

1 ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ І НАПРЯМИ РОЗВИТКУ МІКРОЕЛЕКТРОНІКИ

1.1 Етапи розвитку електроніки

Електроніка (electronic) – наука про взаємодію електронів з електромагнітними полями і методи створення електронних приладів, пристроїв, в яких ця взаємодія використовується для перетворення електромагнітної енергії, передавання, оброблення і зберігання інформації.

Практичними завданнями електроніки є: розроблення електронних приладів і пристроїв, що виконують різні функції в системах перетворення і передавання інформації, в системах управління, в обчислювальній техніці, а також в енергетичних пристроях; розроблення наукових основ електронних приладів технології, що використовує електронні і іонні процеси.

На базі досягнень електроніки розвивається промисловість, яка випускає електронну апаратуру для різних видів зв'язку, автоматики, телебачення, радіолокації, обчислювальної техніки, систем управління технологічними процесами, світлотехніки, інфрачервоної техніки, рентгенотехніки і ін.

Головними етапами розвитку електроніки є *вакуумна (vacuum)* *твердотільна (solid)* і *квантова (quantum)* електроніка. Кожний етап поділяється на ряд розділів і напрямів. Розділ об'єднує комплекси однорідних фізико-хімічних явищ і процесів, які мають фундаментальне значення для розроблення багатьох класів електронних приладів даного етапу. Напрямок охоплює методи конструювання і розрахунку електронних приладів, подібних за принципами дії або виконуваними функціями.

Найшвидкими темпами розвивається твердотільна електроніка. Твердотільні електронні прилади пройшли шлях розвитку від довгохвильових транзисторів і детекторів НВЧ до великих і надвеликих інтегральних мікросхем, що є базою сучасної обчислювальної техніки і її численних застосувань. На цьому шляху довелося долати труднощі як принципового, так і технологічного характеру. Вибір і точне легування матеріалів, а також отримання конструкцій з мікронними і субмікронними розмірами викликали розвиток таких складних технологічних напрямів, як фото і електронна літографія, іонна імплантація. Створення інтегральних мікросхем і інших твердотільних приладів виявилось неможливим без отримання ряду нових *напівпровідникових (semi-conductor)* і *діелектричних (dielectric)* особливо чистих матеріалів.

Весь період розвитку елементної бази електроніки в радіо-радіоелектронній апаратурі можна поділити на чотири покоління:

а) дискретна електроніка на електровакуумних приладах; б) дискретна електроніка на напівпровідникових приладах; в) інтегральна мікroeлектроніка

на інтегральних мікросхемах; г) інтегральна мікроелектроніка на функціональних приладах.

У першому поколінні елементної бази електроніки роль активних елементів виконували різні електровакуумні прилади. Як пасивні елементи застосовували *резистори (resistor)*, *конденсатори (capacitor)*, котушки індуктивності, трансформатори, з'єднувачі, перемикачі і інші дискретні радіодеталі. Радіоелектронну апаратуру (РЕА) збирали з окремих дискретних елементів, які механічно зміцнювалися на спеціальних панелях і електрично з'єднувалися між собою дротяними провідниками за допомогою паяння або зварки. Пізніше була розроблена друкарські плати, які були надійнішими, забезпечували велику відтворюваність параметрів РЕА і відносну легкість автоматизації виробництва.

Друге покоління елементної бази електроніки з'явилося з винаходом *транзисторів (transistor)* в 1948 р. американськими ученими Бардіном і Браттейном. Перші транзистори були точковими, їх *p-n*-переходи одержували в місці контакту з напівпровідником двох заточених дротів. Проте точкові контакти були нестабільними. Цей недолік був усунений в сплавних транзисторах, отримання *p-n*-переходів яких засновано на взаємодії рідкої фази вплавленого електрода, що містить легуючий елемент, з твердим напівпровідником. Сплавні транзистори відрізнялися великими переходами, низькою відтворюваністю параметрів і неможливістю отримання базових областей шириною менше 10 мкм. Потім у виробництво були впроваджені транзистори з дифузійними переходами, параметри яких більш відтворювані, а ширина бази може бути зменшена до 0,2–0,3 мкм.

Третє покоління елементної бази електроніки – інтегральні мікросхеми – пов'язані з появою плівкової технології, яка в поєднанні з планарною технологією дала можливість в мікрооб'ємах твердого тіла виготовляти величезну кількість активних приладів.

Четверте покоління елементної бази електроніки складають функціональні мікросхеми, прилади і вузли. В структурі цих приладів важко або неможливо виділити елементи, еквівалентні традиційним дискретним компонентам (транзистори, *діоди (diode)*, *конденсатори (capacitor)*, *резистори (resistor)* і ін.). Прилади функціональної мікроелектроніки принципово відрізняються від елементів всіх попередніх поколінь. Тут проводиться інтеграція різних об'ємних і поверхневих фізичних явищ, завдяки чому може бути подоланий бар'єр конструктивної складності сучасних інтегральних мікросхем.

1.2 Основні положення і принципи мікроелектроніки

Мікроелектроніка дозволяє вирішити проблеми різкого підвищення надійності електронної апаратури, значного зменшення її габаритів, маси, споживаної енергії і вартості. В мікроелектроніці відмовляються від

застосування дискретних радіокомпонентів. Використовуючи досягнення фізики твердого тіла, металургії надчистих матеріалів і електронного машинобудування на основі якісно нової технології, в мікрооб'ємах твердого тіла формують складні електронні вузли – інтегральні мікросхеми.

Інтегральною мікросхемою (integral microcircuit) – називають мікроелектронний виріб, що виконує певну функцію перетворення і оброблення сигналів і має високу щільність пакування електрично з'єднаних елементів (або елементів і компонентів) і кристалів, які з точки зору вимог до випробувань, приймання, поставки і експлуатації розглядається як єдине ціле. Щільність пакування елементів в мікросхемі може досягати сотень тисяч елементів в одному кристалі.

Часто замість терміну *інтегральна мікросхема* (ІМС) використовуються терміни *інтегральна схема* (ІС) або просто *мікросхема*. Інтегральна мікросхема містить елементи і компоненти.

Елементом (element) інтегральної мікросхеми називається частина ІМС, що реалізовує функцію якого-небудь простого електрорадіо-елементу (наприклад, транзистора, діода, резистора, конденсатора) Ця частина виконана нероздільно від кристала ІМС (або її підкладки). Елемент не може бути відокремлений від ІМС як самостійний виріб, тому його не можна випробувати, упакувати і експлуатувати.

Компонентом (component) інтегральної мікросхеми також називається частина ІМС, що реалізовує функції якого-небудь електрорадіоелементу. Проте ця частина перед монтажем була самостійним виробом в спеціальній упаковці (комплектуючий виріб). Компонент у принципі може бути відокремлений від виготовленої ІМС.

Апаратуру, в якій в основному використовуються вироби мікроелектроніки, називають мікроелектронною. Підвищення надійності мікроелектронної апаратури пояснюється використанням при виготовленні інтегральних мікросхем спеціальної технології, при якій застосовуються особливо чисті матеріали, а весь процес виготовлення протікає в умовах, що виключають можливість забруднень. Крім того, внутрішні з'єднання інтегральних мікросхем захищені міцним покриттям, а їх малі габарити дозволяють створювати міцні і компактні вузли і блоки апаратури, здатні витримувати великі механічні навантаження. Висока надійність інтегральних мікросхем обумовлена також меншим числом з'єднань.

Застосування інтегральних мікросхем і мікропроцесорів дозволяє зменшити габарити апаратури і її масу на два порядки і більше. Це пояснюється тим, що елементи інтегральних мікросхем досить малі – їх розміри складають одиниці і десятки частки мікрометра. Малі габарити інтегральних мікросхем і мале споживання ними електричної енергії

дають можливість здійснити комплексну мікромініатюризацію всіх компонентів електронної апаратури.

Окрім інтегральних мікросхем мікроелектроніка охоплює область *функціональної електроніки*. При створенні функціональних приладів, мікросхем, вузлів і блоків електронної апаратури використовують явища в твердих тілах, пов'язані з механічними, тепловими випромінювальними і магнітними ефектами, а також явища в рідких тілах, пов'язані з електрохімічними процесами. При цьому відповідному матеріалу додають властивості, необхідні для виконання даної функції, а проміжний етап подання бажаної функції у вигляді еквівалентної електронної схеми опускають. Функціональні *прилади (device)*, *блоки (block)*, мікросхеми і елементи можуть виготовлятися не тільки на основі напівпровідників, але і на основі таких матеріалів, як надпровідники та сегнетоелектрики.

1.3 Нові напрямки розвитку мікроелектроніки

Розвиток сучасної мікроелектроніки характеризується розробленням великого числа типів інтегральних мікросхем, в першу чергу створенням великих і надвеликих інтегральних схем і мікропроцесорів, а також систем на одному кристалі. При цьому продовжуватиметься масовий випуск інтегральних мікросхем середнього рівня інтеграції для всіх видів радіоелектронної апаратури. Найбільш широко випускаються напівпровідникові ІМС. Гібридні ІМС і мікроскладення знаходять все більше застосування в аналоговій радіоелектронній *апаратурі (apparatus)* і апаратурі побутового призначення.

Характерним для всіх типів ІМС є зростання ступеня інтеграції. Напівпровідникові ІМС мають ряд принципових обмежень: граничне мінімальне значення потужності, здатної забезпечити функціонування приладу при 300°C, складає 1 мВт, граничне значення показника якості (час спрацьовування на потужність вмикання приладу) – 10-14 Дж, що визначає обмеження щодо щільності упакування приладів і їх швидкодії. Нові напрямки розвитку мікроелектроніки показані на рис. 1.1.

Функціональна мікроелектроніка. В основі створення ІМС лежить принцип елементної (технологічної) інтеграції, мікромініатюризації елементів (активних і пасивних) мікросхеми. В ІМС можна виділити області, що є активними (діоди, транзистори) і пасивними (резистори, конденсатори, котушки індуктивності) елементами. В інтегральній мікроелектроніці зберігається основний принцип дискретної електроніки, заснованої на розробленні електричної схеми за законами теорії ланцюгів. Цей принцип неминуче пов'язаний із зростанням числа елементів мікросхеми і міжелементних з'єднань у міру ускладнення виконуваних нею функцій.

Функціональна мікроелектроніка пропонує принципово новий підхід, що дозволяє реалізувати певну функцію апаратури без застосування стандартних базових елементів, ґрунтуючись безпосередньо на фізичних явищах в твердому тілі. В цьому випадку локальному об'єму твердого тіла додаються такі властивості, які потрібні для виконання даної функції, і проміжний етап подання бажаної функції у вигляді еквівалентної електричної схеми відпадає. Функціональні мікросхеми можуть виконуватися на основі не тільки напівпровідників, але і таких матеріалів, як надпровідники, сегнетоелектрики, матеріали з фотопровідними властивостями і ін. Для перероблення інформації можна використовувати явища, не пов'язані з електропровідністю (наприклад, оптичні і магнітні явища в діелектриках, закономірності розповсюдження ультразвуку і т.д.)

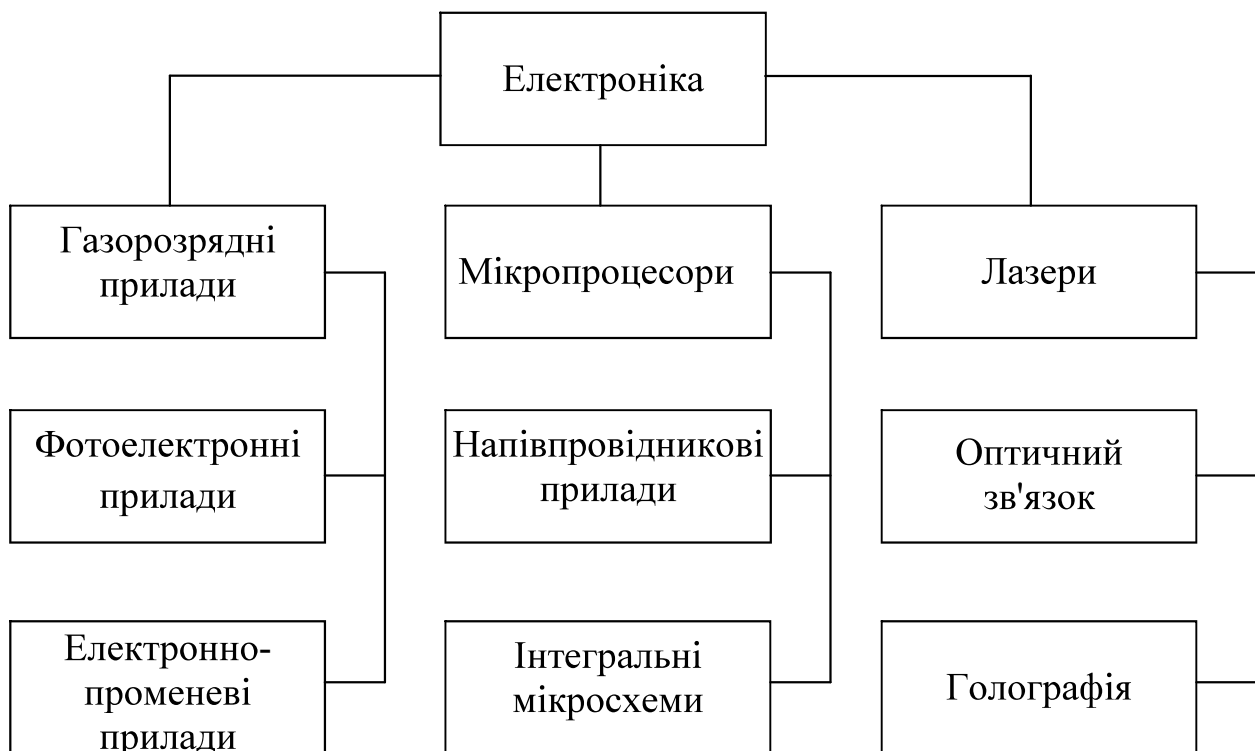


Рисунок 1.1 – Основні напрями розвитку мікроелектроніки

Оптоелектроніка. *Оптоелектронний прилад (optoelectronic device)* – пристрій, в якому при обробленні інформації відбувається перетворення електричних сигналів в оптичні і назад.

У оптоелектроніці звичайно використовується діапазон довжин хвиль 0,2 мкм – 0,2 мм. Як джерело випромінювання використовують світлові діоди на арсеніді галію як *фотоприймачі (photo receiver)* – кремнієві *фотодіоди (photo diode)* і *фототранзистори (photo resistor)*.

Істотна особливість оптоелектронних пристроїв полягає в тому, що елементи в них оптично зв'язані, але електрично ізольовані один від одного. Завдяки цьому легко забезпечується узгодження високовольтних і низьковольтних, а також високочастотних ланцюгів. Крім того, оптоелектронним пристроям властиві і інші властивості: можливість просторової модуляції *світлових пучків (light beam)*, що в поєднанні із змінами в часі дає три ступені свободи (в чисто електронних ланцюгах – дві); можливість значних розгалужень і перетину світлових пучків у відсутності гальванічного зв'язку між каналами; велике функціональне навантаження світлових пучків зважаючи на можливість зміни багатьох їх параметрів (амплітуди, напрямів, частоти фази, поляризації).

Оптоелектроніка охоплює два незалежні напрями: оптичне і електронно-оптичне. Оптичний напрям базується на ефектах взаємодії твердого тіла з електромагнітним випромінюванням. Воно опирається на *голографію (holography)*, *фотохімію (photochemistry)*, електрооптику і інші напрями розвитку. Оптичний напрям іноді називають *лазерним (laser)*.

Електронно-оптичний напрям використовує принцип фотоелектричного перетворення, реалізованого в твердому тілі за допомогою внутрішнього фото ефекту з одного боку, і електролюмінесценції – з іншого. В основі цього напрямку лежить заміна гальванічних і магнітних зв'язків в традиційних електронних ланцюгах оптичними. Це дозволяє підвищити щільність інформації в каналі зв'язку, його швидкодію, перешкодозахист.

Для мікроелектроніки становить інтерес в основному електронно-оптичний напрям, який дозволяє вирішити головну проблему інтегральної мікроелектроніки – істотно зменшити паразитні зв'язки між елементами як усередині однієї ІМС, так і між мікросхемами. На оптоелектронному принципі можуть бути створені безвакуумні аналоги електронних пристроїв і систем: дискретні і аналогові перетворювачі електричних сигналів (підсилювачі, генератори, ключові елементи, елементи пам'яті, логічні схеми, лінії затримки і ін.); перетворювачі оптичних сигналів – твердотільні аналоги електронно-оптичних перетворювачів, відиконів, електронно-променевих перетворювачів (підсилювачі світла і зображення, плоскі передавальні і відтворювальні екрани); пристрої відображення інформації (індикаторні екрани, цифрові табло і інші пристрої картинної логіки).

Магнетоелектроніка. Магнетоелектроніка – напрям функціональної мікроелектроніки, пов'язаний з появою нових магнітних матеріалів, що мають малу намагніченість насичення і з розробленням технологічних методів отримання тонких магнітних плівок. На перемагнічування тонкоплівкового елемента, товщина якого звичайно не перевищує товщини одного домена, потрібна енергія в 10-20 разів менша і час в 10-30 разів менший, ніж на перемагнічування феритового сердечника.

Найбільший інтерес становить використання тонкоплівкових металевих *магнітних матеріалів (magnetic materail)* в мікроелектронних запам'ятовуючих пристроях (ЗП), де як елемент пам'яті застосовуються тонкі магнітні плівки. Ці плівки дозволяють створювати надійні швидкодійні ЗП з малою потужністю управління. Вельми перспективні пристрої пам'яті на циліндрових магнітних доменах. *Щільність (density)* запису таких пристроїв досягає 10^5 біт/см² при швидкості оброблення інформації – $3 \cdot 10^6$ біт/с. Перевага цих пристроїв полягає також в тому, що магнітні домени можуть скласти систему ідентичних елементів, що реалізують функції логіки, пам'яті і комутації без порушення однорідності структури матеріалу носія інформації. Отже, кристал на магнітних доменах є обчислювальним середовищем, на поверхні якого за допомогою системи зовнішніх аплікацій можна розмішувати схеми, що реалізують різні комбінації логічних і перемикальних функцій і функцій пам'яті.

На тонких магнітних плівках можуть бути виконані не тільки *елементи пам'яті (elements memory)* ЕОМ, але також логічні мікросхеми, магнітні *підсилювачі (amplifier)* і інші прилади.

Широкі перспективи побудови різних функціональних пристроїв відкривають нові матеріали – магнітні напівпровідники. До них відносять магнетики, яким не властива металева природа електропровідності і з'єднання магнітних і немагнітних елементів. В наш час відомі такі магнітні напівпровідники, як халькогеніди Європія, халькогенідні шпінелі хрому, сильнолеговані ферити (наприклад, залізоітрієвий гранат, легований кремнієм) і т. д.

Акустоелектроніка. *Акустоелектроніка (acoustic electronics)* – напрям функціональної мікроелектроніки, зв'язаний з використанням механічних резонансних ефектів, п'єзоелектричного ефекту, а також ефекту, заснованого на взаємодії електричних полів з хвилями акустичних напруг в *п'єзоелектричному (piezoelectricity)* напівпровідниковому матеріалі. Акустоелектроніка займається перетворенням акустичних сигналів в електричні і електричних сигналів в акустичні.

П'єзоелектричні перетворювачі використовують для збудження за допомогою електричних сигналів акустичних хвиль в ультразвукових лініях затримки і зворотного перетворення їх в електричний сигнал.

Новим етапом в розвитку акустоелектроніки є використання поверхневих акустичних хвиль. Поверхневі хвилі мають всі властивості об'ємних хвиль, доступні для дії на всьому шляху, їх розповсюдження уздовж лінії, а технологія виготовлення *ультразвукових (ultrasound)* ліній з поверхневими хвилями сумісна з технологією виготовлення інтегральних мікросхем.

Хемотроніка. *Хемотроніка (hemothronick)* як новий науковий напрям виник на стику двох напрямів, що розвиваються: електрохімії і

електроніки. На першому етапі свого розвитку хемотроніка як технічна галузь була покликана розробляти загальні теоретичні і технологічні принципи побудови електрохімічних перетворювачів. При цьому створювалися в основному аналоги електронних приладів з тією різницею, що носіями заряду були не електрони у вакуумі, газі або твердому тілі, а іони в розчині. Так були створені електрохімічні *випрямлячі (rectifier)*, *інтегратори (integrator)*, підсилювачі. Рухливість іонів в розчині набагато менша, ніж рухливість електронів в газі або твердому тілі, тому електрохімічні прилади є низькочастотними за своєю фізичною природою, проте, вони мають і ряд переваг перед електронними приладами.

Перспектива розвитку хемотроніки – це створення інформаційних систем і систем керування на рідинній основі, а в майбутньому – біоперетворювачів інформації. Для подальшого успішного розвитку хемотроніки потрібні фундаментальні дослідження не тільки фізики рідини, але також складних фізико-хімічних і електрохімічних процесів, що протікають в рідинах і на межі рідких фаз.

У наш час на основі електрохімічних явищ створений ряд хемотронних приладів: діоди-випрямлячі, інтегратори, підсилювачі, електрокінетичні перетворювачі, твердофазні електрохімічні перетворювачі і ін.

Кріоелектроніка. *Кріоелектроніка (cryogens electronics)* – напрям електроніки і мікроелектроніки охоплюючий дослідження взаємодії електромагнітного поля з електронами в твердих тілах при кріогенних температурах і створення електронних приладів на їх основі. До кріогенних температур відносять температури, при яких настає глибоке охолодження, тобто температури від 80 до 0К. В кріоелектронних приладах використовуються різні явища: надпровідність металів і сплавів, залежність діелектричної проникності деяких діелектриків від напруженості електричного поля, поява у металів при температурі нижче 80 К напівпровідникових властивостей при аномально високій рухливості носіїв заряду і ін. Принципи кріоелектроніки використовують для побудови ряду приладів (кріотрони, квантові і параметричні підсилювачі, резонатори, фільтри, лінії затримки і ін.). Найпоширенішим з цих приладів є кріотрон, що є перемикальним кріогенним елементом, заснованим на властивості надпровідників стрибком змінювати свою провідність під впливом критичного магнітного поля. Дія кріотрона аналогічно роботі *ключа (key)* або *реле (relay)*. Кріотрон може знаходитися тільки в одному з двох станів: або в надпровідному, або з малою провідністю.

Час переходу кріотрона з одного стану в інший складає декілька часток мікросекунди, тобто цей прилад має високу швидкодію. Кріотрони мікромініатюрні: на 1 см² площі може бути розміщено до декількох тисяч кріотронів. На основі кріотронів можна створити кріотронові ВІС, виконуючі логічні функції, функції запам'ятовування з неруйнуючим

прочитуванням, керуванням і функції міжелементних з'єднань. Проте необхідність роботи в умовах глибокого охолодження і пов'язані з цим технологічні труднощі різко обмежують використання кріотронів. Підсилювачі, принцип дії яких заснований на використуванні кріоелектронних явищ, служать, головним чином, для приймання слабких сигналів НВЧ. Вони мають нікчемно малий рівень шумів, широку смугу пропускання (десятки гігагерц) і високе посилення (до 10000). Шумові температури кріоелектронних підсилювачів досягають одиниць і частки одиниці кельвіна.

Діелектрична електроніка. В мікроелектроніці широко використовуються тонкі плівки металів і діелектриків. При переході до тонких плівок виникають нові явища і закономірності, що не виявляються в масивних зразках і структурах. Для плівок типова можливість створювати керовані емісійні струми, аналогічні струмам у вакуумі. При контакті неметалевого твердого тіла з металом, що має меншу роботу виходу, приконтатна область збагачує вільними носіями заряду, емітованих з металу. В масивних зразках ці вузькі приконтатні області підвищеної провідності не впливають на струмовий режим, визначуваний концентрацією вільних носіїв заряду в *об'ємі тіла (volume bodies)*. В тонких же плівках емітовані носії заряду можуть домінувати у всьому об'ємі, визначаючи закономірності струмових явищ. З точки зору теорії розсіювання носіїв заряду будь-яке неметалієве тверде тіло в товстому *шарі (sheet)* – напівпровідник, а в тонкому шарі – діелектрик.

Ефекти, пов'язані з протіканням емісійних струмів в неметалевих твердих тілах, не охоплюються ні фізикою напівпровідників, ні фізикою діелектриків. Закономірності цих явищ, а також приладові і схемні розробки на їх основі складають зміст нового розділу фізики твердого тіла і електроніки – діелектричної електроніки.

Якщо між двома металевими *електродами (electrode)* помістити тонку (порядку 1 – 10 мкм) діелектричну плівку, то мігруючі з металу електрони заповнять всю товщину плівки і *напруга (voltage)*, прикладена до такої системи, створять *струм (current)* в діелектриці.

Простими приладами діелектричної електроніки є діоди і транзистори, що мають характеристики, аналогічні характеристикам електровакуумних приладів.

Ці прилади вдало поєднують ряд властивостей напівпровідникових і електровакуумних приладів. Вони мікромініатюрні, малоінерційні, мають низький рівень шумів, малочутливі до змін температури і радіації.

Квантова мікроелектроніка. В квантовій електроніці вивчають методи посилення і генерації електромагнітних коливань, засновані на використуванні ефекту вимушеного випромінювання, а також властивості квантових підсилювачів, *генераторів (generator)* і їх використання. Найбільший практичний інтерес становлять квантові

генератори світла (лазери), які випромінюють світлові хвилі з дуже високою спрямованістю. Це властивість широко використовується в оптичних лініях зв'язку.

У квантовій мікроелектроніці все більше використання знаходять прилади, засновані на ефектах Гана і Джозефсона.

Ефект Гана (effect Ghana) – це явище генерації високочастотних коливань електричного струму в напівпровіднику у разі подання до зразка постійної напруги, що перевищує деяке критичне значення. Частота коливань залежить від довжини зразка і лежить в діапазоні декількох гігагерц.

Ефект Джозефсона (effect Dzgozefsona) полягає в тому, що через тонку, порядку 2 нм, діелектричний прошарок між надпровідними шарами при низьких температурах навіть у відсутності різниці потенціалів може протікати тунельний струм, керований порівняльно слабкими зовнішніми сигналами. Значення параметрів приладів, заснованих на ефекті Джозефсона, дуже високі відносно всіх видів елементів, що запам'ятовують і логічних: швидкодія окремих приладів 20 – 30 пс, розсіювана потужність 100нВт, тобто показник якості приладу 10-18 Дж, що в 10^6 разів кращий, ніж в інтегральних мікросхем.

Біоелектроніка. *Біоелектроніка (bioelectronics)* – один з напрямів біоніки, вирішує задачі електроніки на основі аналізу структури і життєдіяльності живих організмів. Біоелектроніка охоплює проблеми вивчення нервової системи людини і тварин і моделювання нервових клітин (нейронів і нейронних сіток) для подальшого вдосконалення електронної обчислювальної техніки, техніки зв'язку, розроблення нових елементів і пристроїв автоматики і телемеханіки.

Дослідження *нервової системи (nervous system)* показали, що вона має ряд цінних особливостей і переваг перед найдосконалішими обчислювальними пристроями. Основними з них є:

а) досконале і гнучке сприйняття зовнішньої інформації незалежно від форми, в якій вона поступає;

б) висока надійність, значна перевищуюча надійність технічних систем (останні виходять з ладу при обриві в ланцюзі одного або декількох елементів; при загибелі ж мільйонів нервових клітин з мільярдів клітин, що становлять головний мозок, роботоздатність системи зберігається);

в) мікромініатюрність елементів (при кількості елементів 10^{10} – 10^{11} об'єм мозку людини складає 1,5 дм³; сучасний пристрій на транзисторних структурах з таким же числом елементів зайняв би об'єм в декілька сотень кубічних метрів);

г) економічність роботи (споживання енергії мозком людини не перевищує декількох десятків ватів);

д) високий ступінь *самоорганізації (self organization)*, швидке пристосування до нових ситуацій, до зміни програм діяльності.

Нервова система складається з клітин, що одержали назву нейронів. Нейрони, де б вони не знаходилися, мають однакову структуру і зразково однакові логічні характеристики. Вони є найбільш універсальним логічним елементом. На основі нейронів будуються прості і впорядковані нейронні сітки, вказуючі на той, поки що недосяжний в техніці факт, що за допомогою єдиного елемента можна побудувати систему, здатну виконувати складні завдання, які звичайно вирішує людина.

Для технічної реалізації ряду складних нейронних сіток в першому наближенні достатній нейроноподібний елемент, що має аналогічні властивості і за своїми функціональними можливостями наближається до біологічних рецепторних і деяких видів центральних нейронів. Основним заданням при створенні такого нейроноподібного елемента є реалізація залежності *амплітуди (amplitude)* імпульсного вихідного сигналу від сумарного імпульсного «збудження» на вході. Дослідження показали, що модель нейрона може бути виконана у вигляді двох інтегральних мікросхем на МДН-транзисторах.

У наш час ведуться великі дослідження в різних напрямках біоелектроніки. Результати досліджень показують, що використання явищ живої природи в електроніці може привести до нової науково-технічної революції в цій області техніки.

Негатроніка (negatron). Цей напрямок електроніки пов'язаний з теорією і практикою створення і застосування негатронів – електронних приладів, що мають у визначеному режимі негативне значення основного диференціального параметра (негативних ємності, індуктивності та опору). Зараз розроблені різні види негатронів. Тільки напівпровідникових негатронів створено більше двох десятків різновидів. Серед них найпотужніші надвисокочастотні (НВЧ) прилади – лавинопролітні діоди, надшвидкодіючі ключі на лавинних транзисторах, найпотужніші струмові напівпровідникові перемикачі на диністорах і тиристорах.

Освоєння НВЧ-діапазону дало поштовх до пошуку нових фізичних ефектів і напівпровідникових приладів, що мають негативний опір. Зусилля насамперед були спрямовані на створення напівпровідникових негатронів, що мають негативний опір на надвисоких частотах у надвисокочастотному діапазоні. Початком пошуку шляхів створення таких НВЧ-приладів було покладено статтю Шоклі, опубліковану в 1954 році. Автор викладає ідею двохелектродного приладу з негативним опором, що виникає завдяки ефекту часу прольоту. Як перший приклад він розглядає "діод із затримкою неосновних носіїв". У запропонованій ним p^+-n-p чи (n^+-p-n) -структурі, неосновні носії, що інжектуються із p^+ - n -переходу, дрейфують до іншого $p-n$ -переходу, затримуючись при цьому на час, рівний часу прольоту. Інший прилад, запропонований Шоклі, являє собою $p-n-p$ структуру, що використовується в режимі прокола, щоб забезпечити

її уніполярність. Ці дві структури надзвичайно схожі на *інжекційно-пролітні діоди (Injection polity diode)*, що з'явилися пізніше, (ІПД).

У тій же статті Шоклі обговорює можливість створення двохелектродного приладу, що являє собою просто однорідний напівпровідник, у якому під дією сильного електричного поля можуть спостерігатися відхилення від закону Ома, що приводять до виникнення негативного диференціального опору. Відхилення від *закону Ома (law ohm)* виражається в зниженні швидкості носіїв зі збільшенням напруженості поля, тобто в появі ділянки негативної диференціальної рухливості. Однак практичної реалізації ця ідея не одержала через низку теоретичних недоробок. І тільки в 1963р. Ганом були отримані перші експериментальні дані про існування пролітних коливань, пов'язаних з цією властивістю у GaAs і InP. А прилади, що використовують цей ефект, одержали найменування "діоди Гана" чи "прилади на ефекті об'ємного негативного опору".

Цікавий двохелектродний прилад з негативним опором, діючий на новому принципі – тунельний діод, був відкритий у 1957 р. японським фізиком Есакі. На прямій ділянці ВАХ дуже вузького германієвого *p-n*-переходу (тобто переходу, створеного на сильнолегованому матеріалі) була виявлена ділянка негативного опору скінченної величини. Така характеристика виходить в результаті польової емісії (тунелювання) електронів через вузький збіднений шар. Варто помітити, що тунельний діод не виправдав надій, оскільки від нього не вдалося одержати великої вихідної потужності.

У 1958 р. Рід запропонував використовувати для генерації НВЧ потужності діод з багатоскладовою n^+p-p^- - структурою. У цьому приладі використовується поєднання ефектів лавинного множення, заснованого на ударній іонізації, і часу прольоту електронів. Тому прилад був названий *ІМПАТТ-діод (Impact Avalanche and Transit Time)*. Однак запропонована ним спеціальна конструкція діода виявилася занадто складною, її вдалося втілити в життя тільки в 1964р.

В СРСР ці прилади одержали назву "лавинопролітні діоди (ЛПД)" і були відкриті А.С. Тагером і його співробітниками в 1959 р. За кордоном перше повідомлення про практичну реалізацію ЛПД було опубліковано в 1965 році.

Подальшим розвитком ЛПД є *ТРАПАТТ-діод (Trapped Plasma Avalanche-and-Transit Time)*, що означає "лавинопролітний діод із захопленням плазми"). Для реалізації ТРАПАТТ-режима, відкритого в 1966р. необхідна дуже складна взаємодія між приладом і НВЧ-схемою. Наприклад ТРАПАТТ – підсилювач вимагає настроювання за гармоніками і субгармоніками, а також використання ЛПД-режиму для запуску. Незважаючи на складність самого приладу і відповідної схеми, ТРАПАТТ-діоди відіграють провідну роль у фазованих антенних ґратках (ФАГ),

оскільки забезпечують можливість одержання високої імпульсної потужності на НВЧ (більше 100 Вт), більшого коефіцієнта заповнення (1 - 20%), високого ККД (більше 25%) і ширини смуги пропускання в підсилювачах не менше 15%. Однак цим приладам властиві і деякі недоліки:

- процесу ударної іонізації властиві значні шуми, тому підсилювачі і генератори на їхній основі будуть також мати великі шуми;
- процес ударної іонізації вимагає більшої потужності для одержання значних електричних полів.

В 1971 р. вперше була отримана генерація у НВЧ-діапазоні за допомогою інжекційно-пролітних діодів (ІПД), теоретичні основи роботи якого були обґрунтовані ще в 1954 році Шоклі. У ряді публікацій ці діоди одержали назву "*БАРИТТ-діоди*" (*Barrier Injection Transit Time Diodes*). Маючи, як і ЛПД, динамічний негативний опір у діапазоні НВЧ, у них не використовується режим лавинного множення носіїв і, отже, відсутні недоліки, властиві ЛПД.

Всі вищерозглянуті діоди з негативним опором призначені для роботи в діапазоні НВЧ і здатні працювати при відносно невеликих значеннях потужності сигналу і робочих струмах.

Загальним істотним недоліком усіх вищерозглянутих напівпровідникових негатронів є залежність їхнього негативного опору від фізичних властивостей напівпровідникових кристалів і фізичних процесів у них. А прагнення реалізувати 100% внутрішній позитивний зворотний зв'язок всередині кристала накладає тверді вимоги до технології виготовлення таких негатронів, створює труднощі у виробництві ідентичних приладів і подальшому їхньому застосуванні. Ці недоліки при створенні транзисторних негатронів були частково усунені шляхом реалізації комбінованого 100% позитивного зворотного зв'язку: частково внутрішнього, за рахунок тимчасової затримки неосновних носіїв у базі транзистора; частково, за рахунок введення ланцюга зовнішнього зворотного зв'язку. Початком цього напрямку, очевидно, варто вважати 1956 р., коли Ямагучі (J. Yamaguchi) досліджував негатрон на транзисторі з загальним колектором і індуктивним ланцюгом зворотного зв'язку між базою і колектором. В подальшому були досліджені різні модифікації такого негатрона, що одержав назву "індуктивний транзистор", тому що він виявився перспективним як напівпровідниковий аналог індуктивності. Слід зазначити успішне застосування цього негатрона в різних аналогових НВЧ-пристроях (*активних фільтрах (active filter)*, генераторах, *перетворювачах частоти (frequency converter)*, мультиплексорах, активних антенах та ін.).

Іншим напрямком негатроніки, спрямованим на подолання недоліків однокристальних напівпровідникових негатронів, є створення аналогів негатронів на базі різних схемотехнічних комбінацій активних приладів. Їх

можна поділити на три групи. У першій групі об'єднуються транзисторні аналоги, що складаються з транзисторів однієї структури. Другу групу складають аналоги, виконані на транзисторах різної структури, але не складовий еквівалент *p-n-p-n*-структури. Третя група складається з транзисторних еквівалентів *p-n-p-n*-структури. Використання в таких схемах перехресних зв'язків обмежує їхнє застосування частотами до 1 ГГц.

Зокрема, з бурхливим розвитком твердотільної НВЧ-електроніки особливо гостро постало завдання мініатюризації частотовибіркових кіл. Розв'язання завдання шляхом використання об'ємних резонаторів, відрізків лінії передачі, сегнетоелектричних і феритових резонаторів неможливе, тому що їхня добротність зменшується зі зменшенням розмірів. Коливальні контури на базі негatronів таких недоліків не мають, що дозволяє розв'язувати задачу з реалізації в одному кристалі декількох десятків високودобротних коливальних контурів (фільтрів, LC-генераторів і т.д). Крім R-негатронів ведуться дослідження зі створення і застосування С- і L-негатронів. Це прилади або їхні схемотехнічні аналоги, що мають за певних умов негативну диференціальну ємність $C = \partial Q / \partial U < 0$ або індуктивність $L = \partial \psi / \partial i < 0$, відповідно. Практичне застосування таких негatronів у наш час не одержало широкого поширення і вимагає подальших досліджень і пошуку напрямків їхнього ефективного використання.

9 ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

9.1 Диэлектрические слои для полупроводниковых ИМС

Диэлектрические пленки широко используются в технологии интегральных микросхем для различных целей:

- маскирование при диффузии и ионном легировании, окислении и травлении;
- изоляция приборов в схеме, контактов и межсоединений;
- в качестве подзатворного диэлектрика в МДП ИС;
- пассивация поверхности интегральных структур.

Для получения диэлектрических слоев диоксида кремния SiO_2 , наиболее широко применяемого в полупроводниковых ИМС, используют методы:

- термического окисления;
- пиролитического осаждения;
- плазменного и электролитического анодирования;
- ионного распыления.

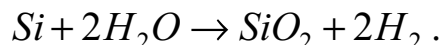
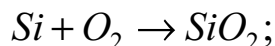
Второй диэлектрик, используемый в полупроводниковой технологии, нитрид кремния Si_3N_4 получают пиролитическим осаждением и ионным распылением. Так как наиболее широкое применение нашел диоксид кремния, полученный термическим окислением, рассмотрим физико-химические основы этого метода.

9.2 Термическое окисление кремния

Механизм роста окисла и кинетика окисления

Особенности роста пленки и кинетики окисления кремния определяются структурой и свойствами пленки SiO_2 . Окисел обладает открытой пространственно-полимерной структурой с прочными связями $\equiv Si-O-Si \equiv$. Это один из лучших диэлектриков с шириной запрещенной зоны более 8 эВ. Рост окисла

происходит в атмосфере сухого кислорода или паров воды согласно реакциям



При этом происходит перераспределение валентных электронов между кремнием и кислородом и образуется ковалентная связь между атомами. Рост окисла сопровождается перемещением границы двух фаз $Si - SiO_2$ в глубь полупроводника. Однако происходящее при этом расширение объема приводит к тому, что внешняя поверхность SiO_2 не совпадает с первоначальной поверхностью кремния (рис. 9.1).



Рис. 9.1 – Рост оксида кремния

Если учесть значение плотности и молекулярной массы Si и SiO_2 , то рост пленки SiO_2 толщиной x происходит за счет кремния толщиной $0,44 x$, т.е. можно считать, что толщина окисла примерно в два раза больше толщины поглощаемого им кремния.

Слой окисла толщиной 2–8 нм образуется на поверхности кремния уже при комнатной температуре, но малая толщина окисла и низкое качество не позволяют его использовать в технологии ИС. Высококачественный окисел может быть получен лишь при термическом окислении кремния при температуре 700–1200 °С. Принятая в настоящее время модель окисления основана на диффузии окисляющих частиц через растущий окисел и их взаимодействии с кремнием на границе двух фаз $Si - SiO_2$.

Модель окисления

Кинетика процесса окисления описывается моделью Дила и Гроува [14]. Она применима для температурного диапазона 700–1300 °С, парциальных давлений O_2 $(0,2-1,0) \cdot 10^5$ Па (возможно, и для более высоких значений) и толщины окисных пленок 0,03–2 мкм в атмосфере, состоящей из кислорода и (или) паров воды. Процесс окисления состоит из двух этапов – массопереноса окислителя в растущем окисле и протекания химической реакции кремния с окислителем (кислородом или парами воды).

В соответствии с моделью Дила и Гроува процесс окисления описывается параболическим или линейным законом. При большом времени окисления имеет место следующий закон:

$$x^2 = Bt, \quad (9.1)$$

где x – толщина окисла;

B – параболическая константа скорости окисления;

t – время окисления.

При коротком времени окисления справедлив линейный закон

$$x = \frac{B}{A} t + \tau,$$

где B/A – линейная константа скорости окисления;

τ – величина, соответствующая сдвигу по временной оси, которая учитывает наличие первоначального окисла толщиной x_0 .

Уравнения (9.1) и (9.2) соответствуют случаям протекания реакции окисления с диффузионным и кинетическим контролем.

Достаточно простая модель окисления Дила и Гроува обеспечивает хорошее совпадение теоретических результатов с экспериментальными данными для окисления во влажном и сухом кислороде. Эксперименты проводились при окислении в очищенном сухом кислороде (содержание паров воды меньше $5 \cdot 10^{-4}$ %) и во влажном кислороде (парциальное давление паров воды $85 \cdot 10^3$ Па). Учитывая основные уравнения, описывающие процесс роста окисла (9.1) и (9.2), Дил и Гроув получили значения констант A и B

для процессов окисления в сухом и влажном кислороде, приведенные в табл. 9.1 и 9.2 [14]. При окислении во влажном кислороде не наблюдается сдвига по временной оси, т.е. при $t = 0$ толщина окисла $x_0 = 0$ и, соответственно, $\tau = 0$.

Таблица 9.1 – Константы скорости окисления кремния в сухом кислороде

Температура окисления, °С	A , мкм	Параболическая константа скорости окисления B , мкм ² /ч	Линейная константа скорости окисления B/A , мкм/ч	τ , ч
1200	0,040	0,045	1,12	0,027
1110	0,090	0,027	0,30	0,076
1000	0,165	0,0117	0,071	0,37
920	0,235	0,0049	0,0208	1,40
800	0,370	0,0011	0,0030	9,0
700	0,00026	81,0

Таблица 9.2 – Константы скорости окисления кремния во влажном кислороде

Температура окисления, °С	A , мкм	Параболическая константа скорости окисления B , мкм ² /ч	Линейная константа скорости окисления B/A , мкм/ч	τ , ч
1200	0,05	0,720	14,40	0
1100	0,11	0,510	4,64	0
1000	0,226	0,287	1,27	0
920	0,50	0,203	0,406	0

При окислении в сухом кислороде при $t = 0$ толщина окисла x_0 примерно равна 0,025 мкм, поэтому при расчетах следует учитывать величину τ .

Технология выращивания термического окисла и технологические параметры, влияющие на процесс роста окисла.

Выбор метода окисления определяется необходимой толщиной и свойствами окисла. Относительно тонкие пленки с хорошими диэлектрическими свойствами и минимальным зарядом на границе диэлектрик-полупроводник обычно выращиваются в сухом кислороде. При формировании толстых окисных пленок ($>0,5$ мкм) используют окисления во влажном кислороде при атмосферном и повышенном давлениях. Общим недостатком окисления в парах воды является низкая плотность пленок, которая ухудшает их защитные свойства. Низкая плотность (около 2 г/см^3) связана с их пористостью из-за наличия водорода и гидроксильных групп OH . Компромиссным решением является окисление во влажном кислороде, когда энергия активации меняется от $2,24 \cdot 10^{-19}$ Дж (для сухого кислорода) до $1,28 \cdot 10^{-19}$ Дж (для водяного пара). При этом скорость роста окисла меняется в широком диапазоне и при достаточно больших скоростях достигается плотность пленок $2,18\text{--}2,2 \text{ г/см}^3$.

Кроме того, практика показала, что можно получить качественные пленки при удовлетворительной производительности процесса, если чередовать этапы окисления в сухом и влажном кислороде. При такой комбинированной технологии в начале процесса в течение 15 минут наращивается тонкий окисел в сухом кислороде. Затем 1 ч 45 мин кремний окисляется во влажном кислороде. И, наконец, в течение 1 часа подложки выдерживаются в сухом кислороде. При этом происходит уплотнение оксида кремния.

Метод окисления реализуется в кварцевых или кремниевых диффузионных трубах в атмосфере сухого или влажного кислорода при температуре $(800\text{--}1200)^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$. При окислении в сухом кислороде используется очищенный осушенный кислород с содержанием паров воды меньше $5 \cdot 10^{-4} \%$. При окислении во влажном кислороде кислород барботируется через подогретую

до 95 °С воду, при этом парциальное давление паров воды составляет $85 \cdot 10^3$ Па [14].

Основным технологическим параметром, влияющим на процесс термического окисления, является температура окисления. В модели Дила-Гроува параболическая константа скорости B имеет размерность коэффициента диффузии ($\text{см}^2\text{с}^{-1}$) и определяет процесс массопереноса окислителя через растущую пленку. Этот процесс подчиняется статистике Больцмана и, следовательно, температурная зависимость B описывается уравнением Аррениуса. Причем энергии активации для константы B при окислении в сухом кислороде и в парах воды соответственно равны $1,93 \cdot 10^{-19}$ и $1,14 \cdot 10^{-19}$ Дж. Эти значения сравнимы с величинами энергии активации для коэффициентов диффузии кислорода и паров воды в кварцевом стекле (равными соответственно $1,87 \cdot 10^{-19}$ и $1,28 \cdot 10^{-19}$ Дж). Кварцевое стекло имеет структуру, аналогичную структуре термического окисла. Более поздними экспериментами, однако, было установлено, что эти значения энергии справедливы лишь при температурах окисления выше 1000 °С.

Несмотря на то, что коэффициент диффузии паров воды значительно меньше коэффициента диффузии кислорода, параболическая константа B в парах воды больше, чем в сухом кислороде, так как равновесная концентрация молекул кислорода C^* меньше, чем равновесная концентрация молекул воды. При температуре 1000 °С $C^*_{\text{O}_2} = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, а $C^*_{\text{H}_2\text{O}} = 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. В результате скорость роста окисла во влажном кислороде много больше скорости роста в сухом кислороде.

Кроме температуры окисления, скорость роста окисла зависит от парциального давления окислителя, т.к. величины B и B/A зависят от концентрации окислителя в газовой фазе C^* , которая, согласно закону Генри, непосредственно определяется парциальным давлением

$$C^* = H p, \quad (9.3)$$

где p – парциальное давление окислителя в газовой фазе вблизи поверхности окисла;

H – постоянная Генри, зависящая от давления и температуры.

Расчеты показывают нижеприведенную зависимость C^* от давления (табл. 9.3).

Таблица 9.3 – Значения концентрации окисляющих частиц при разных давлениях

P , Па	$C_{O_2}^*$, см ⁻³	$C_{H_2O}^*$, см ⁻³
$1,0 \cdot 10^5$	$5,2 \cdot 10^{16}$	$3,0 \cdot 10^{19}$
$5,0 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^{17}$	$9,0 \cdot 10^{19}$
$1,0 \cdot 10^6$	$4,0 \cdot 10^{17}$	$2,0 \cdot 10^{20}$
$2,0 \cdot 10^6$	$5,0 \cdot 10^{17}$	$3,0 \cdot 10^{20}$
$2,5 \cdot 10^6$	$5,2 \cdot 10^{17}$	$3,4 \cdot 10^{20}$

Таким образом, при увеличении давления можно снизить температуру окисления при обеспечении той же скорости роста окисла.

Процесс роста окисла также определяется неконтролируемыми примесями, которые находятся в окружающей атмосфере. Наиболее важными являются пары воды и ионы натрия, проникающие через стенки кварцевых труб.

Как указывалось выше, содержание воды в сухом кислороде не превышает обычно 10^{-4} %, тогда как за счет неконтролируемой диффузии воды через стенки труб ее содержание повышается примерно на порядок (до $1,5 \cdot 10^{-3}$ %). Это приводит к увеличению скорости роста на 20 %.

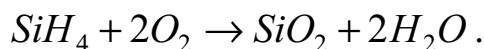
Содержание ионов натрия в окружающей атмосфере составляет $10^{16} - 10^{18}$ см⁻³, а учитывая, что коэффициент диффузии ионов натрия в кварцевом стекле 10^{-6} см²с⁻¹, то кварц фактически прозрачен для натрия. Увеличение концентрации Na^+ приводит к росту скорости окисления, а кроме того, Na^+ , изменяя структуру окисла, ускоряет диффузию и увеличивает концентрацию молекулярного кислорода в окисле, что существенно ухудшает свойства диэлектрика. Появление заряженных ионов натрия, имеющих высокую подвижность в оксиде кремния даже

при низких температурах (менее 100 °С), вызывает в последующем нестабильность характеристик интегральных структур, особенно в МДП-транзисторах и схемах на их основе. Для уменьшения влияния Na^+ , улучшения диэлектрических свойств и снижения плотности положительного заряда в окисел вводят галогены, чаще всего хлор, который переводит некоторые примеси на поверхности кремния в летучие соединения, способствует снижению концентрации дефектов упаковки. Хлор вводят в реактор в виде газообразного HCl . Концентрация хлора обычно не превышает 1–4 %, при этом скорость окисления увеличивается, константы линейного и параболического роста с увеличением давления хлора возрастают по линейному закону, однако этот рост быстро насыщается.

9.3 Химическое осаждение диэлектрических пленок

Осаждение диэлектрических пленок на поверхность кремниевой пластины взамен их окисления позволяет, во-первых, уменьшить температурное воздействие на пластину и, во-вторых, использовать широкий круг материалов, которые обладают наилучшими диэлектрическими и защитными свойствами. Иногда (например, при получении межслойной изоляции или пассивирующих покрытий) метод термического окисления вообще неприменим.

Для получения пленок оксида кремния широко используют реакцию окисления силана



Процесс протекает при температурах 200–350 °С. Реагенты (SiH_4 и O_2) поступают в реактор сильно разбавленные аргоном, что позволяет строго контролировать процесс. Скорость роста составляет 0,1 мкм/мин.

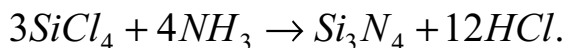
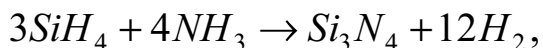
Наряду с окислением силана широко используют реакцию термического разложения кремнийорганических соединений, в частности, тетраэтоксисилана $Si(OC_2H_5)_4$. Процесс протекает при температуре 750 °С по реакции



Скорость осаждения оксида кремния при этом составляет 0,03 мкм/мин. Во избежание загрязнения пленки продуктами разложения процесс лучше проводить не в потоке газа-носителя, а в вакууме при давлении порядка 10 Па.

Помимо оксида кремния в полупроводниковых ИС используют нитрид кремния Si_3N_4 . Благодаря высокой плотности этого диэлектрика легирующие примеси B, P, As имеют в нем малый коэффициент диффузии, что позволяет использовать его в качестве маскирующего слоя уже при толщине 0,2 мкм. Высокое значение диэлектрической постоянной ($\epsilon = 6-8$) и практически полная непроницаемость для ионов щелочных металлов обусловили применение нитрида кремния в качестве дополнительного слоя для подзатворного окисла в МДП-структурах. Кроме того, нитрид кремния служит надежной маской при локальном окислении кремния.

Для получения нитрида кремния используют следующие реакции



Первая реакция протекает при температуре 650–950 °С, а вторая – при температуре 1000–1200 °С. Для получения пленок используют установки эпитаксиального наращивания или однозонные диффузионные печи. Скорость роста пленок нитрида кремния составляет 0,01–0,02 мкм/мин.

і збуджується аномальний тліючий розряд. Наявність замкнутого магнітного поля біля поверхні мішені, що розпилюється, дає можливість локалізувати плазму розряду безпосередньо біля мішені. Емітовані з катода під дією іонного бомбардування електрони захоплюються магнітним полем, їм надається складний циклоїдальний рух по замкнутих траєкторіях біля поверхні мішені. Електрони циклічно рухаються доти, доки не відбудеться кілька іонізуючих зіткнень з атомами робочого газу, в результаті яких електрон втратить одержану від електричного поля енергію. Отже, більша частина енергії електрона, перш ніж він попаде на анод, йде на іонізацію і збудження, що значно збільшує ефективність процесу іонізації і приводить до зростання концентрації позитивних іонів на поверхні мішені. Це, в свою чергу, зумовлює збільшення інтенсивності іонного бомбардування, а отже, і швидкості осадження плівки.

2.3. Основи літографічних процесів

В технології мікроелектроніки літографічні процеси характеризуються універсальністю і найбільш частою повторюваністю. Вони використовуються для одержання прецизійних контактних та вільних масок. Літографічні процеси формують на поверхні шар стійкого до наступних технологічних процесів матеріалу, здатного під дією опромінювання певної довжини хвилі змінювати необоротно свої властивості і насамперед стійкість до травників. Резистивний шар, локально опромінений за допомогою шаблону, обробляють в проявнику, де в результаті усунення локальних ділянок одержують резистивну маску.

В залежності від довжини хвилі використаного випромінювання розрізняють оптичну (фотолітографію), рентгенівську, електронну та іонну літографії.

