної емісії *192*
4.2.3. Монітори на основі вуглецевих нанотрубок *194*
4.2.4. Електролюмінісцентні екрани *195*
4.2.5. Вакуумні флуоресцентні монітори *196*

Національний університет водного господарства та природокористування

4.2.6. Плазмові монітори *197*
4.2.7. Рідкокристалічні монітори *198*
4.2.8. Світлодіодні екрани *202*
4.2.9. Дисплеї на органічних світлодіодах *203*
4.2.10. 3D-монітори *206*
4.3. Проектори 210
4.3.1. Мікроелектромеханічні системи *210*
4.3.1.1. Мікродзеркальні проектори *210*
4.3.1.2. Проектори на основі технології TMA *211*
4.3.1.3. Проектори на основі GLV-технології *211*
4.3.1.4. Проектори на основі технології IMOD *212*
4.4. Електронний папір 213
4.4.1. Електронний папір на основі технології Gyricon *214*
4.4.2. Електронний папір на основі технології *215*
електрозмочування *215*
4.4.3. Електронний папір на основі нанотехнологій *216*
4.3.4. Електронний папір на основі електрофлюїдної технології *218*
4.4. Інші пристрої виведення інформації на екран 219
4.5. Принтери 219
4.5.1. Матричні (голчасті) принтери *220*
4.5.2. Рядкові принтери *221*
4.5.3. Кольорові голчасті принтери *221*
4.5.4. Струменеві принтери *222*
4.5.5. Кольорові струменеві принтери *224*
4.5.6. Термічні принтери *225*
4.5.7. Сублімаційні та термовоскові принтери *226*
4.5.8. Лазерні технології друку *227*
4.5.9. Лазерні кольорові принтери *229*
4.5.10. Світлодіодні принтери *230*
4.5.11. Твердочорнильні принтери *231*
4.5.12. 3D-принтери *233*
4.6. Інші пристрої виведення даних 241
Бібліографічний список до розділу 4 ..... *241*

РОЗДІЛ 5

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ В РЕАЛІЗАЦІЇ СКЛАДОВИХ ЧАСТИН КЛАСИЧНОГО КОМП'ЮТЕРА 243

5.1. Перспективні технології елементної бази 243
5.1.1. Транзистори на основі нанотрубок *244*
5.1.2. Тривимірні транзистори *246*
5.2. Перспективні види оперативної пам'яті 247

Національний університет водного господарства та природокористування

5.2.1. Оперативна пам'ять на основі напівпровідників *248*
5.2.2. Магнітна оперативна пам'ять *261*
5.2.3. Механічна оперативна пам'ять *263*
5.3. Перспективні технології магнітного зберігання 265
інформації 265
5.3.1. Система магнітного теплового зберігання даних *265*
5.3.2. Система структурованого (патернованого) зберігання даних *266*
5.3.3. Технологія AFC *268*
5.4. Перспективні оптичні технології в комп'ютерній техніці 269
5.4.1. Флуоресцентні технології *269*
5.4.2. Голографічна система запису та зберігання інформації *273*
5.4.3. Перспективні 3D-технології *279*
Бібліографічний список до розділу 5 ..... *282*

РОЗДІЛ 6

ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ КОМП'ЮТЕРІВ 283

6.1. Молекулярний комп'ютер 283
6.2. Оптичний комп'ютер 291
6.3. Нейрокомп'ютер 304
6.4. Квантовий комп'ютер 314
6.5. Біокомп'ютер 332
6.6. Інші розробки комп'ютерів 346
Бібліографічний список до розділу 6 ..... *346*