Фотолітографія – це сукупність фотохімічних процесів, серед яких можна виділити три основних етапи: формування на поверхні матеріалу шару фоторезисту, передавання зображення з шаблону на цей шар, формування конфігурації елементів пристроїв за допомогою маски з фоторезисту. Схема процесу фотолітографії показана на рис. 2.13 [2.3].

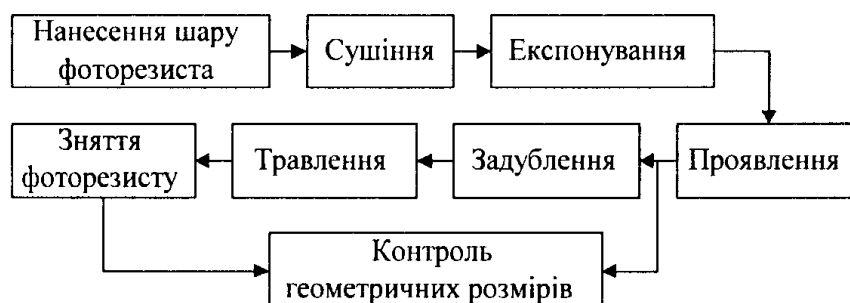


Рис. 2.13. Схема процесу фотолітографії

Фотолітографія може бути контактною (шаблон у випадку перенесення зображення приводиться в щільний контакт з фоторезистом (ФР) і безконтактною (на мікрозазорі та проекційна ФЛ).

Негативні та позитивні ФР. Фоторезисти – складні полімерні композиції. Фоторезисти, в яких розчинність експонованої ділянки зменшується, називаються негативними (ФН), а ФР, розчинність яких після опромінювання зростає – позитивними (ФП). Після обробки експонованого фоторезисту в суміші, яка усуває розчинні ділянки, утворюється рельєфне зображення (рис.2.14) [2.1], яке повинне бути стійким до дії технологічних факторів.

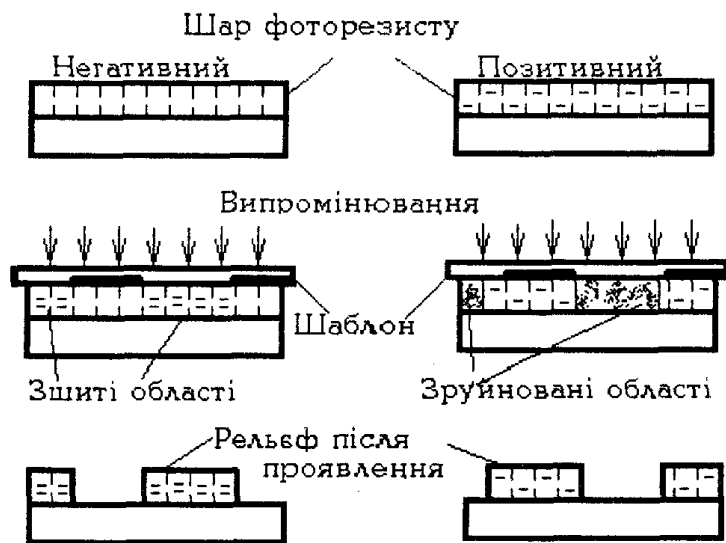


Рис. 2.14. Утворення рельєфу при використанні ФН та ФП

Основу утворення рельєфного зображення складають:

- фотополімеризація та утворення нерозчинних ділянок;
- зшивання лінійних полімерів радикалами, що утворюються під час фотолізу світлочутливих сполук;
- фотоліз світлочутливих сполук з утворенням розчинних речовин.

Розглянемо ряд найважливіших параметрів ФР.

Світлочутливість – величина, обернена експозиції, яка потрібна для переведення ФР в розчинний або нерозчинний (в залежності від того, ФП чи ФН) стан.

Роздільна здатність – максимальна кількість ліній однакової ширини, розділених проміжками тієї ж ширини, яку можна одержати в ФР на 1 мм.

Стійкість до дії агресивних факторів – поняття, як правило, не піддається загальним визначенням: в окремому випадку може означати величину, пропорційну часу відшарування плівки ФР у використаному травнику або проникнення травника через пори плівки ФР до підкладки (с або хв).

Стабільність експлуатаційних властивостей ФР в часі виражається терміном служби за певних умов зберігання та використання.

Нанесення шару ФР на підкладку. Найчастіше ця операція здійснюється методом центрифугування (рис.2.15, а) [2.1]. Під час вмикання центрифуги рідкий ФР розтікається під дією відцентрових сил. Граничний шар, який прилягає до підкладки, формується в результаті зрівноважування відцентрової сили, пропорційної кількості обертів, і сили опору, яка залежить від когезії молекул фоторезисту.

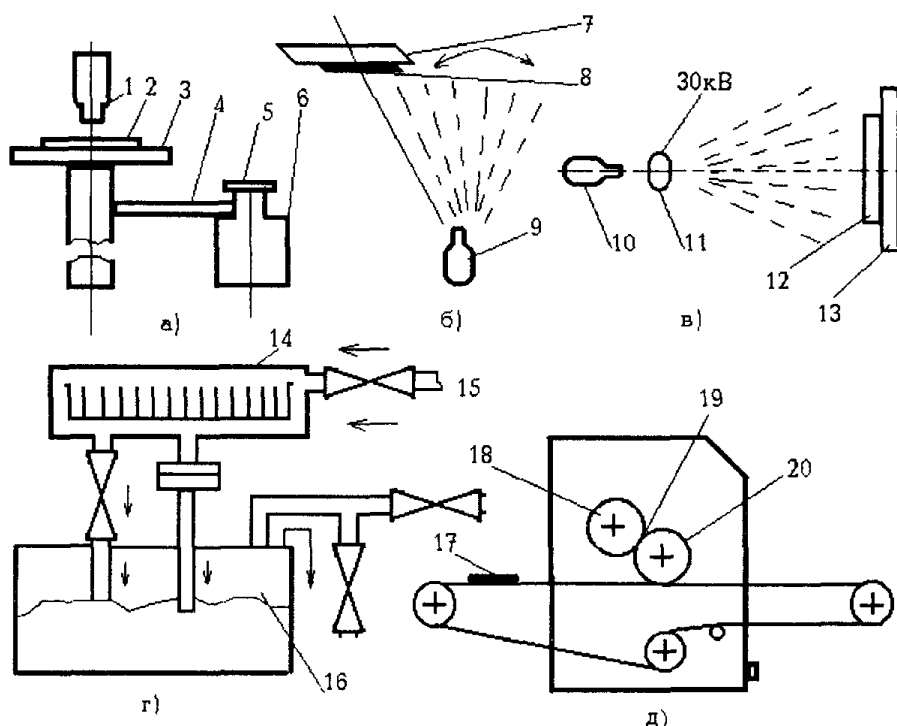


Рис. 2.15. Способи нанесення фоторезисту:

а) центрифугування; б) розпилення; в) електростатичне нанесення; г) занурення; д) нанесення хвилями. 1 – дозатор для подачі ФР; 2, 8, 12, 14, 17 – підкладки; 3 – столик центрифуги; 4 – привід; 5 – тахометр; 6 – двигун; 7 – пласнашка, що нагрівається; 8 – форсунка подачі ФР; 10 – форсунка; 11 – кільце для зарядження ФР; 13 – заземлена основа; 15 – фільтроване стиснене повітря; 16 – ємність для збирання ФР; 17 – ведучий ролик; 19 – подача ФР; 20 – ролик нанесення

Метод центрифугування дає змогу формувати фоторезист на підкладці діаметром до 350 мм з відхиленням у центральній її частині 0.04...0.05 % від її загальної товщини. Формування шару відбувається протягом 20...30 с. Товщина шару та його якість визначаються типом ФР та його в'язкістю, максимальною частотою обертання, прискоренням та сповільненням центрифуги, температурою та вологістю довкілля, властивостями поверхні підкладки. Прискорення центрифуги впливає на рівномірність товщини резистивних шарів, що

формуються. Час досягнення заданої частоти обертання центрифуги змінюється в межах 0,1...3,6 с. Для більших прискорень шар ФР стає тоншим і рівномірнішим по всій поверхні підкладки. Потовщення шару до краю підкладки (валик) зменшується при вищих частотах обертання.

Нанесення ФР *розпиленням* (рис.2.15, б) дає змогу одержувати широкий інтервал товщини шарів, причому підкладка може мати непlosку поверхню. Фоторезист наноситься з пневматичного розпилювача. Параметри шару залежать від тиску і температури повітря, відстані від сопла до підкладки, в'язкості фоторезисту і концентрації сухого продукту, типу розчинника. Відсутність крайового потовщення робить метод розпилення особливо ефективним при нанесенні фотошару на прямокутні підкладки.

При *електростатичному нанесенні* (рис. 2.15, в) ФР диспергується за допомогою форсунки або саме електричне поле роздроблює рідину на мілкі краплини діаметром приблизно 10 мкм. Заряджені краплини прискорюються полем і осаджуються на підкладку.

Для нанесення ФР використовуються *поливання* або *занурювання* (рис. 2.15, г), а також валиковий метод. Установка конвеєрного типу (рис.2.15, д) забезпечує рівномірність товщини шару $\pm 5\%$. Нанесення ФР занурюванням – найпростіший метод покриття, коли підкладку занурюють у ФР і виводять з нього з регульованою швидкістю.

Експонування та проявлення. Ці процеси нерозривно зв'язані між собою. Вибір режиму експонування і проявлення здійснюється в такій послідовності. З грубим наближенням знаходять час експонування і проявлення, при якому одержується задовільна якість рельєфу. При роботі з ФР перевіряють густину проколів у шарі фоторезисту, для чого на пластину окисленого кремнію з відомою густиною дефектів у оксиді наносять шар ФР, висушують його і проявляють протягом часу, приблизно в два рази більшого, ніж знайдений спочатку час проявлення. Потім проводять сушку, травлення і визначають, наскільки збільшилась густина дефектів у оксиді внаслідок проникнення травника крізь проколи в шарі резисту. При цьому допускається, що зростання густини дефектів викликається лише процесом проявлення. Для порівняння перевіряють густину дефектів у непроявленому шарі. Якщо при максимальному часі проявлення густина дефектів занадто велика, слід збільшити товщину шару або замінити ФР і знову повторити описані вище процедури.

Потім визначають залежності точності передавання розмірів зображення від часу проявлення при фіксованому значенні часу експонування та від часу експонування при фіксованому часі проявлення; в результаті знаходять оптимальні значення часу, що відповідають точності передавання, близькій до одиниці. Підбираючи час експонування, докладно стабілізують решту факторів, що впливають на точність передавання розмірів зображення: коливання освітленості, неминучий зазор між фотошаблоном (ФШ) та фоторезистом, підвищення температури шару, яке виникає іноді під час експонування.

Для усунення резистивної маски використовують: деструкцію полімеру (наприклад, сульфуванням у сірчаній кислоті); обробку в органічних розчинниках; плазмохімічну, термічну або фототермічну обробку, яка полягає здебільшого в окислювальній деструкції в кисні або газах, що містять кисень.

Хімічна деструкція ФП в сірчаній кислоті приводить до утворення коротких ланцюгів полімеру та сульфованих мономерів. Після обробки в сірчаній кислоті проводиться відмивання водою. Ефективне сульфування відбувається в підігрітій до 433 К концентрованій кислоті або в її суміші з двохромовокислим калієм (хромпіком) або з перекисом водню.

Усунення ФР хімічною деструкцією сірчаної кислоти неприпустиме для металізованих підкладок, крім того, нагрівання сірчаної кислоти вище 433 К приводить до утворення плівки сірчистого кремнію, що впливає на процеси окислення і дифузії.

В основі *плазмохімічного методу усунення ФР* лежить обробка в низькотемпературній кисневій плазмі під тиском $5 \cdot 10^2$ Па. В плазмі утворюються активні частинки: атомарний кисень, озон і збуджені молекули кисню. Вміст атомарного кисню, наприклад, може досягати 10...20%, стільки ж міститься збудженого молекулярного кисню. Під дією активного кисню ФР розкладається. Додаток 1% азоту дає змогу збільшити швидкість усунення ФР на 20%, а 1% водню на 100% порівняно зі швидкістю усунення в чистій кисневій плазмі.

Методи переносу зображень. *Контактний метод* забезпечує можливість одержання елементів з розмірами 2 мкм на полях 100 x 100...200 x 200 мм. На практиці забезпечити щільний контакт та відсутність локальних зазорів на великих площах важко; збільшення ж площі приводить до зменшення можливої роздільної здатності методу.

Зазор при контактуванні двох поверхонь (виключаючи оптичний контакт) носить випадковий характер, тобто має місце неконтрольований зазор, що спричиняє ряд оптичних ефектів. До них відносяться: вплив апертури експонуючого пучка на спотворення розмірів елементів; відбивання світла між контактними поверхнями; дифракція світла на краях елементів; розсіювання світла в світлочутливому матеріалі (ФР); інтерференція падаючого та відбитого світла в шарі ФР, утворення стоячих хвиль.

Проекційний метод використовують для перенесення зображень шляхом одночасного передавання зображення ФШ на всю технологічну площу; поелементне (крокове) експонування зображення зі зменшенням або без зменшення одного й того ж елемента або різних типових елементів по всій площі; викреслювання зображення безпосередньо на вкритій ФР технологічній площі тонким ультрафіолетовим променем, керованим комп'ютером.

Проекційні системи за принципом формування зображення можна розділити на системи, що одночасно формують зображення на всьому полі та скануючі системи (послідовне експонування).

Проекційні системи, що формують зображення на всьому полі, можуть забезпечити високоякісне зображення лише при наявності плоскої підкладки зі світлочутливою плівкою (неплощинність не повинна перевищувати одиниць мікрметра по всій поверхні), а тому застосовуються обмежено при формуванні різних зображень на плоских скляних підкладках, зокрема для фотошаблонів ІС.

В проекційних скануючих системах одержання мікрозображень здійснюється шляхом послідовного формування зображення, побудови його частинами, що забезпечує вищу роздільну здатність. Формування зображення цими методами може здійснюватися без зміни масштабу або з деяким його зменшенням. Найчастіше використовуються масштаби 1:4; 1:5; 1:10; 1:15.

Сканування зображення може проводитись неперервно, без зупинок, а також у перервному режимі, коли в момент експонування ніяких переміщень компонент оптичної системи не відбувається. Сканування може проводитися як за однією координатою, тобто з розгорткою лише в одному напрямку щілиною або смугою, що дорівнює поперечному розміру поля зображення, так і за двома координатами.

Найчастіше використовується метод зі скануванням за двома координатами. Метод полягає в послідовному експонуванні окремих полів зображення, що відповідають ІС (модулям), причому операція мультиплікації зображень по всьому полю проводиться з використанням об'єкта, збільшеного в 5...10 разів, що дає змогу підвищити точність формування зображення (рис. 2.16) [2.1].

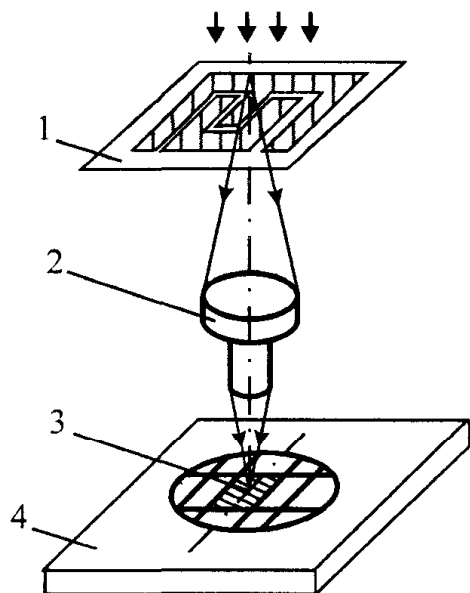


Рис. 2.16. Схема проекційного крокового сканування з одночасними зменшенням та мультиплікацією по двом координатам: 1 – об'єкт ФШ; 2 – об'єктив; 3 – площина зображення; 4 – двокоординатний стіл

Електронно-променева літографія. Метод електронолітографії характеризується високою роздільною здатністю. Ефекти дифракції, що обмежують роздільну здатність в оптичному та субоптичному діапазонах і зв'язані з більшою довжиною хвилі експонуючого випромінювання ($\lambda=350\ldots400$ нм), в електронно - променевій літографії (ЕПЛ) такі малі, що ними можна знехтувати. Практичні можливості ЕПЛ оцінюються розмірами елементів

мікросхем 0,2...0,3 мкм. Іншою перевагою ЕПЛ є велика глибина різкості створюваного зображення. Тому практично не відбувається спотворення рисунка мікросхеми під час збільшення глибини рельєфу багат шарових структур та неплоскостності поверхні пластини. Застосування ЕОМ для безпосереднього керування електронним променем (ЕП) дає змогу легко перебудовувати та коректувати програму експонування.

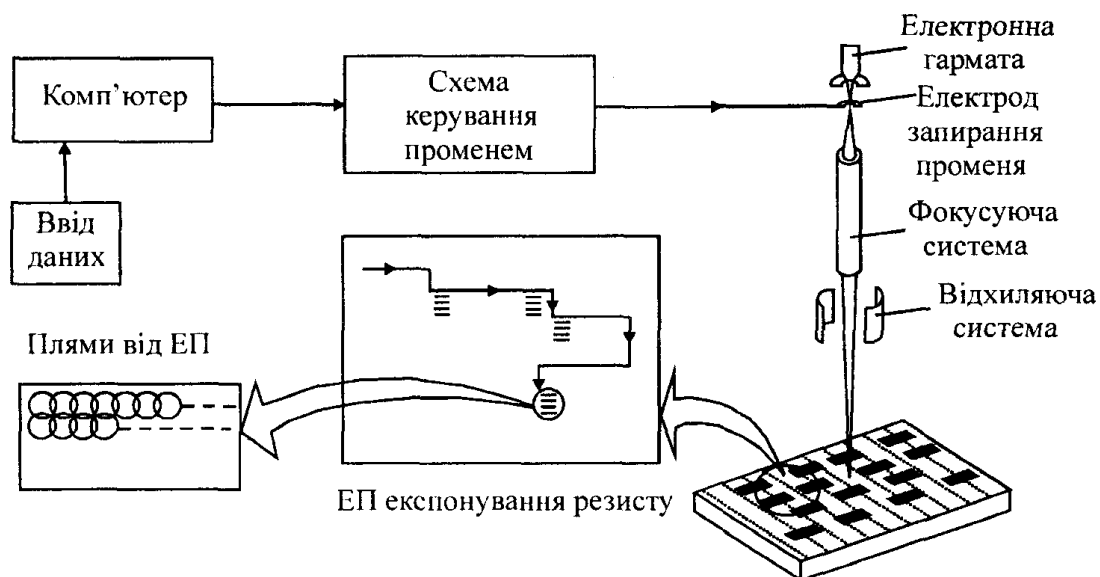
Існує три основні області застосування ЕПЛ: в технології виробництва еталонних ФШ та проміжкових фотооригіналів (ПФО) з розмірами елементів більше 2 мкм; при виготовленні ВІС з розмірами елементів менше 1 мкм шляхом безпосереднього гравірування кремнію; у виробництві високоточних ФШ для рентгено - і фотолітографії глибокого ультрафіолету.

Процес ЕПЛ показано на рис. 2.17 [2.1]. В основі методу лежить дія керуючого гостросфокусованого ЕП на резист. Електрони локально або руйнують його, або зшивають молекули, змінюючи його властивості. В процесі проявлення селективно усувається експонована (позитивний фоторезист) або неекспонована (негативний фоторезист) частина. Сформований з фоторезисту рельєф (топологічний рисунок) і є маскою для різних технологічних операцій. Вікна в плівці фоторезисту можуть бути використані для травлення підкладки іонним пучком або в плазмі, а також для селективного іонного впровадження домішки в підкладку.

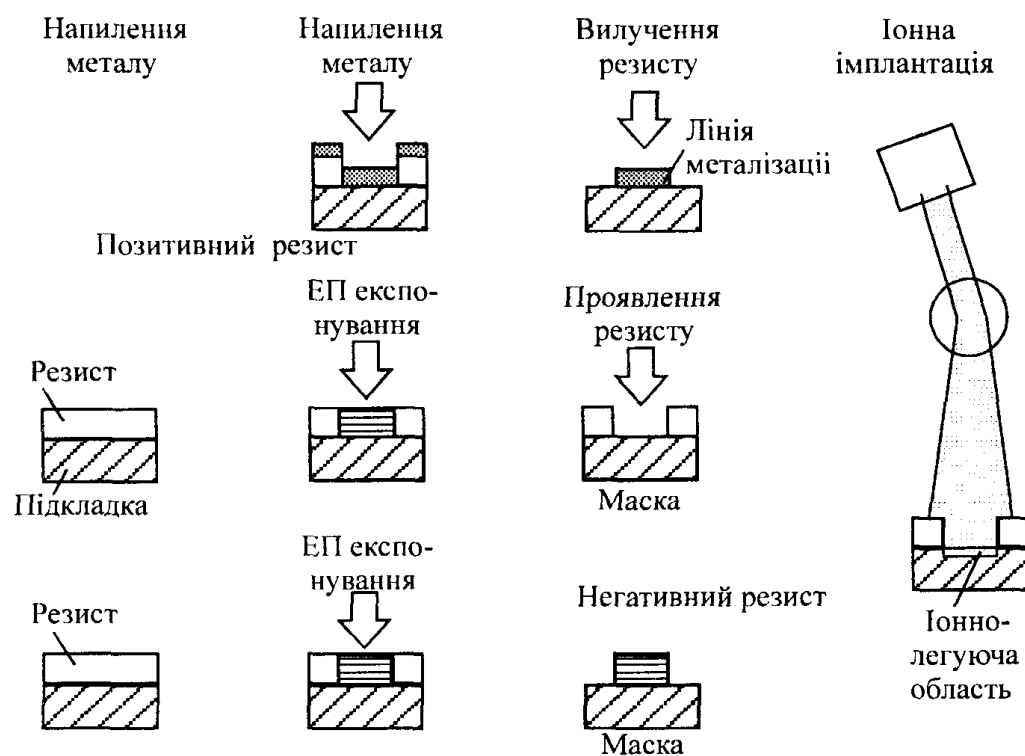
Електронорезисти являють собою композиції електронно – чутливих полімерів в органічних розчинниках. Вимоги до електронорезистів: висока чутливість до експонуючих електронів, висока роздільна здатність (можливість відтворення елементів розміром до 0,2...0,3 мкм), низька мікродфектність плівки резисту (до 0,1 см⁻²), добра адгезія до напівпровідникових матеріалів, висока термічна, плазмохімічна та хімічна стійкість під час процесів, пов'язаних з мікрогравіруванням напівпровідникових шарів.

Методи електронно-променевого експонування. Для одержання рисунків методом ЕПЛ застосовуються два способи: електронний промінь, керований комп'ютером, переміщується по заданій траєкторії поверхнею підкладки; електронний пучок проходить через маски. Електронний пучок може бути сформований у дуже тонкий промінь, який модулюється і переміщується поверхнею нанесеного на підкладку резисту для одержання необхідного рисунка. Електронний промінь може бути сфокусований у точку субмікронного розміру.

Методи репродукування з високою роздільною здатністю наведені на рис. 2.18 [2.1]. Вони полягають у безконтактному репродукуванні рисунка ФП за допомогою електронного (рис. 2.18, а, б) або рентгенівського (рис. 2.18, в) променя. Серед цих проекційних методів рентгенолітографія забезпечує найвищу роздільну здатність. Доцільно використовувати шаблони, одержані за допомогою ЕПЛ і проекційної ФЛ з дзеркальною системою (рис. 2.18, г) в поєднанні з ультрафіолетовим випромінюванням, щоб звести до мінімуму ефекти дифракції.



а)



б)

Рис. 2.17. Послідовність операцій ЕПЛ:

а) експонування; б) варіанти використання масок з фоторезисту для створення рисунків та іонно-легованих областей

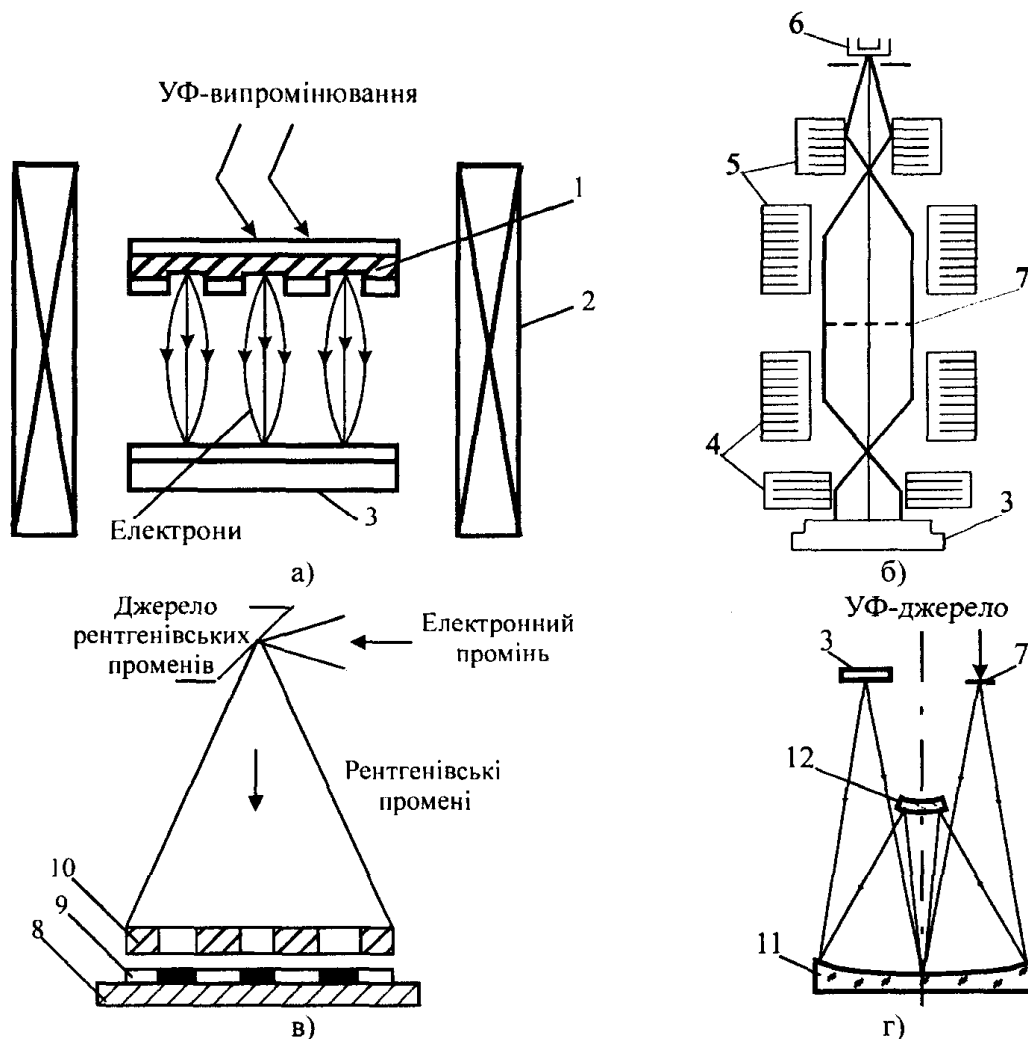


Рис. 2.18. Методи репродукування за допомогою електронного (а, б), рентгенівського (в) випромінювання та проекційної ФЛ з дзеркальною системою (г): 1 – фотокатод з маскою; 2 – фокусуючі відхиляючі котушки; 3 – пластина кремнію; 4 – проекційна лінза; 5 – конденсаторні лінзи; 6 – електронна гармата; 7 – шаблон; 8 – підкладка; 9 – резист; 10 – маска із золота; 11 – основне дзеркало; 12 – допоміжне дзеркало

Рентгенівська літографія. Основу рентгенівської літографії (РЛ) становлять принципи контактного або безконтактного друку при використанні для експонування низькоенергетичного (1...10 кеВ) рентгенівського випромінювання. В цьому випадку можна знехтувати явищем дифракції, властивим фотолітографії, а також явищем зворотного розсіювання, що виникає під час ЕПЛ. Принцип РЛ ілюструється рис. 2.19 [2.1]. Система РЛ складається з власне рентгенівської установки для експонування, системи суміщення шаблону з підкладкою та прецизійного шаблону. Промені проходять через шаблон,

затримуються на одних ділянках і проходять через інші, проектуючи зображення шаблону на резисті.

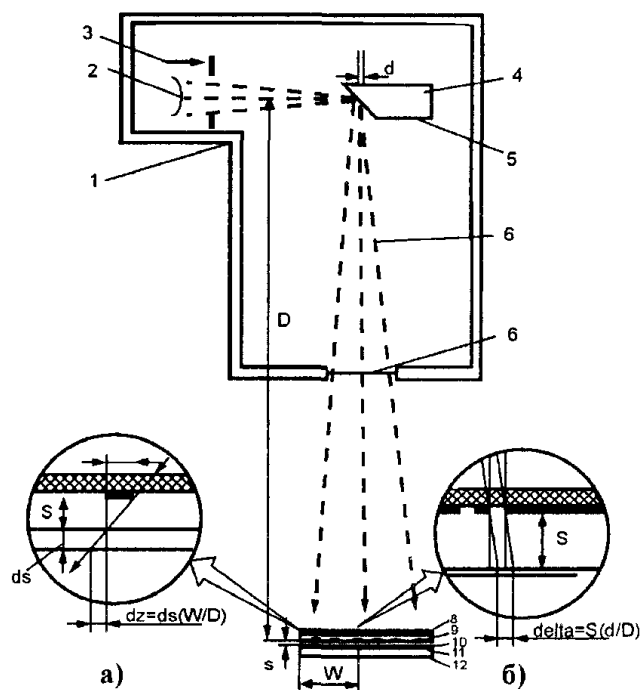


Рис. 2.19. Принципи РЛ та спотворення при експонуванні резисту в системі проєкційного друку: а) геометричні спотворення; б) напівтіньові спотворення:

1 – вакуумна камера; 2 – катод; 3 – електронний пучок; 4 – мішень; 5 – джерело рентгенівських променів; 6 – рентгенівські промені; 7 – вакуумне вікно; 8 – підкладка фотошаблону; 9 – поглинач рентгенівських променів; 10 – зазор; 11 – резист; 12 – пластина

Маски для рентгенолітографії. Основна мета при створенні масок для РЛ полягає у виготовленні тонкої підкладки, прозорої для рентгенівського випромінювання. Внаслідок високого коефіцієнта абсорбції всіх твердих матеріалів маски повинні виготовлятися на тонких підкладках (1...12 мкм). З одного боку, маска повинна добре пропускати рентгенівське випромінювання в місцях, де відсутній поглинаючий шар, з другого – добре поглинати його в непрозорих місцях. Для виготовлення підкладок використовують два типи мембран – *органічні та неорганічні* (поліаміди, кремній, двоокис кремнію, алюміній та їх сполуки).

Іонно-променева та голографічна літографії. Іонно-променева літографія (ІПЛ) – метод одержання структур з субмікрометровими розмірами елементів. Роздільна здатність ІПЛ вища, ніж електронної. Дифракційні обмеження практично відсутні, оскільки довжина хвилі де Бройля для іонів при близьких енергіях значно менша, ніж для електронів і тим більше фотонів. Для ІПЛ не існує ефекту близькості. Бічне розсіювання іонів у випадку їх проникнення в речовину незначне, вторинні електрони мають малу енергію і гальмуються на відстанях, менших соті частки мікрметра. Резисти мають значно більшу чутливість до іонів, ніж до електронів, оскільки питомі втрати енергії іонів в десятки разів більші.

Іонні джерела. Відомо три типи іонних джерел: дуоплазмотронний, рідкометалічний і газофазний з польовою іонізацією. Робота першого ґрунтується

на добуванні з плазми газового розряду, а другого і третього – на явищі відривання іонів рідкого металу або сорбованого газу з вістря аноду під дією сильного електричного поля. Принципові схеми іонних джерел наведені на рис. 2.20 [2.1].

Експонування колімованим іонним пучком. Установки ІПЛ, у яких використовуються широкі пучки протонів (рис. 2.21) [2.1] нагадують установки іонного легування.

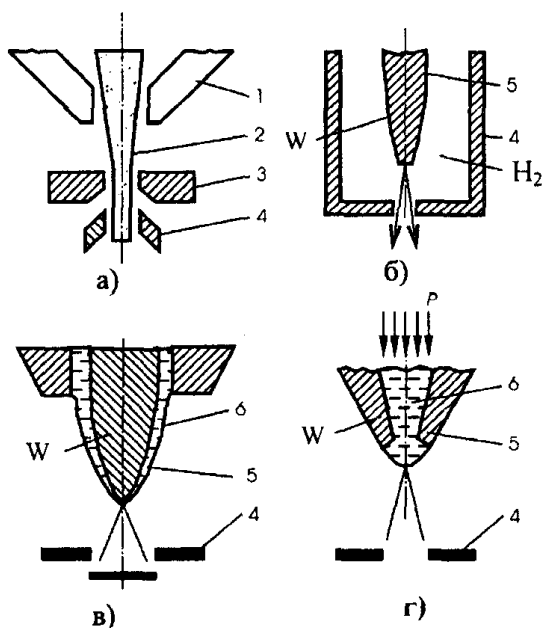


Рис. 2.20. Принципові схеми іонних джерел: а) дуоплазматрон; б) газозфазне джерело з польовою іонізацією; в) рідкометалічне джерело з вістрям; г) рідкометалічне капілярне джерело: 1 – електрод; 2 – плазма; 3 – анод; 4 – екстрактор; 5 – емітер; 6 – рідкий метал

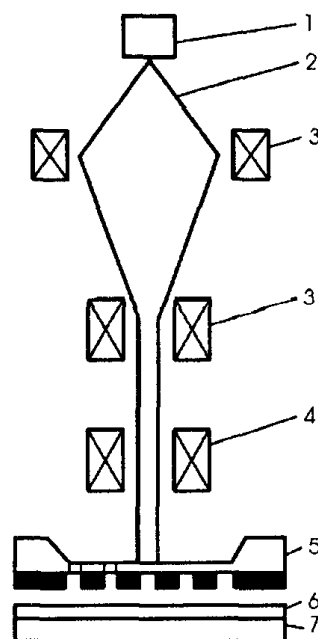


Рис. 2.21. Схема експонування колімованим іонним пучком: 1 – джерело іонів; 2 – іонний пучок; 3 – колімуюча система; 4 – керуюча система; 5 – шаблон; 6 – плівка матеріалу, що не пропускає іони; 7 – підкладка для ІС

Система ІПЛ для одержання рисунка ІС шляхом експонування чутливого шару органічного резисту аналогічна системі РЛ з мікропроміжком. Шаблон для ІПЛ виготовляється на основі суцільної тонкої ($\sim 0,5$ мкм) плівки аморфного (монокристалічного) матеріалу з нанесеною на неї плівкою ($0,5 \dots 1$ мкм) важкого металу, що поглинає протонне випромінювання, або з отворами в тих місцях, де не повинно бути металічної плівки.

Пластина, попередньо вкрита шаром резисту, експонується через шаблон шляхом сканування колімованим протонним пучком, переріз якого 1 см^2 . Енергія протонів у пучку становить $1,0 \dots 2,0$ кеВ, струм пучка 1 мкА . При вказаній енергії протони мають малу довжину пробігу в матеріалі основи шаблону ($1 \dots 2$ мкм), що

приводить до сильного поглинання іонів. Товщина основи суцільного іоношаблону повинна бути в кілька разів меншою від товщини основи рентгеношаблону.

Голографічна літографія. Принцип голографії полягає в тому, що на поверхні або в об'ємі світлочутливого матеріалу реєструється інтерференційна картина взаємодії двох хвиль, предметної та опорної. Цей зареєстрований інтерференційний візерунок і є голограмою (рис. 2.22) [2.1]. Якщо таку голограму освітити опорною хвилею з фазою, спряженою з фазою хвилі під час запису, то відновиться предметна хвиля, також спряжена з предметною хвилею під час запису, тобто хвиля, яка утворює дійсне зображення об'єкта. Голографія в проєкційній ФЛ забезпечує: високу роздільну здатність на великих полях без застосування складних об'єктів; запис і відновлення з однієї голограми кількох зображень (наприклад, різних шарів ІС); голографічне передавання високоякісних зображень поверхнями низької оптичної якості (наприклад ілюмінатори вакуумних камер); малу чутливість голограм до пошкоджень і дефектів, тобто великий термін служби голограм-шаблонів; можливість голографічної оптичної мультиплікації з повною сумісністю зображень.

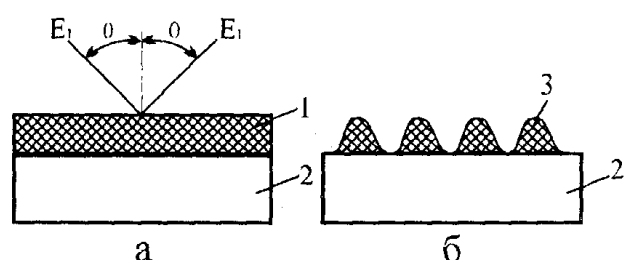


Рис. 2.22. Принцип використання голографічної літографії:
а) експонування; б) рельєф після травлення резистора:
1 – фоторезист; 2 – підкладка;
3 – задублений фоторезист

Схема голографічного запису повинна забезпечувати однакові умови для запису всього поля об'єкта. Для формування голограми потрібна оптична система, яка забезпечує або плоский, або збіжний однорідний за інтенсивністю хвильовий фронт, спряжений з опорним з точністю не нижче $\lambda/4$. Відновлювальна хвиля проходить через підкладку голограми, тому будь-які її недосконалості впливають на якість зображення. Для будь-яких хвильових фронтів, крім плоских, навіть ідеальна плоскопаралельна підкладка вносить додаткові аберації, врахування яких при формуванні потрібної відновлювальної хвилі завдає труднощів. Необхідно використовувати тільки плоску опорну хвилю, формування якої вимагає використання високоякісної оптичної системи і має ряд труднощів. Підкладка для голограми повинна мати неплоскостність не більше $\lambda/4(n_s - 1)$, де n_s – показник заломлення світла підкладки, тобто вимоги для її якості в кілька разів перевищують вимоги до підкладок еталонних ФШ.

На ФР можна одержувати високоякісні голограми, наприклад дифракційні решітки. Фоторезист забезпечує усунення спотворень голограми при реєстрації,

однак залежність глибини рельєфу від експозиції лінійна лише в певних режимах проявлення.

Процеси травлення в літографії. В літографічному процесі після одержання рисунка на резисті (фотолітографічним, електронно-променевим або рентгенівським методами) створюється зображення на поверхні матеріалу мікроелектронного пристрою. Застосовують процес вологого (хімічного) чи сухого травлення в плазмі. Для травлення кремнію використовують *ізотропні* та *анізотропні* методи травлення. Анізотропні травники травлять кремнієву підкладку в напрямках $\langle 100 \rangle$ і $\langle 110 \rangle$ з більшою швидкістю, ніж в напрямку $\langle 111 \rangle$. В більшості випадків анізотропні травники являють собою багатокомпонентні розчини, які складаються з окислювача, що окислює кремній до гідратованого двооксиду кремнію і комплексоутворювача, призначеного для того, щоб в реакції гідратованим двооксидом кремнію утворювати розчинний комплексний іон і воду.

2.4. Технологія виготовлення елементів товстоплівкових сенсорів

Товстоплівкова технологія ґрунтується на процесах нанесення та впалювання паст. Загалом паста повинна містити щонайменше дві обов'язкові дрібнодисперсні компоненти: основний матеріал та зв'язуючу речовину [2.3, 2.8–2.13].

Пасти, що використовуються для виготовлення чутливих елементів, залежать від призначення та принципів роботи сенсорів і розглядаються в наступних розділах. Зокрема, для виготовлення чутливих елементів сенсорів газу використовуються пасти на основі SnO_2 , ZnO , ZrO , TiO_2 ; сенсорів механічних величин – RuO_2 , IrO_2 , PbTiO_2 , BaTiO_3 , Ni , Co ; сенсорів температури – MnO_2 , CoO , Fe_2O_3 , RuO_2 , NiO , TiO_2 , BaTiO_3 ; сенсорів випромінювання – CdS , CdSe , CdTe , PbS , PbSe , PbTe . Для виготовлення електродів та провідників товстоплівкових сенсорів використовуються пасти на основі Pt , Au , Pd , Ag , Al , Cu , Ni тощо.

Загалом пасти, що використовуються в товстоплівковій технології, можна поділити на провідникові, резистивні, діелектричні, напівпровідникові та припайні.

Провідникові пасти. До їх складу входять дрібнодисперсні порошки металів (функціональний матеріал), скло (постійна зв'язувальна) і суміш декількох органічних рідин (тимчасова зв'язувальна). Електричні і металургійні властивості плівки визначаються властивостями функціонального матеріалу. Скло втримує функціональний матеріал в стані точкових контактів, забезпечує адгезію і запобігає розчиненню провідної плівки в процесі лудіння.

До складу типових провідникових плівок входить від 10 до 20 об. % скла, яке частково обволікає поверхню металевих частинок і частково знижує провідність

2.2. Методи одержання тонких плівок

Термовакuumний метод одержання тонких плівок полягає в нагріванні у вакуумі матеріалу до температури випаровування, утворенні пари та конденсації її на підкладці. Якщо тиск пари випарованого матеріалу перевищує тиск у робочій камері, то утворюється потік частинок, які випаровувалися. Для нагрівання використовують електронний промінь, енергію лазерного випромінювання, джоулеве тепло, енергію високочастотного поля тощо.

Електронно-променеве (ЕП) випаровування. Базова установка для ЕП-випаровування (рис. 2.2) [2.1] складається з технологічної камери, системи відкачування, тигля з матеріалом, що випаровується електронної гармати, заслінки для переривання потоку пари і підкладки з пристосуваннями для її кріплення і нагрівання. При бомбардуванні поверхні робочого матеріалу електронним пучком значна частина кінетичної енергії електронів перетворюється в тепло і поверхня нагрівається до такої температури, при якій стає джерелом пари. На шляху потоку пари розміщують підкладку, на якій конденсується частина пари, тобто відбувається напilenня.

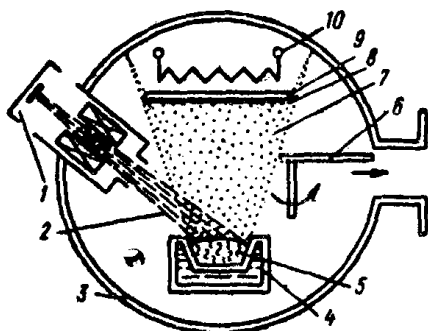


Рис. 2.2. Принцип електронно-променевого випаровування:

1 – електронна гармата; 2 – електронний пучок; 3 – кожух вакуумної камери; 4 – тигель, що охолоджується водою; 5 – матеріал, що випаровується; 6 – діафрагма випарника; 7 – потік пари; 8 – напilenний шар; 9 – підкладка; 10 – підігрівач підкладки

Для випаровування сплавів використовують багатотигельний або однотигельний способи (рис. 2.3) [2.1]. При багатотигельному випаровуванні (а) компоненти випаровуються окремо, кожна зі свого тигля, а конденсуються на підкладці разом. При однотигельному випаровуванні (б) потік пари потрібного складу створюється і конденсується при неперервному постачанні додаткового матеріалу в зону нагріву основного матеріалу. При однотигельному випаровуванні з тигля з великою кількістю розплавленої речовини процес випаровування здійснюють покомпонентно, змінюючи потужність підігрівання за певним графіком.

Електронно-променеві випарники складаються з електронної гармати і тигля. Часто їх доповнюють пристосуваннями для підживлення розплаву в тиглі вихідним матеріалом. Приклади ЕП-випарників приведені на рис. 2.4 [2.1]. Катод розміщений поблизу матеріалу, що випаровується або тигля. Під дією

прискорювальної напруги між катодом і тиглем пучок електронів прямує на матеріал, що випаровується. Керуючий електрод знаходиться під потенціалом катода і служить для фокусування електронного пучка. Якщо катод кільцевий, то керуючому електроду також надають форму кільця, яке концентрично охоплює тигель.

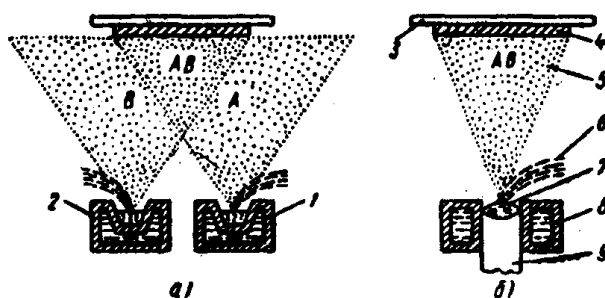


Рис.2.3 Принципи електронно-променевого випаровування сплавів:

а) багатотигельне випаровування; б) однитигельне випаровування:

1 – тигель з компонентом А; 2 – тигель з компонентом В; 3 – підкладка;
4 – напівшар; 5 – потік пари; 6 – електронний пучок; 7 – розплавлена речовина;
8 – кільцевий тигель; 9 – твердий штабик з сплаву, що випаровується

Анод, розміщений між тиглем і керуючим електродом з катодом, формує електронний пучок, який скеровують на матеріал, що випаровується. Для отримання електронного пучка малого діаметра використовують довгофокусні генератори електронних пучків. Фокусування пучка здійснюють також за допомогою магнітних лінз.

Тиглі служать для розміщення в них матеріалу, що випаровується. Їх виготовляють з матеріалу з низькою пружністю пари і хімічною інертністю при високій температурі до матеріалів, які випаровуються, і газів. Використовують водоохолоджувані або гарячі тиглі з водяним охолодженням і керамічними вставками. Відомі мідні водоохолоджувані тиглі. Висока теплопровідність міді допускає великі перепади температур на межі між стінкою тигля і матеріалом, що випаровується. В таких тиглях можна випаровувати як тугоплавкі речовини (вольфрам при 3000...4000 К), так і хімічно високоактивні (титан).

Для випаровування при резистивному нагріві (джоулеве тепло) використовують нагрівники-випарники поверхневого типу з резистивним нагрівачем у формі спіралей, стрічок, човників, а також випарники тигельного типу з непрямым підігрівом, які можуть мати як відкритий, так і квазізамкнутий об'єми. Випарники з непрямым підігрівом можуть бути дротяними, стрічковими та спеціальних конструкцій. Найчастіше в термовакуумному методі застосовують випарники з вольфраму; великого поширення набули також молибденові і танталові випарники.

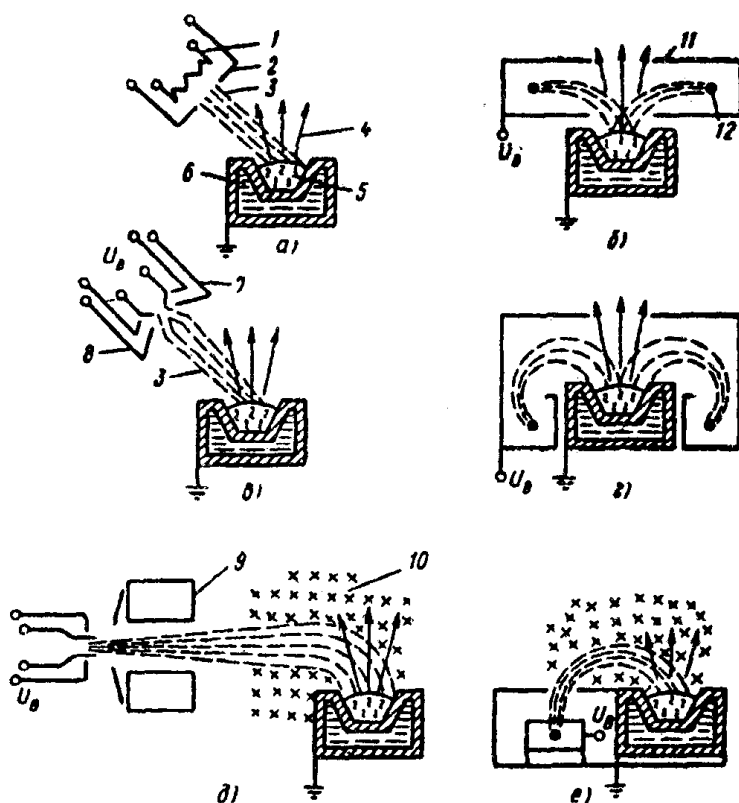


Рис. 2.4. Електронно-променеві випарники:

а) з лінійним катодом та електростатичним фокусуванням; б) з кільцевим катодом та електростатичним фокусуванням; в) з аксіальною гарматою та довгофокусним електростатичним фокусуванням; г) з кільцевим катодом, електростатичним фокусуванням та відхиленням пучка; д) з аксіальною гарматою, магнітним фокусуванням та відхиленням пучка на 90° ; е) з плоскопроменевою гарматою та магнітним поворотом пучка на 100° : 1 – катод; 2 – електрод під потенціалом катода; 3 – електронний пучок; 4 – потік пари; 5 – матеріал, що випаровується; 6 – тигель, що охолоджується водою; 7 – керуючий електрод; 8 – анод; 9 – магнітна лінза; 10 – поперечне магнітне поле; 11 – кільцевий електрод; 12 – кільцевий катод

Для виготовлення випарників з вольфраму використовують перекристалізований вольфрамовий дріт, оскільки рекристалізований дріт, одержаний у результаті нагрівання вольфраму при температурі, що перевищує 1273 K , дуже крихкий. Нерекристалізований вольфрамовий дріт гнучкий і легко формується. Намотування спіралей для випарників проводять при нагріванні вольфрамового дроту до 373 K на газовому пальнику, оскільки при цій температурі гнучкість дроту досягає максимуму [2.1].

Для нанесення товстих шарів плівок використовують конструкцію випарників з паралельно з'єднаних або скручених вольфрамових дротинок. При

випаровуванні алюмінію використовують випарники, які складаються з трьох–шести дртинок діаметром 0,55...0,75 мм.

При випаровуванні хрому і кадмію попередньо гальванічно покривають необхідним металом протравлену поверхню нагрівника. Таким способом випаровують невеликі кількості хрому і кадмію з вольфраму, срібла з молібдену. При необхідності випаровування великих кількостей цих металів застосовують гальванічно покриті необхідною речовиною нагрівники, на які насаджують шматочки металу, що випаровується.

Випаровування "вибухом" є різновидністю термовакuumного методу, який здійснюється з поверхневих випарників при неперервному або дискретному випаровуванні дроту або мілкодисперсних частинок, що подаються зі спеціальних дозаторів (рис. 2.5) [2.1]. Подавання дроту або мілкодисперсних частинок відбувається зі швидкістю, що дорівнює швидкості випаровування частинок цієї речовини. У паровій фазі над випарником присутні всі компоненти складної речовини в такому ж співвідношенні, в якому вони знаходяться в твердій фазі, що забезпечує при конденсації на поверхні підкладки можливість одержання плівок потрібного стехіометричного складу.

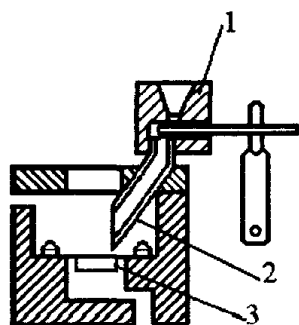


Рис. 2.5. Конструкція випарника дискретної дії для випарювання «вибухом»:

1 – бункер; 2 – лоток для подавання матеріалу; 3 – випарник

Імпульсне нанесення плівок. Цей метод знімає температурні обмеження при випаровуванні, використовує щільні потоки пари, іонізацію та прискорення плазми, на кілька порядків підвищує миттєву швидкість осадження (до 10^{-1} м/с і більше) і характеризується нестаціонарністю вказаних процесів.

Електричний вибух провідників і напівпровідників. Електричний вибух провідників виникає в тонкому зразку конденсованого матеріалу при інтенсивному виділенні джоулевого тепла. Електричні провідники (дріт, фольга, плівки, нанесені на діелектричні підкладки) розпилюються при розряді високовольтної і малоіндуктивної (з високим значенням швидкості наростання струму) конденсаторної батареї (рис. 2.6,а) [2.1]. Діаметр дртинок або товщина плоского зразка становить 0,01...0,1 мм, а інтенсивність об'ємного джерела тепла досягає 10^{11} ... 10^{13} Вт/г.

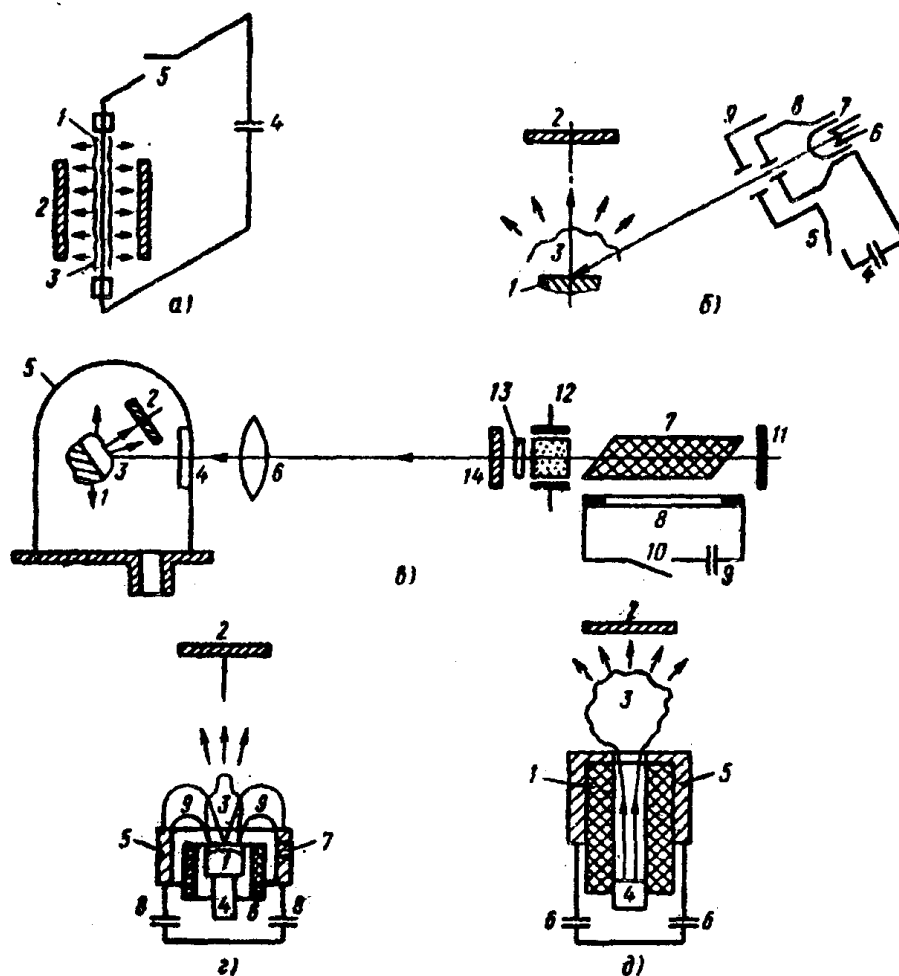


Рис. 2.6. Способи імпульсного нанесення плівок:

а) електричний вибух: 1 – зразок, що вибухає; 2 – підкладка; 3 – потік продуктів вибуху; 4 – конденсаторна батарея; 5 – керований розрядник; б) випаровування потужним електронним пучком: 1 – мішень; 2 – підкладка; 3 – потік пари; 4 – генератор імпульсного струму; 5 – керований розрядник; 6 – розігрівання катода електронної гармати; 7 – катод; 8 – електрод, що фокусує; 9 – анод; в) лазерне випаровування: 1 – мішень; 2 – підкладка; 3 – потік пари; 4 – прозоре вікно; 5 – вакуумна камера; 6 – лінза, що фокусує; 7 – активна речовина; 8 – лампа накачування; 9 – конденсатор; 10 – керований розрядник; 11 – непрозоре дзеркало; 12 – комірка Керра; 13 – поляроїд; 14 – напівпрозоре дзеркало; г) використання імпульсного генератора металічної плазми: 1 – речовина, що утворює плазму; 2 – підкладка; 3 – потік ерозійної плазми; 4 – центральний електрод; 5 – зовнішній електрод; 6 – ізолятор; 7 – індукуючий електрод; 8 – конденсаторна батарея; 9 – розрядний струм; д) використання генератора діелектричної плазми: 1 – речовина, що утворює плазму; 2 – підкладка; 3 – потік ерозійної плазми; 4 – центральний електрод; 5 – зовнішній електрод; 6 – конденсаторна батарея

Вибухи розділяються на повільні, швидкі та вибухову абляцію в залежності від співвідношення між часом випаровування дроту τ_e і сталими часу τ_s і τ_h (τ_s – стала нестійкості, тобто характеристичний час, необхідний для того, щоб нестабільність, наприклад хвилястість дроту зросла вдвоє; τ_h – електротермічна стала часу, тобто час, необхідний для проникнення температури, яка дорівнює точці кипіння, на глибину, що приблизно дорівнює радіусу дроту).

В процесі повільного вибуху $\tau_e \gg \tau_s$ фізичні спотворення дроту мають значний вплив на характер його протікання. Швидкому вибуху відповідає $\tau_e \ll \tau_s$. Під вибуховою абляцією розуміється ситуація, коли процес розвитку вибуху керується скін-ефектом і випаровування відбувається лише в тонкому приповерхневому шарі, а центр залишається непрогрітим.

При швидкому вибуху в вакуумі протягом $10^{-8} \dots 10^{-7}$ с зразок, що вибухає, перетворюється в пару з густиною, близькою до густини твердого тіла і температурою $1 \dots 4 \cdot 10^5$ К (енергія вибуху $10 \dots 35$ еВ).

Найхарактернішими рисами нанесення плівок при електровибуховому випаруванні є дуже висока швидкість росту плівки ($10^7 \dots 10^8$ нм/с) і висока енергія плазми, що конденсується (еквівалентна температура $T \approx 10^5 \dots 10^6$ К). Швидкість плазми близько 10^5 см/с, а густина потоку приблизно 10^{23} см⁻²·с⁻¹. Висока інтенсивність потоку пари характеризується також тим, що на 10^8 атомів пари, які бомбардують підкладку, яка знаходиться на відстані $L \approx 7$ см від зразка, приходить всього одна молекула залишкового газу (тиск близько $133 \cdot 10^{-5}$ Па). Тим самим електровибухове випаровування дає змогу одержувати виключно чисті плівки.

Імпульсне випаровування під дією електронного бомбардування. Густина струму з катода (LaB_6) електронної гармати може досягти $j_c = 300$ А·см⁻²; а густина струму в пучку $j \approx 300$ А·см⁻²; тепловий потік, що приноситься електронами на одиницю бомбардованої поверхні, $q_T = 10^7$ Вт/см², що достатньо для імпульсного випаровування у вакуумі і нанесення таким чином тонких плівок (рис. 2.6, б).

Імпульсне лазерне випаровування в режимі вільної генерації. Імпульсні лазери, які працюють у режимі вільної генерації, забезпечують протягом імпульсу тривалістю близько 10^{-3} с тепловий потік на поверхню тіла, що випаровується, $q_T = 10^6 \dots 10^8$ Вт/см². В цьому випадку генерується послідовність імпульсів тривалістю 10^{-6} с, в чому й полягає імпульсне нанесення плівок. У випадку лазерного імпульсного нанесення плівок лазер розміщують за межами вакуумної камери (рис. 2.6, в).

Поглинання випромінювання лазера непрозорим твердим тілом залежить від зонної структури останнього. Падаючий на поверхню металу світловий потік, за винятком відбитої частини, практично повністю поглинається електронами провідності в шарі товщиною $0,1 \dots 1$ мкм, яка відповідає глибині проникнення світла в метал.

Поглинання енергії електромагнітного випромінювання в напівпровідниках і діелектриках має складніший характер і може бути розділене на кілька типів: власне поглинання, поглинання вільними електронами, поглинання локальними домішковими центрами і поглинання ґраткою. Якщо енергія фотонів не перевищує ширину забороненої зони напівпровідника, то при досить інтенсивних світлових потоках на початку імпульсу випромінювання спостерігається інтенсивне поглинання – внутрішній фотоэффект, електрони валентної зони переходять в зону провідності, причому через $1...10$ нс при інтенсивності 10^6 Вт/см² концентрації вільних електронів можуть досягати значень приблизно $10^{20}...10^{21}$ см⁻³.

Лазерне імпульсне нанесення плівок дає змогу одержувати полікристалічні плівки GaAs на підкладках з CaF і NaCl стехіометричного (конгруентного) складу. Сполуки типу A^{III}B^V (GaP, GaS, GaSb, InSb) і типу A^{II}B^{VI} (ZnO, ZnS, ZnSe, ZnTe, CdS, CdSe, CdTe), за винятком ZnO, випаровуються конгруентно, а утворені плівки мають склад речовини мішені.

Імпульсне лазерне випаровування в режимі модульованої добротності. Модуляція добротності оптичного резонатора, наприклад, за допомогою комірочки Керра і поляроїда (рис. 2.6, в) дає змогу зменшити тривалість світлового імпульсу твердотілого лазера до $10^{-8}...10^{-7}$ с і збільшити густину потоку випромінювання на поверхню мішені до $10^9...10^{10}$ Вт/см² і більше.

При використанні цього режиму генерації для імпульсного нанесення плівок слід відзначити значне (на 2...3 порядки) зменшення кількості випаруваного за імпульс матеріалу та зростання енергії пари поблизу поверхні до 10...50 еВ. Кількість винесеної маси для лазера на неодимовому склі з енергією в імпульсі близько 20 Дж, що дає потік $q_T = 10^{10}...10^{11}$ Вт/см², не перевищує 1 мг. Густина пари (плазми) поблизу поверхні мішені досягає $10^{19}...10^{21}$ см⁻³.

Імпульсні генератори ерозійної плазми являють собою плазмові прискорювачі, які використовують як основний фізичний процес сильноточковий вакуумний розряд, тобто розряд, що горить у парі матеріалів елементів розрядної камери (електродів та ізоляторів) (рис. 2.6, г, д).

Руйнування електродів та ізоляторів в сильноточковому вакуумному розряді зумовлене тепловими потоками до елементів розрядної камери, які досягають $q_T = 10^5...10^8$ Вт/см², тобто приблизно такі, що й під дією випромінювання лазерів у режимі вільної генерації. Природа теплових потоків для різних елементів різна. В катодних плямах – це іонне бомбардування поверхні катода іонами, які прискорюються прикатодним падінням напруги, в анодних плямах – це електронне бомбардування; теплові потоки до поверхні ізоляторів обумовлені сусідством плазми і являють собою здебільшого потоки випромінювання з плазми.

Явище ерозії електродів у електронних гарматах складне. Здебільшого фіксується лише результат цілої гами фізичних процесів (народження, пересування і загибель катодних або анодних плям, нагрівання електродів, їх

випаровування, іонізація пари, дія на плазму електродинамічних сил), які залежать, у свою чергу, від геометрії і матеріалу електродів, режиму розряду тощо.

Руйнування діелектрика, що здійснюється запалюванням розряду у вузьких і довгих діелектричних каналах (трубках) (рис. 2.6, д) є більш організованим процесом.

Анодний режим роботи імпульсних генераторів ерозійної плазми торцевого типу (рис. 2.6 г) є ефективним внаслідок більшого ефективного анодного падіння потенціалу і більшої рівномірності підведення енергії до поверхні електрода. В такому режимі одержані шари товщиною 10 ...1 мкм з Nb, Cu і Al на різних підкладках і з хорошою адгезією.

Одержання плівок з іонізованих потоків багатоатомних частинок методами іонного осадження. Метод іонно-кластерного осадження використовує явище утворення кластерів (багатоатомних агрегатів) при витіканні у вакуум з надзвуковою швидкістю потоку пари з квазізамкнутого тигля через один або кілька отворів (сопел) малого діаметра. Якщо температура пари в тиглі T_T , то після виходу його з сопла в результаті адіабатичного розширення температура знижується до T_B і може бути визначена з рівняння $T_B/T_T = (P_B/P_T)^{1/\gamma}$, де P_T і P_B – тиск пари в тиглі та у вакуумній камері поблизу сопла. Відношення питомої теплоємності пари при постійному тиску C_p до його питомої теплоємності при постійному об'ємі C_v визначається як $\gamma = C_p/C_v = 1 + 2/n_c$, де n_c – кількість ступенів свободи молекули пари [2.1].

Утворення кластерів відбувається найефектніше, якщо $P_T/P_B > 10^4$, що забезпечується вибором температури тигля і діаметра отвору сопла, який звичайно не перевищує 1...30% внутрішнього діаметра тигля і становить 0,1...1,0 мм.

Іонізацію потоку кластерів електронним ударом можна здійснити кількома способами (рис. 2.7) [2.1]. В одному випадку електрони, інжектвані кільцевим катодом, поміщеним в екран, витягуються і прискорюються в напрямку тигля під дією різниці потенціалів (рис. 2.7, а). Простір між джерелом електронів (іонізатором) і тиглем є зоною іонізації потоку матеріалу, який випаровується. В іншому випадку (рис. 2.7, б, д) іонізатором служить циліндричний діод, сітковий анод якого обмежує область, де відбувається бомбардування осцилюючими електронами потоку кластерів. Іонізатором може бути також і звичайна триелектродна електронна гармата (рис. 2.7, в), яка складається з катода, фокусуючого електрода і анода. Прискорений електронний пучок, проходячи через анодний отвір, бомбардує потік осаджуваного матеріалу в напрямку, перпендикулярному його руху до підкладки, і потім попадає на колектор, що знаходиться під невеликим позитивним потенціалом відносно анода. Якщо для формування потоків кластерів багатокомпонентних матеріалів застосовуються багатотигельні системи, то іонізувати електронним ударом можна як кластери

кожного з елементів, так і суміш кластерів вихідних елементів, розміщуючи електронну гармату, наприклад, між тиглями (рис. 2.7, г) і направляючи електронний пучок в бік підкладки. При одержанні плівок випаровуванням матеріалів в середовищі якого-небудь газу (реактивним іонно-кластерним методом) для дозованого подавання останнього у вакуумну камеру поблизу тигля розміщується натікач (рис. 2.7, д) з соплом на кінці. Використання кожного з цих пристроїв дає змогу прискорювати іонізовані кластери до підкладки за рахунок негативного потенціалу, який подається, наприклад, на підкладкотримач (рис. 2.7, а–в) – або на прискорюючий електрод (рис. 2.7, г, д). В останньому випадку підкладкотримач знаходиться, як правило, під плаваючим потенціалом.

Іонно-кластерним методом одержують плівки металів, напівпровідників, діелектриків простого і складного складу. При цьому робочими речовинами можуть служити матеріали, які легко сублімуються (золото, срібло, мідь, свинець, кремній, сульфід кадмію і цинку, сплав Au–Be і сполука Mn–Bi). При іонно-кластерному методі осадження можливе легування матеріалу плівок у процесі їх одержання. Для цього легуючу речовину завантажують або в окремий тигель або в тигель разом з матеріалом плівки, що наноситься. Осадження плівок реактивним іонно-кластерним методом дає змогу одержувати плівки окислів, нітридів тощо. Такий метод високопродуктивний, причому швидкість осадження можна регулювати в широких межах (від сотих частинок до десятків мікрметрів на хвилину) навіть при випаровуванні матеріалів з односоплового тигля.

Автоемісійний метод одержання плівок. Звичайний термовакуумний метод одержання тонких плівок можна легко перетворити в метод автоемісійного розпилення. Для цього поблизу випарника, який знаходиться під високим позитивним потенціалом, розміщується заземлений екстрагуючий електрод. Випарником може бути одновиткова (рис. 2.8, а) або багатовиткова (рис. 2.8, б) спіраль, або тигель, поблизу якого розміщується вібратор для створення на поверхні розплавленої речовини загострених виступів (рис. 2.8, в) [2.1]. Розігрівання осаджуваного матеріалу електронним пучком (рис. 2.8, г) дає змогу знизити напругу екстракції $U_{ек}$ в кілька разів. При $U_{ек} = 1$ кВ одержані потоки багатоатомних іонізованих частинок свинцю, олова, алюмінію, срібла, золота, платини, вуглецю, вольфраму тощо при іонному струмі до 10 мА.

Швидкість осадження регулюється позитивним потенціалом на випарнику. При використанні автоемісійного методу речовина, що розпилюється, звичайно розігрівається тільки до температури плавлення, тому знижується потужність, яка підводиться до випарника, помітно зменшуються енергетичні втрати, пов'язані з нагріванням струмоводів, і значно розширюється номенклатура матеріалів для виготовлення випарників. Крім того, при осадженні плівок цим методом немає необхідності в додаткових пристроях для іонізації потоку багатоатомних частинок розпиленого матеріалу.

Для реалізації цього методу і одержання високих швидкостей осадження матеріали, що наносяться, повинні знаходитися в рідкому стані. Іонізовані

кластери, утворені при відриванні мікрокрапель з поверхні розплаву, складаються з порівняно невеликої кількості атомів ($5 \cdot 10^8 \dots 5 \cdot 10^9$), зв'язаних між собою сильніше, ніж атоми кластерів, одержаних іонно-кластерним методом, що зумовлює низьку ймовірність їх руйнування при співударі з підкладкою.

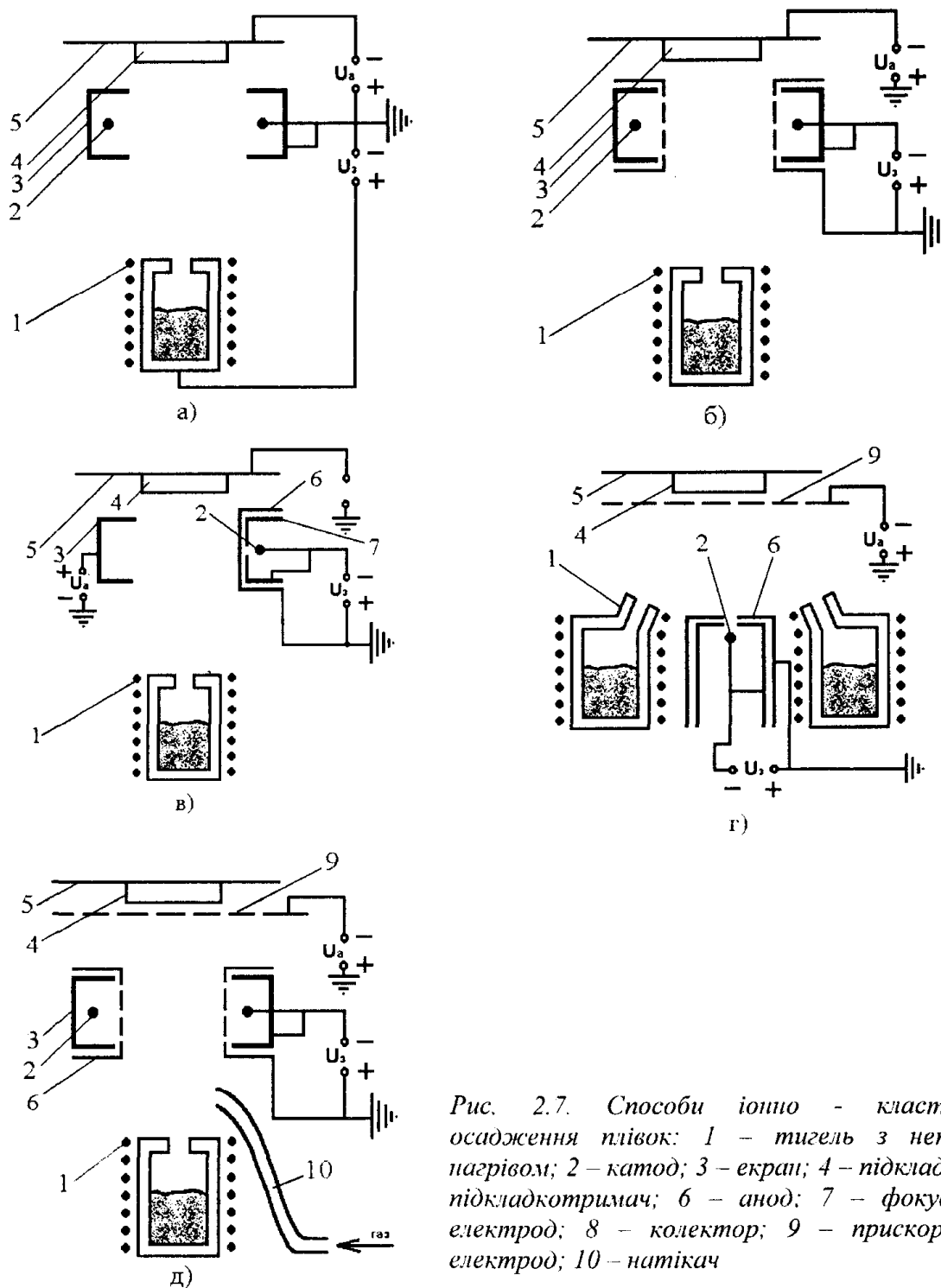


Рис. 2.7. Способи іонно - кластерного осадження плівок: 1 – тигель з непрямым нагрівом; 2 – катод; 3 – екран; 4 – підкладка; 5 – підкладкотримач; 6 – анод; 7 – фокусуючий електрод; 8 – колектор; 9 – прискорюючий електрод; 10 – натікач

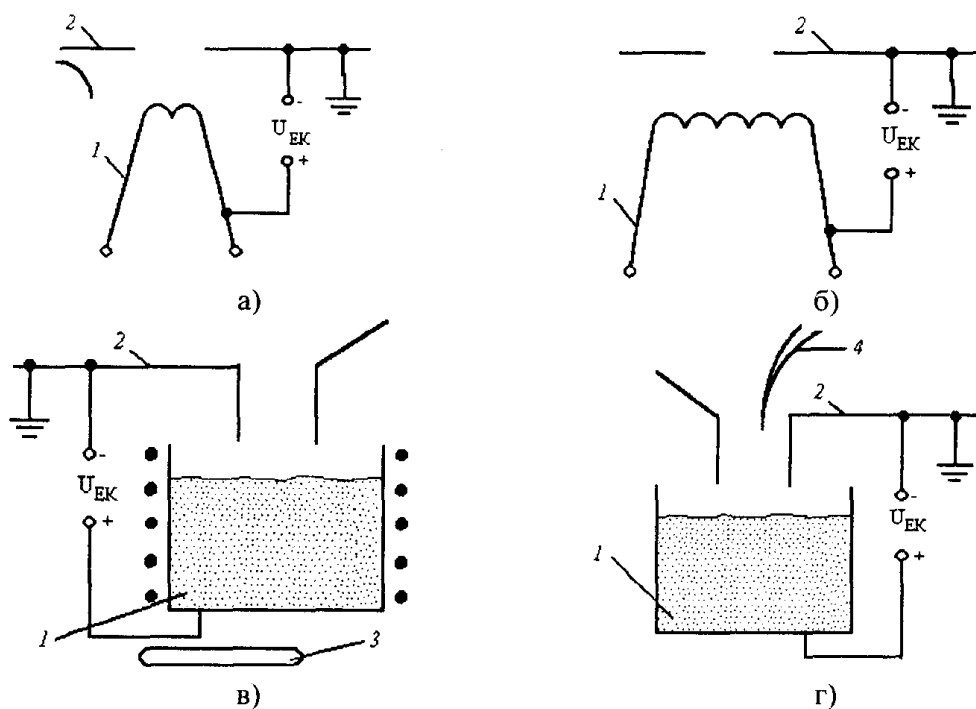


Рис. 2.8. Автоемісійний спосіб отримання плівок:
1 – випарник; 2 – електрод, що екстрагує; 3 – вібратор; 4 – електронний пучок

Катодне розпилення іонним променем в плазмі газового розряду. При розпиленні твердих тіл бомбардування поверхонь іонами з енергіями, вищими від порогової, викликає їх руйнування, яке супроводжується розпиленням атомів з поверхні. Значення порогової енергії слабо залежить від мас частинок, що стикаються, і лежить у діапазоні 5,6...59 еВ. Зі збільшенням енергії вище від порогової (до 100 еВ) інтенсивність процесу розпилення зростає в $10^3...10^4$ разів, при цьому коефіцієнт катодного розпилення становить 0,1...0,4 атом/іон. Коефіцієнт розпилення зростає зі збільшенням енергії до 300...500 еВ, а потім його збільшення припиняється. Збільшення коефіцієнта спостерігається при бомбардуванні іонами з великими масами, а також при опроміненні поверхні під кутом до нормалі приблизно $50...70^\circ$.

При нанесенні тонких плівок катодним розпиленням широко застосовуються плазмові методи з використанням тліючого розряду постійного струму (рис. 2.9, а–в), магнетронного розряду в схрещених електричних і магнітних полях (рис. 2.9, є, ж), а також несамоіонізованого розряду з розжарюваним термокатодом (рис. 2.9, д, е) [2.1]. Значення робочого тиску для цих типів пристроїв становить відповідно $10^0...10^1$; $10^0...10^{-1}$; $10^{-1}...10^{-2}$ Па.

При розпиленні на змінному струмі (рис. 2.9, г) газовий розряд локалізується в просторі між стержнями, які розпилюються поперемінно лише протягом одного півперіоду, коли на них подається негативна напруга і вони служать катодом розряду.

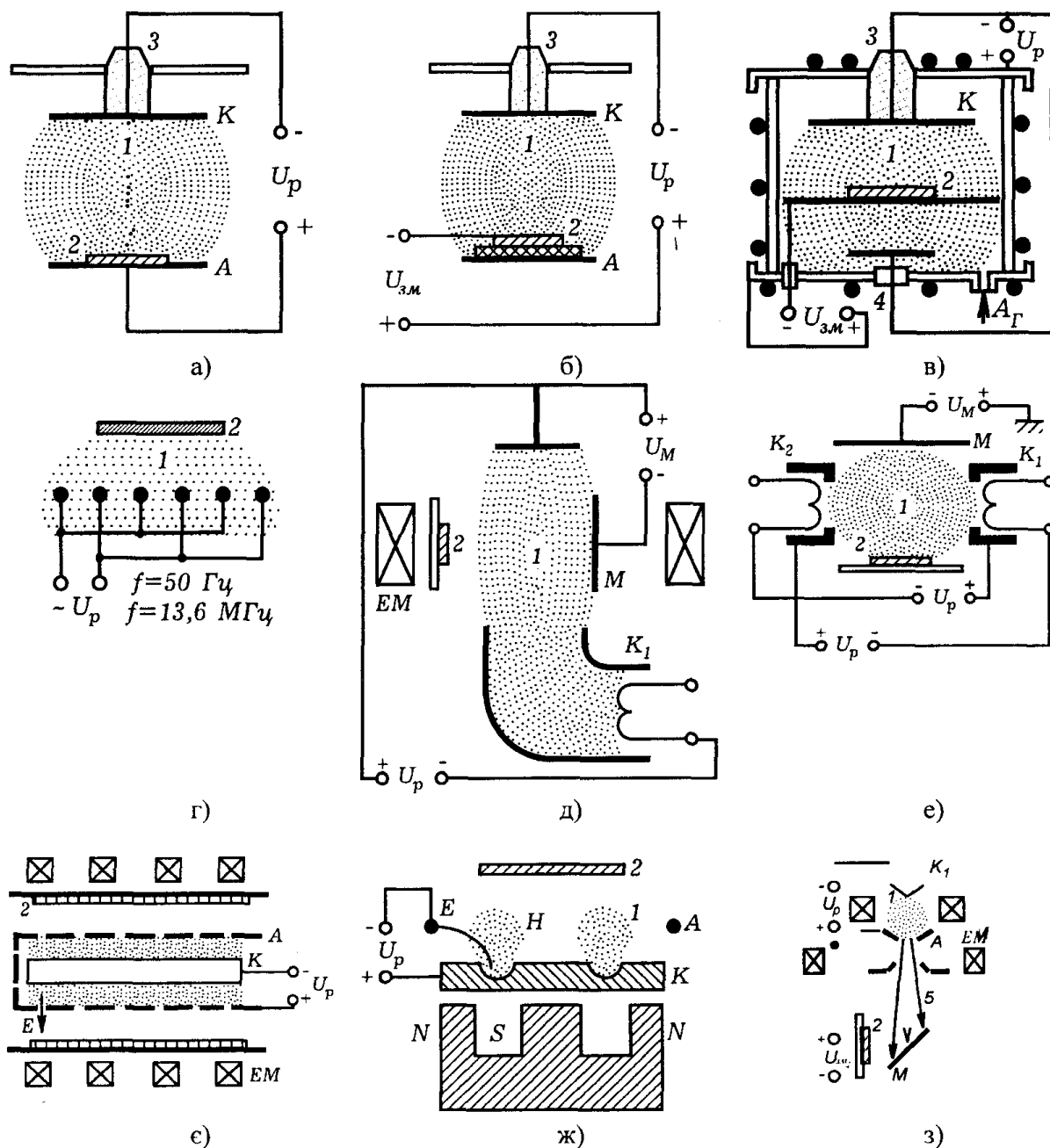


Рис. 2.9. Осадження плівок методами катодного розпилення: А – анод; К – катод; K_1 , K_2 – термокатоди; М – мішень; ЕМ – електромагніт; U – напруга (U_p – розряду, U_m – мішені, U_{3M} – зміщення підкладки); E – силова лінія електричного поля; H – силова лінія магнітного поля; 1 – область розряду; 2 – підкладка; 3 – ізолятор; 4 – електрод, що прискорює іони; 5 – іонний пучок

Магнітні поля (рис. 2.9, д, е–з) сприяють підвищенню ефективності іонізації газу, тобто зменшенню робочого тиску і напруги розряду, локалізують плазму поблизу об'єкту, який розпилюється (катода або мішені), а також ослаблюють бомбардування підкладки швидкими електронами, яка приводить звичайно до різкого спонтанного її розігріву. В установках з тліючим розрядом підкладка

розміщується на аноді (рис. 2.9, а), частинки дифундують до підкладки через газовий розряд, багаторазово стикаються з атомами робочого газу і розсіюються назад на катод. В тліючому і магнетронному розрядах іонізатор і джерело пари живляться від одного й того ж самого блока U_p , в установках з нагромаджуючим катодом утворення плазми і процес розпилення виконується за допомогою самостійних вузлів і джерел живлення (U_p , U_M).

Ще більше розділення функцій іонізатора і джерела пари здійснюється в установці іонно-променевого розпилення (рис. 2.9, з), в якій область розряду відокремлена від вузла мішені. Напускання робочого газу проводиться в камеру іонного джерела, а його відкачування здійснюється через анодну діафрагму малого перерізу, так що перепад тисків між областями становить близько півтора порядків. З межі плазми, що проникає з анода А, прискорювальним електродом витягується пучок іонів, який транспортується на мішень.

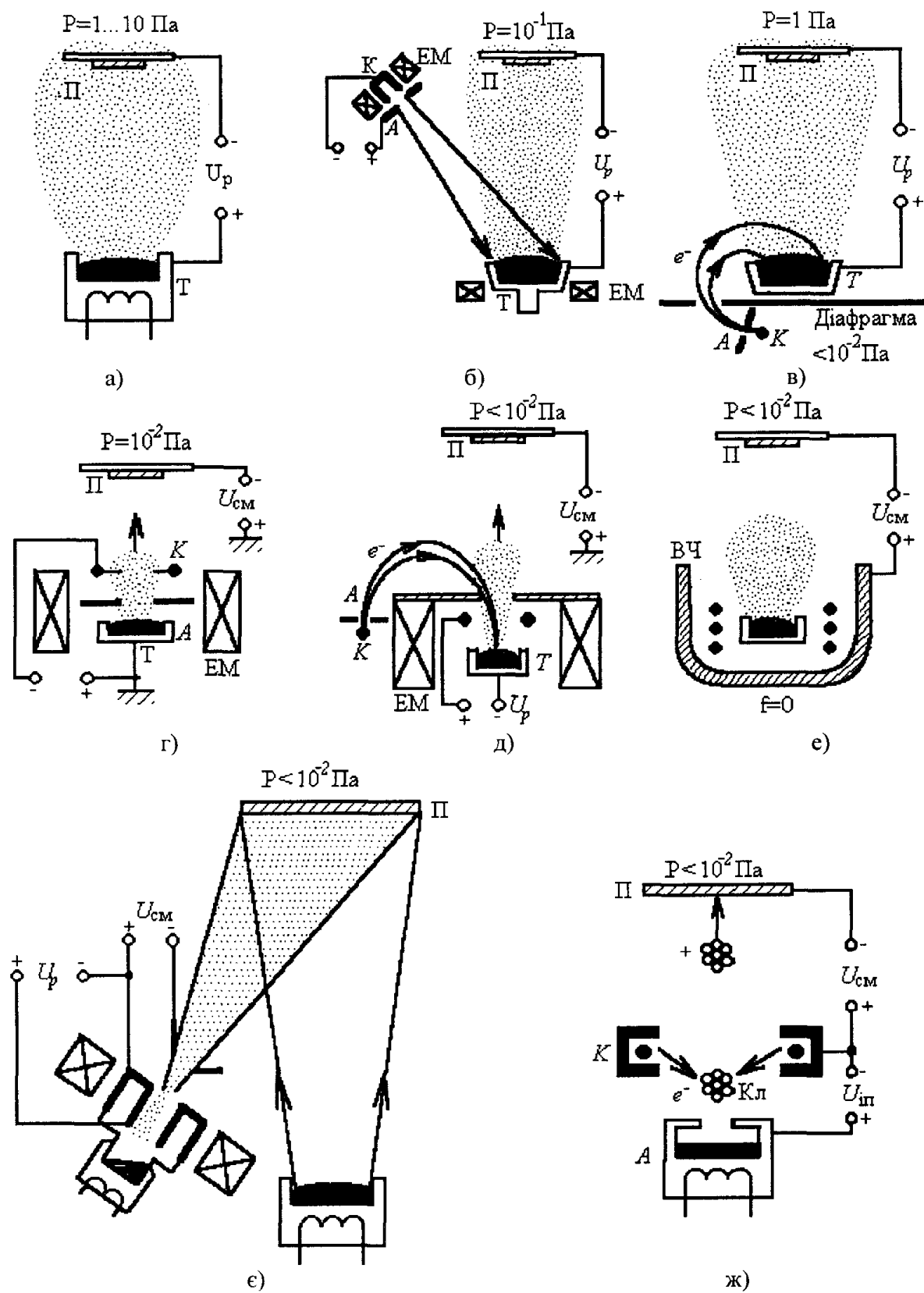
Розпилення на постійному струмі застосовується лише у випадку одержання плівок з матеріалів з високою електропровідністю. Для розпилення діелектриків використовується високочастотна напруга U_p , U_M . Під час від'ємного півперіоду мішень розпилюється, а під час додатного електрони, які приходять на її поверхню, нейтралізують створений іонами позитивний поверхневий заряд.

Для всіх типів розпилювальних пристроїв загальною вимогою є необхідність утримання плазми і швидких частинок, які виходять з неї, в обмеженому просторі вакуумної камери за допомогою магнітних полів або екранів (рис. 2.9, в). Внаслідок цього не підвищується газовиділення зі стінок вакуумної камери і внутрішньокамерної арматури.

Зразок, що розпилюється, може бути плоским (рис. 2.9, а–в, д, е, ж, з) або циліндричним (рис. 2.9, г, є), від цього залежать конфігурація електродів всієї розрядної системи і вузла кріплення підкладок, характеристики розряду, розподіл нейтральних та заряджених частинок в просторі.

Іонним осадженням називаються вакуумні процеси одержання плівок, в яких фазовий перехід пара – тверде тіло супроводжується бомбардуванням високоенергетичними частинками ($E = 10^2 \dots 10^4$ еВ) газу, осаджуваного матеріалу або легуючої домішки. Вміст іонів у потоці пари на підкладку може становити від часток процента до 100%.

Плазмовими методами іонного осадження називаються (рис. 2.10) [2.1] методи, в яких для утворення іонного потоку на підкладку використовується газовий розряд при робочому тиску $10^{-1} \dots 10^1$ Па незалежно від способу утворення частинок пари. На підкладку може подаватися від'ємна напруга розряду U_p або зміщення $U_{зм}$, як це показано на рис. 2.10, а–в.



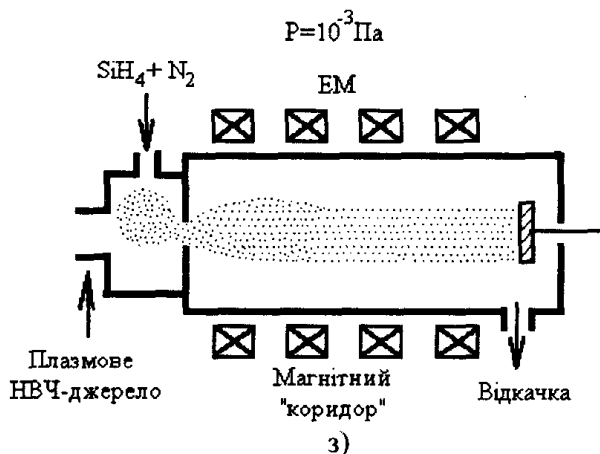


Рис. 2.10. Схематичне зображення пристроїв іонного осадження плівок:

U_p – розряд у газі або парі; U_{in} – іонізатор пари; U_{zm} – напруга зміщення; K – катод електронно-променевого джерела; A – анод електронно-променевого джерела; T – тигель з матеріалом, що випаровується; EM – електромагніт; $П$ – підкладка; $Кл$ – кластер; e – електронний промінь

При іонно-променевих методах осадження процес конденсації здійснюється у високому вакуумі (менше 10^{-2} Па), а для утворення іонів використовується іонно-променеве джерело (рис. 2.10, г, ж). Прискорення іонного потоку відбувається як у просторі іонізатор–підкладка за допомогою потенціалу U_{zm} (рис. 2.10, в–д, ж), так і в самому іонному джерелі (рис. 2.10, є).

Іонне осадження при підвищеному тиску застосовується у випадку нанесення плівок на деталі з складним геометричним рельєфом поверхні [2.1, 2.6].

Установка термоіонного осадження в газорозрядній плазмі містить у собі два основних вузли: термічний випарник матеріалу плівки, яка напилюється, і розрядну систему діодного типу з від'ємною напругою на підкладці. Нагрівання матеріалу, що випаровується, проводиться резистивним способом (рис. 2.10, а), електронно-променевим з використанням газорозрядної гармати з порожнистим катодом (рис. 2.10, б) або випарника з відхиленням первинного пучка на 270° в секторному магнітному полі (рис. 2.10, в), з цією метою може також застосовуватися високочастотний індуктор.

В установці, зображеній на рис. 2.10, в, використовується розділювальна діафрагма з отвором для введення первинного електронного пучка високовакуумної зони, в якій знаходиться електронний прожектор, у зону газового розряду з тиском робочих газів близько 1 Па. Перепад тисків між цими двома зонами забезпечується безпосереднім приєднанням вакуумних насосів до першої області, в той час як напускання робочого газу проводиться в другу, а їх відкачування здійснюється через отвір у діафрагмі з малою продуктивністю.

Нагрівники іншого типу (рис. 2.10, б, в, є) електронно-променевого джерела можуть працювати і в області тисків $1...10$ Па, тому для таких установок не потрібно розділяти зони за вакуумними умовами.

Одержання плівок з низьким рівнем домішки газів в умовах попереднього відкачування камери до "промислового" вакууму ($10^{-5}...10^{-4}$ Па) недоцільно здійснювати високовакуумними методами іонного осадження, тобто енергетичну

активацію поверхні пара – тверде тіло проводити не частинками самої речовини, що випаровується (рис. 2.10, в,г). Ці методи називаються іонно-променевими.

Найпростішою іонною гарматою є електронно-променевий випарник з від'ємним зміщенням на підкладці. Однак такий пристрій при потужності випарника 5...8 кВт забезпечує слабку іонізацію пари, так що відношення потоку іонів до потоку атомів пари на підкладці не перевищує кількох процентів. Для підвищення енергетичної активації використовують додаткову іонізацію пари: аксіальні магнітні поля (рис. 2.10, г), дуговий розряд Пеннінга в парі металу з застосуванням схрещених електричних і магнітних полів (рис. 2.10, д), високочастотний розряд у потоці пари (рис. 2.10, в). В таких установках відношення потоків іонів і атомів досягає 50%.

В установці, показаній на рис. 2.10, є, один іонний пучок, сформований і прискорений до 5...10 кеВ в автономному джерелі, застосовується не тільки для активації процесу конденсації (пара – тверде тіло), але й для іонного легування матеріалу плівки. Іони легуючої речовини з такими низькими енергіями проникають в поверхневі шари межі розділу фаз пара – тверде тіло лише на глибину кількох атомних шарів, що дає змогу проводити прецизійне керування розподілом концентрації домішки по товщині плівки.

Осадження з пучка іонізованих кластерів (рис. 2.10, ж) поєднує переваги плазмового та електронно-променевого методів. Матеріал, що випаровується, нагрівається всередині геометричного тигля з невеликим отвором у верхній кришці (кілька міліметрів у діаметрі). Тиск перегрітої пари всередині тигля становить 1...10 Па, так що з сопла у вакуум виходить струмінь пари. В результаті адіабатичного розширення перенасиченої пари атоми групуються в кластери, які іонізуються електронним пучком, сформований розжареним катодом К і анодом А. Іонізовані кластери прискорюються потенціалом зміщення підкладки.

Вакуумно-дуговий метод осадження дає змогу провести процес іонного осадження в досить високому вакуумі, внаслідок чого підвищується чистота одержаних плівок. Вакуумний дуговий розряд збуджують у парі ерозії матеріалу катода. Останній може бути або холодним (охолоджуваний) або гарячим (неохолоджуваний). В першому випадку дуга горить у вигляді окремих катодних плям, які переміщуються поверхнею катода зі швидкістю 10^4 см/с. В другому випадку дуга горить на всій робочій поверхні катода, при цьому температура може наближатися до температури плавлення катода.

Для генерації матеріалу катода використовуються електродугові випарники металів, густина струму в катодній плямі яких дорівнює $10^6...10^7$ А/см². Катодна пляма складається з емітуючої ділянки катода, області катодного падіння потенціалу, в якій зосереджується позитивний просторовий заряд і найяскравішої частини – області іонізації.

Коаксіальна геометрія електродів (рис. 2.11) [2.1] дає змогу здійснити напрямлений рух плазмового потоку внаслідок сил, діючих на плазму в

схрещених електричних і магнітних полях, усунути ізотропне розлітання плазми. Внаслідок цього можна значно підвищити коефіцієнт використання матеріалів.

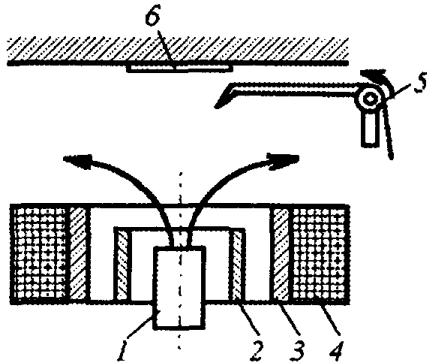


Рис. 2.11. Схема плазмового прискорювача: 1 – катод, 2 – екран; 3 – анод; 4 – соленоїд; 5 – пристрій запалювання; 6 – підкладка

Магнетронні системи належать до систем розпилення діодного типу, в яких розпилення матеріалу відбувається за рахунок бомбардування поверхні мішені іонами робочого газу (звичайно аргону), утвореними в плазмі за рахунок локалізації плазми біля поверхні мішені, що розпилюється, за допомогою сильного поперечного магнітного поля [2.7].

Принцип дії магнетронної розпилювальної системи (МРС) показаний на рис. 2.12 [2.1]. Основними елементами установки є катод-мішень, анод і магнітна система. Силкові лінії магнітного поля замикаються між полюсами магнітної системи. Поверхня мішені, розміщена між місцями входу і виходу силових ліній магнітного поля, інтенсивно розпилюється і має вигляд замкнутої доріжки, геометрія якої визначається формою полюсів магнітної системи.

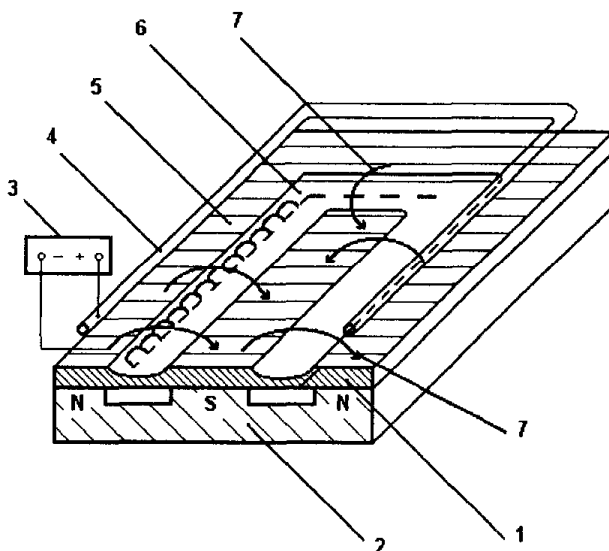


Рис. 2.12. Схема магнетронної розпилювальної системи: 1 – катод-мішень; 2 – магнітна система; 3 – джерело живлення; 4 – анод; 5 – траєкторія руху електронів; 6 – зона розпилення; 7 – силова лінія магнітного поля

У випадку прикладення постійної напруги між мішенню (негативний потенціал) і анодом (позитивний потенціал) виникає неоднорідне електричне поле

і збуджується аномальний тліючий розряд. Наявність замкнутого магнітного поля біля поверхні мішені, що розпилюється, дає можливість локалізувати плазму розряду безпосередньо біля мішені. Емітовані з катода під дією іонного бомбардування електрони захоплюються магнітним полем, їм надається складний циклоїдальний рух по замкнутих траєкторіях біля поверхні мішені. Електрони циклічно рухаються доти, доки не відбудеться кілька іонізуючих зіткнень з атомами робочого газу, в результаті яких електрон втратить одержану від електричного поля енергію. Отже, більша частина енергії електрона, перш ніж він попаде на анод, йде на іонізацію і збудження, що значно збільшує ефективність процесу іонізації і приводить до зростання концентрації позитивних іонів на поверхні мішені. Це, в свою чергу, зумовлює збільшення інтенсивності іонного бомбардування, а отже, і швидкості осадження плівки.

2.3. Основи літографічних процесів

В технології мікроелектроніки літографічні процеси характеризуються універсальністю і найбільш частою повторюваністю. Вони використовуються для одержання прецизійних контактних та вільних масок. Літографічні процеси формують на поверхні шар стійкого до наступних технологічних процесів матеріалу, здатного під дією опромінювання певної довжини хвилі змінювати необоротно свої властивості і насамперед стійкість до травників. Резистивний шар, локально опромінений за допомогою шаблону, обробляють в проявнику, де в результаті усунення локальних ділянок одержують резистивну маску.

В залежності від довжини хвилі використаного випромінювання розрізняють оптичну (фотолітографію), рентгенівську, електронну та іонну літографії.

Фотолітографія – це сукупність фотохімічних процесів, серед яких можна виділити три основних етапи: формування на поверхні матеріалу шару фоторезисту, передавання зображення з шаблону на цей шар, формування конфігурації елементів пристроїв за допомогою маски з фоторезисту. Схема процесу фотолітографії показана на рис. 2.13 [2.3].

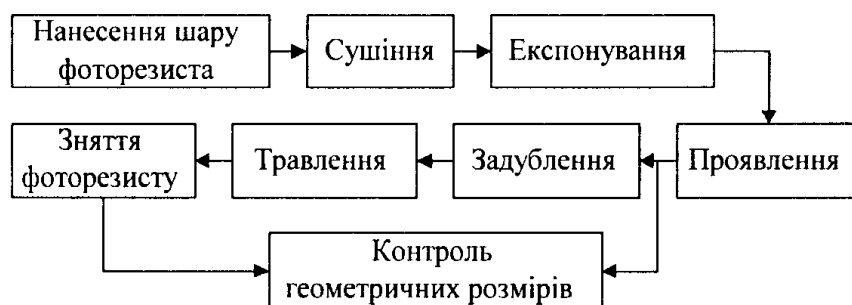


Рис. 2.13. Схема процесу фотолітографії

2.5. Дифузія в напівпровідниках

Фізичні процеси, що відбуваються в процесі дифузії домішки в напівпровідниках. Дифузія в напівпровідниках – процес послідовного переміщення атомів домішки в кристалічній ґратці, зумовлений тепловим рухом [2.1]. У напівпровідниках існує два види дифузії:

- дифузія в кристалі, який знаходиться в стані хімічної рівноваги, тобто при однорідному хімічному складі і однорідному розподілі власних дефектів – самодифузія атомів розчинника;

- дифузія в умовах, коли система не знаходиться в стані хімічної рівноваги і градієнти потенціалів викликають виникнення результуючих хімічних потоків – або взаємна дифузія.

При підвищеній температурі атоми в вузлах решітки коливаються поблизу рівноважного положення.

Для виготовлення р-п – переходів використовується хімічна дифузія домішкових (розчинених) атомів, які вводяться в кристалічну ґратку для зміни її електрофізичних властивостей. Переміщення домішки в ґратці відбувається внаслідок послідовних стрибків у трьох напрямках. За наявності градієнта концентрації власних або домішкових атомів точкові дефекти (атом у міжвузлі або вакансії) впливають на їх дифузію.

До основних механізмів дифузії належать: механізм прямого обміну атомів, кільцевий, естафетний, краудіонний, дисоціативний, вакансійний.

Загалом дифузія анізотропна, однак у кубічній решітці внаслідок симетрії вона ізотропна. Процеси ізотропної дифузії описуються за допомогою коефіцієнта дифузії D , який є скалярною величиною і визначається з першого закону Фіка. Для одномірної дифузії

$$J = D \partial N / \partial x,$$

де j – густина потоку атомів або дефектів речовини; D – коефіцієнт дифузії; N – концентрація атомів або дефектів речовини.

Температурна залежність коефіцієнта дифузії

$$D = D_0 e^{-E_a/kT},$$

де D_0 – стала величина в межах сотень градусів, при яких здійснюється дифузія; E_a – енергія активації для стрибка атома; k – постійна Больцмана; T – температура дифузії.

Зміна концентрації розчиненої речовини з часом при одномірній дифузії визначається другим законом Фіка:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial N}{\partial x} \right).$$

При дифузії на невелику глибину з відносно низькою концентрацією домішки (концентрація електронів і дірок нижча від концентрації власних носіїв n

або $p < n$ при температурі дифузії) коефіцієнт дифузії не залежить від концентрації, тому рівняння (4.3) можна записати:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2}.$$

Однак при високих рівнях легування спостерігається значне збільшення коефіцієнта дифузії, що має місце при дії на рух домішки виникаючого при хімічній дифузії електричного поля і при взаємодії домішки та точкових дефектів з точковими дефектами, які знаходяться в різних заряджених станах.

Методи проведення дифузії. Параметри дифузійного шару визначаються видом легуючої домішки та її концентрацією. Технологічно складним є відтворення одержання поверхневих концентрацій домішок нижче 10^{18} см^{-3} при збереженні високої міри однорідності поверхні, особливо на пластинах великого діаметра. Для одержання відтворюваної та регульованої поверхневої концентрації домішки в напівпровідниковій пластині використовують:

- нанесення дифузанта на пластини в ході дифузії (зовнішнє джерело), при цьому розробляються методи регулювання вмісту сполуки домішки в атмосфері, яка оточує напівпровідникові пластини під час дифузії;

- нанесення дифузанта на пластини кремнію до дифузії, тут роль грає регулювання кількості домішки, що наноситься на пластини перед дифузією і забезпечення однорідності їх поверхні.

Основною вимогою дифузійної системи є доставка дифундуючої домішки до поверхні підкладки і проведення дифузії при певній температурі протягом певного часу.

Необхідно, щоб система задовольняла наступні вимоги: а) можливість регулювання поверхневої концентрації домішки; б) відсутність порушень поверхні підкладки при дифузії; в) можливість проведення процесу одночасно на великій кількості пластин. Джерела домішки діляться на зовнішні джерела та домішкові покриття.

Зовнішні джерела підрозділяють на газоподібні, рідкі, тверді. Тверді джерела мають вигляд: порошку (поміщаються в реактор у тиглях з кварцу, алунду, платини); дисків (тверді планарні джерела ТПД), вирізаних з матеріалу, який містить домішку, як правило, в зв'язаному вигляді (встановлюються у вигляді човників, паралельно до розміщених вертикально кремнієвих пластин) (рис.2.28) [2.1].

Домішковими покриттями, з яких здійснюється дифузія домішки, є леговані окисли; попередньо леговані полікристалічний або аморфний кремній та силіциди таких тугоплавких металів як молібден, титан, вольфрам; фоторезисти-дифузанти і високомолекулярні полімери, які містять домішки; бориди рідкоземельних металів. Цей перелік може бути з часом продовжений.

Дифузія в запаяній ампулі (закритій трубі). Здійснюється в запаяній і відкачаній кварцовій ампулі. Після дифузії труба відкривається. Така система вільна від забруднень.

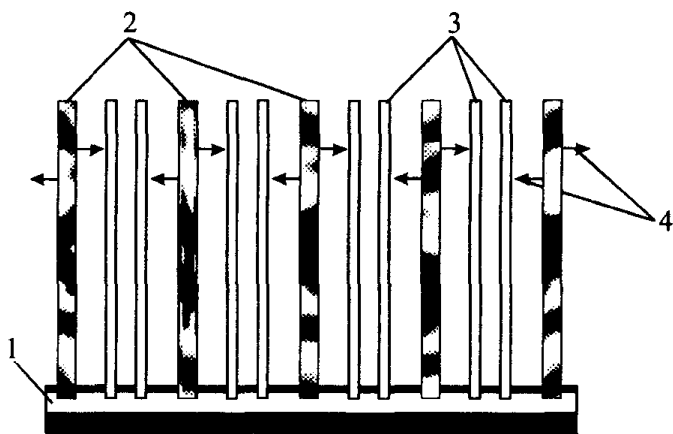


Рис. 2.28. Розташування твердих планарних джерел у кварцовому човнику: 1 – човник; 2 – джерела; 3 – кремнієві пластини; 4 – речовина, що випаровується

В системі запаяної ампули відбувається термічне випаровування джерела дифузанта, перенесення у газовій фазі, адсорбція атомів домішки на поверхні напівпровідника та стінках і дифузія домішки в підкладку. Залишковий чи остаточний тиск газу в ампулі повинен приблизно дорівнювати $1,33 \cdot 10^2$ Па. При значенні тиску більше $1,33 \cdot 10^3$ Па обмежується перенос дифузанта передусім за рахунок покриття поверхні сторонніми атомами, а при тиску менше 1,33 Па довжина вільного пробігу для дифузійної домішки перевищує розміри ампули, що приводить до неглибокої дифузії.

Поверхнева концентрація домішки, одержана в системі запаяної ампули, відповідає граничній розчинності домішки при температурі дифузії, оскільки для того, щоб джерело було нескінченним, його поверхня вибирається набагато більшою від поверхні системи в стані рівноваги, наприклад, використовується гранульоване джерело домішки. Тривалість дифузії також повинна бути значною, щоб і поверхня підкладки і стінки ампули перебували в рівновазі. Тому така система частіше використовується для глибоких шарів і для поверхневих концентрацій не нижчих від граничної розчинності в кремнії.

Джерелами домішки для дифузії в ампулах можуть служити як гази, так і рідкі та тверді тіла. Для дифузії бору придатними джерелами є трифтористий бор BF_3 , триокис бору B_2O_3 . При дифузії фосфору зовнішнім джерелом може бути елементарний червоний фосфор, п'ятиокис фосфору P_2O_5 , трихлористий фосфор PCl_3 або фосфін PH_3 . Можна також використовувати подрібнений у порошок кремній або SiO_2 , який містить достатню кількість домішки, фосфід кремнію.

Дифузія у вакуумі. Метод аналогічний методу запаяної ампули, однак ампула з кварцового скла не відповідає від вакуумної системи.

Зовнішнім джерелом у випадку дифузії домішки р-типу за таким методом може служити елементарний бор, змішаний з порошком SiO_2 , або порошок борного ангідриду B_2O_3 . Тиск у реакторі становить $1,33 \dots 1,33 \cdot 10^{-3}$ Па.

Дифузію проводять також з неперервних потоків газу з заданим тиском пари домішки, які вводяться в газову камеру.

Дифузія в замкнутому об'ємі (бокс-метод). В основі методу лежить припущення, що між окислом на поверхні пластини кремнію і окислом SiO_2 , який знаходиться поряд з ним і змішаний з домішками, виникає стехіометрична рівновага при нагріванні їх у замкнутому об'ємі (боксі). При випаровуванні домішки попадають в атмосферу боксу і потім адсорбуються на поверхні кремнію до того часу, доки вміст домішок у цьому окислі не буде дорівнювати їх вмісту в суміші. Окисел на поверхні кремнію стає джерелом домішок, що дифундують у кремній.

Бокс для проведення дифузії парів повинен бути закритим достатньо щільно, щоб не було великої втрати пари домішки, однак при цьому він повинен бути негерметичним, щоб забезпечити усунення вологи і надходження кисню, оскільки утворення окислу є важливим моментом для дифузії цього типу. Процес супроводжується коливанням швидкості витоків, яке змінює параметри дифузійного шару. Установки для проведення дифузії в замкнутому боксі зображені на рис. 2.29 – 2.32 [2.1].

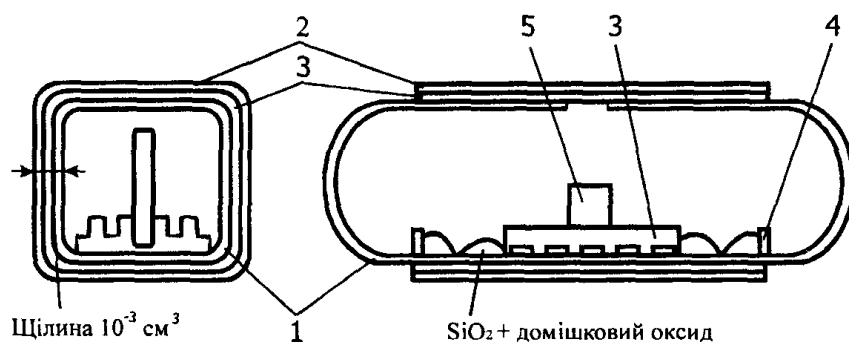


Рис. 2.29. Кварцовий реактор для дифузії за бокс-методом:

1 – реактор; 2 – кварцове скло; 3 – платинова смужка; 4 – платиновий човник; 5 – кремнієва підставка; 6 – кремнієва пластина

Для ущільнення двох ампул з кварцового скла використовують платину. Платина досить інертна до 1473 К, легко очищається і дає хороше ущільнення, яке зменшує швидкість витоків до допустимого рівня.

При проведенні дифузії бокс-методом частіше використовуються ті сполуки, які при температурі дифузії стають рідкими, оскільки при цьому покращується відтворюваність і однорідність дифузії. Однак тут неможливо широко регулювати поверхневу концентрацію, тому що в рідкому стані знаходяться високолеговані джерела.

При дифузії фосфору, бору, сурми, як правило, частіше працюють у тій області, де поверхнева концентрація визначається граничною розчинністю, а не потужністю джерела.

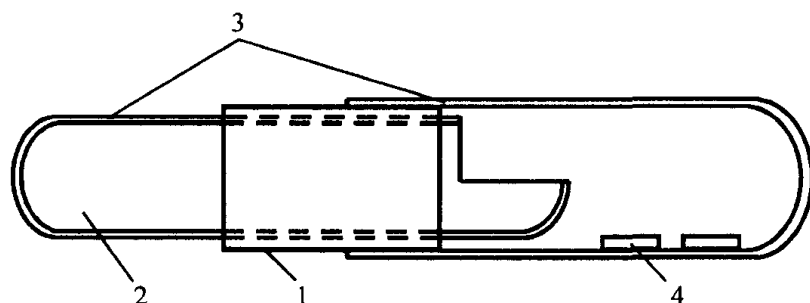


Рис. 2.30. Кварцовий реактор для дифузії за бокс-методом конструкції Терстона:
1 – платинова фольга;
2 – речовина джерела;
3 – реактор; 4 – зразок

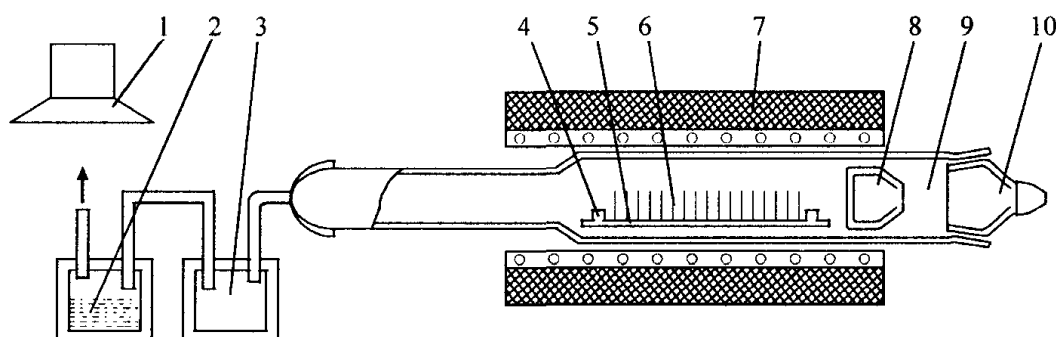


Рис. 2.31. Кварцовий реактор для дифузії за бокс-методом з кварцовою кришкою:
1 – витяжна парасоль; 2 – уловлювач з розчином; 3 – вільний уловлювач; 4 – випарники з джерелом домішки; 5 – човник; 6 – кремнієві пластини; 7 – нагрівач пічки;
8 – заглушка; 9 – реактор; 10 – кришка

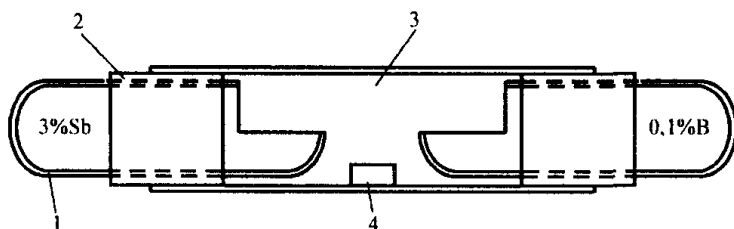


Рис. 2.32. Кварцовий реактор для проведення одночасної дифузії сурми та бору за бокс-методом: 1, 3 – кварцове скло; 2 – платинова фольга; 4 – кремнієвий зразок

Для дифузії бору джерелом служить окис бору B_2O_3 або борна кислота H_3BO_6 , яка поміщається в спеціальний алундовий тигель. Для дифузії фосфору використовуються P_2O_5 і суміш P_2O_5 і CaO як високолеговане рідке джерело. Точка плавлення технологічної суміші (93% P_2O_5 , 75% CaO) становить близько 773 К. Крім того, за допомогою бокс-методу для проведення дифузії двох домішок у протилежних кінцях ампули з кварцового скла вміщують пластини, які містять 3% Sb і 0,1% В, а в центрі – кремнієві. При відповідній комбінації часу і температури можна одержати на підкладці n-типу n-p-n-структуру. Установка зображена на рис. 2.32.

Якість промивання боксу інертним газом, ступінь попереднього очищення газу, кількість і розміщення джерел визначають однорідність легування, яка тим вища, чим ближча поверхнева концентрація домішки до граничної розчинності при температурі дифузії.

Методи дифузії в боксах забезпечують розкид не більше $\pm 10...20\%$ за бором (при $R_s = 20...30 \text{ Ом}/\square$) і $\pm 3...10\%$ за фосфором (при $R_s = 1...5 \text{ Ом}/\square$).

Методи відкритої труби. Підкладка вміщується в відкриту трубу з кварцу. Для кожної домішки використовують свою трубу і човник, щоб уникнути забруднень різними домішками. Пластины вводяться в трубу з одного кінця, а з другого подаються газу і домішка. Вихідний кінець труби сполучається з атмосферою. Труба розміщена вздовж осі одного або двох нагрівників. Кремнієві пластины звичайно розміщуються у високотемпературній частині труби; якщо використовується зовнішнє джерело, то воно розміщується ближче до входу газу.

Тверде джерело. При використанні зовнішніх джерел у човник з платини, алунду або кварцу завантажується джерело домішки і він вміщується з боку надходження газу-носія, перед човником з пластинами кремнію (рис. 2.33) [2.1].

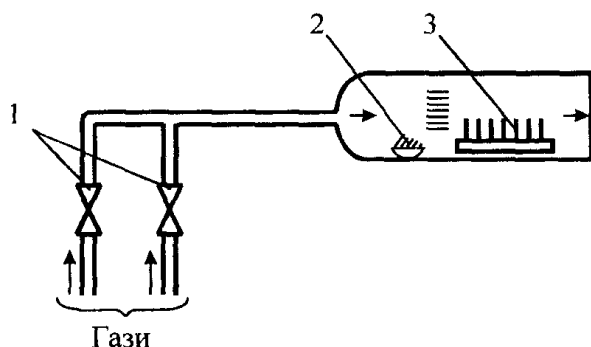


Рис. 2.33. Дифузійна система твердого джерела: 1 - ротаметр; 2 - платиновий човник з джерелом; 3 - пластины; 4 - кварцова труба

У процесі дифузії газ-носіє переносить пару від джерела до поверхні пластины. Для ізоляції джерела його потрібно пересунути в холоднішу зону печі. Однорідність легування значною мірою залежить від тиску пари в джерелі. Щоб регулювати тиск пари, джерело встановлюють при нижчій температурі, ніж температура дифузії. Для цього використовують двохзонну піч. Однак часто джерела і пластины розміщують при однаковій температурі.

При використанні домішкових покриттів виключається транспортування пари дифузанта до підкладки. Цей метод використовується для виготовлення пластин великого діаметра, де потрібне точне керування дифузиею. Осаджені тверді джерела дають змогу одержувати низькі поверхневі концентрації за рахунок підбору відповідного співвідношення домішка – зв'язувальна речовина. Поверхнева концентрація регулюється вже не межею розчинності, а концентрацією домішки в покритті. Цей метод дає змогу одержувати низькі концентрації в одностадійному процесі, відпадає необхідність стадій загінки і розгонки домішки. Альтернативним методом є метод іонного легування.

Рідке джерело. Газ-носіє продувається через рідину – джерело домішки і переносить пару від джерела до поверхні. Якщо наносити цей газ парою домішки, то концентрація домішки в кремнії не буде залежати від потоку газу. Поверхнева концентрація передусім залежить від температури рідкого джерела і дифузійної системи (рис. 2.34) [2.1]. Вміст пари домішки в реакторі встановлюють регулюванням потоку газів через змішувач. Рідкими джерелами можуть бути галогени, які одночасно зменшують забруднення системи важкими металами і сприяють формуванню бездефектних областей, які містять активні елементи. Однак при цьому можливе локальне розчинення напівпровідника, при якому його поверхня стає матовою.

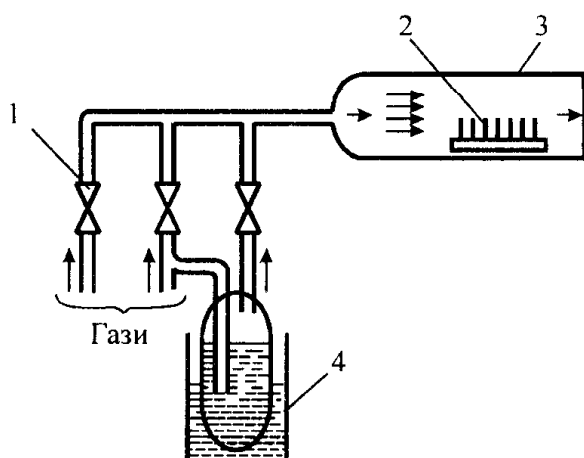


Рис. 2.34. Дифузійна система рідкого джерела: 1 – ротаметр; 2 – пластини в човнику; 3 – кварцова труба; 4 – рідке джерело

Утворені в процесі дифузії фосфору плівки фосфорно-силікатного скла (ФСС) є хорошим засобом гетерування домішок у напівпровідниковій технології. При температурі осадження ФСС утворюються індуковані дифузійні напруження попереду фронту дифузії. Ця область служить стоком для металічних домішок. Крім того, ФСС служить постійною пасткою для цих забруднень, так що вони не переходять у розчин під час охолодження.

Однорідність і відтворюваність легування в робочій зоні дифузійної печі визначаються при постійній температурі розподілом у ній тиску пари утвореного окислу домішки.

Газоподібне джерело. Дифузійна система (рис. 2.35) [2.1] нагадує систему для рідкого джерела з тією відмінністю, що джерелом дифузанта служить не потік газу-носія, який проходить через рідке джерело, а балон з сумішшю PH_3 (або B_2H_6) та інертного газу, наприклад, аргону. Газом-носієм може бути азот у суміші з киснем. В цьому методі спостерігається збільшення поверхневого опору в напрямку протікання газу, однак він дає змогу одержати малий розкид поверхневого опору в широкому інтервалі поверхневих концентрацій. При дуже малому вмісті кисню в газовій суміші можуть утворюватися плівки, які важко усунути.

Імпульсні методи проведення дифузії. Імпульсна або швидка термічна обробка дає можливість одержувати прилади мікронних розмірів, замінюючи процеси, які проводяться в печі: відпал іонно-імплантованих шарів, дифузію домішки з домішкових покриттів, окислення, формування силіцидів, пасивацію, сплавлення омичних контактів.

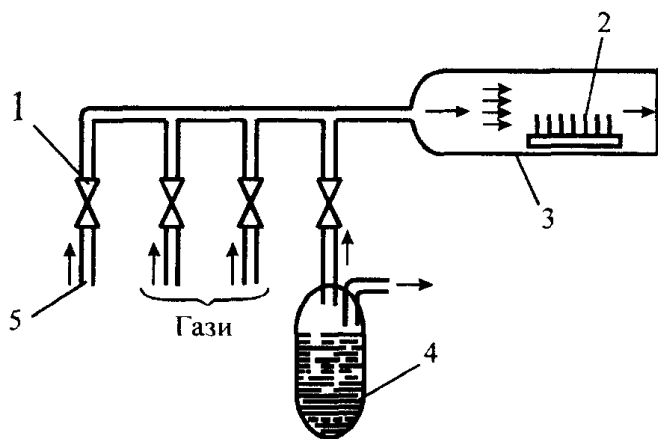


Рис. 2.35. Дифузійна система газоподібного джерела:

1 – ротаметр; 2 – пластини в човнику; 3 – кварцова труба;

4 – хімічна пастка;

5 – газоподібне джерело

Імпульсна термічна обробка базується на використанні інтенсивного когерентного (лазерного) або некогерентного світлового випромінювання, електронних та іонних пучків.

В залежності від тривалості дії випромінювання існує три режими відпалу: адіабатичний ($t < 10^{-7}$ с), теплового потоку ($t = 10^{-6} \dots 10^{-2}$ с), ізотермічний ($t > 10^{-2}$ с). Джерелами потоків некогерентного світла при тривалості процесів більше 10^{-2} с можуть служити імпульсні лампи в мілісекундному діапазоні тривалості імпульсу, а також галогенні лампи розжарювання, ксенонові дугові лампи і графітові нагрівники для секундних експозицій.

В залежності від умов імпульсного нагрівання і, в першу чергу, від експозиційної потужності випромінювання можна проводити термообробку, як у твердій фазі, так і з плавленням рекристалізацією. Для сучасної технології виготовлення ІС найцікавішим є твердофазний режим, оскільки він добре узгоджується з іншими традиційними технологічними операціями. При використанні багаторазового сканування електронного променя відсутні різкі

температурні градієнти, які приводять до виникнення термостійких комплексів точкових і протяжних дефектів, покращуються відтворюваність і якість процесу відпалу, виникає можливість контролю і регулювання дифузійного перерозподілу домішки.

Прискорену дифузію в тліючому розряді проводять при температурі не вищій за 573 К, а дифузію при низьких температурах бомбардуючими іонами з плазми, включаючи іони легуючої домішки, підкладки, успішно застосовують для виготовлення тонких дифузійних шарів $x_j \leq 0,1$ мкм.

Радіаційно-стимульована дифузія. Дифузія домішки в напівпровіднику може підсилюватися також під дією опромінювання швидкими частинками, оскільки дифузія в твердих тілах здійснюється, в основному по дефектах кристалічної решітки, а опромінення швидкими частинками приводить до утворення таких дефектів. Загальна дія перенесення домішок за допомогою радіаційно-стимульованої дифузії при температурах від 77 до 400 К еквівалентна термічній дифузії від 773 до 1573 К.

2.6. Технологія епітаксійних шарів

Фізичні основи процесу епітаксії. *Епітаксія* – орієнтований ріст шарів, кристалічна ґратка яких повторює структуру підкладки [2.1]. Якщо підкладка і шар складаються з одної речовини, то процес називають автоепітаксійним, якщо з різних – гетероепітаксійним.

Хемоепітаксія – процес утворення нової фази при хімічній взаємодії речовини підкладки з речовиною нарощуваного шару.

Прагнення довільної системи до мінімуму вільної енергії приводить до того, що в процесі епітаксії нарощувані шари орієнтуються з деякою відповідністю по відношенню до стичної атомарної площини підкладки. По відношенню до епітаксії невідповідність кристалічних решіток може бути визначена як $d = (a_i - b_i)/a_i$ при $i=1,2$. Індекс i використовується для позначення двох вибраних напрямків на поверхні розділення: a_i , b_i – нормальні міжатомні відстані в плівці та підкладці в напрямку i .

Когерентна поверхня розділу – поверхня, через яку здійснюється досконале сполучення атомів обох речовин ($a_i = b_i$). Звичайно такі поверхні (площини) визначають в індексах Міллера.

Існує кілька моделей, які пояснюють характер сполучень суміжних атомних площин двох речовин. Якщо параметри решітки речовини мало відрізняються, говорять про *псевдоморфізм* – результат пристосування міжатомних відстаней нарощуваного кристала до міжатомних відстаней підкладки. Однак здебільшого спостерігається стрибкоподібна зміна параметра решітки на межі розділення і виникнення дислокацій, які знижують виникаючі механічні напруження.

Підкладка має значний вплив на процес кристалізації нарощуваної речовини. Атом, який приходить з зовнішньої фази, може передати їй свою кінетичну енергію. Сили зв'язку між підкладкою та адсорбованими атомами утримують останні на поверхні; кристалохімічні особливості підкладки впливають на швидкість поверхневої дифузії адсорбованих атомів і тим самим на кристалографічну орієнтацію осаджуваної плівки. Недосконалості будови поверхні підкладки також впливають на характер розподілення і будову нарощуваного матеріалу.

В процесі проведення епітаксійного нарощування при високих пересиченнях легко утворюються зародки різних орієнтацій і епітаксія не відбувається. При збільшенні температури підкладки може відбуватися також зміна орієнтації росту.

Методи проведення епітаксії. *Конденсація з парової фази у вакуумі.* Атоми напівпровідника переносяться безпосередньо від джерела до кристала-підкладки без проміжної взаємодії шляхом випаровування, сублімації, розпилення і т.д. Кількість атомів або молекул, які осіли на підкладці значною мірою залежить від температури підкладки, стану її поверхні, природи осаджуваних атомів, їх кінетичної енергії і кута падіння (рис.2.36, а) [2.1].

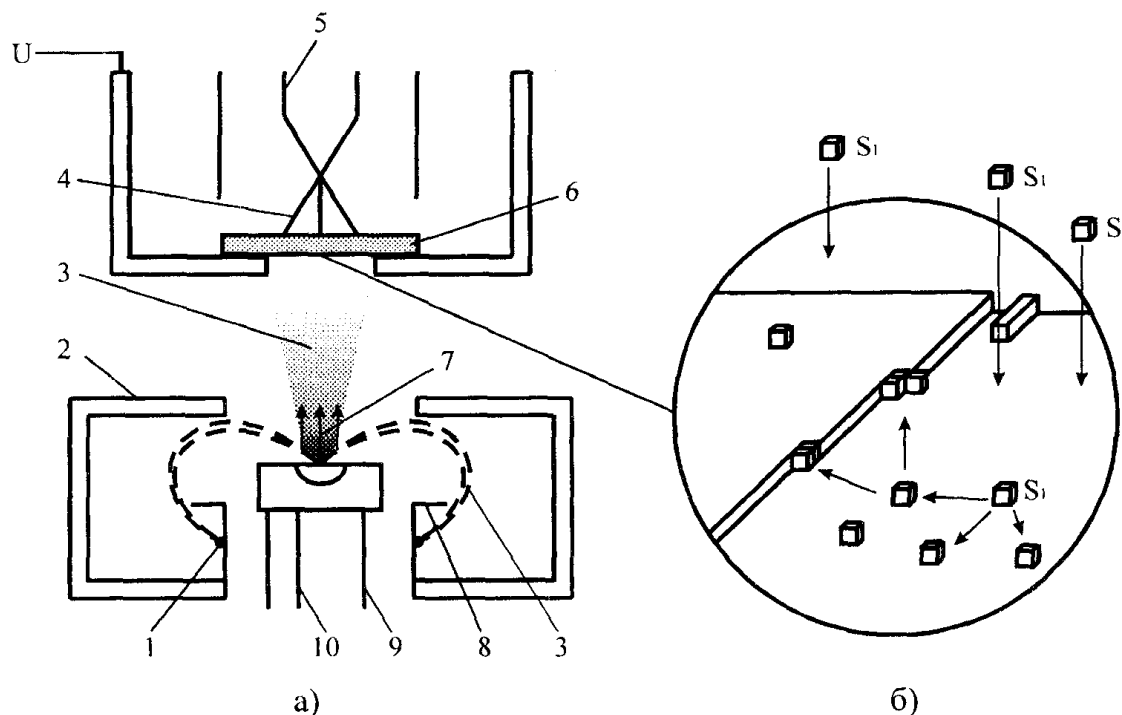


Рис. 2.36. Випаровування та нагрівання підкладки електронним бомбардуванням у процесі епітаксії: 1 – нитка розжарення джерела; 2 – електростатичний екран; 3 – пара кремнію; 4 – електронний пучок; 5 – нитка підігрівання підкладки; 6 – кремнієва підкладка; 7 – розплавлений кремній; 8 – екран; 9 – основа з водяним охолодженням (нульовий потенціал); 10 – твердий кремній

Кінетика процесу кристалізації значною мірою залежить від міграції адсорбованих атомів кристала. Якщо б осаджувані частинки зв'язувались з поверхнею в точках надходження, то завжди утворювався б аморфний пористий шар речовини. Однак частинки мають значну рухливість.

Теплове розсіювання при епітаксії відбувається в момент співудару і під час міграції атомів підкладкою. Теплова рівновага характеризується часом життя адсорбованих атомів τ_s .

Епітаксію слід проводити по можливості в глибшому вакуумі, оскільки інтенсивність потоку залишкового газу, який бомбардує підкладку в вакуумі $0,13 \cdot 10^{-3}$ Па, еквівалентна наростанню одного моношару в секунду.

При автоепітаксії кремнію атоми, рухаючись по нагрітій поверхні, займають положення, які відповідають кристалічній структурі підкладки, формуючи плоску двомірну ґратку з острівців, що ростуть вздовж поверхні (рис. 2.36, б). Конденсація з молекулярного потоку на холодній підкладці приводить до утворення полікристалічних або аморфних плівок. При нагріванні підкладки вище 1273 К одержують монокристалічні плівки, їх якість значною мірою залежить від стану підкладки і залишкового тиску газу. Для забезпечення чистоти процесу випаровування кремнію проводять прямим нагріванням електричним струмом пластини кремнію, віддаленої від підкладки на $(1 \dots 10) \cdot 10^2$ мкм. Одержані даним методом полі- і монокристалічні плівки мають більший питомий опір. Залежність швидкості випаровування кремнію від температури наведена на рис. 2.37 [2.1].

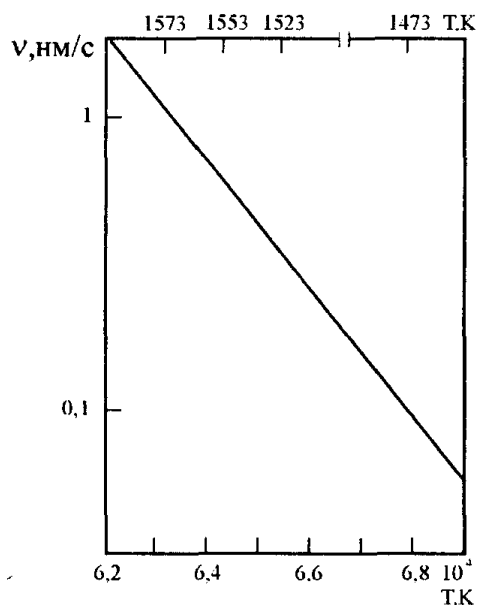


Рис. 2.37. Залежність швидкості випаровування кремнію від температури

Залежно від способу доставки кремнію до підкладки існують такі методи одержання епітаксійних шарів кремнію у вакуумі: метод молекулярних пучків у вакуумі, сублімація та катодне розпилення. Спільним для даних методів є те, що кремній при випаровуванні і перенесенні від джерела до підкладки, а потім при кристалізації не має яких-небудь необоротних хімічних змін. Відрізняються вони один від одного методикою випаровування кремнію, умовами осадження і апаратним оформлення процесу.

Метод молекулярних пучків у вакуумі (МПВ). Даний метод полягає у випаровуванні напівпровідника з рідкої фази (джерела) і наступній його кристалізації на поверхні розігрітої підкладки, розміщеної поблизу від джерела.

Способи випаровування напівпровідників за методом МПВ можна класифікувати як тигельні і безтигельні (або автотигельні).

Для виготовлення тиглів використовують Al_2O_3 , ThO , SiO_2 і графіт. Шари напівпровідників, одержані таким чином, звичайно забруднені матеріалом тигля внаслідок великої хімічної активності кремнію в розплавленому стані. Розглянемо даний метод для кремнієвої технології.

Для одержання епітаксійного кремнію найчастіше використовуються безтигельні методи.

Кремній, який підлягає випаровуванню, розміщується у вигляді стержня всередині вольфрамової спіралі, яка є джерелом електронів. Випаровування кремнію здійснюється з краплі, утвореної при електронному бомбардуванні кінця стержня. Краплю розплавленого кремнію можна підтримувати в підвішеному стані всередині високочастотного індуктора або утворювати у вигляді перетяжки в місці контакту двох кремнієвих електродів, якими пропускають електричний струм.

Спосіб випаровування кремнію з рідкої фази при пропусканні струму через брусок кремнію використовує сильну температурну залежність електропровідності кремнію і стрибкоподібну зміну провідності при переході від твердого до рідкого стану (рис. 2.38) [2.1]. Охолодження нижньої грані бруска при пропусканні через нього струму дає змогу випаровувати кремній з рідкої фази, утвореної в центрі верхньої грані бруска, і розміщеної на твердій нижній. Цей спосіб дає змогу осаджувати шари кремнію зі швидкістю 0,05...0,1 мкм/хв.

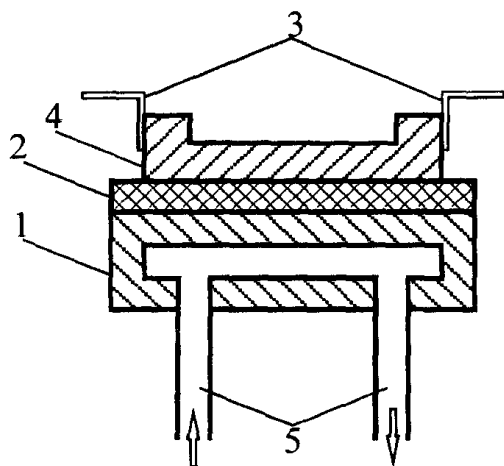


Рис. 2.38. Схема пристрою для випаровування кремнію:
1 – основа; 2 – ізолюючий прошарок;
3 – струмопроводи; 4 – кремнієвий брусок; 5 – мідні трубки

Випарники з електронно-променевим нагріванням кремнію мають кращі технологічні характеристики.

Типовий пристрій для електронно-променевого нагрівання кремнію зображений на рис. 2.39 [2.1]. Джерело кремнію заземлене і нагрівається електронним пучком. Під дією високого потенціалу (на катоді 9 кВ), який оточує джерело, електрони прискорюються і фокусуються на заданій ділянці зливка на

аноді. Якість фокусування пучка залежить від геометрії системи, але в правильно сконструйованому пристрої нагрів обмежується ділянкою меншою 3 мм в діаметрі.

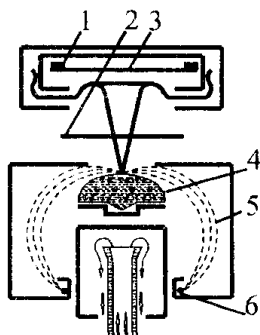


Рис. 2.39. Схема пристрою для електронно-променевого нагрівання кремнію:
1 – нагрівач підкладки; 2 – заслінка; 3 – кремнієва підкладка; 4 – кремнієве джерело;
5 – електронний пучок; 6 – вольфрамова нитка

Речовина, що випаровується в підкладку, розміщується в геометричній тіні відносно джерел електронів для обмеження забруднень, які виділяються з катода. Розплавлений кремній розміщується на поверхні твердого кремнію і контактує тільки з нею. Весь зливоч знаходиться на водоохолоджуваній підставці, що запобігає забрудненню кремнію що випаровується, матеріалом тигля.

Цей спосіб нагрівання дає змогу підтримувати температуру джерела на кілька сотень градусів вищою від точки плавлення кремнію, внаслідок чого досягаються високі швидкості нарощування (до 4 мкм/хв) при мінімальних забрудненнях.

Нагрівання підкладок проводять за допомогою різних методів: дрітними і стрічковими нагрівниками, виготовленими з танталу, молібдену, вольфраму, або розфокусованим електронним променем.

Осадженню шарів кремнію передують підготовчий етап, який полягає в послідовному знегажуванні нагрівників, джерела і підкладки кремнію. Після попередньої високотемпературної обробки підкладки (до 1623 К) її температуру знижують до заданої. З моменту відкриття заслінки, розміщеної між джерелом і підкладкою, починається процес нарощування шарів кремнію.

Сублімація. Метод полягає у випаровуванні напівпровідника з розігрітої до високої температури (для кремнію до 1623 К) поверхні твердого зразка і наступної його кристалізації на розміщеній поблизу джерела поверхні підкладки, яка має нижчу температуру при значенні тиску залишкових газів $133 \cdot (10^{-7} \dots 10^{-10})$ Па.

При сублімації кремнію застосовують такі способи розігрівання джерела: пряме пропускання струму через нитку або брусок кремнію, індукційне та електронно-променеве нагрівання. Нагрівання підкладок проводиться лампами розжарювання, встановленими поза камерою, випромінюванням від джерела кремнію, стрічковими нагрівниками, пропусканням струму через кремнієву підкладку або розфокусованим електронним пучком.

Схема одного з пристроїв для одержання епітаксійних шарів кремнію методом вакуумної сублімації показана на рис. 2.40 [2.1].

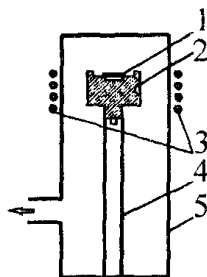


Рис. 2.40. Схема пристрою для одержання шарів кремнію методом сублімації:
1 – кремнієва підкладка; 2 – джерело кремнію (підставка); 3 – високочастотний індуктор;
4 – тримач з кварцу; 5 – робоча камера з кварцу

Підкладка кремнію встановлюється на підставці, виготовленій з монокристалічного кремнію, яка є одночасно джерелом кремнію. Підставка нагрівається за допомогою високочастотного індуктора ($P = 3$ кВт; $f = 1,5$ МГц) до температури 1623...1653 К. При цьому можливе нагрівання підставки випромінюванням до 1373 К. Швидкість росту шарів становить 0,3 мкм/хв.

Незалежно від методу осадження шарів кремнію вибраний спосіб нагрівання підкладки повинен виключати можливість забруднення шарів, забезпечувати рівномірність нагрівання по всій поверхні підкладки, стабільно підтримувати задану температуру, забезпечувати регулювання температури в широких межах.

Застосування того чи іншого методу нагрівання підкладки значною мірою зумовлено конструктивними особливостями використовуваного обладнання або вибраного методу осадження. Так, у методі сублімації найчастіше використовують нагрівання підкладки пропускання струму аналогічно до нагрівання випарника або застосовують дротяні і стрічкові нагрівники. В останньому способі можливе забруднення шарів домішками від нагрівників.

Метод одержання шарів кремнію, оснований на сублімації кремнію, простіший в апаратурному оформленні, проводиться в порівняно "чистих" вакуумних умовах, однак має низькі швидкості осадження (максимальна 0,3 мкм/хв), малий коефіцієнт корисної дії (ККД) і обмежені можливості при виготовленні напівпровідникових приладів.

Найважливішими змінними в процесі осадження шарів кремнію методами сублімації з МПВ є тиск пари кремнію і температура підкладки. Тиск пари, як правило, регулюється температурою джерела. На густину молекулярного пучка, крім температури джерела, впливають також геометричні фактори (розмір зони випаровування і відстань до підкладки). Відношенням густини падаючого молекулярного пучка до густини зворотного потоку, викликаного випаровуванням з поверхні підкладки при заданій температурі, визначається пересичення пари в області фронту кристалізації. Від міри цього пересичення залежить і швидкість осадження шарів. Швидкість осадження регулюється також зміною відстані підкладка–випарник.

Катодне розпилення. Даний метод розпилення відрізняється від двох вищеописаних тим, що процес здійснюється в середовищі інертного газу (звичайно аргону) при значенні тиску $133 \cdot (10^{-2} \dots 10^{-4})$ Па. Матеріал, що випаровується, в цьому випадку є катодом тліючого розряду. Атоми і іони матеріалу, вибиті з поверхні катода позитивними іонами аргону, конденсуються на розігрітій до заданої температури підкладці. Схема пристрою для катодного розпилення кремнію наведена на рис. 2.41 [2.1]. Ступінь пересичення при катодному розпиленні для різних температур підкладки визначається за зміною іонного струму між електродами.

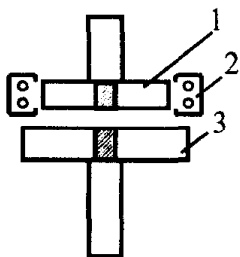


Рис. 2.41. Схема пристрою для катодного розпилення кремнію: 1 – тримач підкладки (анод); 2 – нагрівач підкладки; 3 – випарник (катод)

Переваги цього процесу – легкість очистки поверхні, простота обладнання, відсутність тиглів, достатня універсальність, сталість складу легованого кремнію в процесі його осадження, порівняно низька температура кристалізації ($1023 \dots 1173$ К). Однак швидкості катодного розпилення дуже низькі. Крім того, наявність газів у робочій камері, необхідних для підтримки тліючого розряду, приводить до забруднень шарів в процесі розпилення.

Кристалізація з газової фази. Атоми напівпровідника переносяться в складі хімічної сполуки, яка дисоціює на підкладці. При цьому відбувається перенесення реагентів до поверхні кристалічної підкладки; адсорбція і реакція реагентів на поверхні; десорбція продуктів реакції; перенесення продуктів реакції з кристала до основного потоку і впорядкування кристалізації адсорбованих атомів кремнію в ґратці. Ріст достатньо товстих досконалих монокристалічних шарів ускладнюється утвореними дефектами росту.

Осадження при нормальному тиску. Зараз у технології напівпровідників осадження з газової фази при нормальному тиску застосовується для епітаксійного вирощування кремнію, осадження плівок SiO_2 , Si_3N_4 , напівкристалічного кремнію тощо. Цей метод забезпечує достатню однорідність нанесених покриттів і може проводитися при низькій температурі. Для осадження плівок полікристалічного кремнію і нітриду кремнію використовуються установки вертикального і горизонтального типів з нормальним тиском.

Схема горизонтального епітаксійного реактора, який використовує високочастотне нагрівання, представлена на рис. 2.42. Основні гази, які застосовуються в реакторі, і їх призначення, наведені в табл. 2.6 [2.1].

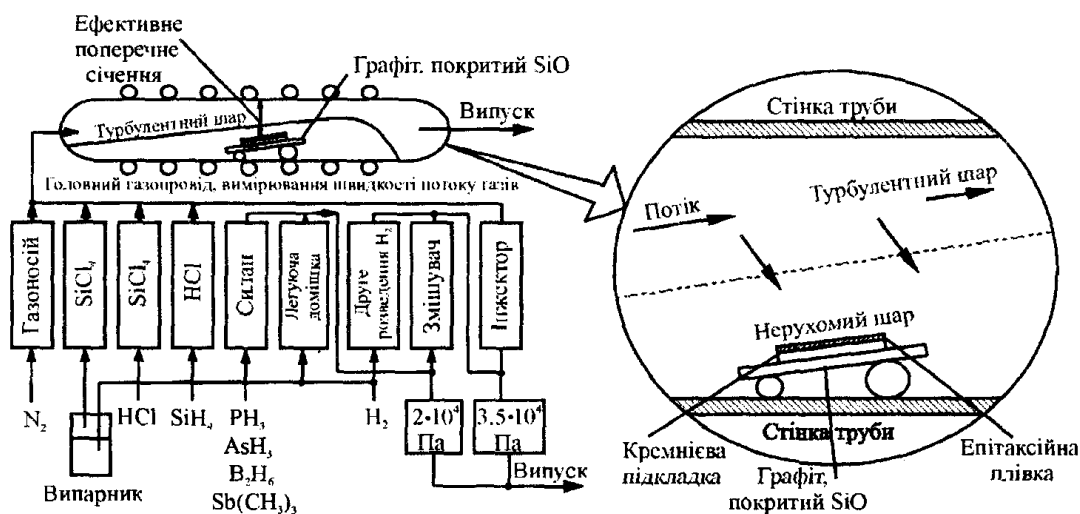


Рис. 2.42. Схема пристрою для вирощування епітаксійних плівок кремнію з горизонтальним реактором високочастотного нагрівання

Таблиця 2.6.

Гази та їх призначення при використанні в процесі епітаксійного осадження

Газ	Призначення	Примітка
N ₂	Газоносії	Очищує від вибухонебезпечних і токсичних газів, які є в реакторній трубі перед напуском повітря
H ₂	Те саме	Використовується для вирощування епітаксійних шарів
SiCl ₄	Джерело Si	Звичайно рідке джерело Si випаровується в пухирцях H ₂ , пар корозійний, температурний інтервал 1423...1473 К, швидкість росту 0,2...10 мкм/хв
SiH ₄	Те саме	Звичайно газоподібне джерело Si, пірофорний газ, температурний інтервал 1273...1323 К, швидкість росту 0,2...1,0 мкм/хв
HCl	Травник Si	Використовується для підготовки поверхні підкладки, корозійний токсичний газ
PH ₃	Легування Si	Використовується як джерело фосфору для легування епітаксійних плівок, займистий токсичний газ
AsH ₃	Те саме	Властивості, аналогічні PH ₃
Sb(CH ₃) ₃	Те саме	Рідке джерело сурми використовується як випарник при концентрації декількох сотень на мільйон молекул H ₂ замість нестабільного SbH ₃ , пара токсична
B ₂ H ₆	Легування	Властивості, аналогічні PH ₃ .

Осадження при низькому тиску. Установки, які працюють при низькому тиску, прості конструктивно, продуктивні, забезпечують хорошу однорідність плівки, мають мале газоспоживання. На рис. 2.43 [2.1] показана одна з таких установок, в якій газом-носієм є гелій. При осадженні, наприклад, плівки полікристалічного кремнію шляхом піролізу силану можна легко одночасно

обробляти 50 пластин діаметром 102 мм. однорідність по товщині становить $\pm 2\%$. З меншою однорідністю по товщині на цій установці можна одержувати плівки Si_3N_4 (табл. 2.7) [2.1].

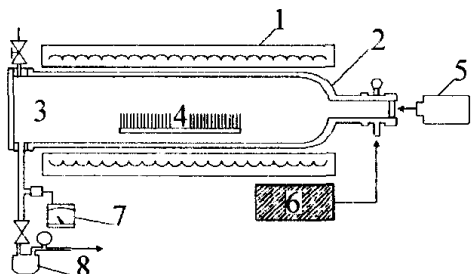


Рис. 2.43. Схема установки для осаждения з газової фази при низькому тиску:
1 – пічка резистивного нагрівання; 2 – реакційна пічка; 3 – човник; 4 – пластина;
5 – пірометр; 6 – система регулювання газу; 7 – вакуумметр; 8 – вакуумний насос

Таблиця 2.7.

Основні типи реакцій осадження, які використовуються в установках осадження з газової фази при низькому тиску

Осаджувана плівка	Рівняння реакції осадження
Полікристалічний кремній	$773 \dots 973 \text{ K}$ $\text{SiH}_4 \longrightarrow \text{Si} + 2\text{H}_2$
Нітрид кремнію	$923 \dots 1173 \text{ K}$ $\text{SiH}_2 + \text{NH}_3 \longrightarrow \text{Si}_3\text{N}_4 + \text{H}_2$ $1023 \dots 1073 \text{ K}$ $\text{SiH}_2\text{Cl}_2 + \text{NH}_3 \longrightarrow \text{Si}_3\text{N}_4 + \text{HCl}$
Двооксид кремнію	$723 \dots 873 \text{ K}$ $\text{SiH}_2 + \text{O}_2 + \text{PH}_3 \longrightarrow \text{SiO}_2 + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{H}_2$ $\text{Si}(\text{OC}_3\text{H}_7)_4 \xrightarrow{> 973 \text{ K}} \text{SiO}_2 + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{H}_2\text{O}$ $\text{або } + (\text{CH}_3\text{O})_3\text{PO} \longrightarrow \text{SiO}_2 + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{H}_2\text{O}$ $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$

Плазмове осадження. В кремнієвій технології застосовується метод плазмового осадження нітриду кремнію, що відрізняється значними перевагами перед іншими методами. За рахунок регулювання величини потоку газу (рис. 2.44) в залежності від рівня ВЧ-потужності і умов розподілу можна одержати плівку з високою однорідністю на великій площі. В установці використовується система газів $\text{N}_2 + \text{NH}_4 + \text{SiH}_4$ і осаджується плівка складу $\text{Si}_x\text{H}_y\text{N}_2$, температура обробки $473 \dots 573 \text{ K}$, вакуум $0,26 \cdot 10^2 \text{ Па}$, ВЧ- потужність 500 Вт , швидкість осадження плівки $0,67 \text{ нм/с}$.

Найчастіше використовується для осадження кремнію силан (SiH_4), який внаслідок високої температури осадження мало чутливий до окислення, що приводить до виникнення поверхневих дефектів. Розкладання силану на поверхні кремнієвої підкладки відбувається відповідно до реакції

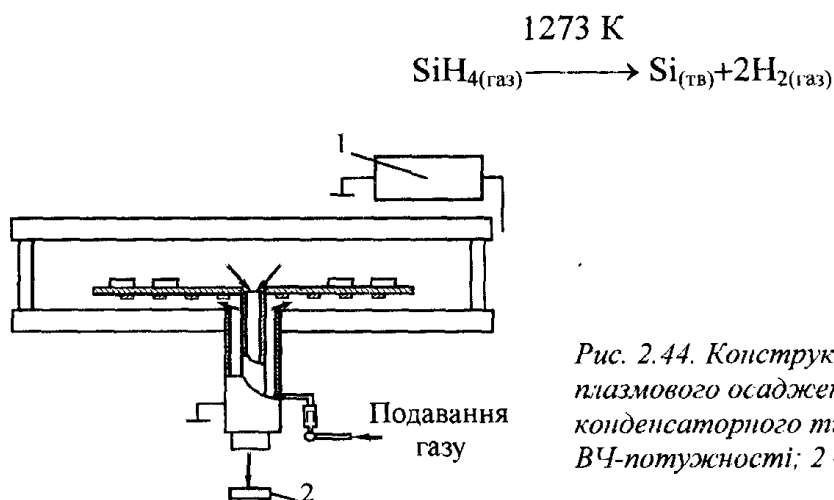


Рис. 2.44. Конструкція установки плазмового осадження з газової фази конденсаторного типу: 1 – джерело ВЧ-потужності; 2 – вакуумний насос

Установки для епітаксійного вирощування відновленням тетрахлориду кремнію мають вертикальний або горизонтальний реактор. Перед осадженням пластини кремнію обробляють у потоці хлористого водню при 1473 K для усунення залишкової поверхневої плівки SiO_2 , потім у реактор подається водень, насичений паром тетрахлориду і на пластині відбувається відновлення SiCl_4 до атомарного кремнію



Швидкість росту плівки кремнію пропорційна парціальному тиску силану, її температурні залежності для вертикального і горизонтального реакторів наведені на рис. 2.45 [2.1]. Збільшення вмісту SiCl_4 до 5% приводить до збільшення швидкості росту плівки (рис. 2.46) [2.1]; потім швидкість зменшується внаслідок неповного відновлення SiCl_4 . При невисоких температурах підкладки і великому вмісті SiCl_4 утворюються пухкі аморфні плівки. Збільшення температури і зменшення молярної частки SiCl_4 зумовлюють ущільнення плівок. Вирощування проводять при температурах підкладки 1473...1553 K, молярному вмісті SiCl_4 1...3% і швидкості протікання водню $(2...3) \cdot 10^5 \text{ м}^3/\text{с}$. Оптимальна швидкість росту 16...20 нм/с.

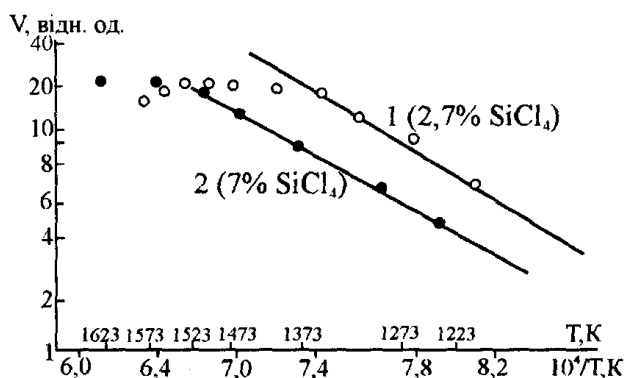


Рис. 2.45. Температурна залежність швидкості росту плівки кремнію для вертикального (1) та горизонтального (2) реакторів

Кремнієва епітаксія широко застосовується в технології кремній на сапфірі (КНС), де на сапфіровій підкладці вирощується епітаксійний шар кремнію товщиною 0,5...1,0 мкм, в якому за допомогою травлення одержують острівці для формування р- і n- областей. В результаті досягається висока густина пакування елементів з хорошою ізоляцією без паразитних зв'язків.

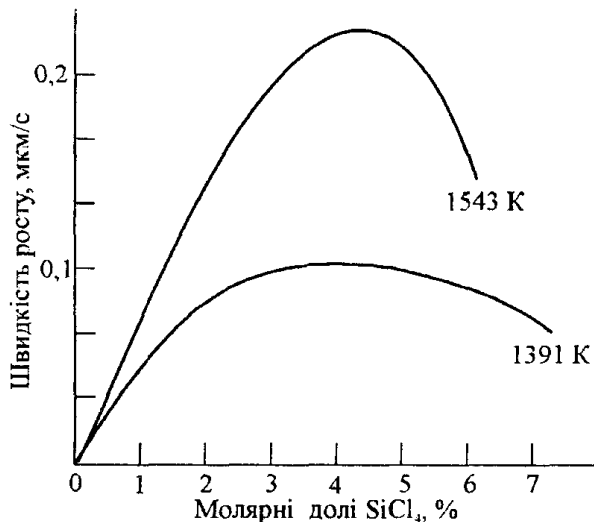


Рис. 2.46. Залежність швидкості росту плівки кремнію від молярного вмісту SiCl_4

Рідкофазна епітаксія. Полягає в нарощуванні монокристалічного шару з металічного розплаву, насиченого напівпровідниковим матеріалом, який рекристалізується на поверхні підкладки. При температурній рівновазі підкладки з розчином нарощування відбувається внаслідок перенасичення розчину. Розчинником може бути легкоплавкий компонент нарощуваної сполуки, що знижує температуру кристалізації, підвищує чистоту нарощуваного шару і зменшує концентрацію вакансій. Для одержання епітаксійних шарів сполук $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ використовуються тільки монокристалічні підкладки.

На рис. 2.47 [2.1] показана схема пристрою, який забезпечує одержання гетеропереходів (Ge-Si, GaAs-GaP) товщиною менше 1 мкм.

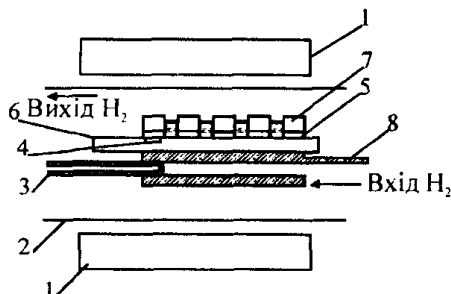


Рис. 2.47. Схема рідинної епітаксії:

1 - електрична пічка; 2 - кварцова труба; 3 - термопара; 4 - обмежувач; 5 - підкладка; 6 - основний графітовий тримач; 7 - графітовий ковзний тримач розчину; 8 - штовхач

При епітаксії, яка керується струмом (електроепітаксії), через вирощуваний граничний шар пропускають електричний струм, температура системи

підтримується постійною. Таким способом вирощуються напівпровідникові шари InSb, GaAs, InP, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, гранатів.

Вдосконалення реакторів для рідинної епітаксії можливе шляхом пропускання струму через межу розчин – підкладка (рис. 2.48) [2.1], що супроводжується пельтьє-нагріванням або пельтьє-охолодженням, в залежності від напрямку струму. Кінетика росту плівки залежить від товщини шару, утвореного на межі розчину.

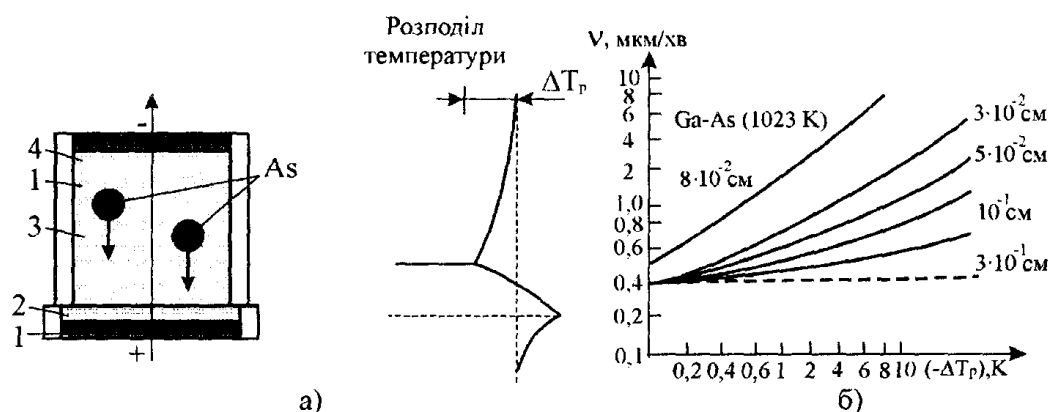


Рис. 2.48. Електроепітаксійне нарощування: а) конструкція комірки для електроепітаксійного нарощування GaAs з розчину $\text{Ga}=\text{As}$; б) залежність швидкості росту плівки GaAs з розчину $\text{Ga}=\text{As}$ від зміни швидкості на межі: 1 – електричний контакт; 2 – підкладка ($\text{Ga}=\text{As}$); 3 – розчин GaAs; 4 – ізолятор (— — — ефект Пельтьє з електроміграцією; — — — тільки електроміграція)

Твердофазна епітаксія (ТФЕ). В основі ТФЕ лежать процеси твердофазної взаємодії в багатошаровій тонкоплівковій системі, які відбуваються при ізотермічному відпалі. В нарощуванні епітаксійних шарів можуть брати участь дві або три тверді фази, які мають хороший контакт між собою. Одна з фаз – монокристалічна підкладка, інші можуть бути аморфними, полікристалічними або частково орієнтованими. При епітаксії з твердої фази відбувається процес перекристалізації однієї з фаз і її орієнтоване нарощування на поверхні підкладки в процесі ізотермічного відпалу багатошарової композиції.

Перед процесом ТФЕ на монокристалічних підкладках кремнію або германію з орієнтацією (111) або (100) осаджують плівку металу за допомогою електронно-променевого випарювання з швидкістю $0,2 \dots 6 \text{ nm/s}$ і проводять процес осадження аморфного напівпровідника з швидкістю $1 \dots 10 \text{ nm/s}$. Тиск у процесі осадження становить $(0,67 \dots 1,33) \cdot 10^{-4} \text{ Па}$. Потім без розвакуування системи зразки піддають ізотермічному відпалу в вакуумі $10^{-4} \dots 10^{-3} \text{ Па}$ або в потоці сухих інертних газів (Ar , N_2).

Молекулярно-променева епітаксія (МПЕ). Полягає у взаємодії кількох молекулярних пучків з нагрітою монокристалічною підкладкою з осадженням на

ній елементарних компонентів. Схема установки для вирощування плівок методом МПЕ зображена на рис. 2.49 [2.1].

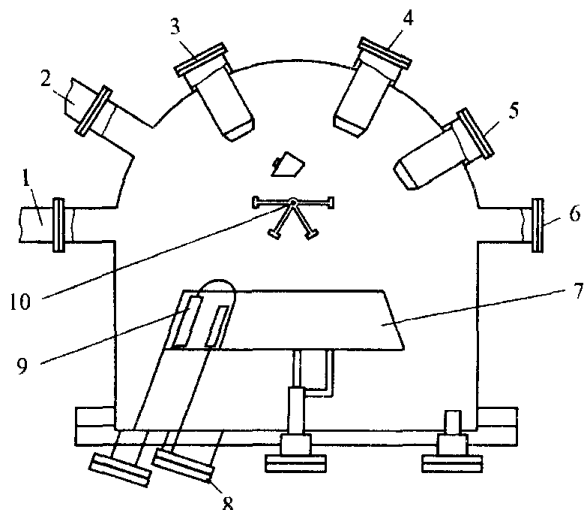


Рис. 2.49. Схема установки для вирощування плівок методом МПЕ:

1 – електронна гармата; 2 – система дифракції електронів; 3 – іонна гармата; 4 – мас-спектрометр; 5 – оптико-електронна система; 6 – екран для дифракції електронів низьких енергій; 7 – кріопанель; 8 – комірка Кнудсена; 10 – система для кріплення та переміщення підкладок

Епітаксійний ріст здійснюється в надвисокому вакуумі шляхом одночасної реакції численних молекулярних пучків різної щільності та хімічного складу з нагрітою підкладкою і характеризується малою контрольованою швидкістю проходження епітаксії (1 мкм/год або 1 атом. шар/с), що дає змогу модулювати молекулярний пучок з точністю до моношару. Низька температура підкладки (773...873 K) зменшує кількість термодинамічних дефектів (вакансій) в епітаксійному шарі з вищим структурним розділенням, яке перевищує традиційні методи на два порядки, і дуже малою дифузією легуючого матеріалу навіть всередині моноатомного шару. Молекулярно-променева епітаксія дає змогу контролювати хімічний склад кристалічної структури поверхні розподілу концентрації елементів по глибині безпосередньо під час осаджування епітаксійних шарів. Можливість застосування аналітичних методів контролю в процесі росту дає змогу керувати ними на атомному рівні, одержувати структури з малим забрудненням. В табл. 2.8 наведені методи вимірювань, які здійснюються при МПЕ [2.1].

Процес МПЕ використовується для одержання тонких (0,5...50 нм) структур з контрольованими поперечними розмірами для виготовлення оптичних мікрохвильових приладів на основі GaAs і $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.

Епітаксія з використанням сканування променя лазера. Служить для вирощування плівки монокристалічного кремнію на монокристалічних кремнієвих і сапфірових підкладках. Монокристалічну плівку кремнію вирощують на сапфірі методом МПЕ, причому на межі розділу утворюється аморфна плівка з великою кількістю дефектів. Її кристалічні властивості відновлюють лазерним відпалом. Особливістю даного методу є те, що плівку монокристалічного кремнію можна виростити на аморфних плівках плавленого

кварцу, окису кремнію нітрیدів. На рис. 2.50 [2.1] показана структура плівки окису кремнію товщиною 0,5 мкм, вирощеної на підкладці з плавненого кварцу. В результаті лазерного відпалу одержана монокристалічна плівка 1,5х1,5 мм, орієнтована в площині (100). Цей метод одержав назву графоепітаксії.

Таблиця 2.8.

Методи вимірювання, здійснювані в процесі МПЕ

Вид вимірювання	Методи вимірювання
Визначення хімічного складу поверхні та профілю концентрацій різних елементів	Оже-електронна спектроскопія Рентгеноелектронна спектроскопія Іонна оже-спектроскопія Мас-спектроскопія вторинних іонів
Визначення кристалічної структури поверхні	Дифракція електронів низьких енергій Дифракція електронів високих енергій
Визначення складу молекулярних пучків	Мас-спектроскопія
Вимірювання температур джерел і підкладки	Контактний і безконтактний
Вимірювання інтенсивності молекулярних пучків	Оптичний
Вимірювання товщини епітаксійних шарів	Еліпсометрія

Легування в процесі епітаксії. Легування в процесі епітаксії можна проводити з домішок, розчинених у кристалі, з пари, яка знаходиться в елементарній формі, з газів і пари, які містять домішкові елементи.

Перший спосіб дає змогу змінювати тип і концентрацію домішки в широкому діапазоні. При використанні летких домішок – фосфору, миш'яку, сурми – їх атоми не можуть бути перенесені з джерела, доки не випаруються навколишні атоми напівпровідника. Так можна регулювати концентрацію домішки.

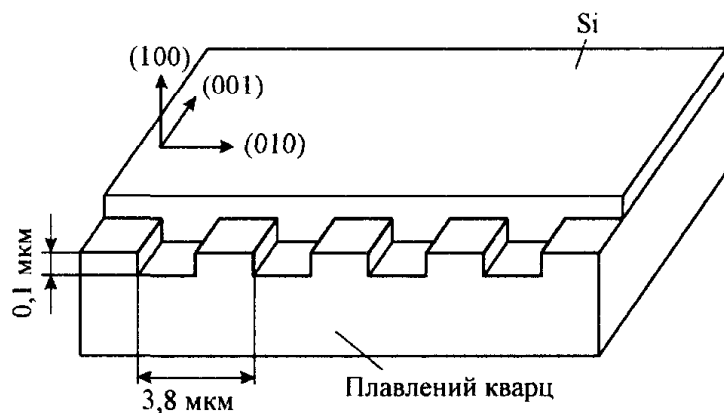


Рис. 2.50. Структура монокристалічної плівки кремнію, отриманої методом графоепітаксії

Введення домішок до складу газоподібних сполук проводять з використанням фосфіну PH_3 , арсину AsH_3 , діборану B_2H_6 і деяких інших газів, які додаються в водень або інертні гази в концентраціях $5 \cdot 10^{-4} \dots 1\%$.

В методі відкритої труби застосовують легування з пари трибромистого бору BBr_3 , трихлористого фосфору PCl_3 або оксихлориду фосфору POCl_3 , які додаються в посудину з SiCl_4 або випаровуються з окремих резервуарів. При нарощуванні плівки відбувається перерозподіл атомів домішки з підкладки в плівку. Процес легування плівки за рахунок дифузії атомів домішки з підкладки називають *автолегуванням*. Існує макроавтолегування, при якому небажані легуючі атоми переміщуються всередині реактора від одної пластини до другої і мікроавтолегування, при якому сторонні домішкові атоми впроваджуються в локальні області епітаксійного шару тієї самої пластини. Розподіл концентрації домішки на межі плівка – підкладка

$$C_x = C_0 \exp(-x_1/L) \pm C_e [1 - \exp(-x_1/L)],$$

де C_x – концентрація домішки в плівці на глибині x_1 ; C_0 – концентрація домішки на межі плівки з підкладкою; C_e – рівноважна концентрація домішки, яка встановилася в епітаксійному шарі; L – параметр нахилу функції розподілу, який залежить від коефіцієнта і часу дифузії.

Перший член рівняння характеризує легування плівки домішкою підкладки, другий – легування газової фази. Результуюча концентрація визначається сумою обох членів, якщо плівка і підкладка мають один тип електропровідності, і різницею, якщо тип електропровідності різний. Відповідні криві розподілу домішок показані на рис. 2.51 [2.1].

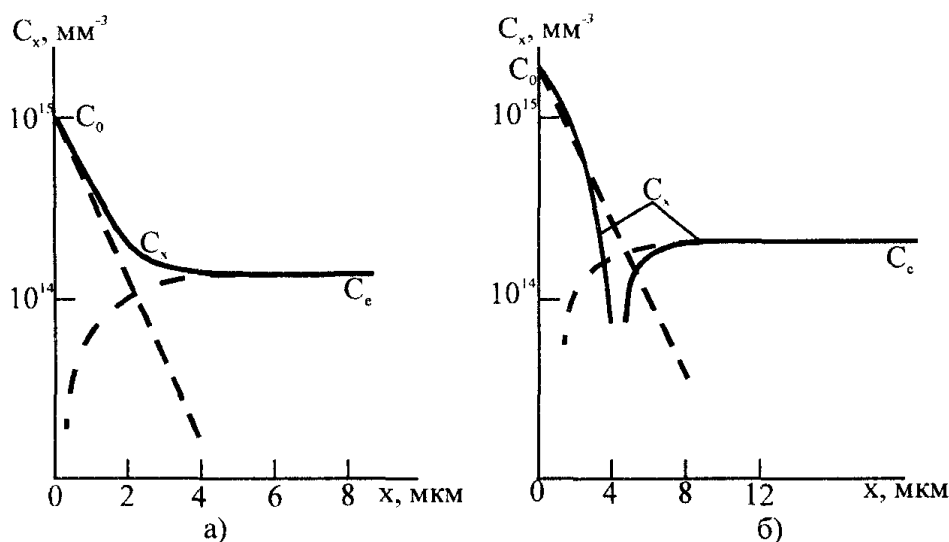


Рис. 2.51. Розподіл концентрації домішки в епітаксійному шарі при створенні $n-n$ (а) та $p-n$ – переходів (б)

Положення р-n-переходу x в епітаксійному шарі можна вирахувати, логарифмуючи наведений вираз з урахуванням умови $C_x = 0$ при $x = x_j$; $x_j = L \ln(C_0/C_c + 1)$.

2.7. Іонна імплантація

Іонна імплантація – процес впровадження в твердотільну підкладку іонізованих атомів з енергією, достатньою для проникнення їх у приповерхневі області підкладки (від кіло- до мегаелектронвольт) [2.1, 2.14].

Найбільш загальним застосуванням іонної імплантації є процес іонного легування матеріалів, оскільки технологія іонної імплантації дає змогу з високою точністю керувати кількістю легуючої домішки. Іонна імплантація характеризується універсальністю і гнучкістю процесу, що дає змогу одержувати необхідні концентрації домішки тоді, коли інші методи непридатні (легування бором і фосфором в алмазах). Маски для даного методу легування можуть бути виконані з фоторезистів, окислів, нітридів, полікристалічного кремнію та ін. Процес іонної імплантації може здійснюватися при низьких температурах (аж до кімнатних), внаслідок чого зберігаються вихідні електрофізичні властивості кристалів.

Під час іонної імплантації виникає велика кількість радіаційних дефектів в опромінену матеріалі аж до утворення аморфного шару. Такі дефекти усувають майже повністю за допомогою короткочасного відпалу (в кремнії при 900...1100 К).

На рис. 2.52 показана схема пристрою для іонної імплантації. Іони, що імплантуються, одержуються шляхом іонізації відповідної пари або газу і екстрагуються з джерела шляхом іонізації з джерела потенціалом 10 кВ [2.1]. Пучок іонів формується за допомогою системи електростатичних лінз. Для його суміщення з щілиною магніту використовуються відхиляючі пластини (3,4,6). Збільшення енергії до значень, які перевищують 10^{15} Дж здійснюється прискоренням іонів шляхом прикладення високої напруги на прискорювальні електроди і мішень (пластини). Геометрія системи дає змогу одержувати пучок перерізом 4...5 см². Розходження пучка становить $\pm 2^\circ$, густина струму 0,3...10 мкА/см². Тиск у системі підтримується на рівні 10^{-3} Па в камері джерела іонів і 10^{-5} Па в камері мішені, яка імплантується.

В технології мікроелектроніки при імплантації використовується три види матеріалів: аморфні, полі- та монокристалічні. Аморфні та полікристалічні матеріали використовуються як маски при імплантації іонів. В монокристалічних матеріалах (напівпровідникових) створюються структури з заданим профілем концентрації домішок.

При впровадженні в мішень швидкі іони в результаті зіткнень з атомними ядрами і електронами втрачають свою енергію і зупиняються. Довжина шляху

іонів від поверхні мішені (точка 0) до точки впровадження називається довжиною пробігу R , а її проекція на напрямок початкового руху – проекцією пробігу R_p (рис. 2.53), яку одержують експериментально [2.1].

Розподіл пробігу іонів залежить насамперед від їх енергії і атомної маси, а також матеріалу мішені. Для монокристалічних мішеней на розподіл пробігу впливає орієнтація їх граней відносно пучка іонів і наявність ефекту каналювання – руху іонів по каналах, утворених атомними площинами.

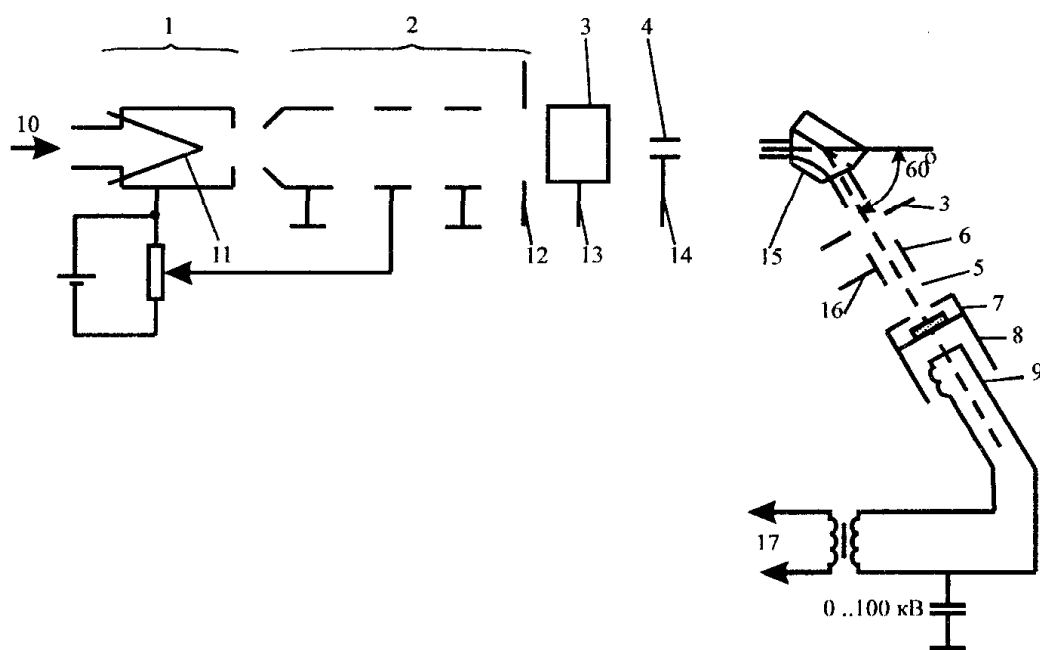


Рис. 2.52. Схема пристрою для іонної імплантації з магнітною сепарацією пучка іонів: 1 – джерело іонів; 2 – електростатичні лінзи; 3 – вертикально відхиляючі пластини; 4, 6 – горизонтально відхиляючі пластини; 7 – камера; 8 – мішені, що імплантуються; 9 – пічка для підігрівання мішеней, що імплантуються; 10 – легуючий матеріал (газ); 11 – нитка накаливання; 12 – діафрагма; 13, 16 – триелектродні лінзи; 14 – керуюча пластинка; 15 – полюси магнітного сепаратора; 17 – джерело живлення

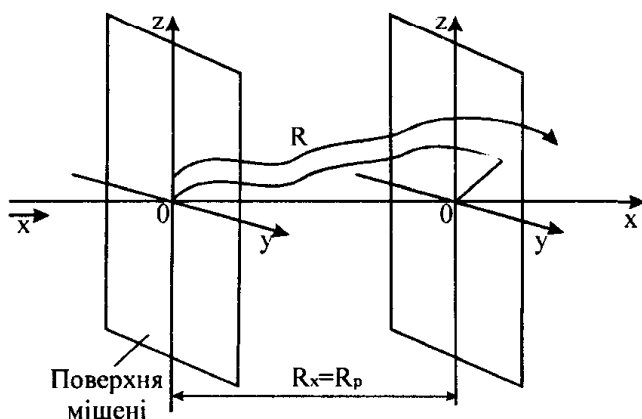


Рис. 2.53. Довжина пробігу впроваджених іонів (R – повна довжина пробігу; R_p – проекція повної довжини пробігу)

Під час руху іонів у твердому тілі іони, що впроваджуються в підкладку, змінюють напрямок свого руху внаслідок зіткнень з атомами мішені, які можуть покидати свої початкові положення у вузлах кристалічної решітки. В результаті вздовж траєкторії впроваджених атомів утворюються численні вакансії і міжвузлові атоми. Виникають цілі області, в яких порушена кристалічна ґратка, аж до переходу монокристалу в аморфний стан. При цьому оцінюють звичайно два види втрат енергії іонами – в результаті взаємодії їх з електронами (як зв'язаними, так і вільними) і ядрами. В першому наближенні вважається, що обидва види втрат не залежать одна від одної і діють одночасно. Характерні теоретичні криві ядерного і електронного гальмувань зображені на рис. 2.54 [2.1]. Ядерне гальмування значніше при малих енергіях, електронне гальмування переважає при високих енергіях іонів. Зі збільшенням маси впроваджуваних іонів зростають потоки енергії за рахунок зіткнень з ядрами мішені.

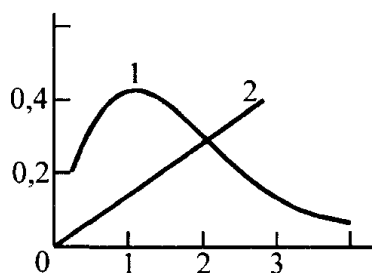


Рис. 2.54. Теоретичні криві для ядерного (1) та електронного (2) гальмувань (ρ та ε – безрозмірний пробіг та енергія відповідно)

Середнє значення питомих втрат енергії для одного іона, що бомбардує, можна представити у вигляді суми ядерної S_n та електронної S_e складових процесу гальмування

$$-dE/dx = N(S_n + S_e), \quad (2.1)$$

де E – енергія іона в точці x , розміщеній на його шляху; N – середня кількість атомів у одиниці об'єму. Відповідно до (2.1)

$$dx = \frac{1}{N} \cdot \frac{dE}{S_n + S_e}$$

Таким чином, повна проекція пробігу R для іонів з енергією E визначається як

$$R_p = \frac{1}{N} \int_0^E \frac{dE}{S_n + S_e}, \quad (2.2)$$

Ядерна гальмівна здатність не залежить від енергії рухомих іонів:

$$S_n = 4,3 \cdot 10^{-30} \frac{z_1 z_2}{z^{1/3}} \frac{M_1}{M_1 + M_2},$$

де z_1, z_2 – атомні номери рухомого іона і атома мішені; $z^{1/3} = (z_1^{2/3} + z_2^{2/3})^{1/2}$; M_1, M_2 – молярні маси іона та матеріалу мішені.

Електронна гальмова здатність пропорційна до швидкості рухомих іонів: $S_e = kE^{1/2}$.

Для аморфної мішені коефіцієнт k визначається природою іонів та матеріалу мішені. Оскільки S_e змінюється зі збільшенням енергії E , а S_n залишається постійною, повинна існувати деяка енергія $E_{кр}$, при якій $S_e = S_n$. Тоді для кремнієвої мішені ($M_2 = 28$, $z_2 = 14$)

$$E_{кр}^{1/2} = \frac{S_n}{k_{Si}} = 6,5 \cdot 10^{-9} \frac{14Z_1}{[(14)^{2/3} + (Z_1)^{2/3}]^{1/2}} \cdot \frac{M_1}{M_1 + 28}.$$

При імплантації в кремній іонів бору ($z_1 = 5$, $M_1 = 10$) $E_{кр} \approx 2 \cdot 10^{-15}$ Дж, а при імплантації іонів фосфору ($z_1 = 15$, $M_1 = 30$) $E_{кр} = 3 \cdot 10^{-14}$ Дж.

Якщо початкова енергія атома, що бомбардує, значно менша $E_{кр}$, тобто $S_n \gg S_e$, то переважає гальмування на ядрах. Для цього випадку рівняння (2.1) можна записати у вигляді

$$-dE/dx \approx NS_n.$$

Проекція пробігу іонів для кремнієвої мішені ($N_{Si} = 5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$) згідно з (2.2)

$$R_p = 1,12 \cdot 10^{-29} \frac{z^{1/3}}{z_1 z_2} \frac{M_1 + M_2}{M_1} E,$$

де R_p – в м; E – в Дж.

Якщо початкова енергія рухомих іонів набагато більша від E , то переважає електронне гальмування. При цьому проекція пробігу для кремнієвої мішені

$$R_p \approx 5E^{1/2}.$$

Ця формула зручна для оцінки максимальної довжини R_λ швидких іонів, які бомбардують, в кремнієвих мішенях у випадку відсутності каналювання. Наприклад, при енергії падаючих іонів $1,4 \cdot 10^{-14}$ Дж $R_p = 5 \cdot (1,4 \cdot 10^{-14})^{1/2} \approx 6 \cdot 10^7 \text{ м} \approx 0,6 \text{ мкм}$.

Радіаційні порушення в мішені створюються здебільшого при $S_n \gg S_e$. Тому при впровадженні іонів малих енергій радіаційні дефекти утворюються вздовж всієї траєкторії, а при високій енергії іонів – тільки в кінці їх пробігу.

Залежності dE/dx і довжини пробігу R_p від енергії для As і B, P в кремнії наведені на рис. 2.55 та 2.56 [2.1]. На рис. 2.56 представлені результати імплантації в аморфну кремнієву мішень і термічний окисел SiO_2 (густина $2,27 \text{ г/см}^3$).

Якщо відомі значення $\overline{R_p}$ і $\Delta \overline{R_p}$ і повна доза опромінення, можна визначити профіль концентрації домішки в кремнієвій мішені. Повній дозі опромінення відповідає поверхнева концентрація іонів N_s , які бомбардують мішень

$$N_s = Q_{оп} / q,$$

де $Q_{оп}$ – доза опромінення, $\text{Кл} \cdot \text{см}^{-2}$; q – заряд іона, Кл/іон.

Розподіл концентрації домішки в кремнієвій мішені, легованій методом іонної імплантації, описується законом Гауса :

$$N_x = \frac{N_S}{\Delta R_p \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - R_p}{\Delta R_p} \right)^2 \right] \pm N_{\text{вх}},$$

де $N_{\text{вх}}$ – вхідна концентрація домішки в кремнієвій мішені.

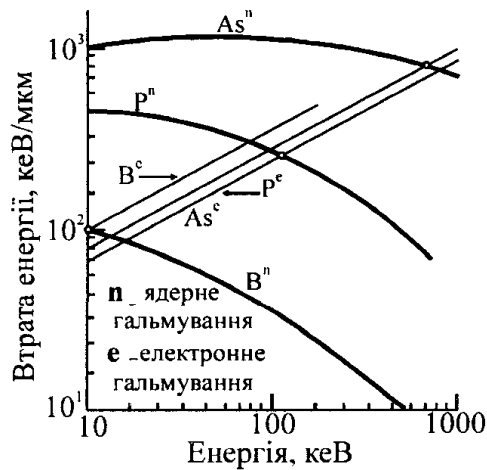


Рис. 2.55. Залежність dE/dx від енергії, одержана шляхом розрахунку (точками показані енергії іонів, при яких складові ядерного та електронного гальмування дорівнюють одна одній)

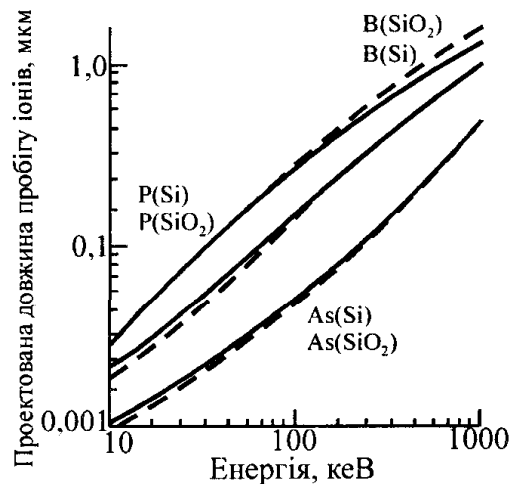


Рис. 2.56. Залежність проекції довжини пробігу R_p іонів As, P та B від енергії, одержана шляхом розрахунку

Профіль розподілу концентрації домішок іонів, впроваджених в аморфну мішень, наведений на рис. 2.57 [2.1].

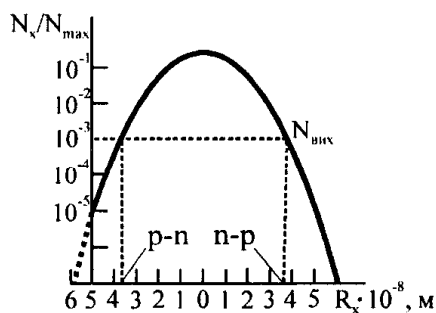


Рис. 2.57. Профіль розподілу концентрації домішок іонів, впроваджених в аморфну мішень

Максимальна концентрація домішки, яка відповідає найімовірнішій проекції пробігу R_p ($x = R_p$),

$$N_{\text{max}} = 0,4 N_S / \Delta R_p. \quad (2.3)$$

Глибина залягання р-п-переходу:

$$x_j = R_p \pm \Delta R_p \sqrt{2 \ln \frac{N_s}{\Delta R_p N_{\text{вх}} \sqrt{2\pi}}}.$$

При добуванні кореня слід враховувати обидва знаки, оскільки концентрації визначаються в об'ємі напівпровідника. При цьому можливе одночасне утворення двох р-п-переходів (рис. 2.57).

Розподіл пробігів іонів у монокристалічних мішенях відрізняється від їх розподілу в аморфних тим, що в монокристалах напрямок падаючого пучка може збігатися з одним із основних кристалографічних напрямків мішені (рис. 2.58, а), що зв'язано з ефектом каналювання [2.1].

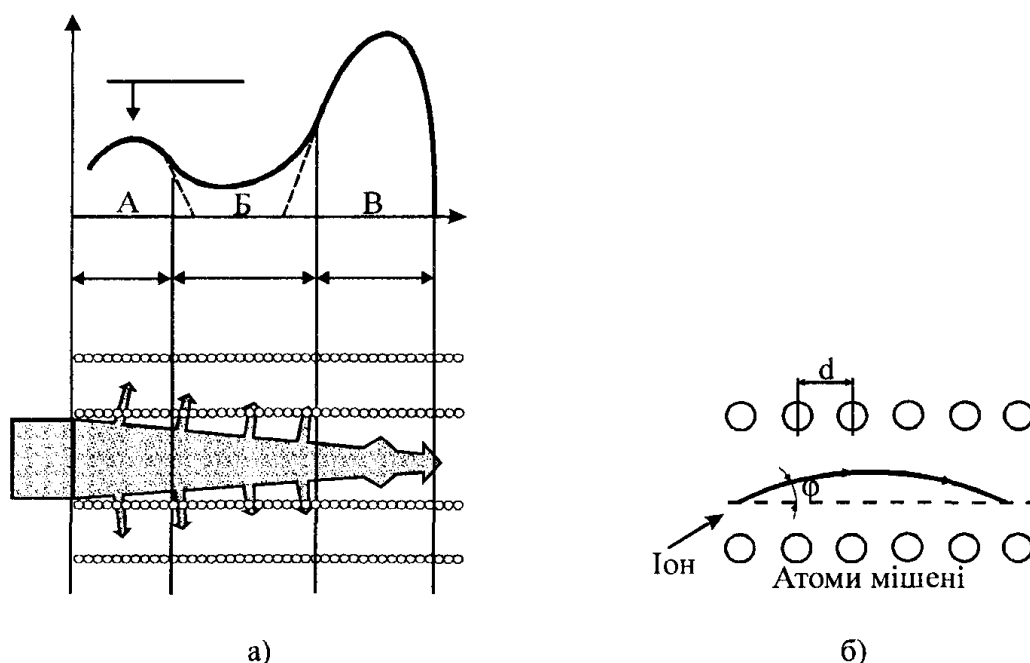


Рис. 2.58. Схема, що пояснює процеси каналювання і розподіл падаючих іонів за глибиною (а) та траєкторія руху каналюваного іона (б):

А – область, у якій розподіл має такий самий вигляд, як і в аморфній мішені;

Б – область деканалювання; В – розподіл іонів, створений каналюванням

Рух іонів строго по центру каналу малоймовірний. Однак може існувати траєкторія, осцилююча навколо осі каналу, якщо імплантовані іони пересуваються (постійно зберігаючи імпульс, направлений до центру каналу) за допомогою послідовних легких співударів з атомами, які утворюють "стінки" каналу. Така траєкторія руху іонів показана на рис. 2.58, б, де напрямок шляху іона утворює кут ϕ з віссю каналу [2.1].

Максимальний кут ϕ , при якому зникає направляюча дія атомів мішені, називається критичним кутом каналювання $\phi_{\text{кр}}$. Він визначає можливість каналювання. Для великої енергії падаючих іонів E_i

$$\left(E_i \geq \frac{z_1 z_2 e^2 d}{2\pi \epsilon_0 a^2} = E_0 \right)$$

$$\varphi_{кр} = \sqrt{\frac{z_1 z_2 e^2}{E_i \cdot 2\pi \epsilon_0 d}} \sim E_i^{1/2},$$

а для енергії, меншої ніж E_0 ,

$$\varphi_{кр} = \left(\sqrt{\frac{z_1 z_2 e^2}{E_i \cdot 2\pi \epsilon_0 d}} \frac{ca}{\sqrt{2d}} \right) \sim E_i^{1/4},$$

де z_1, z_2 – атомні номери іонів і атомів мішені; e – заряд електрона; ϵ_0 – діелектрична стала вакууму; d – відстань між атомами мішені; c – стала, яка залежить від потенціальної енергії; a – радіус екранування; E_i – енергія падаючих іонів.

В табл. 2.9 наведені критичні кути каналювання в кремнії для іонів бору, азоту, фосфору і миш'яку [2.1].

Таблиця 2.9.

Критичні кути каналювання в кремнії для іонів , бору, азоту, фосфору і миш'яку				
Іон	Енергія, кеВ	$\varphi_{кр}$, град		
		Орієнтація кристала		
		[110]	[111]	[100]
В	30	4,2	3,5	3,3
	50	3,7	3,2	2,9
N	30	4,5	3,8	3,5
	50	4,0	3,4	3,0
P	30	5,2	4,3	4,0
	50	4,5	3,8	3,5
As	30	5,9	5,0	4,5
	50	5,2	4,4	4,0

Якщо відомі експериментальні значення S_c , то

$$R_{p \max} = 2E_i^{1/2} B, \quad (2.4)$$

де $B = NS_e E_\phi^{1/2}$ – стала, що залежить від S , виміряної при деякому фіксованому значенні E_ϕ .

Якщо припустити, що всі іони ідеально каналювані, то розподіл концентрації іонів у мішені буде мати два максимуми: один для неканалюваних іонів згідно з (2.3), другий для ідеально каналюваних іонів згідно з (2.4) (рис. 2.60) [2.1]. У напівпровідниковій технології ефект каналювання дає можливість одержувати глибші леговані шари і зменшувати кількість радіаційних порушень.

Розрахунок концентрації впроваджених іонів для каналюваного пучка ускладнюється дією деканалюючих факторів (теплові коливання атомів мішені, недосконалість структури тощо, рис. 2.59) [2.1].

На зразках кремнію з орієнтацією поверхні $[110]$ відносно пучка з точністю до $0,1^\circ$ ймовірність каналювання з ростом енергії іонів зростає, а зі збільшенням дози опромінювання спадає. При кутах розорієнтації пучка іонів у мішені приблизно 8° профілі розподілу концентрацій змінюються мало. Збільшення температури мішені викликає деканалювання іонів внаслідок теплових коливань кристалічної ґратки, значення R_p при цьому майже не змінюється.

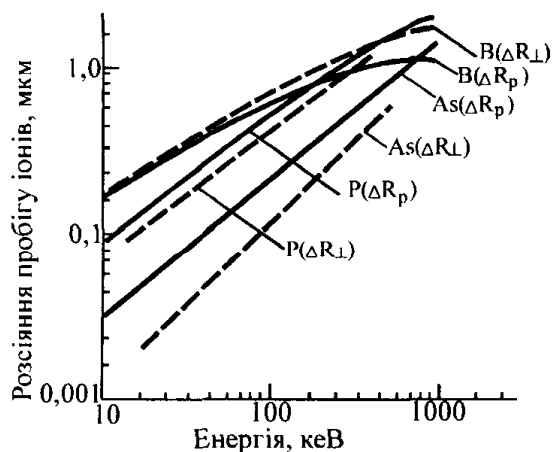


Рис. 2.59. Залежність розсіювання ΔR_p та ΔR_L одержана шляхом за допомогою розрахунку для іонів As, P та B, імплантованих у кремній

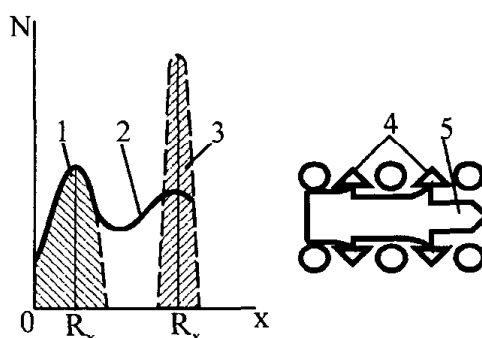


Рис. 2.60. Схема утворення реального профілю концентрації домішок у твердому тілі: 1 – для неканальованих іонів; 2 – реальний розподіл; 3 – для ідеально каналюваних іонів; 4 – деканальовані іони; 5 – залишок каналюваного пучка

На рис. 2.61 та 2.62 наведені криві, що характеризують вплив дози і температури опромінювання на розподіл іонів фосфору в кремнієвій мішені [2.1].

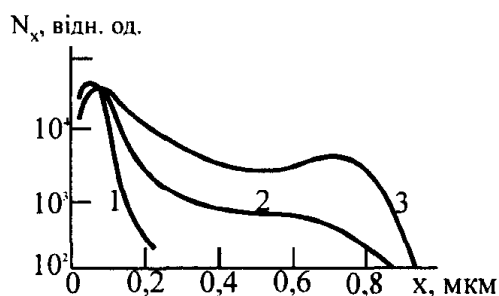


Рис. 2.61. Вплив дози опромінення на характеристики розподілу іонів фосфору $^{31}\text{P}^+$ при імплантації в кремнієву мішень з орієнтацією $[110]$ та енергією $E=6 \cdot 10^{-15}$ Дж: 1 – $N_S=1.2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$; 2 – $N_S=8.9 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$; 3 – $N_S=7.25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$

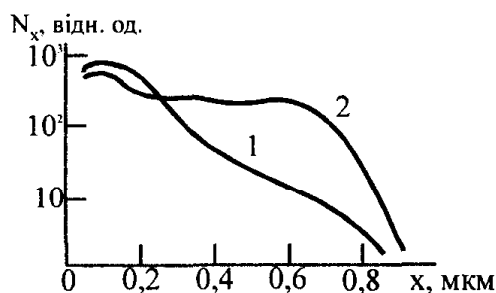


Рис. 2.62. Вплив температури на профіль розподілу іонів фосфору $^{31}\text{P}^+$ при імплантації в кремнієву мішень з орієнтацією $[111]$ та енергією $E=6 \cdot 10^{-15}$ Дж: 1 – $T=673 \text{ К}$; 2 – $T=293 \text{ К}$

Профіль розподілу концентрації іонів фосфору при імплантації з енергією $1,6 \cdot 10^{-13}$ Дж (рис. 2.63, а) вказує на хорошу відповідність розрахункових і експериментальних даних.

Крива розподілу іонів фосфору при імплантації (рис. 2.63, б) має максимум при $R_x = 0,04$ мкм, що відповідає теоретичним розрахункам (0,037 мкм). Однак глибина залягання р-п-переходу при $N_{\text{вх}} = 1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, яка дорівнює 0,19 мкм, істотно відрізняється від розрахункової (0,125 мкм), що пояснюється ефектом каналювання.

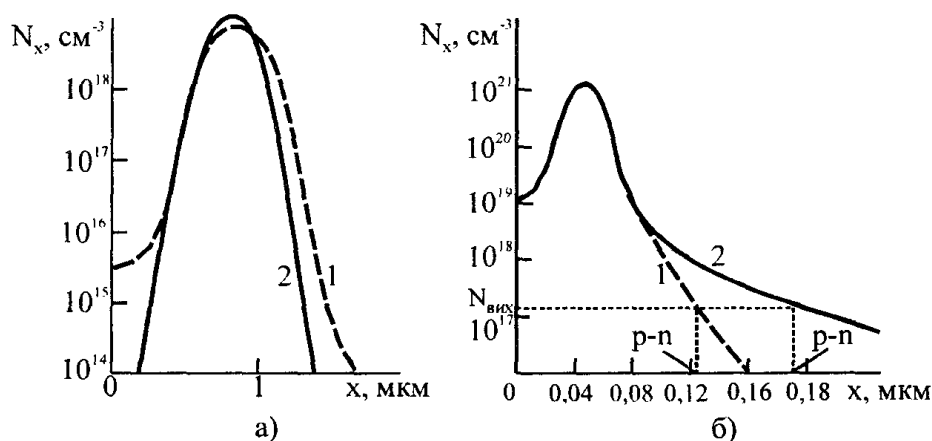


Рис. 2.63. Профілі розподілу концентрації іонів фосфору $^{31}\text{P}^+$ при імплантації в кремнієву мішень з орієнтацією [111] та енергією для температури відпалювання 973 K та часу відпалювання 30 хв: а – $N_S = 4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, $E = 1,6 \cdot 10^{-13}$ Дж; б – $Q_{\text{опр}} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ Кл/см}^2$, $E = 4,8 \cdot 10^{-17}$ Дж; 1 – теоретична крива; 2 – експериментальна крива

2.8. Технологія збирання мікроелектронних сенсорів

Монтаж кристалів та компонентів. Метод приклеювання. Основні вимоги, які ставляться до клейових з'єднань: механічна стійкість, висока адгезійна здатність (не менше 2...3 МПа) і стабільність електроізоляційних властивостей в інтервалі робочих температур (питомий об'ємний опір не менше $10^{14} \text{ Ом}\cdot\text{см}$; $\text{tg}\delta \leq 1 \cdot 10^{-3}$). Крім того, газовиділення клейового шва в герметизованих об'ємах при температурах експлуатації не повинні містити агресивних компонентів, які вступають у реакцію з елементами кристала.

Клей повинен забезпечувати умови для порівняно легкого демонтажу навісних компонентів на підкладці. Після приготування клею необхідна здатність до склеювання повинна зберігатися протягом процесу склеювання, а полімеризація повинна відбуватися при порівняно низьких температурах (не вище 353 K), щоб запобігти пошкодженню навісних елементів. На посадочне місце кристала клей наносять лопаткою, шприцом або трафаретним друком.

Глава 7

Элементы интегральных схем

7.1. Введение

Напомним, что *элементами ИС* (как полупроводниковых, так и гибридных) называют их неделимые составные части — те, которые нельзя отдельно специфицировать и поставить как отдельные изделия. Одна из особенностей элементов ИС по сравнению с аналогичными дискретными приборами или электрорадиоэлементами состоит в том, что они имеют электрическую связь с общей подложкой, а иногда и друг с другом. Поэтому математические и физические модели (эквивалентные схемы) элементов ИС несколько отличаются от моделей дискретных аналогов.

Вторая важная особенность элементов ИС по сравнению с дискретными приборами связана с тем, что все элементы ИС получают в едином технологическом процессе. Например, все резисторы пленочной ИС получают одновременно и, следовательно, характеризуются одинаковой толщиной и одинаковым удельным сопротивлением (разница может быть только в длине и ширине слоя). Или в полупроводниковой ИС рабочий слой резистора получается одновременно с базовым слоем транзистора и, следовательно, имеет те же электрофизические параметры, что и базовый слой. Иначе говоря, *при изготовлении элементов ИС имеется меньше «степеней свободы», чем при изготовлении их дискретных аналогов*: можно варьировать главным образом конфигурацией элементов ИС «в плане», т.е. их длиной и шириной, а не глубиной слоев и их электрофизическими параметрами. В результате *параметры элементов ИС в значительной мере коррелированы (взаимосвязаны) и ограничены*, чего нет у дискретных компонентов.

Отметим, однако, что указанные особенности прежде всего характерны для элементов БИС и СБИС, при изготовлении которых из-за проблем совмещения всегда приходится «экономить» на количестве фотолитографий. Если проблема ограни-

чения количества фотолитографий не превалирует над остальными, параметры элементов ИС могут значительно отличаться.

Помимо указанных двух особенностей, следует отметить, что в процессе развития микроэлектроники появились такие элементы ИС, которые не имеют аналогов в дискретной электронике: многоэмиттерные и многоколлекторные транзисторы, транзисторы с барьером Шоттки, трехмерные элементы и др.

Традиционные компоненты — диоды, конденсаторы и т.п. — изменились конструктивно, изменился диапазон их параметров. В полупроводниковых ИС отсутствуют аналоги таких традиционных компонентов, как катушки индуктивности и тем более трансформаторы.

Компонентами ИС, как отмечалось в гл. 1, называют такие составные части гибридных микросхем, которые можно специфицировать отдельно и поставлять в виде отдельных изделий. Компоненты ГИС представляют собой навесные детали, отличающиеся от «обычных» дискретных компонентов лишь конструктивным оформлением (бескорпусные диоды, транзисторы и ИС).

Главными элементами биполярных полупроводниковых ИС являются $n-p-n$ -транзисторы. Именно на них ориентируются при разработке новых технологических циклов, стараясь обеспечить оптимальные параметры этих транзисторов. Технология всех других элементов ($p-n-p$ -транзисторов, диодов, резисторов и т.п.) должна «приспосабливаться» к технологии $n-p-n$ -транзистора. Такое «приспособление» означает, что для изготовления других элементов следует по возможности избегать дополнительных технологических операций: желательно использовать те же рабочие слои (коллекторный, базовый и эмиттерный), которые необходимы для $n-p-n$ -транзистора. Отсюда такая терминология: «в качестве резистора используется базовый слой» или «рабочий слой резистора получается на этапе базовой диффузии».

Главными элементами МДП-транзисторных ИС до последнего времени были МДП-транзисторы с индуцированным p -каналом. Соответственно на них ориентировался технологический цикл и к этому циклу «приспосабливалась» технология остальных элементов. В последние годы, после того как удалось преодолеть трудности изготовления качественных n -канальных МДП-транзисторов и разработать технологию комплементар-

ных МДП (КМДП) схем, последняя, по существу, заняла главное место в технологии ИС.

7.2. Изоляция элементов

На рис. 7.1 показаны два n - p - n -транзистора и диод, выполненные в общей кремниевой подложке n -типа. Как видим, коллекторы транзисторов и катод диода оказались принудительно связаны через подложку. Такие связи, как правило, неприемлемы: они не соответствуют желательной конфигурации схемы. Следовательно, *элементы биполярных полупроводниковых ИС нужно изолировать друг от друга с тем, чтобы необходимые соединения осуществлялись только путем металлической разводки.*

В случае изготовления на одной подложке МДП-транзисторов истоки и стоки смежных элементов (рис. 7.2) оказываются разделенными встречно-включенными p - n -переходами и такая связь не столь губительна, как в биполярных элементах. Однако с ростом степени интеграции и «сближением» элементов, обратные токи разделительных p - n -переходов растут и принуждают разработчиков ИС искать способы изоляции не только биполярных, но и МДП элементов.

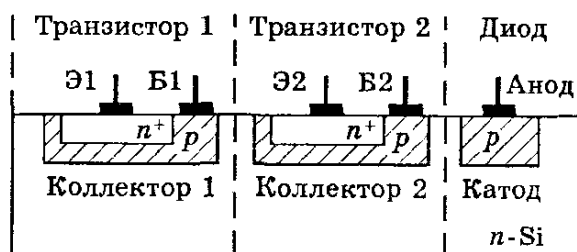


Рис. 7.1. Внутренняя связь элементов биполярных ИС через подложку в отсутствие изоляции

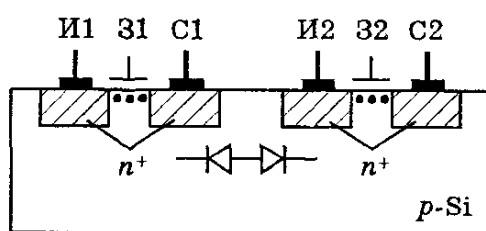


Рис. 7.2. Отсутствие связи между элементами МДП-транзисторных ИС

Сравнительная оценка способов изоляции. Все известные способы изоляции можно разделить на два главных типа: *изоляцию обратносмещенным p - n -переходом* и *изоляцию диэлектриком*. Оба типа изоляции проиллюстрированы на рис. 7.3.

Обедненный слой p - n -перехода, особенно при большом обратном смещении, имеет очень высокое удельное сопротивление, близкое к удельному сопротивлению диэлектриков. Поэтому указанные два типа

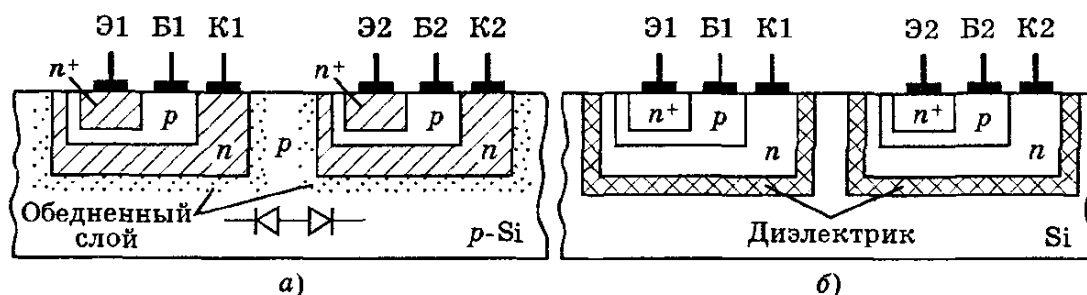


Рис. 7.3. Основные методы изоляции элементов ИС:
 а — с помощью p - n -переходов; б — с помощью диэлектрика

изоляция различаются не столько удельным сопротивлением изолирующего слоя, сколько его структурой. Изоляцию p - n -переходом относят к однофазным способам, имея в виду, что материал по обе стороны и в пределах изолирующего слоя один и тот же — кремний. Изоляцию диэлектриком относят к двухфазным способам, имея в виду, что материал (фаза) изолирующего слоя отличается от материала подложки — кремния. Учитывая, что при разработке ИС происходит постоянное снижение рабочих напряжений, изоляция p - n -переходом применяется все реже и реже.

Из рис. 7.3, а ясно, что изоляция p - n -переходом сводится к осуществлению двух встречно-включенных диодов между изолируемыми элементами — так же, как в МДП-транзисторных ИС (рис. 7.2). Для того, чтобы оба изолирующих диода находились под обратным смещением (независимо от потенциалов коллекторов), на подложку задают максимальный отрицательный потенциал от источника питания ИС¹.

Изоляция p - n -переходом хорошо вписывается в общий технологический цикл биполярных ИС, однако ее недостатки — наличие обратных токов в p - n -переходах и наличие барьерных емкостей.

Изоляция диэлектриком более совершенная и «радикальная» (рис. 7.3, б). При комнатной температуре токи утечки в диэлектрике на 3–5 порядков меньше, чем обратные токи p - n -перехода. Что касается паразитной емкости, то, разумеется, она имеет место и при диэлектрической изоляции. Однако ее легко сделать меньше барьерной, выбирая материал с малой диэлектрической проницаемостью и увеличивая толщину диэлектрика. Как правило, паразитная емкость при диэлектриче-

¹ Так же поступают в МДП-транзисторных ИС.

В настоящее время вместо монолитной пластины n -типа используют тонкий эпитаксиальный n -слой, выращенный на подложке (рис. 7.5). В этом случае проблема изоляции существенно упрощается: диффузия, обеспечивающая образование коллекторных «островков» (ее называют *разделительной* или *изолирующей диффузией*), проводится только через одну (верхнюю) поверхность пластины на глубину, равную толщине эпитаксиального слоя (обычно не более 5–10 мкм). При такой малой глубине время диффузии не превышает 2–3 ч, а расширение изолирующих p -слоев на поверхности, обусловленное боковой диффузией, в несколько раз меньше, чем при методе встречной диффузии (рис. 7.4, б). При этом коэффициент использования площади кристалла имеет приемлемую величину.

«Островки» n -типа, оставшиеся в эпитаксиальном слое после разделительной диффузии, называют *карманами*. В этих карманах на последующих этапах технологического процесса осуществляют необходимые элементы ИС, в первую очередь — транзисторы¹.

Простейшие карманы, показанные на рис. 7.5, находят ограниченное применение. Транзисторы, изготовленные в таких карманах (рис. 7.6, а), характерны большим горизонтальным сопротивлением коллекторного слоя $r_{\text{кк}}$ (100 Ом и более). Уменьшать удельное сопротивление эпитаксиального слоя нерационально: при этом уменьшается пробивное напряжение коллекторного перехода и возрастает коллекторная емкость. Поэтому типовым решением является использование так называемого скрытого n -слоя, расположенного на дне кармана. Роль такого низкоомного слоя очевидна из рис. 7.6, б.

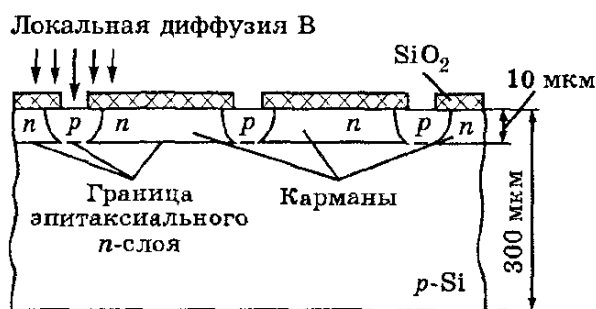


Рис. 7.5. Основной способ изоляции элементов с помощью переходов в планарно-эпитаксиальных ИС

¹ Слой n^+ под коллекторным электродом, получаемый на этапе эмиттерной диффузии (т.е. одновременно с эмиттерным n^+ -слоем), предотвращает образование паразитного p - n -перехода при вжигании алюминия в n -слой (см. с. 202)

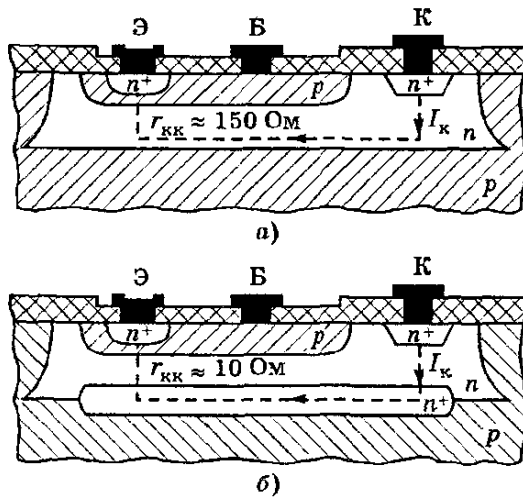


Рис. 7.6. Структура интегрального n - p - n -транзистора: а — без скрытого слоя, б — со скрытым n -слоем

Скрытые слои получают диффузией, которая проводится до наращивания эпитаксиального слоя. Во время эпитаксии донорные атомы скрытого слоя под действием высокой температуры диффундируют в нарастающий эпитаксиальный n -слой. В итоге скрытый слой частично расположен в эпитаксиальном, и дно кармана в этом месте оказывается «приподнятым» на несколько микрон. Для того, чтобы предотвратить чрезмерное распространение доноров из скрытого слоя в эпитаксиальный (что может

привести к смыканию скрытого n^+ -слоя с базовым p -слоем), выбирают для скрытого слоя диффузант со сравнительно малым коэффициентом диффузии — сурьму или мышьяк.

Использование скрытого n^+ -слоя обеспечивает не только меньшее сопротивление коллектора (первоначальное назначение скрытого слоя), но и некоторые другие преимущества, в том числе большой инверсный коэффициент усиления транзистора и меньший избыточный заряд в коллекторном слое, накапливающийся в режиме двойной инжекции.

Разделительная диффузия в эпитаксиальный слой является в настоящее время наиболее простым и распространенным вариантом изоляции p - n -переходом. Однако используются и более сложные варианты этого метода, к числу которых относится изоляция коллекторной диффузией (ИКД, см. рис. 7.7).

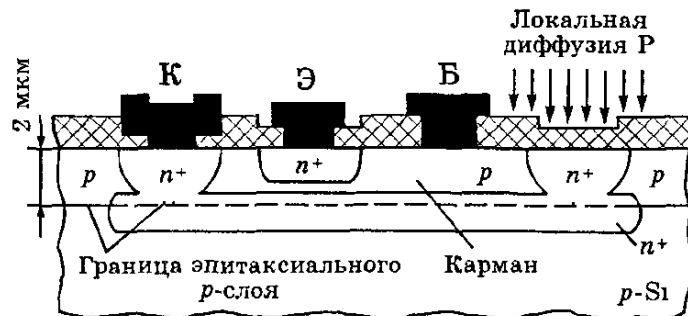


Рис. 7.7. Метод изоляции элементов коллекторной диффузией

Метод ИКД характерен тем, что эпитаксиальный слой (толщиной 2–3 мкм) имеет проводимость p -типа. В этом слое расположены заранее созданные скрытые n^+ -слои. Разделительная диффузия в данном случае осуществляется с помощью донорной примеси (фосфора); глубина диффузии соответствует расстоянию от поверхности до скрытого слоя. В результате получаются карманы p -типа (будущие базовые слои), а скрытый n^+ -слой вместе с разделительными n^+ -слоями образует область коллектора. Как видим, в данном случае разделительные слои выполняют полезную функцию и, следовательно, не влияют на коэффициент использования площади. Последний при методе ИКД оказывается значительно больше, чем в основном варианте (рис. 7.5). Однако из-за большой концентрации примеси в n^+ -слоях методу ИКД свойственны меньшие пробивные напряжения коллекторного перехода и большие значения коллекторной емкости. Кроме того, чтобы сделать базу неоднородной и тем самым создать в ней внутреннее ускоряющее поле, в p -карманы приходится дополнительно проводить диффузию акцепторной примеси.

Изоляция диэлектриком. Исторически первым способом изоляции диэлектриком был так называемый *эпик-процесс*. Этапы этого процесса показаны на рис. 7.8. Исходная пластина кремния n -типа покрывается тонким (2–3 мкм) эпитаксиальным слоем n^+ -типа (рис. 7.8, а). Через маску в пластине вытравливают канавки глубиной 10–15 мкм, после чего всю рельефную поверхность окисляют (рис. 7.8, б)¹. Далее на окисленную рельефную поверхность напыляют толстый (200–300 мкм) слой поликристаллического кремния (рис. 7.8, в). После этого исходную пластину n -типа сошлифовывают на всю толщину вплоть до дна канавок. В результате получают карманы n -типа (со скрытым n^+ -слоем), расположенные уже в поликристаллической подложке (рис. 7.8, г). Изоляция элементов обеспечивается окисным слоем SiO_2 (ср. с рис. 7.3, б). Основную трудность в эпик-процессе представляет прецизионная шлифовка монокристаллической пластины: при толщине сошлифовываемого слоя 200–300 мкм погрешность шлифовки по всей поверхности должна лежать в пределах 1–2 мкм.

¹ Можно использовать как изотропное, так и анизотропное травление (см. раздел 6 б). Особенности последнего рассмотрены ниже.

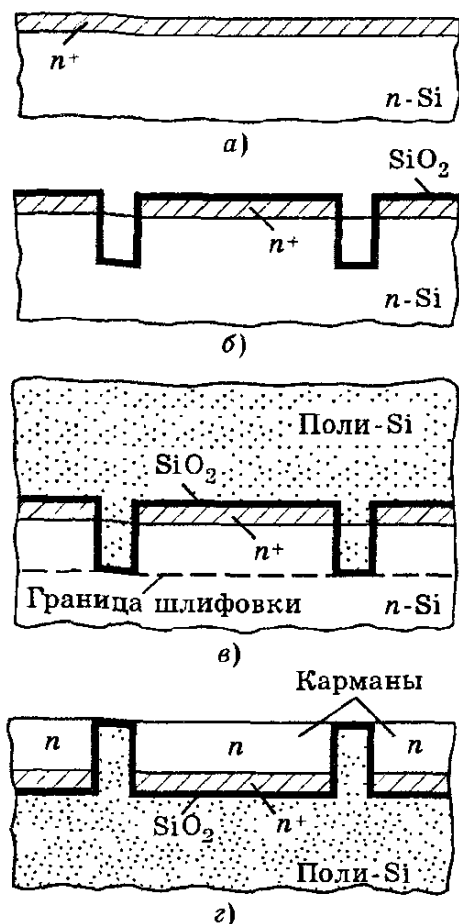


Рис. 7.8. Метод диэлектрической изоляции (эпик-процесс):
 а — исходная структура;
 б — травление канавок и окисление; в — напыление поликристаллического кремния; г — конечная структура (карманы со скрытым n^+ -слоем)

Если на 2-ом этапе (рис. 7.8, б) напылять не полупроводниковый слой (полукристаллический кремний), а диэлектрический — керамику, получается вариант *керамической изоляции*. Этот вариант обеспечивает лучшую гальваническую и емкостную «развязку» элементов, но он сложнее и дороже.

Большое распространение получила так называемая технология *кремний на сапфире* (КНС, англ. SOS — Silicon On Sapphire). Ее основные этапы показаны на рис. 7.9. Сапфир имеет такую же структуру кристаллической решетки, как и кремний. Поэтому на сапфировой пластине (подложке) можно нарастить эпитаксиальный слой кремния (рис. 7.9, а), а затем протравить этот слой насквозь до сапфира, так чтобы образовались кремниевые «островки — карманы» для будущих элементов ИС (рис. 7.9, б). Эти карманы с нижней стороны изолированы друг от друга сапфиром — диэлектриком, а с боковых сторон — воздухом. Поэтому технологию КНС часто относят к классу *воздушной изоляции*. Недостатком этого метода является рельефность поверхности, которая затрудняет осуществление металлической разводки.

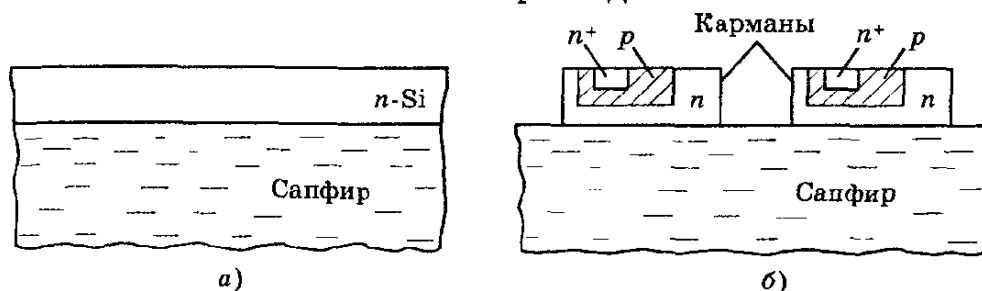


Рис. 7.9. Технология «кремний на сапфире» (КНС):
 а — исходная структура; б — рельефные карманы

Комбинированные способы изоляции. В настоящее время самым распространенным комбинированным методом является так называемая *изопланарная технология* (изопланар). В ее основе лежит локальное сквозное прокисление тонкого (2–3 мкм) эпитаксиального слоя кремния *n*-типа (рис. 7.10). В результате локального прокисления эпитаксиальный *n*-слой оказывается разделенным на отдельные карманы *n*-типа — так же, как при методе разделительной диффузии (рис. 7.5). Однако в данном случае боковые изолирующие слои не полупроводниковые, а диэлектрические (окисные). Что касается донных частей карманов, то они по-прежнему разделены встречно-включенными *p*–*n*-переходами. Именно поэтому изопланар относится к комбинированным методам.

Каждый карман в свою очередь разделен окислом на две части (1 и 2 на рис. 7.10, а). В главной части (1) осуществляются база и эмиттер транзистора, а во второй (2) — омический контакт коллектора (рис. 7.10, б). Обе части связаны через скрытый *n*⁺-слой. Таким образом устраняются все четыре боковые (вертикальные) стенки коллекторного перехода, что способствует уменьшению коллекторной емкости.

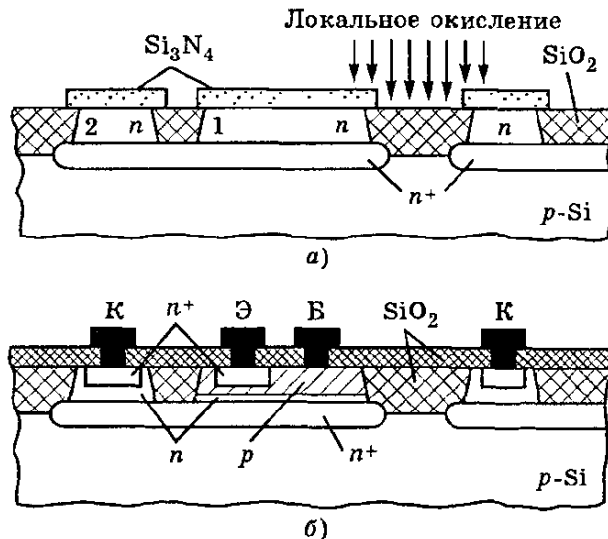


Рис. 7.10. Изопланарная технология: а — структура до базовой диффузии; б — конечная структура транзистора

Локальное прокисление эпитаксиального слоя нельзя проводить через окисную маску, так как при высокой температуре и при наличии кислорода ее толщина будет расти за счет толщины *n*-слоя. Поэтому в изопланаре для локального прокисления используют маски из нитрида кремния.

По сравнению с классическим методом разделительной диффузии изопланарный метод изоляции обеспечивает большую плотность компоновки элементов (т.е. лучшее использование площади), а также более высокие частотные и переходные характеристики транзисторов.

Метод изоляции V-канавками показан на рис. 7.11, а. В данном случае вместо сквозного прокисления эпитаксиального слоя используется его сквозное протравливание методом анизотропного травления (см. раздел 6.6). При этом поверхность кристалла должна иметь ориентацию (100), а травление идет по плоскостям (111), см. рис. 6.10, б. Размеры окна в маске делают такими, что грани (111) «сходятся» чуть ниже границы эпитаксиального слоя и образуют канавки V-образной формы, откуда и название метода. Зависимость между шириной и глубиной канавки строго определенная: $l/d = \sqrt{2}$. При глубине 4–5 мкм ширина канавки составит всего 6–7 мкм, т.е. потери площади под изоляцию получаются весьма незначительными. Недостатком метода является необходимость использования плоскости (100), которой свойственна повышенная плотность поверхностных дефектов (см. рис. 2.5).

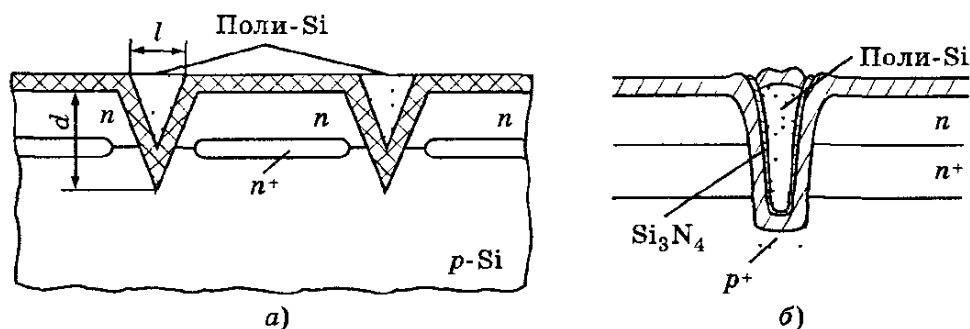


Рис. 7.11. Метод изоляции V-канавками (а) и U-канавками (б)

Рельеф, полученный в результате травления, окисляется, как и при эпок-процессе. Однако, в отличие от эпок-процесса, последующее напыление поликристаллического кремния имеет целью лишь выровнять рельеф поверхности для облегчения металлической разводки. Для этого достаточно заполнить поликремнием только канавки.

При использовании метода реактивного ионного травления можно дополнительно уменьшить ширину канавки. Такой метод изоляции получил название *изоляции U-образными канавками* (рис. 7.11, б).

7.3. Транзисторы $n-p-n$

Поскольку $n-p-n$ -транзисторы составляют основу биполярных ИС, мы рассмотрим их наиболее подробно, включая технологию изготовления. При этом будем считать, что изоляция осуществлена методом разделительной диффузии. Особенности, обусловленные другими методами изоляции, в необходимых случаях оговариваются.

Распределение примесей. На рис. 7.12 показано распределение примесей в слоях интегрального транзистора со скрытым n^+ -слоем (см. рис. 7.6, б). Следует обратить внимание на то, что распределение эффективной концентрации акцепторов в базовом слое оказывается немонотонным. Соответственно немонотонным оказывается и распределение дырок. Справа от точки максимума градиент концентрации дырок отрицательный и внутреннее поле (по отношению к инжектированным электронам) является ускоряющим. Это характерно для всех дрейфовых транзисторов. Однако слева от точки максимума градиент концентрации положительный, а значит поле является тормозящим. Наличие участка с тормозящим полем приводит к некоторому увеличению результирующего времени пролета носи-

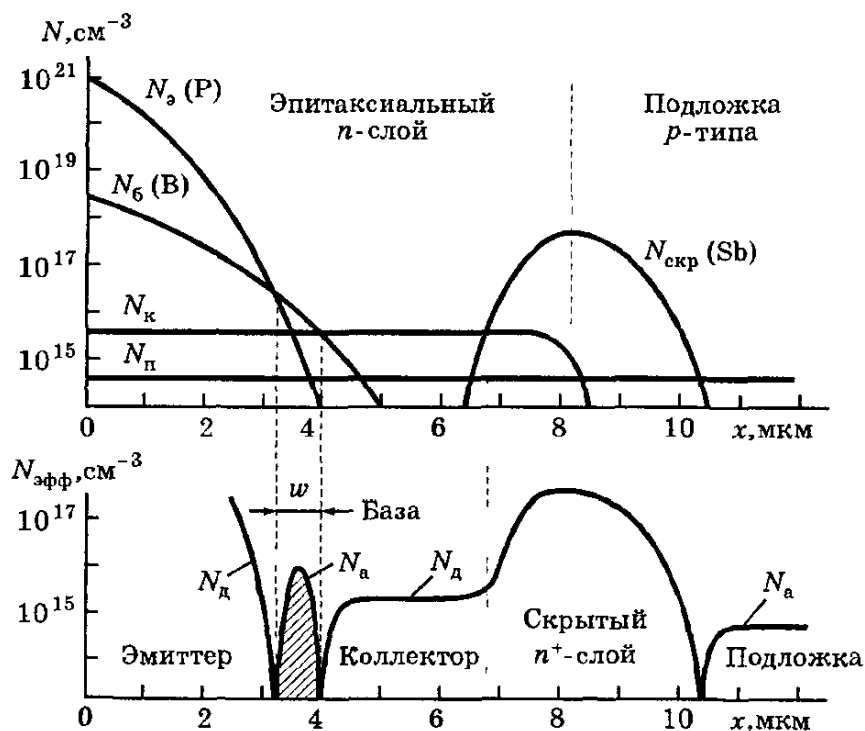


Рис. 7.12. Распределение концентрации примесей в структуре интегрального $n-p-n$ -транзистора и распределение эффективных концентраций

телей через базу. Однако расчеты показывают, что это увеличение составляет всего 20–30% и для приближенных оценок может не учитываться.

Конфигурации и рабочие параметры. Конфигурации интегральных транзисторов (в плане) имеют несколько вариантов. Два из них показаны на рис. 7.13.

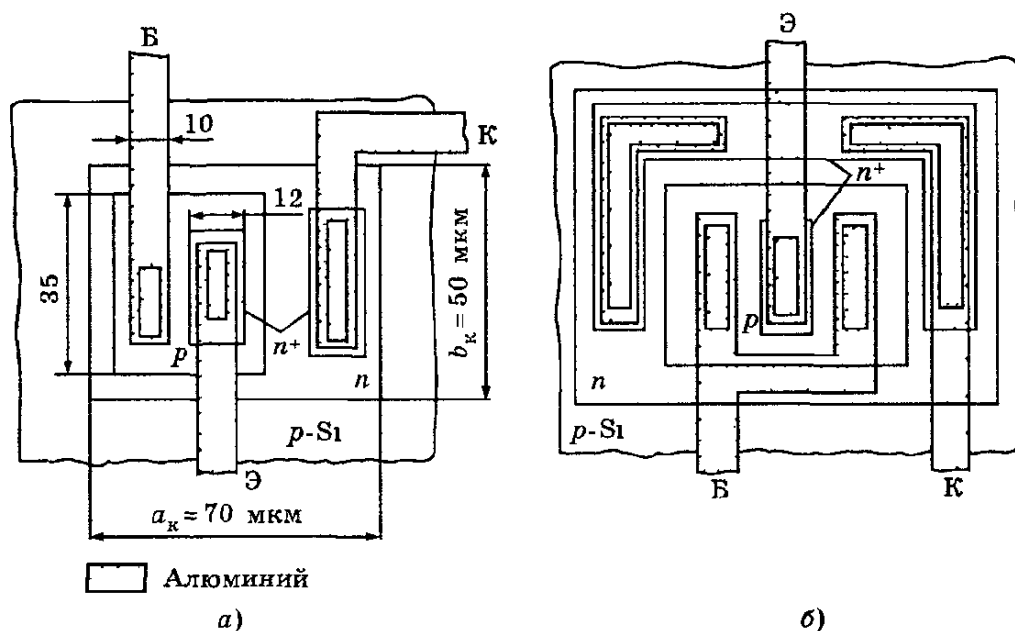


Рис. 7.13. Конфигурация (топология) транзисторов.
а — асимметричная, б — симметричная

Первая конфигурация (рис. 7.13, а) называется асимметричной: в ней коллекторный ток протекает к эмиттеру только в одном направлении: на рис. 7.13, а — справа. Вторая конфигурация (рис. 7.13, б) называется симметричной: в ней коллекторный ток протекает к эмиттеру с трех сторон. Соответственно сопротивление коллекторного слоя $r_{кк}$ оказывается примерно в 3 раза меньше, чем у асимметричной конфигурации.

Вторая конфигурация характерна также тем, что контактное окно и металлизация коллектора разбиты на две части. При такой конструкции облегчается металлическая разводка: алюминиевая полоска (например, эмиттерная на рис. 7.13, б) может проходить над коллектором по защитному окислу, покрывающему поверхность ИС (подробнее см. разд. 7.9).

Для примера на рис. 7.13, а приведены относительные размеры слоев интегрального n - p - n -транзистора для минимального литографического разрешения, равного 10 мкм. Для этого

случая в табл. 7.1 приведены типичные параметры этих слоев, а в табл. 7.2 — типичные параметры транзисторов.

Таблица 7.1. Типичные параметры слоев интегрального $n-p-n$ -транзистора

Наименование слоя	N , см ⁻³	d , мкм	ρ , Ом·см	R_s , Ом/□
Подложка p -типа	$1,5 \cdot 10^{15}$	300	10	—
Скрытый n^+ -слой	—	5–10	—	8–20
Коллекторный n -слой	10^{16}	10–15	0,5	500
Базовый p -слой	$5 \cdot 10^{18}$	2,5	—	200
Эмиттерный n^+ -слой	10^{21}	2	—	5–15

Примечание: N — концентрация примеси (для диффузных базового и эмиттерного слоев — поверхностная концентрация); d — глубина слоя; ρ — удельное сопротивление материала; R_s — удельное сопротивление слоя.

Таблица 7.2. Типичные параметры интегральных $n-p-n$ -транзисторов

Параметр	Номинал	Допуск δ , %
Коэффициент усиления B	100–200	± 30
Предельная частота f_T , МГц	200–500	± 20
Коллекторная емкость C_K , пФ	0,3–0,5	± 10
Пробивное напряжение $U_{кб}$, В	40–50	± 30
Пробивное напряжение $U_{эб}$, В	7–8	± 5

Величину R_s , фигурирующую в табл. 7.1, называют *удельным сопротивлением слоя*. Происхождение этого параметра следующее. Пусть имеется прямоугольная полоска материала длиной a , шириной b и толщиной d . Если ток протекает вдоль полоски (т.е. параллельно ее поверхности), то сопротивление полоски можно записать в виде:

$$R = \rho(a/bd) = R_s(a/b), \quad (7.1)$$

где $R_s = \rho/d$. Если слой неоднороден по толщине (например, если он получен диффузией примеси), то величина R_s запишется в общем виде:

$$R_s = \left[\int_0^d \sigma(x) dx \right]^{-1},$$

Подложку ИС (если она имеет проводимость p -типа) присоединяют к самому отрицательному потенциалу. Поэтому напряжение на переходе «коллектор—подложка» всегда обратное или (в худшем случае) близко к нулю. Следовательно, этот переход можно заменить барьерной емкостью $C_{кп}$, показанной на рис. 7.14, а.

Вместе с горизонтальным сопротивлением коллекторного слоя $r_{кк}$ емкость $C_{кп}$ образует RC -цепочку, которая подключена к активной области коллектора. Тогда эквивалентная схема интегрального $n-p-n$ -транзистора имеет такой вид, как показано на рис. 7.14, б.

Цепочка $r_{кк} - C_{кп}$, шунтирующая коллектор, — главная особенность интегрального $n-p-n$ -транзистора. Эта цепочка, естественно, ухудшает его быстродействие и ограничивает предельную частоту и время переключения.

Поскольку подложка находится под неизменным потенциалом, ее можно считать заземленной по переменным составляющим. Поэтому, дополняя малосигнальную эквивалентную схему ОБ (рис. 5.16) цепочкой $r_{кк}C_{кп}$ и пренебрегая сопротивлением r_b , приходим к выводу, что емкость $C_{кп}$ складывается с емкостью C_k , а сопротивление $r_{кк}$ — с внешним сопротивлением R_k (см. с. 163). Соответственно эквивалентная постоянная времени (5.68) запишется следующим образом:

$$\tau_{\alpha ое} = \tau_{\alpha} + (C_k + C_{кп}) (r_{кк} + R_k). \quad (7.2)$$

Из выражения (7.2) очевидно, что паразитные параметры $C_{кп}$ и $r_{кк}$ ограничивают быстродействие интегрального транзистора в идеальных условиях, когда $\tau_{\alpha} = 0$, $C_k = 0$ и $R_k = 0$. В этом случае эквивалентная постоянная времени $\tau_{\alpha ое}$ равна постоянной времени подложки:

$$\tau_{п} = C_{кп} r_{кк}. \quad (7.3)$$

Например, если $C_{кп} = 2$ пФ и $r_{кк} = 100$ Ом, получаем $\tau_{п} = 0,2$ нс, соответствующая граничная частота $f_{п} = 1/2\pi\tau_{п} \approx 800$ МГц. С учетом параметров τ_{α} , C_k и при наличии внешнего сопротивления R_k эквивалентная постоянная времени возрастает, а граничная частота уменьшается.

Значение $r_{кк} = 100$ Ом, использованное в предыдущем примере, характерно для транзисторов без скрытого n^+ -слоя. При наличии скрытого слоя типичны значения $r_{кк} = 10$ Ом. Тогда

постоянная времени τ_d оказывается на порядок меньше и влияние подложки становится мало существенным.

Соотношение между емкостями $C_{кп}$ и C_k зависит в первую очередь от соотношения площадей соответствующих переходов и концентраций примеси в слоях подложки и коллектора. Обычно $C_{кп} = (2-3)C_k$.

При расчете емкости $C_{кп}$ следует учитывать не только донную часть перехода коллектор-подложка, но и его боковые (вертикальные) части (см. рис. 7.14, а). Удельная емкость боковых частей больше, чем донной, поскольку концентрация акцепторов в разделительных слоях возрастает в направлении от дна перехода к поверхности (на рис. 7.14, а эта концентрация характеризуется густотой штриховки). Типичное значение удельной емкости для донной части составляет $C_{0x} = 100$ пФ/мм², а для боковых частей $C_{0y,z} = 150-250$ пФ/мм². Обычно все три составляющие емкости $C_{кп}$ оказываются почти одинаковыми и лежат в пределах 0,5–1,5 пФ.

Пассивную область базы вместе с лежащими под ней областями коллектора и подложки можно представить как некий *паразитный* $p-n-p$ -транзистор. На рис. 7.14, а структура такого транзистора обведена штриховой линией, а эквивалентная схема, характеризующая взаимосвязь рабочего $n-p-n$ -транзистора с паразитным, показана на рис. 7.14, в.

Если $n-p-n$ -транзистор работает в нормальном активном режиме ($U_{кб} > 0$), то паразитный транзистор находится в режиме отсечки ($U_{эб} < 0$, см. знаки без скобок). В этом случае коллекторный переход паразитного транзистора представлен емкостью $C_{кп}$ (рис. 7.14, б). Если же $n-p-n$ -транзистор работает в инверсном режиме или в режиме двойной инжекции ($U_{эб} < 0$), то паразитный $p-n-p$ -транзистор находится в активном режиме ($U_{эб} > 0$, см. знаки в скобках). При этом в подложку уходит ток $I_{\pi} = \alpha_{p-n-p}I_1$, где I_1 — часть базового тока (рис. 7.14, в).

Утечка базового тока в подложку ухудшает параметры транзистора в режиме двойной инжекции (см. раздел 8.2). Поэтому транзисторы, предназначенные для работы в таком режиме, специально легируют золотом. Атомы золота играют в кремнии роль ловушек, т.е. способствуют уменьшению времени жизни носителей. Соответственно коэффициент α_{p-n-p} уменьшается до значений менее 0,1, и утечкой тока в подложку можно пренебречь.

В случае диэлектрической изоляции паразитный $p-n-p$ -транзистор отсутствует, но емкость $C_{кп}$ сохраняется. Она, как уже отмечалось, меньше, чем при изоляции $p-n$ -переходом. Если ди-

электриком является двуокись кремния, то удельная емкость при толщине 1 мкм составляет около 35 пФ/мм².

Типовой технологический цикл. Промышленность предоставляет разработчику ИС готовые пластины кремния, прошедшие механическую и химическую обработку. Поэтому будем считать, что в начале технологического цикла имеется пластина кремния p -типа с отполированной поверхностью, покрытой тонким, естественным слоем окисла. В этой пластине групповым методом нужно изготовить транзисторы со структурой, показанной на рис. 7.6, б. Последовательность операций будет следующая¹.

- 1) Общее окисление пластины.
- 2) 1-я фотолитография: создание окон в окисле «под скрытые n^+ -слои».
- 3) 1-я диффузия (создание скрытых n^+ -слоев, рис. 7.15, а); диффузант — мышьяк или сурьма.
- 4) Стравливание окисла со всей поверхности.

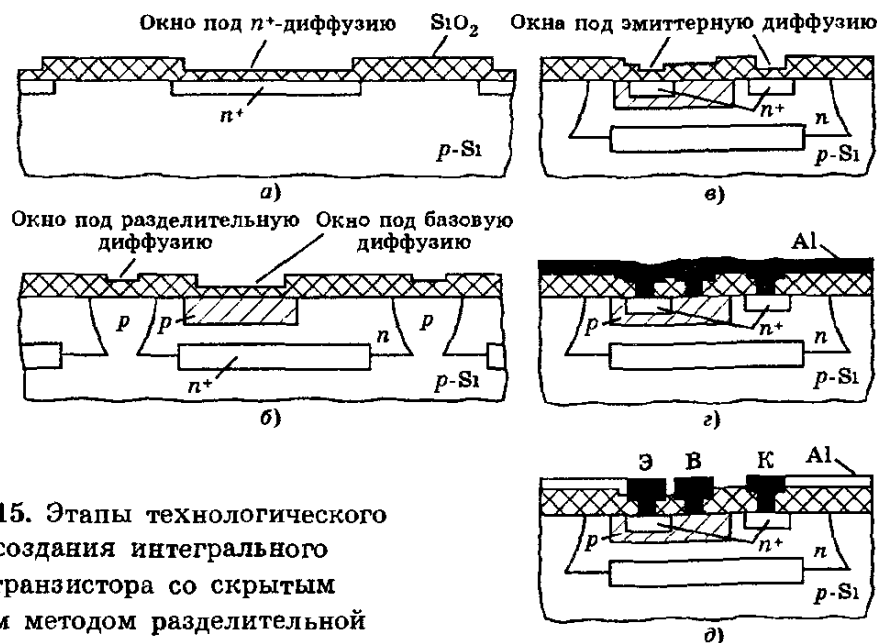


Рис. 7.15. Этапы технологического цикла создания интегрального $n-p-n$ -транзистора со скрытым n -слоем методом разделительной диффузии:

а — создание скрытых слоев; б — создание базовых слоев в эпитаксиальных карманах; в — создание эмиттерных слоев и слоев под омические контакты коллекторов; г — общая металлизация; д — создание рисунка металлической разводкой

¹ В приводимом перечне опущены многочисленные операции очистки и отмывки пластины, а также нанесения и удаления фоторезиста.

5) Нарращивание эпитаксиального n -слоя (при этом скрытый n^+ -слой несколько диффундирует как в подложку, так и в эпитаксиальный слой; см. с. 222).

6) Общее окисление.

7) 2-я фотолитография: создание окон в окисле «под разделительную диффузию».

8) 2-я диффузия (создание разделительных p -слоев и соответственно изолированных n -карманов в эпитаксиальном слое, рис. 7.5); диффузант — бор.

9) 3-я фотолитография: создание окон в окисле «под базовую диффузию».

10) 3-я диффузия (создание базовых p -слоев, рис. 7.15, б); диффузант — бор. Диффузия двухстадийная («загонка» и «разгонка», см. с. 179–180).

11) 4-я фотолитография: создание окон в окисле «под эмиттерную диффузию и омические контакты коллекторов».

12) 4-я диффузия (создание n^+ -слоев, рис. 7.15, в); диффузант — фосфор. Иногда эта диффузия тоже двухстадийная.

13) 5-я фотолитография: создание окон в окисле «под омические контакты».

14) Общее напыление алюминия на пластину (рис. 7.15, г).

15) 6-я фотолитография: создание окон в фоторезисте «под металлическую разводку».

16) Травление алюминия через фоторезистную маску, снятие фоторезиста (рис. 7.15, д).

17) Термическая обработка для вжигания алюминия в кремний.

Сборочные операции мы опускаем: они были рассмотрены в разделе 6.10. К рассмотренному технологическому циклу необходимо сделать несколько дополнительных замечаний.

В последнее время промышленность начала выпускать пластины с уже осуществленными эпитаксиальным слоем и скрытым n^+ -слоем. В таком случае первые пять операций отпадают.

В п.10 отмечено, что диффузия бора на этапе базовой диффузии — двухстадийная («загонка» и «разгонка»). Такое, казалось бы, усложнение процесса имеет серьезные основания и является общепринятым.

Действительно, для того чтобы коэффициент инжекции эмиттерного перехода составлял не менее 0,999, концентрация примеси в эмиттерном слое должна превышать концентрацию в базовом слое не менее

чем в 100 раз [см. (5.24)]. Между тем предельные растворимости бора и фосфора при оптимальных температурах различаются всего в 3 раза (см. табл. 6.1). Для того чтобы преодолеть это противоречие, нужно понизить приповерхностную концентрацию бора. Это можно сделать несколькими способами.

Можно проводить диффузию бора при столь низкой температуре, при которой его предельная растворимость будет в 100 раз меньше, чем у фосфора; однако тогда коэффициент диффузии уменьшится на несколько порядков и диффузию придется проводить в течение ряда суток или даже недель. Можно понизить температуру в зоне источника диффузанта и таким образом создать «диффузантный голод» вблизи поверхности пластины; однако этот процесс трудно контролируется. Таким образом, двухстадийная диффузия оказывается оптимальным решением: во время «разгонки» поверхностную концентрацию легко уменьшить в десятки раз и более (см. рис. 6.7, б).

Температуру «разгонки» делают на 150–200 °С больше, чем температура «загонки», чтобы повысить коэффициент диффузии примеси и сократить время процесса. Типичное время «загонки» составляет 20–40 мин (при температуре 1000–1050 °С), а «разгонки» — несколько часов (при температуре около 1200 °С).

Внедрение фосфора на этапе эмиттерной диффузии (п.12) — последняя высокотемпературная операция в цикле (температура выбирается на 100–150 °С ниже температуры «разгонки» бора, чтобы не изменить глубину коллекторного p - n -перехода). Длительность этой операции определяет толщину n^+ -слоя, а значит, и ширину базы транзистора. У современных планарных транзисторов типичная ширина базы составляет 0,4–0,5 мкм.

В заключение заметим, что в результате неоднократных операций фотолитографии, окисления и диффузии рельеф окисной пленки перед металлизацией оказывается сложным — многоступенчатым. В ряде случаев это затрудняет получение хорошей адгезии алюминия с поверхностью окисла. Обычно на рисунках, иллюстрирующих структуру (разрез) транзисторов или ИС, многоступенчатость окисла для простоты не показывают.

7.4. Разновидности n - p - n -транзисторов

В процессе развития микроэлектроники появились некоторые разновидности n - p - n транзисторов, не свойственные дискретным электронным схемам и не выпускаемые в виде дискретных приборов. Ниже рассматриваются наиболее важные из этих разновидностей.

Многоэмиттерный транзистор. Структура многоэмиттерного транзистора (МЭТ) показана на рис. 7.16, а. Такие транзисторы составляют основу весьма распространенного класса цифровых ИС — так называемых схем ТТЛ (см. разд. 10.2). Количество эмиттеров может составлять 5–8 и более.

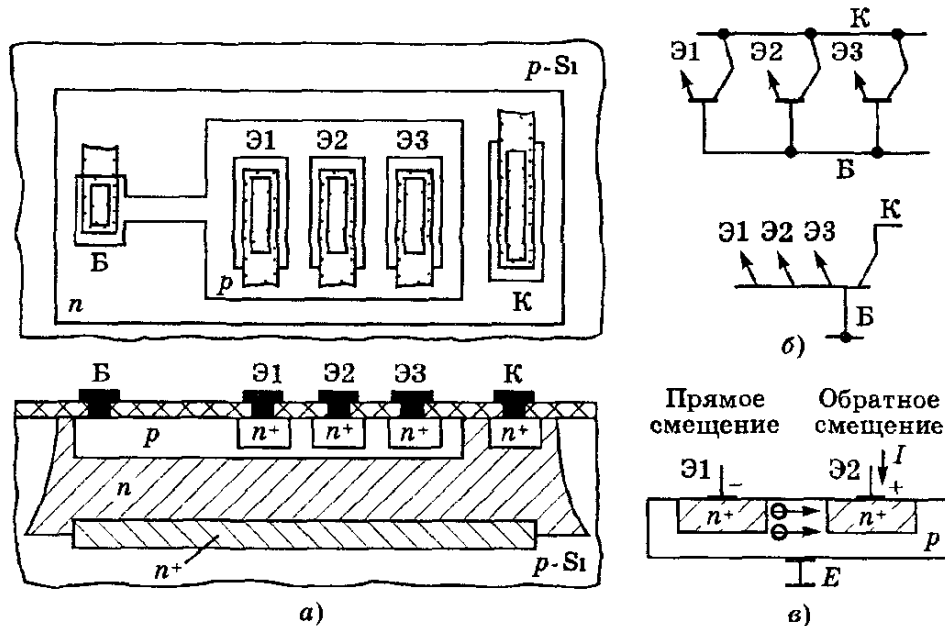


Рис. 7.16 Многоэмиттерный транзистор а — топология и структура, б — схемные модели, в — взаимодействие между смежными эмиттерами

В первом приближении МЭТ можно рассматривать как совокупность отдельных транзисторов с соединенными базами и коллекторами (рис. 7.16, б). Особенности МЭТ как единой структуры следующие (рис. 7.16, в).

Во-первых, каждая пара смежных эмиттеров вместе с разделяющим их p -слоем базы образует *горизонтальный* (иногда говорят — *продольный*) транзистор типа n^+p-n^+ . Если на одном из эмиттеров действует прямое напряжение, а на другом обратное, то первый будет инжектировать электроны, а второй будет собирать те из них, которые инжектированы через боковую поверхность эмиттера и прошли без рекомбинации расстояние между эмиттерами. Такой *транзисторный эффект* является для МЭТ паразитным: в обратносмещенном переходе, который должен быть запертым, будет протекать ток. Чтобы избежать горизонтального транзисторного эффекта, расстояние между эмиттерами, вообще говоря, должно превышать диффузионную длину носителей в базовом слое. Если транзистор легирован зо-

лотом (см. с. 232), то диффузионная длина не превышает 2–3 мкм и практически оказывается достаточным расстояние 10–15 мкм.

Во-вторых, важно, чтобы МЭТ имел как можно меньший инверсный коэффициент передачи тока. В противном случае в инверсном режиме, когда эмиттеры находятся под обратным напряжением, а коллектор под прямым, носители, инжектируемые коллектором, будут в значительной мере достигать эмиттеров, и в цепи последних, несмотря на их обратное смещение, будет протекать ток — паразитный эффект, аналогичный отмеченному выше.

Как известно, инверсный коэффициент передачи всегда меньше нормального из-за различий в степени легирования и в площадях эмиттера и коллектора (см. с. 142). Чтобы дополнительно уменьшить инверсный коэффициент α_I в МЭТ, искусственно увеличивают сопротивление пассивной базы, удаляя омический базовый контакт от активной области транзистора (рис. 7.16, а). При такой конфигурации сопротивление узкого «перешейка» между активной областью и базовым контактом может составлять 200–300 Ом, а падение напряжения на нем от базового тока 0,1–0,15 В. Значит, прямое напряжение на коллекторном переходе (в инверсном режиме) будет в активной области на 0,1–0,15 В меньше, чем вблизи базового контакта. Соответственно инжекция электронов из коллектора в активную область базы будет незначительной и паразитные токи через эмиттеры будут практически отсутствовать.

Многоколлекторные n - p - n -транзисторы. Структура многоколлекторного транзистора (МКТ), показанная на рис. 7.17, а, не отличается от структуры МЭТ. Различие состоит лишь в использовании структуры. Можно сказать, что МКТ — это МЭТ, используемый в инверсном режиме. общим эмиттером является эпитаксиальный n -слой, а коллекторами служат высоколегированные p^+ -слои малых размеров. Такое решение составляет основу одного из популярных классов цифровых ИС — так называемых схем инжекционной логики И²Л (см. раздел 10.3)¹. Эквивалентная схема МКТ показана на рис. 7.17, б.

¹ Специфичность МКТ в схемах И²Л — способ питания, но их основные свойства такие же, как рассматриваемые ниже

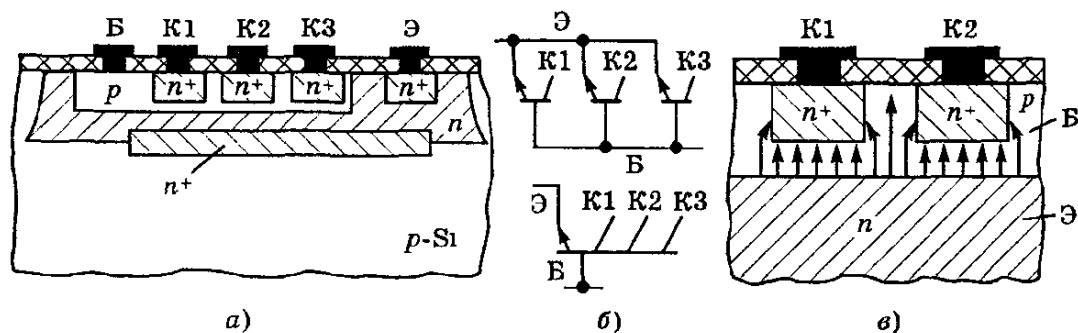


Рис. 7.17. Многоколлекторный транзистор: а — структура; б — схемные модели; в — траектория движения инжектированных носителей

Главной проблемой при разработке МКТ является увеличение нормального коэффициента передачи тока от общего n -эмиттера (инжектора) к каждому из n^+ -коллекторов. Естественно, что эта проблема — обратная той, которая решалась в случае МЭТ, когда коэффициент передачи от n -слоя к n^+ -слоям старались уменьшать.

В данном случае желательно, чтобы скрытый n^+ -слой располагался как можно ближе к базовому или просто контактировал с ним (как, например, при ИКД технологии). Тогда этот высоколегированный n^+ -слой, будучи эмиттером, обеспечит высокий коэффициент инжекции. Что касается коэффициента переноса, то для его повышения n^+ -коллекторы следует располагать как можно ближе друг к другу, сокращая тем самым площадь пассивной области базы. Оба эти пути, конечно, ограничены конструктивно-технологическими факторами. Тем не менее, даже при сравнительно разреженном расположении коллекторов, можно получить коэффициенты передачи на всю совокупность коллекторов $\alpha = 0,8-0,9$ или коэффициенты усиления $B = 4-10$. Этого достаточно для функционирования схем И²Л, если число коллекторов не превышает 3–5¹.

На рис. 7.17, в показаны траектории движения инжектированных носителей в базе. Как видим, носители двигаются так, что их доля, попадающая на коллекторы, существенно больше, чем если ее рассчитывать по формальному отношению площади коллектора к площади эмиттера. Именно поэтому реальный ко-

1 Коэффициент усиления в расчете на один коллектор равен общему коэффициенту усиления, поделенному на число коллекторов. Для приведенных значений общего коэффициента B коэффициент усиления на один коллектор превышает единицу, что и требуется в схемах И²Л.

эффициент β имеет те сравнительно большие значения, которые приведены выше. Следовательно, при расчете коэффициентов α и β нужно использовать не геометрические, а эффективные площади, о чем уже говорилось на с. 142 применительно к инверсному включению транзисторов.

Из рис. 7.17, в видно также, что средняя длина траектории носителей значительно превышает толщину активной базы w . Поэтому среднее время диффузии будет значительно меньше, чем у МЭТ и отдельных транзисторов [см. (5.47)]. Разница во временах пролета еще больше, поскольку в МКТ поле базы для инжектированных носителей является не ускоряющим, а тормозящим. Время пролета t_{np} составляет не менее 5–10 нс, а соответствующая предельная частота f_T — не более 20–50 МГц (ср. с параметрами в табл. 7.2).

С другой стороны, коллекторная емкость C_K у МКТ значительно меньше, чем у МЭТ и обычных транзисторов, из-за малой площади n^+ -коллектора. Поэтому в выражениях (5.68) и (5.69) членами $C_K R_K$ и $C^* R_K$ часто можно пренебречь.

Транзистор с барьером Шоттки. Назначение и принцип действия такого транзистора (ТШ) рассмотрены в разделе 8.4. На рис. 7.18 показана структура интегрального ТШ. Здесь очень изящно решена задача сочетания транзистора с диодом Шоттки: алюминиевая металлизация, обеспечивающая омический контакт с p -слоем базы, проделана в сторону коллекторного n -слоя. На первый взгляд, коллекторный слой оказался закороченным со слоем базы. На самом же деле алюминиевая полоска образует с p -слоем базы невыпрямляющий, омический контакт, а с n -слоем коллектора выпрямляющий контакт Шоттки (см. раздел 3.3). Поэтому эквивалентная схема такой структуры соответствует схеме на рис. 8.12.

Разумеется, структурное решение, показанное на рис. 7.18, можно использовать не только в простейшем транзисторе, но и в МЭТ. В обоих случаях отсутствуют накопление и рассасывание избыточных зарядов и получается существенный (в 1,5–2 раза) выигрыш во времени переключения транзисторов из полностью открытого в запертое состояние.

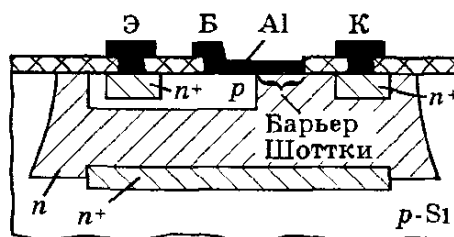


Рис. 7.18. Интегральный транзистор с барьером Шоттки

Супербета транзистор. Это название присвоено транзисторам со сверхтонкой базой: $w = 0,2-0,3$ мкм. При такой ширине базы коэффициент усиления базового тока составляет $B = 3000-5000$ и более, откуда и следует их название.

Получение сверхтонкой базы представляет серьезную технологическую проблему. Во-первых, ширина базы есть разность глубин базового и эмиттерного слоев: $w = d_b - d_e$. Если допуск на ширину базы составляет $\pm 10\%$, т.е. $0,02$ мкм, то при глубине базового слоя $d_b = 2$ мкм глубина эмиттерного слоя должна составлять $d_e = 1,8 \pm 0,02$ мкм. Значит, эмиттерная диффузия должна осуществляться с допуском $\pm 1,25\%$, что лежит на пределе технологических возможностей. Во-вторых, когда в процессе диффузии эмиттерного слоя его металлургическая граница приближается к металлургической границе коллекторного слоя на расстояние $0,4$ мкм, наступает так называемый *эффект отеснения* коллекторного перехода: дальнейшая диффузия атомов фосфора в эмиттерном слое сопровождается диффузией (с той же скоростью) атомов бора в базовом слое. Можно сказать, что эмиттерный слой «продавливает» металлургическую границу ранее полученного базового слоя (рис. 7.19). При этом толщи-

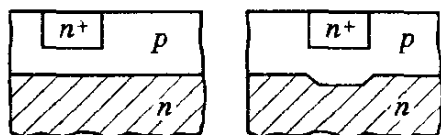


Рис. 7.19. Иллюстрация проблемы получения сверхтонкой базы

на базы сохраняет значение около $0,4$ мкм. Для того, чтобы преодолеть отмеченные трудности и обеспечить воспроизводимость ширины базы, потребовались многолетние усилия физиков-технологов. *Большой коэффициент усиления у супербета транзисторов покупается ценой очень*

малого пробивного напряжения ($1,5-2$ В). Это — результат эффекта смыкания переходов, свойственного транзисторам с тонкой базой (см. разд. 4.4). Поэтому супербета транзисторы являются не универсальными, а специализированными элементами ИС. Их главная область применения — входные каскады операционных усилителей (раздел 10.10).

Необходимо заметить, что дальнейшее уменьшение ширины базы до $0,1$ мкм и менее связано уже не столько с технологическими, сколько с принципиальными физическими проблемами. А именно, если принять среднюю концентрацию акцепторов в базе равной $8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (см. рис. 7.12), то на 1 см длины их приходится $2 \cdot 10^5$. При ширине базы $0,1$ мкм (т.е. 10^{-5} см)

оказывается, что в базе располагаются всего два слоя акцепторных атомов. При этом теряет смысл понятие градиента концентрации примеси (и связанное с ним понятие внутреннего поля), качественно меняются процессы рассеяния и характер движения носителей в базе. Тем самым классическая теория транзисторов в значительной мере теряет силу.

7.5. Транзисторы $p-n-p$

Получение $p-n-p$ -транзисторов с такими же высокими параметрами, как и $n-p-n$ -транзисторы, в едином технологическом цикле остается до сих пор нерешенной задачей. Поэтому все существующие варианты интегральных $p-n-p$ -транзисторов существенно уступают $n-p-n$ -транзисторам по коэффициенту усиления и предельной частоте.

Как известно, при прочих равных условиях $p-n-p$ -транзисторы уступают $n-p-n$ -транзисторам по предельной частоте примерно в 3 раза из-за меньшей подвижности дырок по сравнению с электронами. Поэтому в данном случае, говоря о меньшей предельной частоте $p-n-p$ -транзисторов, мы имеем в виду, что не удастся обеспечить те «равные условия», при которых различие было бы только в 3 раза.

На ранней стадии развития ИС в качестве $p-n-p$ -транзисторов использовались $p-n-p$ -структуры, образованные слоями базы, коллектора и подложки (рис. 7.20, а). Такие транзисторы обычно называют *паразитными* по аналогии с теми, которые входят в состав транзисторов $n-p-n$ (см. рис. 7.14, а). Создание паразитного $p-n-p$ -транзистора не требует дополнительных технологических операций, однако его параметры оказываются крайне низкими из-за большой ширины базы (сравнимой с глубиной эпитаксиального слоя) и слабой степени легирования эмиттера. Практически толщина базы составляет около 10 мкм, что соответствует предельной частоте $f_T = 1-2$ МГц, а коэффициент усиления B обычно не превышает 2-3.

Не менее существенным недостатком паразитных $p-n-p$ -транзисторов является то, что разделительный p^+ -слой связан с подложкой, а через нее с другими разделительными слоями. Следовательно, *коллекторы всех таких $p-n-p$ -транзисторов оказываются соединенными друг с другом*, а это сильно ограничивает сферу их применения (ср. с рис. 7.1).

Вводя дополнительную технологическую операцию — глубокую диффузию акцепторов (рис. 7.20, б), можно получить меньшую толщину базы и улучшить параметры ($B = 8-10$ и $f_T = 4-6$ МГц). Однако

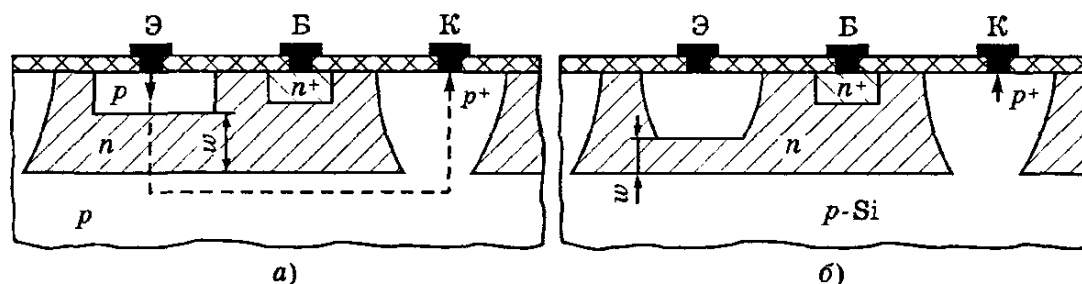


Рис. 7.20. Паразитные $p-n-p$ -транзисторы: а — эмиттер, полученный на этапе базовой диффузии $n-p-n$ -транзистора; б — эмиттер, полученный специально глубокой диффузией бора

увеличивается время проведения диффузии и сохраняется недостаток, обусловленный связью коллекторов через подложку.

В настоящее время основным структурным вариантом $p-n-p$ -транзистора является горизонтальный $p-n-p$ -транзистор (рис. 7.21). Он изолирован от других элементов, имеет гораздо лучшие параметры, чем паразитный $p-n-p$ -транзистор, а его технология полностью вписывается в классический технологический цикл с разделительной диффузией.

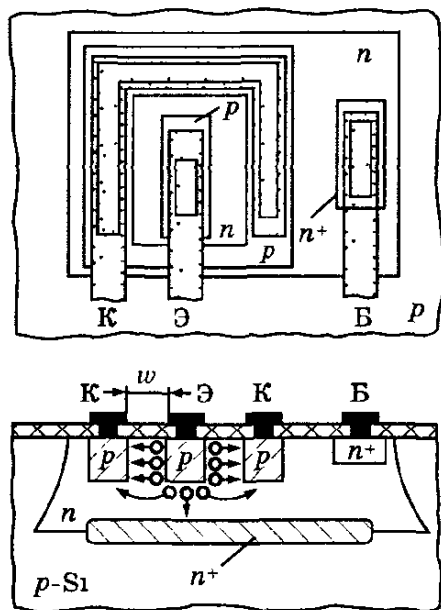


Рис. 7.21. Горизонтальный $p-n-p$ -транзистор (топология и структура)

Эмиттерный и коллекторный слои получают на этапе базовой диффузии, причем коллекторный слой охватывает эмиттер со всех сторон. Это позволяет собирать инжектированные дырки со всех боковых частей эмиттерного слоя. Приповерхностные боковые участки p -слоев характерны повышенной концентрацией примеси, что способствует увеличению коэффициента инжекции. Поскольку базовая диффузия сравнительно мелкая (2–3 мкм), ширину базы (т.е. расстояние между p -слоями) удастся сделать порядка 3–4 мкм. В результате предельная частота может составлять до 20–40 МГц, а коэффициент усиления до 50.

Из рис. 7.21 видно, что горизонтальный $p-n-p$ -транзистор (как и паразитный) является бездрейфовым, так как его база однородная — эпитаксиальный n -слой. Этот фактор вместе с

меньшей подвижностью дырок предопределяет примерно на порядок худшие частотные и переходные свойства $p-n-p$ -транзистора даже при той же ширине базы, что и у дрейфового $n-p-n$ -транзистора. Из рис. 7.21 также видно, что для увеличения коэффициента передачи эмиттерного тока желательно, чтобы площадь донной части эмиттерного слоя была мала по сравнению с площадью боковых частей. Значит, эмиттерный слой нужно делать как можно более узким.

Заметим, что горизонтальному $p-n-p$ -транзистору свойственна электрофизическая симметрия, так как слои эмиттера и коллектора однотипные. В частности, это означает, что пробивные напряжения эмиттерного и коллекторного переходов — одинаковы (обычно 30-50 В). Близкими оказываются также нормальный и инверсный коэффициенты усиления тока B_N и B_I .

Горизонтальная структура позволяет легко осуществить многоколлекторный $p-n-p$ -транзистор: достаточно разделить кольцевой p -коллектор (рис. 7.21) на n частей и сделать отдельные выводы от каждой части.

Коэффициент усиления по каждому из коллекторов будет примерно в n раз меньше, чем для единого коллектора, но все коллекторы будут действовать «синхронно», а нагрузки, присоединенные к ним, будут изолированы — «развязаны» друг от друга.

Главные недостатки горизонтального $p-n-p$ -транзистора — сравнительно большая ширина базы и ее однородность. Эти недостатки можно устранить в вертикальной структуре (рис. 7.22), но ценой дополнительных технологических операций. Из рис. 7.22 следуют две такие операции: глубокая диффузия p -слоя и заключительная диффузия p^{++} -слоя. Последняя операция весьма проблематична, так как для получения p^{++} -слоя необходим акцепторный материал, у которого предельная растворимость больше, чем у фосфора, используемого для получения n^+ -слоя. Поскольку такие материалы практически отсутствуют, верхнюю — наиболее легированную часть n^+ -слоя необходимо стравить до осуществления p^{++} -слоя, что дополнительно усложняет технологический цикл.

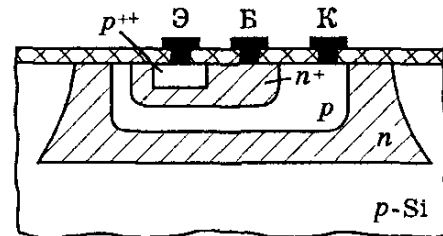


Рис. 7.22. Вертикальный $p-n-p$ -транзистор

Большие возможности для получения качественных $p-n-p$ -транзисторов открывает технология КНС («кремний на сапфире», см. разд. 7.2). В этом случае (рис. 7.23) $p-n-p$ -тран-

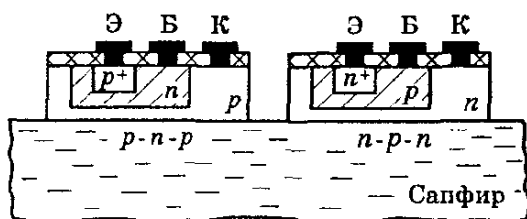


Рис. 7.23. Транзистор $p-n-p$ -типа, полученный по технологии «кремний на сапфире» наряду с $n-p-n$ -транзистором

зистор изготавливается по существу отдельно от $n-p-n$ -транзисторов, начиная с этапа эпитаксии p -слоя (эпитаксия n - и p -слоев осуществляется локально, через разные маски). Поэтому и ширина базы, и степень легирования эмиттерного слоя могут быть оптимизированы. Однако необходимость в локальной эпитаксии и два допол-

нительных процесса диффузии сильно усложняют и удорожают производство.

7.6. Интегральные диоды

В качестве диода можно использовать любой из двух $p-n$ -переходов, расположенных в изолирующем кармане: эмиттерный или коллекторный. Можно также использовать их комбинации. Поэтому по существу *интегральный диод представляет собой диодное включение интегрального транзистора*.

Пять возможных вариантов диодного включения транзистора показаны на рис. 7.24. В табл. 7.3 приведены типичные параметры этих вариантов. Для них приняты следующие обозначения: до черточки стоит обозначение анода, после черточки — катода; если два слоя соединены, их обозначения пишутся слитно. Из табл. 7.3 видно, что варианты различаются как по статическим, так и по динамическим параметрам.

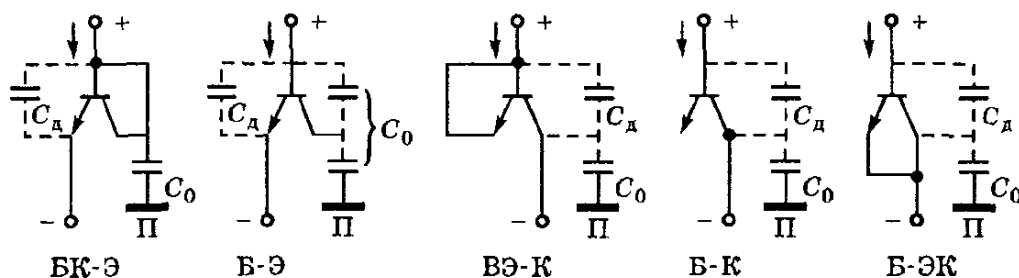


Рис. 7.24. Интегральные диоды (диодные включения транзистора)

Пробивные напряжения $U_{пр}$ зависят от используемого перехода: они меньше у тех вариантов, в которых используется эмиттерный переход (см. табл. 7.2).

Обратные токи $I_{обр}$ (без учета токов утечки) — это токи термогенерации в переходах. Они зависят от объема перехода и, следовательно, меньше у тех вариантов, у которых используется только эмиттерный переход, имеющий наименьшую площадь.

Емкость диода C_d (т.е. емкость между анодом и катодом) зависит от площади используемых переходов; поэтому она максимальна при их параллельном соединении (вариант Б–ЭК). Паразитная емкость на подложку C_0 шунтирует на «землю» анод или катод диода (считается, что подложка заземлена). Емкость C_0 , как правило, совпадает с емкостью $C_{кп}$, с которой мы встретились при рассмотрении n – p – n -транзистора (рис. 7.14, б). Однако у варианта Б–Э емкости $C_{кп}$ и C_k оказываются включенными последовательно и результирующая емкость C_0 минимальна.

Таблица 7.3. Типичные параметры интегральных диодов

Параметр	Тип диода				
	БК–Э	Б–Э	БЭ–К	Б–К	Б–ЭК
$U_{пр}$, В	7–8	7–8	40–50	40–50	7–8
$I_{обр}$, нА	0,5–1	0,5–1	15–30	15–30	20–40
C_d , пФ	0,5	0,5	0,7	0,7	1,2
C_0 , пФ	3	1,2	3	3	3
t_v , нс	10	50	50	75	100

Время восстановления обратного тока t_v (т.е. время переключения диода из открытого в закрытое состояние) минимально у варианта БК–Э; у этого варианта заряд накапливается только в базовом слое (так как коллекторный переход закорочен). У других вариантов заряд накапливается не только в базе, но и в коллекторе, так что для рассасывания заряда требуется большее время.

Сравнивая отдельные варианты, приходим к выводу, что в целом оптимальными вариантами являются БК–Э и Б–Э. Малые пробивные напряжения этих вариантов не играют существенной роли в низковольтных ИС. Чаще всего используется вариант БК–Э.

Помимо собственно диодов, в ИС часто используются *интегральные стабилитроны*. Они также осуществляются в нескольких вариантах, в зависимости от необходимого напряжения стабилизации и температурного коэффициента.

Если необходимы напряжения 5–10 В, то используют обратное включение диода Б–Э в режиме пробоя; при этом температурная чувствительность составляет $+(2-5) \text{ мВ}/^\circ\text{С}$. Если необходимы напряжения 3–5 В, то применяют либо обратное включение диода БЭ–К, используя эффект смыкания (см. с. 144), либо обратное включение p – n -перехода, специально образованного в разделительном слое (рис. 7.25, а). В последнем случае n^+ -слой получают на этапе эмиттерной диффузии. Поскольку приповерхностная часть разделительного слоя сильно легирована, переход имеет структуру p^+ – n^+ и ему свойствен туннельный — низковольтный пробой. Температурная чувствительность составляет $-(2-3) \text{ мВ}/^\circ\text{С}$.

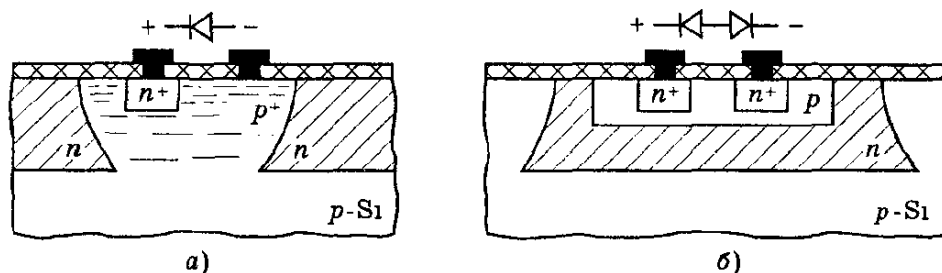


Рис. 7.25. Интегральные стабилитроны.

а — на основе разделительного слоя, б — на основе базового слоя (с применением температурной компенсации)

Широкое распространение имеют стабилитроны, рассчитанные на напряжения, равные или кратные напряжению на открытом переходе $U^* \approx 0,7 \text{ В}$. В таких случаях используют один или несколько последовательно включенных диодов БК–Э, работающих в прямом направлении. Температурная чувствительность в этом случае составляет $-(1,5-2) \text{ мВ}/^\circ\text{С}$.

Если в базовом слое осуществить два p – n -перехода (рис. 7.25, б), то при подаче напряжения между n^+ -слоями один из переходов работает в режиме лавинного пробоя, а второй — в режиме прямого смещения. Такой вариант привлекателен малой температурной чувствительностью ($\pm 1 \text{ мВ}/^\circ\text{С}$ и менее), так как температурные чувствительности при лавинном пробое и при прямом смещении имеют разные знаки.

7.7. Полевой транзистор

Полевые транзисторы (ПТ), рассмотренные в разделе 4.3, хорошо вписываются в общую технологию биполярных ИС и потому часто изготавливаются совместно с биполярными транзисторами на одном кристалле. Типичные структуры ПТ, расположенные в изолированных карманах, показаны на рис. 7.26.

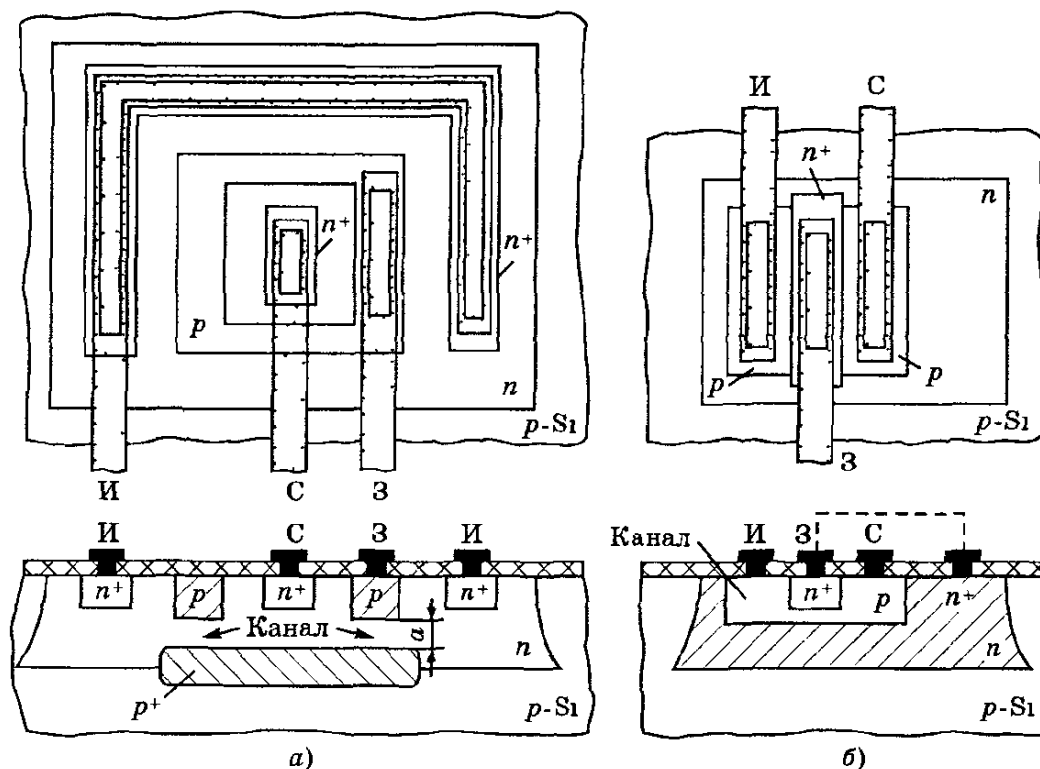


Рис. 7.26. Интегральные полевые транзисторы с n -каналом (а) и с p -каналом (б)

В структуре, показанной на рис. 7.26, а, p -слой затвора образуется на этапе базовой диффузии, а n^+ -слои, обеспечивающие омический контакт с областями истока и стока, — на этапе эмиттерной диффузии. Заметим, что p -слой затвора окружает сток со всех сторон, так что ток между истоком и стоком может протекать только через управляемый канал.

В n -карманах, предназначенных для ПТ, вместо скрытого n^+ -слоя осуществляется скрытый p^+ -слой. Назначение этого слоя — уменьшить начальную толщину канала a и тем самым напряжение отсечки [см.(4.29)]. Осуществление скрытого p^+ -слоя связано с дополнительными технологическими операциями. Для того чтобы скрытый p^+ -слой проник в эпитаксиаль-

ный слой достаточно глубоко, в качестве акцепторного диффузанта используют элементы с большим коэффициентом диффузии (бор или галлий).

На подложку, а значит, и на p^+ -слой задают постоянный (максимально отрицательный) потенциал; поэтому они не выполняют управляющих функций.

Структура, показанная на рис. 7.26, б, совпадает со структурой обычного n - p - n -транзистора. Роль канала играет участок базового p -слоя, расположенный между n^+ - и n -слоями. Если при совместном изготовлении ПТ и биполярного транзистора не использовать дополнительных технологических процессов, то толщина канала будет равна ширине базы n - p - n -транзистора (0,5–1 мкм). При такой малой толщине канала получаются большой разброс параметров ПТ и малое напряжение пробоя. Поэтому целесообразно пойти на усложнение технологического цикла, осуществляя p -слой ПТ отдельно от базового p -слоя, с тем чтобы толщина канала была не менее 1–2 мкм. Для этого проводят предварительную диффузию p -слоя ПТ до базовой диффузии. Тогда во время базовой диффузии p -слой ПТ дополнительно расширяется, и его глубина оказывается несколько больше глубины базового слоя.

Для того чтобы области истока и стока соединялись только через канал, n^+ -слой делают более широким (в плане), чем p -слой (рис. 7.26, б). В результате n^+ -слой контактирует с эпитаксиальным n -слоем и вместе они образуют «верхний» и «нижний» затворы. В нижней части рис. 7.26, б контакт между «верхним» и «нижним» затворами условно показан штриховой линией. Подложка p -типа присоединяется к максимальному отрицательному потенциалу.

7.8. МДП-транзисторы

Вообще говоря, совместное изготовление МДП- и биполярных транзисторов на одном кристалле, в едином технологическом цикле возможно, но является специальным случаем. Как правило, биполярные и МДП-транзисторные ИС разрабатываются и изготавливаются отдельно. Эти два типа ИС предназначены либо для решения разных функциональных задач, либо для решения одной и той же задачи, но с использованием преимуществ соответствующего класса транзисторов. Главную роль в современной микроэлектронике играют МДП-транзисторы, в

которых диэлектриком является SiO_2 , их называют МОП-транзисторами.

Простейший МОП-транзистор. Поскольку интегральные МДП-транзисторы, как отмечалось в разделе 7.2, не нуждаются в изоляции, их структура внешне не отличается от структуры дискретных вариантов. На рис. 7.27 воспроизведена структура МОП-транзистора с индуцированным n -каналом, которая была подробно проанализирована в разделе 4.2. Отметим особенности этого транзистора как элемента ИС.

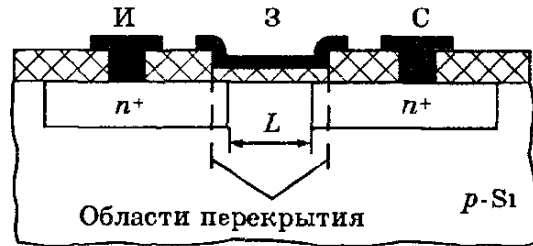


Рис. 7.27. Интегральный МОП-транзистор (с перекрытием затвора)

Из сравнения рис. 7.6, 7.21 и 7.22 очевидна, прежде всего, технологическая простота МОП-транзистора по сравнению с биполярными: необходимы всего лишь один процесс диффузии и четыре процесса фотолитографии (под диффузию, под тонкий окисел, под омические контакты и под металлизацию). Технологическая простота обеспечивает меньший брак и меньшую стоимость.

Отсутствие изолирующих карманов способствует лучшему использованию площади кристалла, т.е. повышению степени интеграции элементов. Однако, с другой стороны, отсутствие изоляции делает подложку общим электродом для всех транзисторов. Это обстоятельство может привести к различию параметров у внешне идентичных транзисторов. Действительно, если на подложку задан постоянный потенциал, а истоки транзисторов имеют разные потенциалы (такое различие свойственно многим схемам), то будут разными и напряжения $U_{\text{ин}}$ между подложкой и истоками. Согласно (4.15) это равносильно различию пороговых напряжений МДП-транзисторов.

Как известно, главным фактором, лимитирующим быстродействие МДП-транзисторов, обычно являются паразитные емкости (см. с. 114–115). Металлическая разводка, используемая в ИС, гораздо компактнее проволочного монтажа, свойственного узлам и блокам, выполненным на дискретных компонентах. Поэтому паразитные емкости интегрального МОП-транзистора меньше, чем дискретного, а его быстродействие соответственно в несколько раз выше.

Паразитные емкости МДП-транзистора были показаны на рис. 4.10. Барьерные емкости переходов истока и стока ($C_{ин}$ и $C_{ис}$) рассчитываются по формуле (3.25); при размерах n^+ -слоев 20×40 мкм эти емкости лежат в пределах 0,04–0,10 пФ.

Удельная емкость металлизации определяется элементарной формулой

$$C_{0м} = \varepsilon_0 \varepsilon / d, \quad (7.4)$$

где d — толщина защитного окисла, ε — его диэлектрическая проницаемость. Подставляя $\varepsilon = 4,5$ и $d = 0,7$ мкм, получаем типичное значение $C_{0м} \approx 60$ пФ/мм². При ширине полоски металлизации 15 мкм погонная емкость составит 0,9 пФ/мм. Как видим, полоски длиной всего 50–100 мкм могут иметь емкость 0,05–0,09 пФ, сравнимую с емкостями переходов $C_{ин}$ и $C_{ис}$. Еще больший вклад вносят контактные площадки: при площади 100×100 мкм² их емкость составляет около 0,6 пФ.

Емкости перекрытия $C_{зи}$ и $C_{зс}$ (см. рис. 4.11) не поддаются сколько-нибудь точному расчету, так как площадь перекрытия характерна большим разбросом из-за неровности краев металлизации затвора и границ диффузионных слоев (рис. 7.27). Порядок величин можно оценить, полагая толщину тонкого окисла $d = 0,12$ мкм. Тогда из (7.4) получаем удельную емкость тонкого окисла $C_0 \approx 350$ пФ/мм². При ширине истока и стока 40 мкм и перекрытии 2 мкм получим средние значения $C_{зи} = C_{зс} \approx 0,03$ пФ. Эти значения меньше, чем значения других емкостей. Поэтому, в частности, емкостью $C_{зи}$ часто пренебрегают. Однако емкость $C_{зс}$, представляющая собой *емкость обратной связи* между выходом транзистора (стоком) и входом (затвором), проявляется во многих схемах не как таковая, а в виде гораздо большей эквивалентной емкости $KC_{зс}$ (благодаря так называемому *эффекту Миллера*, см. разд. 9.5). Множитель K есть коэффициент усиления схемы: он может составлять от нескольких единиц до нескольких десятков и более. Поэтому эквивалентная емкость обратной связи $KC_{зс}$ может достигать значений 0,1–0,5 пФ, т.е. превышать все остальные емкости.

В комплементарных МОП-транзисторных ИС (КМОП) (см. с. 101) на одном и том же кристалле необходимо изготавливать транзисторы обоих типов: с n - и с p -каналом. При этом один из типов транзисторов нужно размещать в специальном кармане. Например, если в качестве подложки используется p -кремний,

то n -канальный транзистор можно осуществить непосредственно в подложке, а для p -канального транзистора потребуется карман с электронной проводимостью (рис. 7.28, а). Получение такого кармана в принципе несложно, но связано с дополнительными технологическими операциями (фотолитография, диффузия доноров и др.). Кроме того, затрудняется получение низкоомных p^+ -слоев в верхней (сильно легированной) части n -кармана. Другим способом изготовления КМОП-транзисторов на одной подложке является КНС технология (см. разд. 7.2). В этом случае на сапфировой подложке создаются «островки» кремния с собственной проводимостью, после чего в одних «островках» проводится диффузия донорной примеси и получаются n -канальные транзисторы, а в других — диффузия акцепторной примеси и получаются p -канальные транзисторы (рис. 7.28, б). Хотя количество технологических операций и в этом случае больше, чем при изготовлении транзисторов одного типа, зато отпадают трудности, связанные с получением низкоомных слоев истока и стока (см. выше).

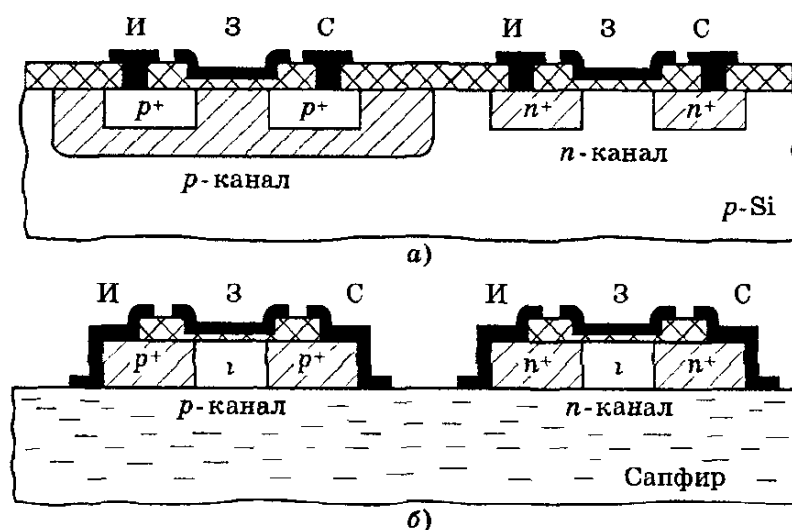


Рис. 7.28. Комплементарные МОП-транзисторы:

а — использование изолирующего n -кармана;

б — использование воздушной изоляции (технология КНС)

Что касается сочетания МОП-транзисторов с биполярными, то в принципе оно осуществляется просто (рис. 7.29): n -канальные транзисторы изготавливаются непосредственно в p -подложке на этапе эмиттерной диффузии, а p -канальные — в изолирующих карманах на этапе базовой диффузии.

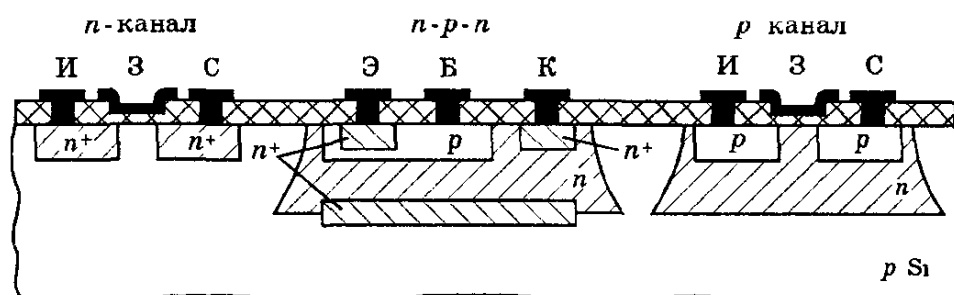


Рис. 7.29. Сочетание биполярных и МОП транзисторов на одном кристалле

В процессе развития микроэлектроники усовершенствование МОП-транзисторов происходило по двум главным направлениям: повышение быстродействия и снижение порогового напряжения. В основе последней тенденции лежало стремление снизить рабочие напряжения МОП-транзисторов и рассеиваемую ими мощность. Поскольку полная мощность кристалла ограничена, уменьшение мощности, рассеиваемой в одном транзисторе, способствует повышению степени интеграции, а уменьшение напряжений питания облегчает совместную работу МОП-транзисторных и низковольтных биполярных ИС без специальных согласующих элементов.

Способы повышения быстродействия. Повышение быстродействия МОП-транзисторов связано прежде всего с уменьшением емкостей перекрытия. Существенное (примерно на порядок) уменьшение емкостей перекрытия достигается при использовании *технологии самосовмещенных затворов*. Общая идея такой технологии состоит в том, что слои истока и стока осуществляются не до, а после осуществления затвора. При этом затвор используется в качестве маски при получении слоев истока и стока, а значит, края затвора и этих слоев будут совпадать и перекрытие будет отсутствовать.

Один из вариантов МОП-транзистора с самосовмещенным затвором показан на рис. 7.30. Последовательность технологических операций при этом следующая. Сначала проводится диффузия n^+ -слоев, причем расстояние между ними делается заведомо больше желательной длины канала. Затем осуществляется тонкое окисление на участке между n^+ -слоями и частично над ними. Далее на тонкий окисел напыляется алюминиевый электрод затвора, причем его ширина меньше расстояния между n^+ -слоями. Наконец, проводится ионное легирование (имплантация атомов фосфора) через маску, образуемую алю-

миниевым затвором и толстым защитным окислом. Атомы фосфора проникают в кремний через тонкий окисел и «продлевают» n^+ -слои до края алюминиевой полоски так, что края затвора практически совпадают с краями истока и стока. Имплантированные слои легированы несколько слабее, чем диффузионные; поэтому для них использовано обозначение n вместо n^+ . Глубина имплантации также несколько меньше, чем глубина диффузии, и составляет 0,1–0,2 мкм.

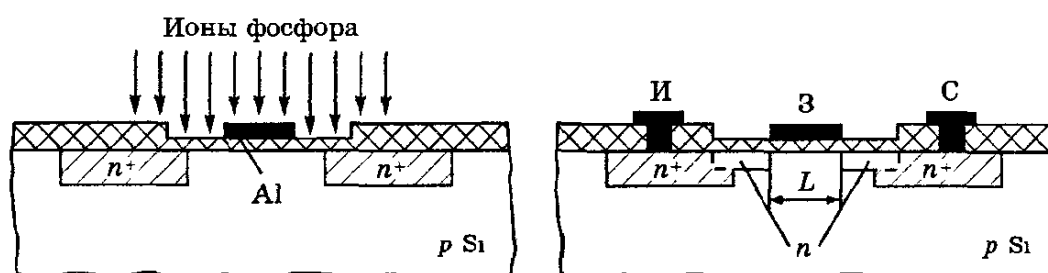


Рис. 7.30. МОП-транзистор с самосовмещенным затвором, полученный методом ионной имплантации

Другой вариант МОП-транзистора с самосовмещенным затвором показан на рис. 7.31. В этом варианте сначала вытравливают окно в окисле с размерами, соответствующими всей структуре транзистора. Затем в средней части окна проводят тонкое окисление кремния в виде полоски, ширина которой равна длине будущего канала L . Далее на эту полоску напыляют поликристаллический слой кремния той же ширины, но более длинный, выходящий за границы исходного окна в окисле (рис. 7.31, а). Удельное сопротивление напыляемого кремния делается достаточно малым, так что слой поликристаллического кремния выполняет роль металлического затвора в обычных МОП-транзисторах. На следующем этапе проводят мелкую диффузию донорной примеси через маску, образуемую полоской поликристаллического кремниевыхого затвора и защитным окислом, окружающим окно; в результате получают n^+ -слои истока и стока, края которых почти совпадают с краями кремниевыхого затвора. Далее всю поверхность кристалла окисляют и в этом окисле, как обычно, делают окна для омических контактов, в том числе для контакта с кремниевым затвором. В заключение осуществляют металлическую разводку. Из рис. 7.31, б видно, что поликристаллический кремниевый затвор оказывается «погруженным» в слой защитного окисла;

омический контакт к нему располагается за пределами рабочей области транзистора.

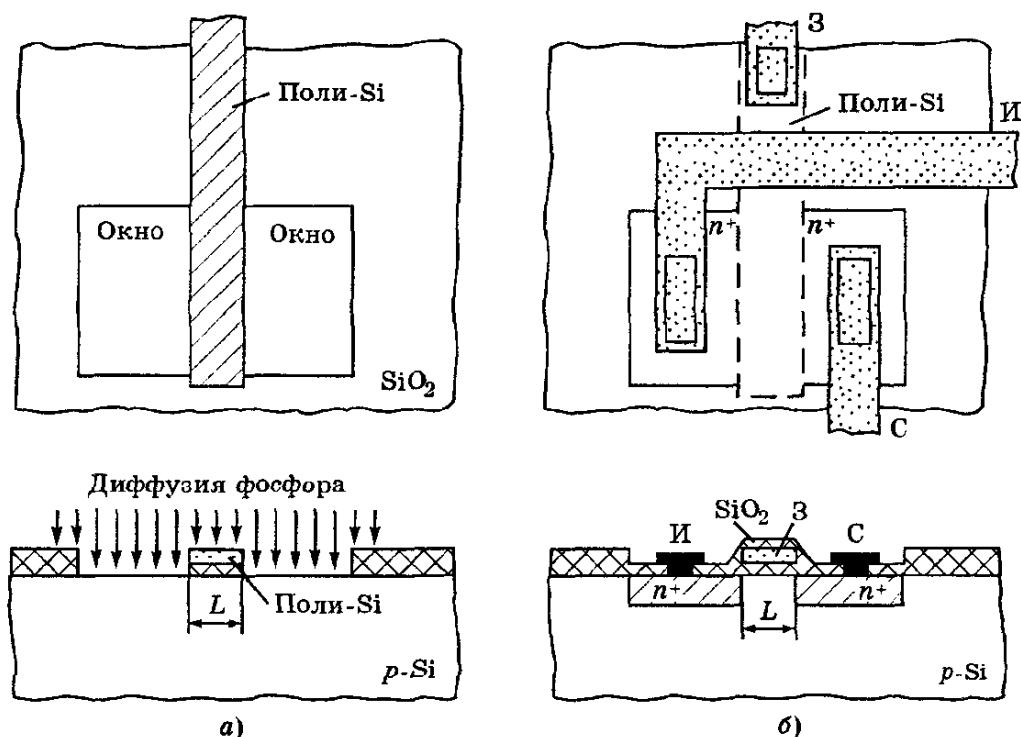


Рис. 7.31. МОП-транзистор с самосовмещенным поликремниевым затвором: а — этап диффузии доноров через маску, включающую слой поликристаллического кремния; б — готовая структура (после нанесения защитного окисла и металлизации)

Уменьшение паразитных емкостей МОП-транзисторов и прежде всего емкости перекрытия $C_{эс}$ выдвигает на первый план задачу уменьшения постоянной времени крутизны τ_s . При малых емкостях она становится главным фактором, ограничивающим быстродействие.

Переход от транзисторов с p -каналом к транзисторам с n -каналом позволил уменьшить значение τ_s примерно в 3 раза благодаря увеличению подвижности носителей. Дальнейшее уменьшение величины τ_s требует уменьшения длины канала L . Этот путь наиболее радикально реализуется *методом двойной диффузии*. Структура МОП-транзистора, полученная этим методом, показана на рис. 7.32.

Эта структура аналогична структуре классического n - p - n -транзистора (рис. 7.14, а) с той, однако, существенной разницей, что эмиттерный n^+ -слой (в данном случае это слой истока) имеет почти такую же площадь, что и базовый p -слой

(в данном случае это слой канала). Для того, чтобы обеспечить точное «вписывание» n^+ -слоя в p -слой, диффузию доноров для n^+ -слоя осуществляют через то же самое окно в окисле, через которое до этого осуществляли диффузию акцепторов для p -слоя. Тем самым устраняется необходимость в совмещении фотошаблонов для двух последовательных фотолитографий, а значит, и ошибка совмещения, которая могла бы привести к сдвигу n^+ -слоя относительно n -слоя. В результате расстояние между n^+ - и n -слоями, т.е. толщина p -слоя, может иметь примерно те же значения, что и ширина базы w у n - p - n -транзистора (см. рис. 7.14, а): до 1 мкм и менее.

Вблизи поверхности расстояние между n^+ - и n -слоями играет роль длины канала L (рис. 7.32). При значениях $L \leq 1$ мкм (вместо 4–5 мкм у наиболее совершенных МОП-транзисторов, полученных по обычной технологии) постоянная времени τ_s согласно (4.27) может быть менее 0,005 нс, а граничная частота f_s более 30 ГГц.

Способы уменьшения порогового напряжения. Транзисторы со структурой, показанной на рис. 7.31, обычно называют МОП-транзисторами с кремниевым затвором. Такие транзисторы характерны не только малой емкостью перекрытия, но и малым пороговым напряжением: 1–2 В вместо обычных 2,5–3,5 В. Это объясняется тем, что материал затвора и подложки — один и тот же — кремний. Следовательно, контактная разность потенциалов между ними (ϕ_{MS}) равна нулю, что и приводит к уменьшению порогового напряжения [см. (4.3а)]. Примерно такой же результат дает использование молибденового затвора.

Помимо контактной разности потенциалов, для уменьшения порогового напряжения можно варьировать и другими параметрами, входящими в выражения (4.3). Например, можно за-

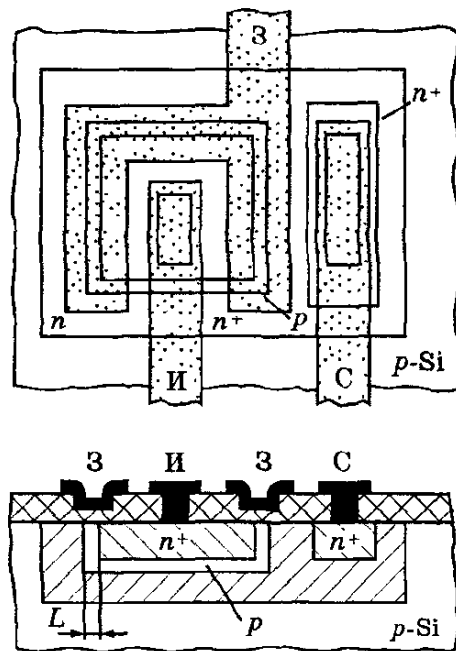


Рис. 7.32. МОП-транзистор, полученный методом двойной диффузии

менить тонкий окисел SiO_2 тонким напыленным слоем нитрида кремния Si_3N_4 , у которого диэлектрическая проницаемость ($\epsilon \approx 7$) примерно в полтора раза больше, чем у двуокиси кремния ($\epsilon = 4,5$). Это приводит к увеличению удельной емкости C_0 , а значит к уменьшению соответствующих слагаемых порогового напряжения. Нитрид кремния в качестве подзатворного диэлектрика обеспечивает также дополнительные преимущества: меньшие шумы, большую временную стабильность ВАХ и повышенную радиационную стойкость МДП-транзистора.

Можно вместо пластин кремния с традиционной кристаллографической ориентацией (111) использовать пластины с ориентацией (100). При этом увеличивается плотность поверхностных состояний (рис. 2.5), а вместе с нею и заряд захватываемых ими электронов. Соответственно возрастает отрицательное слагаемое Q_{0S}/C_0 в формуле (4.3а), а алгебраическая сумма обоих слагаемых, т.е. напряжение U_{0F} , уменьшается.

Обратное влияние оказывает введение в тонкий окисел акцепторных атомов: они захватывают из приповерхностного слоя кремния часть электронов, порожденных донорными примесями, которые всегда присутствуют в окисле (см. с. 95-96). В результате заряд Q_{0s} уменьшается. Введение акцепторов в окисел можно осуществлять с помощью ионной имплантации.

Сочетая перечисленные методы, можно обеспечить пороговые напряжения практически любой сколь угодно малой величины. Следует, однако, иметь в виду, что слишком малые значения порогового напряжения (0,5–1 В и менее) в большинстве случаев неприемлемы по схемотехническим соображениям (малая помехоустойчивость).

МНОП-транзистор. Особое место среди МДП-транзисторов занимает так называемый *МНОП-транзистор*, у которого диэлектрик имеет структуру «сэндвича», состоящего из слоев нитрида и окисла кремния (рис. 7.33, а). Слой окисла получается путем термического окисления и имеет толщину 2–5 нм, а слой нитрида — путем реактивного напыления и имеет толщину 0,05–0,1 мкм, достаточную для того, чтобы пробивное напряжение превышало 50–70 В.

Главная особенность МНОП-транзистора состоит в том, что его пороговое напряжение можно менять, подавая на затвор короткие (100 мкс) импульсы напряжения разной полярности, с большой амплитудой (30–50 В). Так, при подаче импульса + 30 В

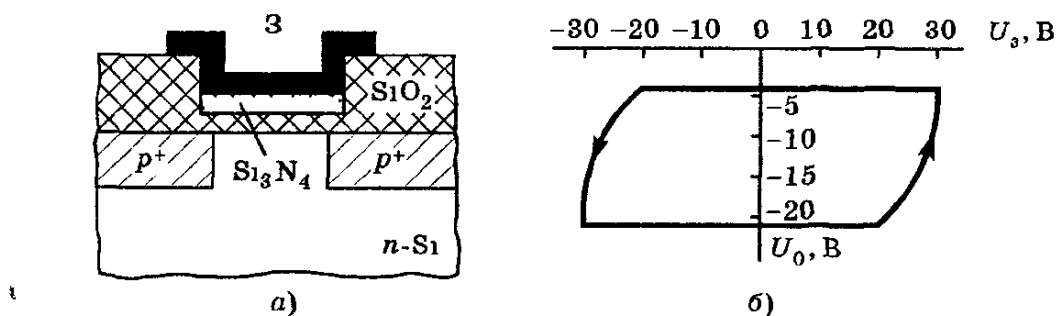


Рис. 7.33. МОП-транзистор с индуцированным p -каналом: а — структура; б — зависимость порогового напряжения от напряжения затвора

устанавливается пороговое напряжение $U_0 = -4$ В (рис. 7.33, б). Это значение сохраняется при дальнейшем использовании транзистора в режиме малых сигналов ($U_3 \leq \pm 10$ В); в таком режиме МНОП-транзистор ведет себя как обычный МДП-транзистор с индуцированным p -каналом. Если теперь подать импульс -30 В, то пороговое напряжение делается равным $U_0 = -20$ В и, следовательно, сигналы $U_3 \leq \pm 10$ В не смогут вывести транзистор из запертого состояния. Как видим, благодаря гистерезисной зависимости $U_0(U_3)$ МНОП-транзистор можно с помощью больших управляющих импульсов переводить из рабочего в запертое состояние и обратно. Эта возможность используется в интегральных запоминающих устройствах.

В основе работы МНОП-транзистора лежит накопление заряда на границе нитридного и оксидного слоев. Это накопление есть результат неодинаковых токов проводимости в том и другом слоях. Процесс накопления описывается элементарным выражением

$$dQ/dt = I_{SiO_2} - I_{Si_3N_4},$$

где оба тока зависят от напряжения на затворе и меняются в процессе накопления заряда. При большом отрицательном напряжении на границе накапливается положительный заряд. Это равносильно введению доноров в диэлектрик и сопровождается увеличением отрицательного порогового напряжения. При большом положительном напряжении U_3 на границе накапливается отрицательный заряд. Это приводит к уменьшению отрицательного порогового напряжения.

При малых напряжениях U_3 токи в диэлектрических слоях уменьшаются на 10–15 порядков (!), так что накопленный за-

ряд сохраняется в течение тысяч часов. Вместе с ним сохраняется и пороговое напряжение.

Смешанные монокристаллические ИС на МОП и биполярных структурах. Биполярные структуры обеспечивают высокоточное преобразование аналоговых величин и обладают большими управляющими токами. КМОП-схемы имеют большую степень интеграции, малую потребляемую мощность и эффективно используются в запоминающих устройствах. В настоящее время активно развивается технология, позволяющая интегрально объединить биполярные и КМОП-схемы в одном кристалле и таким образом существенно расширить функциональные возможности ИС, БИС и особенно СБИС. На рис. 7.34 приведен пример интеграции И²Л-структур с КМОП-структурами с биполярными *p*-карманами. Аналогичное совмещение возможно в случае КМОП-структур с биполярными *n*-карманами.

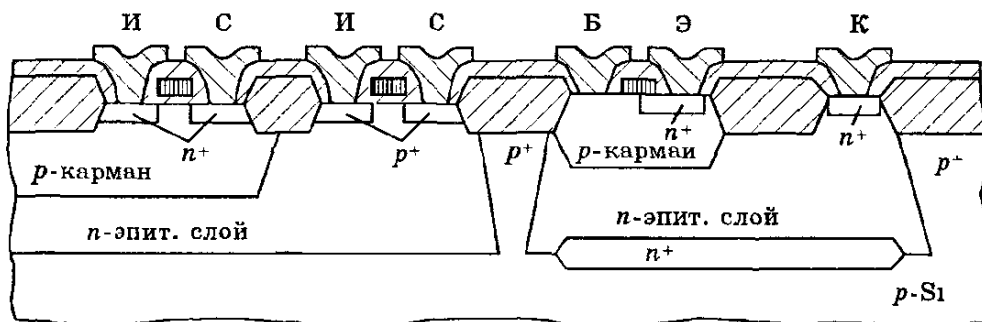


Рис. 7.34. КМОП-структура с *p*-карманами и кремниевыми затворами

7.9. Полупроводниковые резисторы

Первоначально в полупроводниковых ИС применялись только *диффузионные резисторы* (ДР), основу которых составлял один из диффузионных слоев, расположенных в изолированном кармане. В настоящее время большое распространение получили также *ионно-имплантированные резисторы*.

Диффузионные резисторы. Для диффузионных резисторов чаще всего используется полоска базового слоя с двумя омическими контактами (рис. 7.35, а). Для такой полосковой конфигурации сопротивление ДР согласно (7.1) записывается в виде

$$R = R_s (a/b), \quad (7.5a)$$

где R_s — удельное сопротивление слоя (см. с. 229-230), а размеры a и b показаны на рис. 7.35.

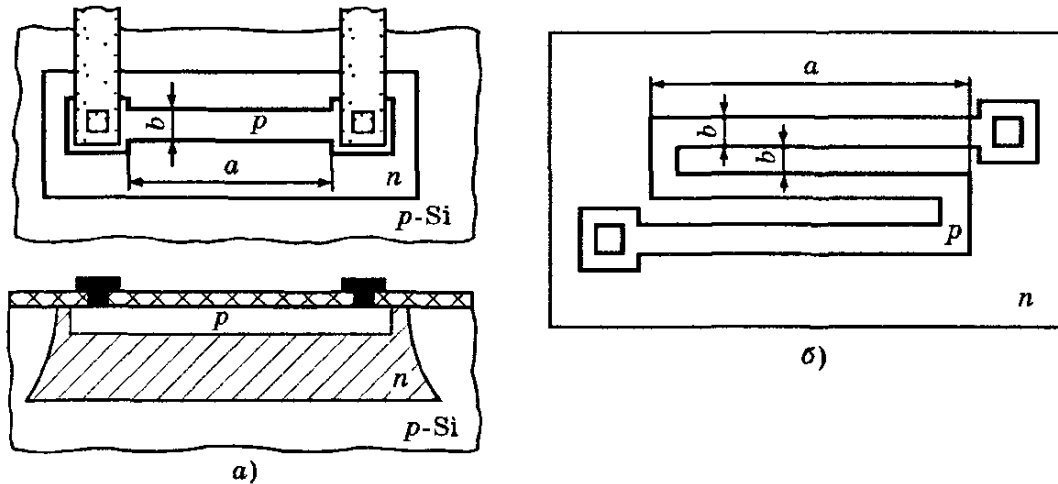


Рис. 7.35. Диффузионный резистор с полосковой (а) и с зигзагообразной конфигурацией (б)

И длина, и ширина полоскового ДР ограничены. Длина a не может превышать размеров кристалла. Ширина b ограничена возможностями фотолитографии, боковой диффузией, а также допустимым разбросом (10–20%).

Подставляя в (7.5а) значения $R_s = 200 \text{ Ом}/\square$ и $a/b = 100$, получаем типичное значение максимального сопротивления $R_{\text{макс}} = 20 \text{ кОм}$. Это значение можно повысить в 2-3 раза, используя не полосковую, а зигзагообразную конфигурацию ДР (рис. 7.35, б). В этом случае сопротивление записывается в более общем виде

$$R = R_s \left(\frac{\sum a_i}{b} + n + 1,3 \right). \quad (7.56)$$

Здесь n — количество «петель» (на рис. 7.35, б $n = 2$), а слагаемое 1,3 учитывает неоднородность ДР в районе омических контактов.

Количество «петель» в конечном счете ограничено площадью, отводимой под ДР. Обычно $n \leq 3$, в противном случае площадь резистора может достигать 15–20 % площади всего кристалла. Максимальное сопротивление при $n = 3$ не превышает 50–60 кОм.

Температурный коэффициент сопротивления ДР, выполненного на основе базового слоя, составляет $0,15-0,30 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$, в зависимости от значения R_s . Разброс сопротивлений относительно расчетного номинала составляет $\pm (15-20) \text{ } \%$. При этом сопротивления резисторов, расположенных на одном кристалле, меняются в одну и ту же сторону. Поэтому отношение сопротивлений сохраняется с гораздо меньшим допуском ($\pm 3 \text{ } \%$ и менее), а температурный коэффициент для отношения сопротивлений не превышает $\pm 0,01 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$. Эта особенность ДР играет важную роль и широко используется при разработке ИС.

Если необходимые номиналы сопротивлений превышают $50-60 \text{ кОм}$, можно использовать так называемые *пинч-резисторы*. Структура пинч-резистора показана на рис. 7.36. По сравнению с простейшим ДР пинч-резистор имеет меньшую площадь сечения и большее удельное сопротивление (так как используется донная, т.е. слабо легированная часть p -слоя). Поэтому у пинч-резисторов удельное сопротивление слоя обычно составляет $2-5 \text{ кОм}/\square$ и более, в зависимости от толщины. При таком значении R_s максимальное сопротивление может достигать значений $200-300 \text{ кОм}$ даже при простейшей полосковой конфигурации.

Недостатками пинч-резисторов являются: большой разброс номиналов (до $50 \text{ } \%$) из-за сильного влияния изменения толщины p -слоя, большой температурный коэффициент сопротивления ($0,3-0,5 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$) из-за меньшей степени легирования донной части p -слоя, нелинейность вольт-амперной характеристики при

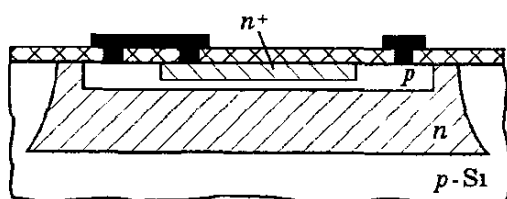
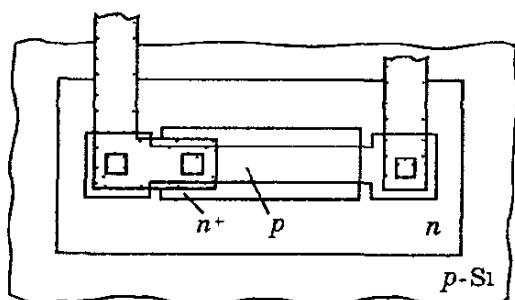


Рис. 7.36. Пинч-резистор

Рис. 7.37. Туннельное пересечение

напряжениях более 1–1,5 В. Последняя особенность вытекает из аналогии между структурами пинч-резистора и полевого транзистора (см. рис. 7.26, б). ВАХ пинч-резистора совпадает с ВАХ полевого транзистора (рис. 4.14, а), если напряжение на затворе последнего положить равным нулю (поскольку у пинч-резистора слои n^+ и p соединены друг с другом металлизацией). Пробивное напряжение пинч-резисторов определяется пробивным напряжением эмиттерного перехода (обычно 5–7 В).

Если необходимые номиналы сопротивлений составляют 100 Ом и менее, то использование базового слоя в ДР нецелесообразно, так как согласно (7.5а) ширина резистора должна быть меньше его длины, что конструктивно трудно осуществить. Для получения ДР с малыми номиналами сопротивлений используют низкоомный эмиттерный слой. При значениях $R_s = 5\text{--}15 \text{ Ом}/\square$, свойственных этому слою (см. табл. 7.1), удастся получить минимальные сопротивления 3–5 Ом с температурным коэффициентом 0,01–0,02 %/°С.

Используя эмиттерный n^+ -слой, можно решить еще одну задачу, возникающую при конструировании ИС: осуществить так называемые «*туннельные*» пересечения (рис. 7.37). Речь идет о возможности изоляции двух взаимно перпендикулярных полосок металлизации, одна из которых (1) идет полностью по защитному окислу, а вторая (2) частично расположена под первой в виде низкоомного n^+ -участка — «*туннеля*». Пример «*туннельного*» пересечения можно видеть на рис. 7.13, б, где в качестве «*туннеля*» используется участок коллекторного n^+ -слоя. «*Туннельное*» пересечение не является универсальным решением, потому что n^+ -участок имеет все же заметное сопротивление (3–5 Ом). Поэтому, в частности, «*туннельные*» пересечения *неприемлемы в цепях питания*, где протекают достаточно большие токи.

Ионно-легированные резисторы. За последнее время все большее распространение получают *ионно легированные резисторы*, которые в отличие от ДР получаются не диффузией, а локальной ионной имплантацией примеси (см. разд. 6.5).

Структура ионно-легированного резистора такая же, как ДР (рис. 7.38), но глубина имплантированного p -слоя значительно меньше глубины базового слоя и составляет всего 0,2–0,3 мкм. Кроме того, ионная имплантация позволяет обеспечить сколь угодно малую концентрацию примеси в слое. Оба фактора способствуют получению весьма высоких удельных сопротивлений слоя — до 10–20 кОм/ \square . При этом номиналы сопротивлений

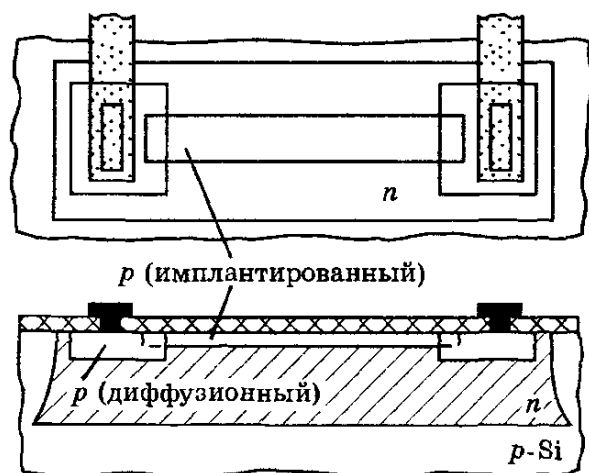


Рис. 7.38. Ионно-легированный резистор

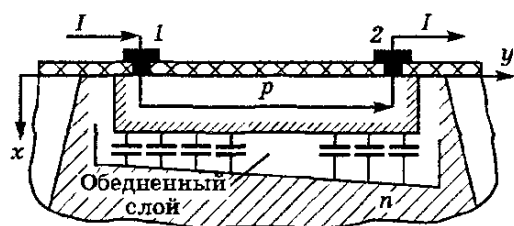
могут составлять сотни килоом. ТКС меньше, чем у ДР, и лежит в пределах $3-5\%/^{\circ}\text{C}$, а разброс сопротивлений не превышает $\pm (5-10)\%$.

Поскольку толщина имплантированного слоя мала, к нему трудно осуществить омические контакты. Поэтому по краям резистивного слоя на этапе базовой диффузии осуществляют узкие диффузионные

p -слои, к которым омический контакт осуществляется обычным способом.

Эквивалентные схемы. Характерной особенностью любого интегрального резистора является наличие у него паразитной емкости относительно подложки или изолирующего кармана. В простейшем ДР (рис. 7.35) такой паразитной емкостью является барьерная емкость перехода между рабочим p -слоем и эпитаксиальным n -слоем кармана¹.

Строго говоря, совокупность резистора и паразитной емкости представляет собой распределенную RC -линию (рис. 7.39).

Рис. 7.39. Физическая модель интегрального резистора в виде распределенной RC -линии

Однако для приближенных расчетов удобнее пользоваться эквивалентными схемами с сосредоточенными постоянными: П-образной (рис. 7.40, а) или Т-образной (рис. 7.40, б). На этих схемах R — сопротивление резистора, \bar{C} — усредненная емкость перехода.

¹ На n -слой задается максимальный положительный потенциал от источника питания, поэтому все участки p - n -перехода находятся под обратным напряжением.

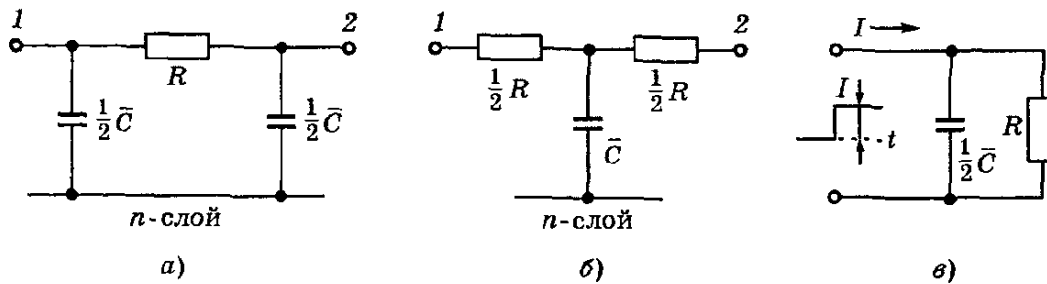


Рис. 7.40. Эквивалентные схемы интегрального резистора:
а) П-образная; б) Т-образная; в) П-образная при $U_z = \text{const}$

Необходимость усреднения емкости объясняется следующим. При протекании тока через резистор потенциал p -слоя оказывается разным в разных точках. Поскольку потенциал n -слоя постоянный, напряжение на p - n -переходе будет меняться вдоль оси y , а следовательно, будет меняться и барьерная емкость.

В типичном случае, когда один из зажимов резистора (например, 2) находится под постоянным потенциалом, а через другой зажим (1) задается ступенька тока, эквивалентная П-образная схема сводится к простейшей RC -цепочке, показанной на рис. 7.40, в. Сущность переходного процесса состоит в плавном изменении напряжения на резисторе при скачкообразном изменении тока. Постоянная времени, определяющая длительность переходного процесса, имеет вид

$$\tau = \frac{1}{2} R \bar{C}, \quad (7.6a)$$

а соответствующая граничная частота

$$f_{\text{гр}} = 1/(2\pi\tau) = 1/(\pi R \bar{C}). \quad (7.6b)$$

Для значений $R = 10$ кОм и $\bar{C} = 1,3$ пФ получаем: $\tau = 6,5$ нс и $f_{\text{гр}} \approx 25$ МГц. Это значит, что в данном примере резистор выполняет свою функцию (т.е. имеет чисто активное сопротивление) только до частот 10–15 МГц. При более высоких частотах его сопротивление становится комплексным и работа схемы, в которой он используется, может существенно измениться.

Рассмотренные эквивалентные схемы действительны и для других вариантов резисторов: когда рабочими являются эмиттерный или коллекторный слой, а также при диэлектрической изоляции элементов. Однако количественные результаты оказываются разными. Например, при использовании диэлектрической изоляции постоянная времени может быть в несколько раз меньше.

7.10. Полупроводниковые конденсаторы

В биполярных полупроводниковых ИС роль конденсаторов играют обратносмещенные p - n -переходы. У таких конденсаторов хотя бы один из слоев является диффузионным, поэтому их называют *диффузионными конденсаторами* (ДК).

Диффузионный конденсатор. Типичная структура ДК, в котором используется переход коллектор-база, показана на рис. 7.41. Емкость такого конденсатора в общем случае имеет вид:

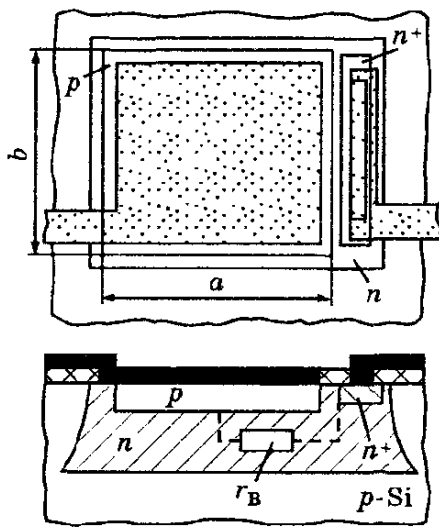


Рис. 7.41. Диффузионный конденсатор

$$C = C_{01}(ab) + C_{02}2(a + b)d, \quad (7.7a)$$

где C_{01} и C_{02} — удельные емкости донной и боковой частей p - n -перехода. Соотношение слагаемых в правой части (7.7a) зависит от отношения a/b , т.е. от конфигурации ДК. Оптимальной конфигурацией является квадрат ($a = b$): при этом «боковая» составляющая емкости оказывается в десятки раз меньше донной. Пренебрегая боковой составляющей, т.е. вторым слагаемым в (7.7a), и полагая $a = b$, получаем:

$$C = C_{01}(ab) = C_{01}a^2. \quad (7.76)$$

Например, если $C_{01} = 150$ пФ/мм² и $C = 100$ пФ, то $a \approx 0,8$ мм. Как видим, размеры конденсатора получились сравнимыми с размерами кристалла.

Для того чтобы суммарная площадь всех конденсаторов, входящих в состав ИС, не превышала 20–25 % площади кристалла, необходимо ограничить суммарную емкость конденсаторов величиной

$$C_{\text{макс}} = (0,2 - 0,25)C_{01}S_{\text{кр}},$$

где $S_{\text{кр}}$ — площадь кристалла. Если $S_{\text{кр}} = 2-9$ мм² и $C_{01} = 150$ пФ/мм², то $C_{\text{макс}} = 50-300$ пФ.

Используя не коллекторный, а эмиттерный p - n -переход, можно обеспечить в 5–7 раз большие значения максимальной емкости

сти. Это объясняется большей удельной емкостью эмиттерного перехода, поскольку он образован более низкоомными слоями.

Основные параметры ДК, включая технологический разброс номиналов δ , температурный коэффициент емкости ТКЕ¹, пробивное напряжение $U_{пр}$ и добротность Q , приведены в табл. 7.4 для обоих вариантов ДК — с использованием коллекторного и эмиттерного переходов. Как видим, основное преимущество при использовании эмиттерного перехода — большие значения максимальной емкости. По пробивному напряжению и добротности (см. ниже) этот вариант уступает варианту с использованием коллекторного перехода.

Таблица 7.4. Типичные параметры интегральных конденсаторов

Тип конденсатора	C_0 , пФ/мм ²	$C_{\text{макс}}$, пФ	δ , %	ТКЕ, %/°C	$U_{пр}$, В	Q (1 МГц)
Переход БК	150	300	± 20	– 0,1	50	50–100
Переход БЭ	1000	1200	± 20	– 0,1	7	1–20
МОП-структура	300	500	± 25	0,02	20	200

Необходимым условием для нормальной работы ДК является обратное смещение p – n -перехода. Следовательно, *напряжение на ДК должно иметь строго определенную полярность.*

Емкость ДК согласно (3.25) зависит от напряжения. Это значит, что ДК, вообще говоря, является *нелинейным конденсатором* с вольт-фарадной характеристикой $C(U)$. Нелинейные конденсаторы находят применение в специальных узлах радиотехнической аппаратуры: параметрических усилителях, умножителях частоты и др. В таких узлах нелинейность ДК оказывается полезной. Однако чаще требуются *линейные* конденсаторы с постоянной емкостью, которые способны пропускать без искажения переменные сигналы и «блокировать» (т.е. не пропускать) постоянные составляющие сигналов. ДК успешно выполняет такую функцию при наличии постоянного смещения E , превышающего амплитуду переменного сигнала.

¹ Зависимость емкости ДК от температуры обусловлена функцией $\Delta\varphi_0(T)$, которая входит в выражение (3.25).

Пусть, например, полное обратное напряжение на ДК имеет вид

$$U = E + U_m \sin \omega t,$$

где $E = \text{const}$ и $U_m \ll E$. В этом случае напряжение U меняется в пределах от $E + U_m$ до $E - U_m$, т.е. весьма незначительно. Соответственно емкость ДК остается практически постоянной и равной значению $C(E)$. Переменная составляющая тока будет определяться реактивной проводимостью этой емкости, как в «обычном» конденсаторе:

$$I_m = Y_C U_m,$$

где $Y_C = \omega C(E)$.

Важной особенностью ДК является возможность менять значение емкости, меняя смещение E . Следовательно, ДК можно использовать не только в качестве «обычного» конденсатора с постоянной емкостью, но и в качестве *конденсатора с электрически управляемой емкостью* или, как говорят, *конденсатора переменной емкости*. Такие конденсаторы необходимы, например, для настройки колебательных контуров в радиотехнике. Электрическая регулировка емкости, разумеется, предпочтительнее обычной механической. Однако диапазон электрической регулировки ограничен: меняя смещение E от 1 до 10 В, можно согласно (3.25) изменить емкость ДК всего в 2–2,5 раза.

Добротность. Важным параметром всякого конденсатора, в том числе ДК, является высокочастотная добротность Q_v . Она характеризует потери мощности при протекании емкостного тока и определяется как отношение реактивного сопротивления конденсатора к активному:

$$Q = \frac{X_C}{r_v} = \frac{1}{\omega C r_v}, \quad (7.8a)$$

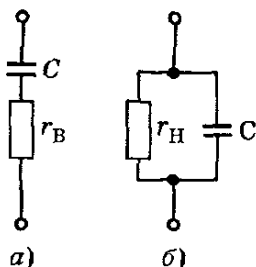


Рис. 7.42. Физические модели диффузионных конденсаторов на ВЧ (а) и на НЧ (б)

где r_v — сопротивление потерь на высоких частотах (рис. 7.42, а). Чем меньше активная мощность по сравнению с реактивной, тем больше добротность. Например, если $C = 100$ пФ, $r_v = 20$ Ом и $f = 1$ МГц, то $Q_v \approx 75$. У идеального конденсатора $r_v = 0$ и $Q_v = \infty$.

Главным источником потерь в ДК являются горизонтальные сопротивления нижних слоев, входящих в состав p - n -переходов. Для перехода БК — это сопротивление коллекторного слоя (рис. 7.41), а для перехода БЭ — базового. При наличии скрытого n^+ -слоя сопротивление r_v для перехода БК значительно меньше, чем при использовании коллекторного (табл. 7.4).

Из выражения (7.8а) очевидно, что добротность возрастает с уменьшением частоты. Однако при достаточно низких частотах становится существенным другой тип потерь, которым на высоких частотах можно пренебречь. Речь идет о сопротивлении потерь r_n , обусловленном обратным током p - n -перехода, т.е. о сопротивлении утечки. Это сопротивление шунтирует емкость ДК (рис. 7.42, б). Поэтому добротность на низких частотах определяют как отношение реактивной проводимости конденсатора к активной:

$$Q_n = \frac{\omega C}{1/r_n} = \omega C r_n, \quad (7.8б)$$

где r_n — сопротивление потерь (утечки) на низких частотах.

Поскольку сопротивление r_n определяется обратным током перехода, оно обратно пропорционально площади перехода. Тем самым произведение $C r_n$, а значит, и низкочастотная добротность не зависят от площади. Типичное значение Q_n на частоте 500 Гц составляет 50–100.

В том диапазоне частот, в котором значения обеих добротностей Q_v и Q_n превышают 100–200, ДК представляет собой почти идеальную емкость, т.е. на эквивалентных схемах (рис. 7.42) можно не учитывать сопротивление потерь. Из приведенных примеров следует, что ДК является почти идеальным в диапазоне частот 500 Гц – 500 кГц.

Эквивалентная схема. Специфической особенностью ДК как элемента ИС является наличие у него паразитной емкости. При использовании перехода БК — это барьерная емкость между коллекторным слоем и подложкой $C_{\text{пар}} = C_{\text{кп}}$ (см. рис. 7.14). Наличие паразитной емкости приводит к неполной передаче напряжения через ДК в нагрузку.

Действительно, из эквивалентной схемы на рис. 7.43 видно, что ДК вместе с паразитной емкостью образует емкостной дели-

тель напряжения. Поэтому на выход проходит только часть входного напряжения $U_{\text{вх}}$:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} \frac{X_{\text{пар}}}{X_{\text{пар}} + X_C},$$

где $X_{\text{пар}}$ и X_C — реактивные сопротивления паразитной и рабочей емкостей $C_{\text{пар}}$ и C . Подставляя $X_{\text{пар}} = 1/\omega C_{\text{пар}}$ и $X_C = 1/\omega C$, запишем коэффициент передачи напряжения в виде

$$U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}} = C/(C + C_{\text{пар}}). \quad (7.9)$$

Коэффициент передачи будет близок к единице, если выполняется неравенство $C_{\text{пар}} < C$. Однако площади обоих конденсаторов (рабочего и паразитного) почти одинаковы (рис. 7.43).

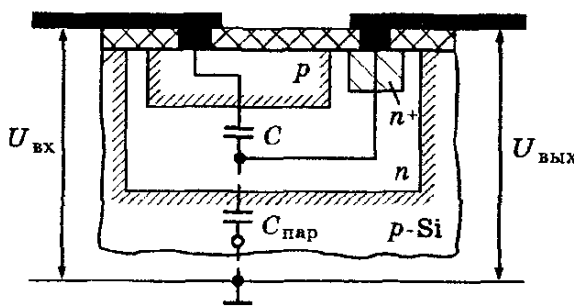


Рис. 7.43. Роль паразитной емкости при передаче переменного напряжения через диффузионный конденсатор

Более того, площадь паразитного конденсатора $C_{\text{кл}}$ даже несколько больше площади рабочего. Поэтому емкости $C_{\text{пар}}$ и C различаются только благодаря различию удельных емкостей переходов БК и КП и различию напряжений на этих переходах. Расчеты показывают, что в реальных структурах ИС паразитную емкость $C_{\text{пар}}$

не удастся сделать меньше $(0,15-0,2)C$. Соответственно коэффициент передачи не превышает $0,8-0,9$. Аналогичные выводы и аналогичная эквивалентная схема действительны и для ДК, использующего переход БЭ.

В последнее время в качестве накопительных конденсаторов в элементах памяти широкое применение находят структуры на основе U-канавок (рис. 7.11). По существу, использование таких конденсаторов эквивалентно «вертикальному» интегрированию структур, когда область накопления заряда располагается не на поверхности кристалла, а в его объеме. Это позволяет резко увеличить степень интеграции.

МОП-конденсатор. Интегральным конденсатором, принципиально отличным от ДК, является МОП-конденсатор. Его типичная структура показана на рис. 7.44. Здесь над эмиттерным

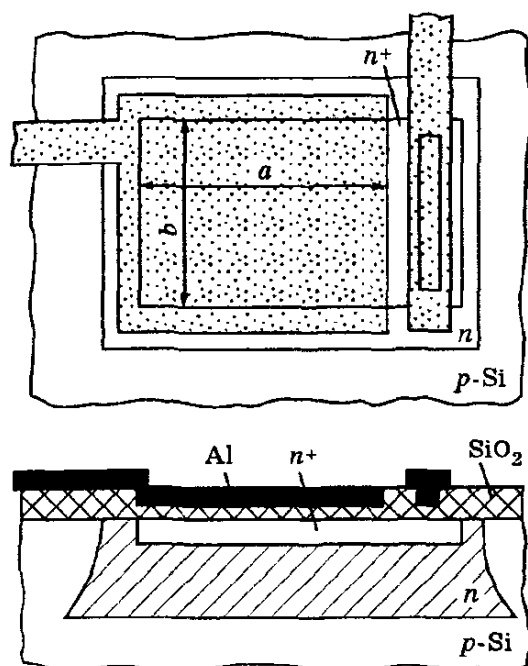


Рис. 7.44. МОП-конденсатор с диэлектриком

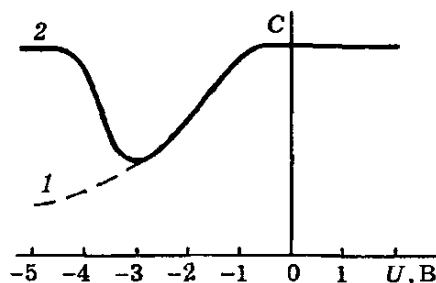


Рис. 7.45. Вольт-фарадная характеристика МОП-конденсатора: 1 — без образования инверсионного слоя; 2 — при образовании инверсионного слоя

n^+ -слоем с помощью дополнительных технологических процессов выращен слой тонкого (0,08–0,12 мкм) окисла. В дальнейшем, при осуществлении металлической разводки, на этот слой напыляется алюминиевая верхняя обкладка конденсатора. Нижней обкладкой служит эмиттерный n^+ -слой.

Удельная емкость МОП-конденсатора выражается формулой (7.4) и обычно составляет около 350 пФ/мм². Основные параметры МОП-конденсаторов приведены в табл. 7.4.

Важным преимуществом МОП-конденсаторов по сравнению с ДК является то, что они работают при любой полярности напряжения, т.е. аналогичны «обычному» конденсатору. Однако МОП-конденсатор, как и ДК, тоже нелинейный; пример вольт-фарадной характеристики (которую обычно называют $C-U$ характеристикой) показан на рис. 7.45.

Зависимость $C(U)$ обусловлена тем, что емкость МОП-конденсатора, вообще говоря, представляет собой последовательное соединение двух емкостей: емкости диэлектрика (о которой говорилось выше) и емкости обедненного слоя, который может образоваться в приповерхностной области полупроводника. В конденсаторе, показанном на рис. 7.44, при нулевом и положительном напряжениях на металлической обкладке приповерхностная область оказывается обогащенной электронами, т.е. обедненный слой отсутствует. Соответственно емкость конденсатора определяется диэлектриком и имеет максимальное значение.

При отрицательных напряжениях постепенно образуется обедненный слой. Его глубина растет с ростом напряжения, а емкость соответственно уменьшается. Это приводит к уменьшению результирующей емкости МОП-конденсатора (кривая 1). При достаточно большом отрицательном напряжении вблизи поверхности образуется инверсионный дырочный слой, т.е. проводящий канал. Тогда емкость обедненного слоя оказывается «отключенной» от емкости диэлектрика, и результирующая емкость МОП-конденсатора снова приближается к начальному значению (кривая 2).

Для того чтобы влияние обедненного слоя было незначительным, необходимо, чтобы емкость этого слоя была большой по сравнению с емкостью диэлектрика. Такое требование удовлетворяется при большой концентрации примеси в полупроводнике. Именно поэтому в качестве полупроводниковой «обкладки» МОП-конденсатора используется n^+ -слой. Одновременно, благодаря малому сопротивлению этого слоя, обеспечивается высокая добротность конденсатора.

Паразитная емкость МОП-конденсаторов учитывается с помощью уже известной эквивалентной схемы (рис. 7.43), где под емкостью $C_{\text{пар}}$ следует понимать емкость между n -карманом и p -подложкой. Коэффициент передачи (7.9) в данном случае составляет не менее 0,9–0,95.

Важной особенностью МОП-конденсаторов является зависимость их емкости от частоты. Такая зависимость обусловлена влиянием быстрых поверхностных состояний на границе полупроводник—диэлектрик. Перезаряд этих состояний является

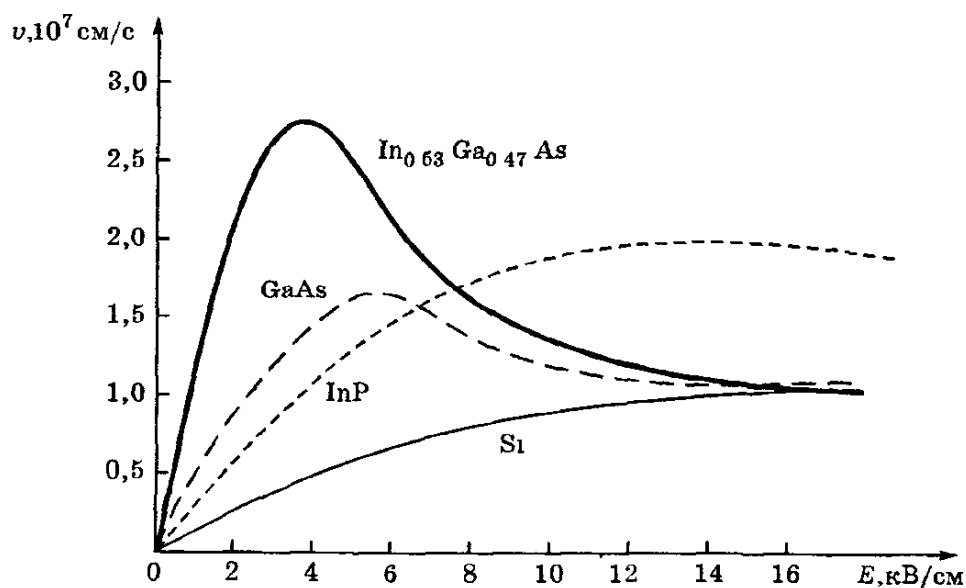


Рис. 7.46. Зависимость дрейфовой скорости электронов проводимости от напряженности электрического поля

инерционным процессом и происходит с постоянной времени порядка 0,1 мкс. Поэтому с ростом частоты емкость МОП-конденсатора уменьшается и достигает установившегося значения лишь при частотах более нескольких мегагерц.

В заключение заметим, что в МОП-транзисторных ИС, в отличие от биполярных, изготовление МОП-конденсаторов не связано с дополнительными технологическими процессами: тонкий окисел для конденсаторов получается на том же этапе, что и тонкий окисел под затвором, а низкоомный полупроводниковый слой — на этапе легирования истока и стока. Изолирующие карманы в МОП-технологии, как известно, отсутствуют.

7.11. Элементы ИС на полупроводниках группы $A^{III}B^V$

Полупроводники группы $A^{III}B^V$ как материалы для ИС. Сравнительный анализ свойств полупроводников группы $A^{III}B^V$ и кремния позволяет выявить три основных различия при создании на их основе активных элементов ИС:

1. Сильно отличаются зависимости дрейфовой скорости электронов проводимости, особенно при низких полях.

2. Из полупроводников группы $A^{III}B^V$ легко изготовить полуизолирующую подложку.

3. Эти полупроводники (арсенид галлия, фосфид индия, арсенид индия и др.) образуют твердые растворы не только двух-, но и трех- и четырехкомпонентные с широким диапазоном изменения их электрофизических свойств.

На рис. 7.46 приведена зависимость дрейфовой скорости электронов проводимости от напряженности электрического поля для двух- и трехкомпонентных полупроводников $A^{III}B^V$ и кремния. Причиной того, что зависимость скорости дрейфа электронов проводимости от поля в GaAs и InP имеет не монотонный, как у кремния, а экстремальный характер, кроется в различии зонной структуры этих материалов. Зонная структура GaAs приведена на рис. 7.47.

Абсолютный минимум зоны проводимости GaAs находится в т. Г. Во втором минимуме в т. Х энергия на 0,36 эВ выше. Эффективная масса электронов проводимости в т. Г мала ($0,068m$, где m — масса покоя свободных электронов в вакууме) и поэтому дрейфовая подвижность электронов проводимости велика.

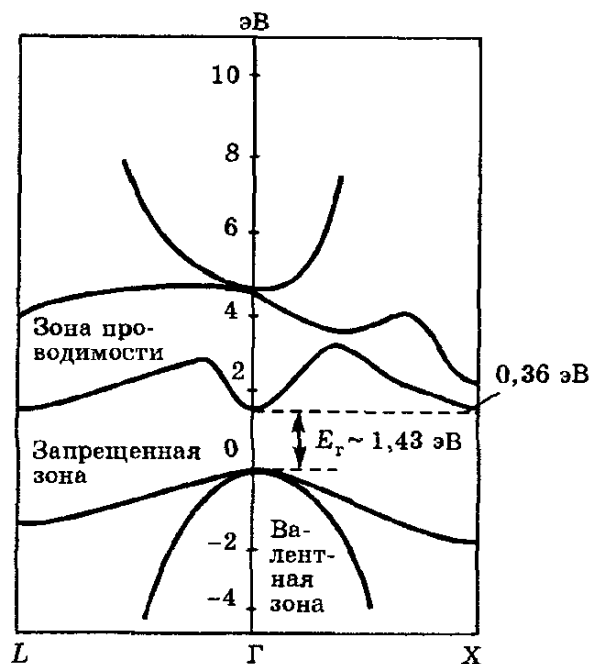


Рис. 7.47. Зонная структура GaAs

Как видно из рис. 7.47, в т. X имеет место второй минимум энергии. Однако здесь эффективная масса электронов значительно выше ($1,2 m$), и дрейфовая скорость электронов проводимости уменьшается. Этим объясняется участок с отрицательной дифференциальной проводимостью на рис. 7.46. Этот эффект получил название эффекта Ганна и используется для генерации высокочастотных сигналов. В ИС на GaAs этот эффект нежелателен и для его подавления необходимо выполнить условие

$$\frac{\Delta E}{E_{\Gamma}} > 1. \quad (7.10)$$

Здесь ΔE — энергетический зазор между т. Γ и т. X, а E_{Γ} — ширина запрещенной зоны в т. Γ зоны проводимости.

Элементы ИС на полупроводниках группы $A^{III}B^V$. Элементы ИС на $A^{III}B^V$ можно грубо разделить на следующие группы: полевые транзисторы с затвором Шоттки, гетеробиполярные транзисторы и МДП-транзисторы.

Несмотря на то, что технологию изготовления материалов $A^{III}B^V$ и приборов на их основе по целому ряду причин нельзя считать столь же отработанной, как для кремниевых структур, исследования и разработки уже продемонстрировали возможности создания сверхбыстродействующих цифровых схем, конкурирующих с кремниевыми. Можно предположить, что главную роль в конкурентной борьбе будут играть полевые транзисторы с затвором Шоттки, т.к. они просты в изготовлении и потребляют незначительную энергию.

Структура и принцип работы полевого транзистора с затвором Шоттки (ЗШП-транзистора). Структура GaAs—ЗШП-транзистора изображена на рис. 7.48, а.

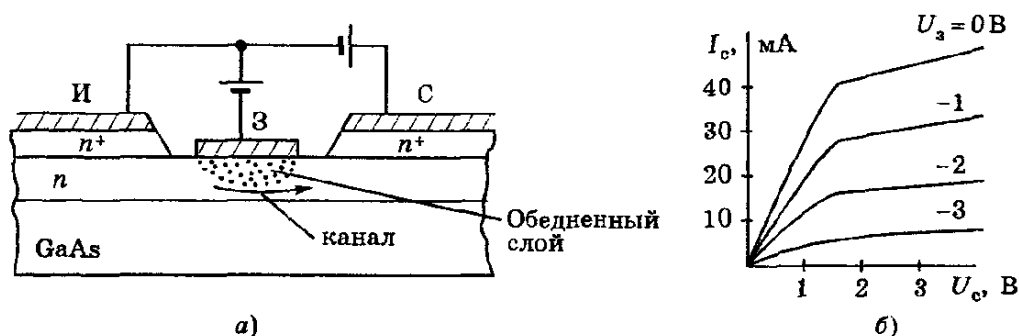


Рис. 7.48. Структура (а) и статические ВАХ (б) ЗШП-транзистора

На полуизолирующей пластине GaAs с высоким удельным сопротивлением (порядка 10^8 Ом·см) формируют тонкий электропроводный слой n -типа, который называют активным слоем. В активном слое расположены области истока, затвора и стока. Для получения хороших омических контактов на активном слое под электродами истока и стока располагаются n^+ -области. Электрод затвора образует с активным слоем контакт Шоттки (см. раздел 3.3). Активный слой обычно формируется ионной имплантацией, например кремния. Толщина этого слоя 0,1–0,3 мкм, а концентрация примеси около $3 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$. Чем короче длина затвора, тем выше быстродействие прибора, в настоящее время длина затвора составляет 0,2–1,0 мкм. Омические электроды изготавливают из сплава Al–Ge–Ni, а электрод затвора — из Al или силицида вольфрама.

Если к стоку приложить положительное напряжение, а к затвору отрицательное, обедненный слой под затвором расширится, а канал между истоком и стоком сузится и ток в цепи от истока к стоку изменится. Поскольку выходной сигнал стока можно регулировать малым входным сигналом затвора, такой прибор можно использовать как усилительный элемент. На рис. 7.48, б приведены статические характеристики такого прибора.

Длина канала в ЗШП-транзисторах является важнейшим параметром, определяющим быстродействие элемента. При использовании технологии самосовмещенной ионной имплантации при образовании слоев n^+ -типа оказывается возможным управлять величиной зазора между ними, что обеспечивает снижение последовательного сопротивления исток-сток и позволяет формировать затворы длиной около 0,1 мкм.

Транзисторы с высокой подвижностью электронов. Известны различные варианты конструкции транзисторов с высокой подвижностью электронов (ВПЭТ). Общее представление о структуре ВПЭТ с одним гетеропереходом дает рис. 7.49. Исток, сток и затворный электрод формируются на поверхности GaAs. Повышение подвижности электронов в канале достигается за счет использования гетероперехода GaAs с материалом с большой шириной запрещенной зоны ($\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$) с введенной в него донорной примесью.

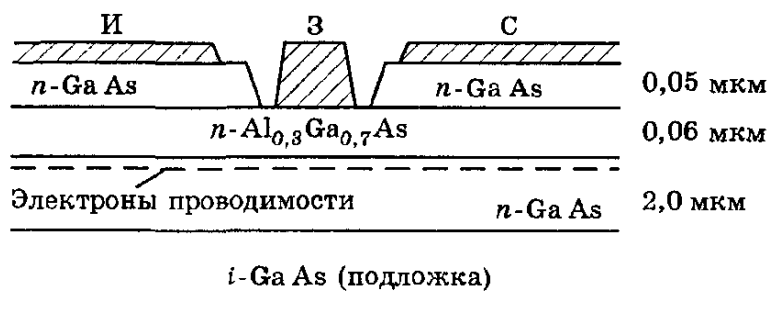


Рис. 7.49. Структура ВПЭТ на GaAs

Создание такой структуры возможно методами либо высококонтролируемого эпитаксиального наращивания слоев $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$, либо методами молекулярно-лучевой эпитаксии. При реализации таких приборов удастся достигнуть значений подвижности электронов до $10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при 77 К и до $2 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при 4,2 К. Для сравнения отметим, что в обычных ЗШП-транзисторах подвижность электронов в слоях n -типа GaAs составляет всего $5 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, т.е. меньше на два порядка.

7.12. Элементы пленочных ИС

Как известно, промышленная технология активных пленочных элементов (диодов и транзисторов) пока не разработана. Поэтому ниже рассматриваются только пассивные элементы: резисторы, конденсаторы и катушки индуктивности. Эти элементы могут изготавливаться как по тонкопленочной, так и по толстопленочной технологии. Конфигурации тонко- и толстопленочных элементов одинаковы, но их конкретные геометрические размеры (при заданных электрических параметрах) могут существенно различаться в связи с использованием совершенно разных материалов.

Пленочные элементы нет необходимости изолировать друг от друга, так как все они выполняются на диэлектрической подложке. Поскольку подложка сравнительно толстая (не менее 500 мкм), а расстояния между элементами сравнительно большие, паразитные емкости практически отсутствуют и их учет на эквивалентных схемах обычно не имеет смысла.

Резисторы. Структура и конфигурации пленочного резистора показаны на рис. 7.50. Как видим, в общем случае конфигурация пленочного резистора такая же, как диффузионного (рис. 7.35), т.е. зигзагообразная. В частности, она может быть полосковой. Поэтому расчет сопротивления можно проводить по формулам (7.5). Удельное сопротивление слоя зависит от толщины слоя и материала. Типичные значения R_s приведены в табл. 7.5. Там же приведены типичные значения других параметров резисторов: максимального и минимального номиналов сопротивления, разброса номиналов (δ), температурного коэффициента (ТКС) и временного дрейфа сопротивления (за 1000 ч при температуре + 70 °С).

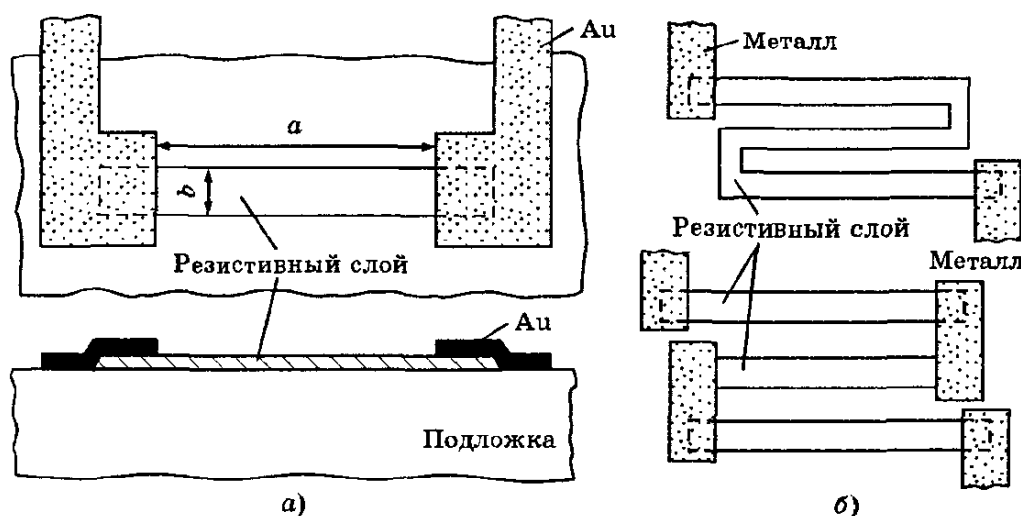


Рис. 7.50. Пленочные резисторы полосковой (а) и зигзагообразной (б) конфигурации

Значение разброса (допуска) δ приведены для двух случаев: когда отсутствует специальная подгонка (юстировка) резисторов после их изготовления (б/подг.) и после такой подгонки (с подг.)¹. Значения ТКС также приведены для двух величин: для

¹ Способы подгонки рассмотрены ниже.

сопротивления отдельного резистора (R) и для отношения сопротивлений двух резисторов (R_1/R_2).

Таблица 7.5. Типичные параметры пленочных резисторов

Тип резистора	R_s , Ом/□	R_{\max} , Ом	R_{\min} , Ом	δ , %		ТКС, $10^{-4}/^{\circ}\text{C}$		$\Delta R(t)$, % (1000 ч, $+70^{\circ}\text{C}$)
				б/подг.	с подг.	R	R_1/R_2	
Тонкопленочный	10–300	10^6	10	± 5	$\pm 0,05$	0,25	$\pm 0,05$	0,005
Толсто-пленочный	$5,0\text{--}10^6$	$5\cdot 10^8$	0,5	± 15	$\pm 0,2$	2	$\pm 0,1$	0,05

Из табл. 7.5 можно сделать следующие общие выводы:

- диапазон сопротивлений пленочных резисторов несравненно шире, чем полупроводниковых (диффузионных и ионно-легированных);
- тонкопленочная технология обеспечивает более высокую прецизионность и стабильность резисторов;
- подгонка обеспечивает существенное уменьшение разброса (допусков) сопротивлений; следовательно, возможность такой подгонки является важным преимуществом пленочных резисторов;
- отношение сопротивлений, как и в случае полупроводниковых ИС, характеризуется меньшим разбросом и меньшим ТКС, чем отдельное сопротивление.

Подгонку резисторов можно осуществлять разными способами. Простейший, исторически первый способ состоит в частичном механическом соскабливании резистивного слоя до того, как поверхность ИС защищается тем или иным покрытием. Более совершенными являются методы частичного удаления слоя с помощью электрической искры, электронного или лазерного луча. Разумеется, все эти способы позволяют только увеличивать сопротивление резистора. Наиболее совершенный и гибкий метод состоит в пропускании через резистор достаточно большого тока. При токовой подгонке одновременно идут два процесса:

окисление поверхности резистивного слоя и упорядочение его мелкозернистой структуры. Первый процесс способствует увеличению, а второй — уменьшению сопротивления. Подбирая силу тока и атмосферу, в которой ведется подгонка, можно обеспечить изменение сопротивления и в ту, и в другую сторону на $\pm 30\%$ с погрешностью (по отношению к желательному номиналу) до долей процента.

Конденсаторы. Структура и конфигурация типичного пленочного конденсатора показаны на рис. 7.51. Удельная емкость конденсатора определяется по формуле (7.4), где толщина диэлектрической пленки d существенно зависит от технологии: для тонких пленок $d = 0,1\text{--}0,2$ мкм, для толстых $d = 10\text{--}20$ мкм. Поэтому при прочих равных условиях удельная емкость толстопленочных конденсаторов меньше, чем тонкопленочных. Однако различие в толщине диэлектрика может компенсироваться благодаря различию диэлектрических проницаемостей материалов.

У тонкопленочных конденсаторов удельная емкость не пропорциональна диэлектрической проницаемости используемого материала, так как учитывается еще его пробивная напряженность. Материал с высоким значением ε может иметь малую пробивную напряженность. Тогда при заданном пробивном напряжении толщину диэлектрического слоя необходимо увеличивать, и выигрыш в удельной емкости оказывается меньше ожидаемого.

При выборе диэлектрика для высокочастотных конденсаторов (как тонко-, так и толстопленочных) приходится дополнительно учитывать потери энергии в диэлектрике¹. Что касается омических потерь в обкладках пленочных конденсаторов, то

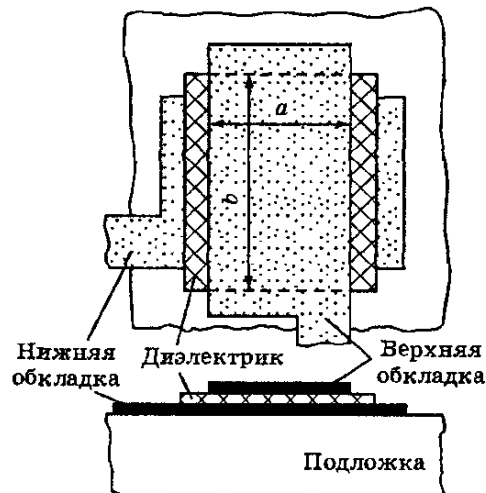


Рис. 7.51. Пленочный конденсатор

¹ Эти потери характеризуют параметром «тангенс дельта» ($\operatorname{tg}\delta$) — тангенсом угла между векторами полного тока и реактивной составляющей тока через конденсатор при заданной частоте. Если потери незначительны, то $\operatorname{tg}\delta \approx \delta \ll 1$.

они гораздо меньше, чем у полупроводниковых конденсаторов, потому что в качестве обкладок используются металлические слои с высокой проводимостью.

В табл. 7.6 приведены типичные параметры пленочных конденсаторов. Для сравнения воспроизведены также параметры близких им по структуре МОП-конденсаторов. Из таблицы можно сделать следующие общие выводы:

- удельные емкости пленочных конденсаторов (при надлежащем выборе диэлектрика) в несколько раз и даже на порядок превышают удельную емкость МОП-конденсаторов и тем более диффузионных конденсаторов;
- максимальные емкости пленочных конденсаторов могут быть на несколько порядков больше, чем емкости полупроводниковых конденсаторов, главным образом благодаря большей площади (поскольку площадь подложек гибридных ИС значительно превышает площадь кристаллов полупроводниковых ИС);
- толстопленочные конденсаторы незначительно уступают тонкопленочным по большинству параметров, за исключением, может быть, температурного коэффициента;
- для высокочастотных тонкопленочных конденсаторов оптимальным диэлектриком является моноксид кремния; близкими к ней параметрами обладает также моноксид германия.

Таблица 7.6. Типичные параметры пленочных конденсаторов

Тип конденсатора		$C_0, \text{ пФ/мм}^2$	$C_{\text{макс}}, \text{ пФ}$ ($S = 25 \text{ мм}^2$)	$\delta, \%$	ТКЕ, $\%/^\circ\text{C}$	$Q (10 \text{ МГц})$
Тонкопленочный	SiO	60	1500	± 15	0,2	200
	Al ₂ O ₃	1500	$4 \cdot 10^4$	± 15	0,03	30
	Ta ₂ O ₅	4000	10^5	± 15	0,02	30
Толстопленочный		—	10^4	± 20	$\pm 0,05 \dots$ $\pm 0,15$	—
МОП		350	200	± 20	0,02	10

Следует заметить, что в последнее время, в связи с наличием миниатюрных дискретных конденсаторов (в том числе с весьма большой емкостью — до нескольких микрофард), наблюдается тенденция к отказу от пленочных конденсаторов и замене их навесными конденсаторами.

Катушки индуктивности. Как уже отмечалось, возможность осуществлять катушки индуктивности методами микроэлектроники является одним из достоинств пленочной технологии. Такие катушки представляют собой плоские спирали, обычно прямоугольной конфигурации (рис. 7.52). Для уменьшения сопротивления в качестве материала используется золото. Ширина металлической полоски составляет 30–50 мкм, просвет между витками 50–100 мкм. При таких геометрических размерах удельная индуктивность лежит в диапазоне 10–20 нГн/мм², т.е. на площади 25 мм² можно получить индуктивность 250–500 нГн.

Добротность катушек индуктивности на высокой частоте определяется выражением

$$Q_v = \omega L / r_v, \quad (7.11)$$

где r_v — сопротивление высокочастотных потерь. Например, на частоте 100 МГц добротность может иметь значение $Q_v = 50$. В отличие от добротности конденсатора [см. (7.8a)] добротность катушки возрастает с увеличением частоты. Поэтому пленочные катушки могут успешно работать в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ), при частотах 3–5 ГГц. При этом число витков составляет 3–5.

В связи с разработкой микроминиатюрных проволочных катушек применение пленочных катушек, особенно на частотах менее 50–100 МГц, ограничивается, и предпочтение, как и в случае конденсаторов, отдается навесным компонентам.

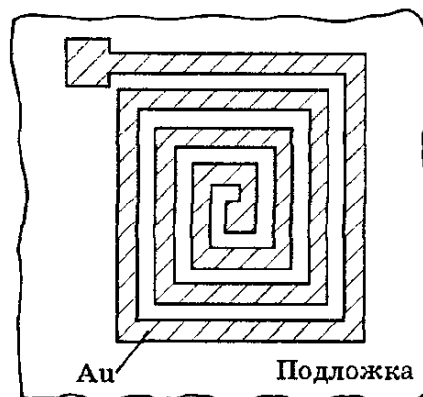


Рис. 7.52. Пленочная катушка индуктивности

Контрольные вопросы

1. Дайте определение элементам интегральных схем.
2. Какие основные методы изоляции элементов вы знаете?
3. В чем их принципиальные достоинства и недостатки?
4. В каком направлении продолжается прогресс в разработке методов изоляции элементов?
5. Нарисуйте конфигурацию и назовите характер и параметры распределения примесей в транзисторной $n-p-n$ -структуре.
6. Почему пробивное напряжение коллекторного перехода $n-p-n$ -транзистора больше эмиттерного?
7. Нарисуйте структуру интегрального $n-p-n$ - ($p-n-p$)-транзистора и укажите на ней все паразитные параметры. Какими из этих параметров ограничивается время переключения интегральных транзисторов?
8. Какие разновидности интегральных биполярных транзисторов вы знаете?
9. Чем определяется проблематика создания сверхтонкой базы биполярных транзисторов?
10. Перечислите основные операции создания структур биполярных транзисторов.
11. Нарисуйте несколько вариантов диодного включения транзисторов.
12. Чем отличаются структуры полевого и МДП-транзисторов?
13. Нарисуйте структуру комплементарной пары МОП-транзисторов.
14. В чем заключается принцип самосовмещения при изготовлении МОП-транзисторов? При изготовлении каких еще других интегральных структур используется этот принцип?
15. Как изготавливается поликремниевый затвор? Каковы преимущества использования поликремниевой металлизации?
16. С какой точностью и какого порядка величины можно изготовить диффузионный резистор? Какими методами можно поднять пределы значений резисторных структур?
17. Какие структуры используются в качестве конденсаторных? Что ограничивает предельные параметры полупроводниковых конденсаторов?

18. Почему использование материалов группы $A^{III}B^V$ позволяет повысить быстродействие ИС?
19. Нарисуйте структуру полевого транзистора с затвором Шоттки на GaAs. Поясните принципы его создания и работы.
20. Какими средствами можно повысить быстродействие простого полевого транзистора с затвором Шоттки?
21. Какие материалы используются для создания пленочных резисторов? Какие предельные параметры пленочных резисторов можно обеспечить? С какой точностью?
22. Какие материалы используются и какого порядка предельные параметры можно получить при создании пленочных конденсаторов?
23. Можно ли изготовить по технологии кремниевых ИС катушки индуктивности?
24. Какого порядка величины и добротности можно изготовить индуктивности по тонкопленочной и толстопленочной технологии?

11 ТИПОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИМС

11.1 Классификация процессов

В основу классификации процессов изготовления полупроводниковых ИМС положен тип и способ формирования транзисторных структур в кристалле. В связи с этим различают биполярную и МДП-технологии.

Типовой технологический процесс изготовления полупроводниковой ИМС на биполярных транзисторах сводится к формированию в пластине кремния транзисторных структур $n-p-n^+$ типа (с одинаковым распределением концентрации примесей и различными размерами в плане) в количестве, необходимом для реализации всех активных и пассивных элементов, обеспечению изоляции между элементами и созданию внутрисхемных соединений. Для классификации технологических процессов изготовления биполярных интегральных схем используют два принципа: способ формирования транзисторной структуры и метод изоляции элементов [6].

Важной проблемой при проектировании и изготовлении биполярных ИМС и особенно больших интегральных схем (БИС) является обеспечение надежной изоляции элементов при одновременной максимальной плотности их размещения. Выбор метода электрической изоляции во многом определяет порядок технологического процесса в производстве ИМС.

Для обеспечения надежной работы *биполярной ИМС* каждый элемент схемы должен быть изолирован. В технологии для решения этой проблемы применяют следующие виды изоляции:

- изоляция $p-n$ -переходом;
- полная диэлектрическая изоляция;
- комбинированная изоляция, одновременно использующая изоляцию $p-n$ -переходом и диэлектриком.

Изоляция $p-n$ -переходом образуется путем проведения диффузионных процессов. При этом каждый элемент ИМС отделяется от остального объема пластины замкнутым $p-n$ -

переходом. Изоляция элементов достигается за счет подачи на $p-n$ -переходы обратного смещения. Этот вид изоляции используется в диффузионно-планарной (рис. 11.1) и эпитаксиально-планарной (рис. 11.2) структурах. Для получения обратного смещения в области подложки, разделяющей элементы, формируется омический контакт, связанный с наиболее низким потенциалом источника питания, а к изолирующим областям резисторов с помощью контактов подводится высокий потенциал.

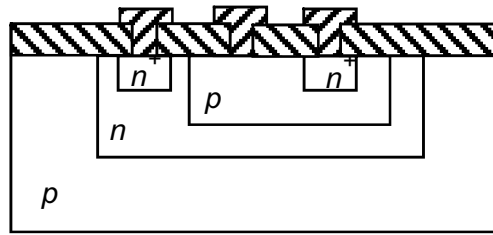


Рис. 11.1 – Диффузионно-планарная структура с изоляцией элементов $p-n$ -переходом

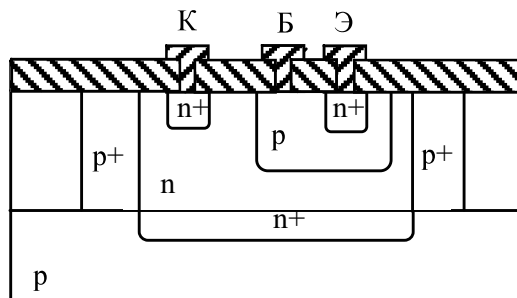


Рис. 11.2 – Эпитаксиально-планарная структура

Замкнутый $p-n$ -переход в эпитаксиально-планарной структуре получают с помощью разделительной диффузии акцепторной примеси на всю толщину эпитаксиальной пленки. Изоляция $p-n$ -переходом осуществляется технологически просто, но такие переходы обладают заметными токами утечки и емкостями. В результате уменьшается быстродействие схемы. Кроме того, учитывая боковую диффузию, расстояние между элементами приходится делать значительным, что уменьшает плотность размещения элементов.

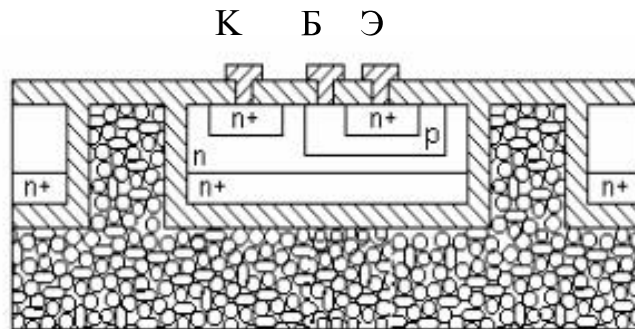


Рис. 11.3 – Структура с диэлектрической изоляцией:

1 – монокристаллический кремний n -типа;

2 – оксид кремния; 3 – поликристаллический кремний

Наилучшую электрическую развязку элементов обеспечивает структура с диэлектрической изоляцией (рис. 11.3). В такой структуре каждый элемент размещен в своеобразном «кармане», который представляет собой область монокристаллического кремния, ограниченную слоем оксида кремния. При этом расстояние между элементами может быть уменьшено до 8–10 мкм.

Однако структуры с диэлектрической изоляцией характеризуются высокой трудоемкостью, главным образом из-за необходимости механического шлифования и полирования подложек. Нарушение монолитности подложки (наличие толстого слоя поликристаллического кремния) вызывает внутренние механические напряжения, которые приводят к короблению подложки после снятия монокристаллического кремния. Коробление пластины затрудняет или делает невозможным использование фотолитографии для получения рисунка.

Все указанные недостатки обусловили поиск комбинированных методов изоляции элементов ИМС, по возможности исключающих недостатки первых двух. Разработаны два вида комбинированной изоляции – изопланарная и полипланарная изоляции. В этих случаях изоляция элементов в схеме осуществляется диэлектриком, а изоляция от подложки $p-n$ -переходом. Изопланарная изоляция обеспечивает изоляцию донной части коллектора от подложки $p-n$ -переходом, а боковые части толстым слоем диэлектрика SiO_2 (рис. 11.4).

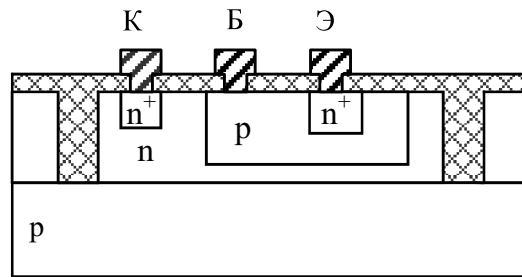


Рис. 11.4 – Структура с изопланарной изоляцией

Технологическим недостатком изопланарной структуры является необходимость длительного окисления для образования разделительных областей SiO_2 , что может вызвать нежелательное перераспределение примеси из скрытого слоя в эпитаксиальный коллектор. Для сокращения времени, затрачиваемого на окисление, уменьшают толщину эпитаксиального слоя и соответственно базы и эмиттера. На практике изопланарный процесс возможно осуществить при толщине эпитаксиального слоя не более 3–4 мкм.

Другой вид комбинированной изоляции используется в полипланарных структурах. Исходной пластиной является подложка с предварительно сформированными n^+ - и n -эпитаксиальными слоями, ориентированными в плоскости 100. Ориентация пластины определяет возможность анизотропного травления, в результате которого образуются канавки V-образной формы с соотношением ширины канавки b и ее глубины H , равной $H/b = 1,41$ (рис. 11.5).

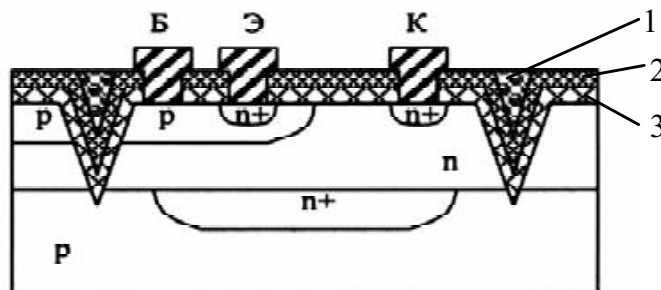


Рис. 11.5 – Структура с полипланарной изоляцией:

1 – поликристаллический кремний; 2 – нитрид кремния;

3 – оксид кремния

Специфическим недостатком описанной структуры является необходимость применять пластины с ориентацией в плоскости 100, которые не являются идеальными с точки зрения

электрических характеристик транзистора, но удовлетворяют требованиям анизотропного травления. Технологическим недостатком данного вида изоляции является введение в процесс трудоемкой операции полировки.

Анализ рассмотренных методов изоляции структур на биполярных транзисторах позволяет сделать вывод, что развитие привело к созданию совершенной изоляции, возможности более компактного размещения элементов ИМС и, в конечном счете, к улучшению электрических характеристик, в частности, к повышению быстродействия.

Для технологии изготовления *МДП ИМС* характерны некоторые особенности, обусловленные конструкцией и структурой ИМС на МДП-транзисторах [6]:

а) весь процесс изготовления сводится к формированию МДП-транзисторов и соединений между ними, поскольку МДП-структуры используют не только в качестве транзисторов, но и как резисторы и конденсаторы, т.е. практически все схемные функции реализуются на одних МДП-структурах;

б) в технологических процессах отсутствуют операции по изоляции структур, так как в МДП ИМС они не требуются из-за самоизоляции элементов;

в) внутрисхемные соединения выполняются не только с помощью алюминиевых металлических слоев, но и высоколегированных диффузионных слоев кремния и материала затвора (молибдена, поликристаллического кремния), значительно упрощая задачу многослойной разводки;

г) сравнительно легко в одном кристалле можно создавать МДП-транзисторы с различным типом электропроводности канала, что позволяет изготавливать МДП ИМС с большими функциональными возможностями на комплементарных структурах (КМДП ИМС);

д) отдельные технологические операции, особенно совмещение фотошаблонов при фотолитографии, диффузия, окисление и др., требуют прецизионного их проведения, поскольку

размеры МДП-транзисторов значительно меньше биполярных, поэтому МДП ИМС можно формировать с высокой плотностью размещения элементов.

Для классификации типовых технологических процессов создания МДП ИМС используют различные признаки: тип электропроводности и вид МДП-структур, тип подложки, материал затвора и подзатворного диэлектрика, способы формирования основных областей МДП-структуры, технологические способы устранения возникающих при изготовлении проблем. Различают p -канальную, n -канальную и КМДП технологии.

11.2 Изготовление биполярных ИМС с изоляцией $p-n$ -переходом

Изоляция обратнo смещенным $p-n$ -переходом используется в диффузионно-планарных и эпитаксиально-планарных структурах. Последовательность формирования кристалла полупроводниковой ИМС на примере самого сложного элемента транзистора по диффузионно-планарной технологии представлена на рис. 11.6.

Вначале составляют партию пластин с одинаковыми геометрическими размерами и заданным удельным сопротивлением, обычно состоящую из 10–20 штук. В отечественной промышленности используют пластины кремния диаметром 60–102 мм и толщиной 0,2–0,4 мм, с удельным сопротивлением 1–10 Ом·см. Пластины подвергают очистке путем химической обработки поверхности с последующим ее травлением и промывкой в деионизованной или дистиллированной воде (этот процесс повторяют перед каждой последующей операцией). Затем осуществляют процесс окисления поверхности пластин (создание маскирующего оксида) в однозонной диффузионной печи в атмосфере сухого или влажного кислорода или паров воды при температуре $\sim 1150^\circ\text{C}$ (рис. 11.6, а). После процесса фотолитографии с определенных участков поверхности пластины селективно удаляют слой оксида – формируют окна в маскирующем слое под коллекторную диффузию. В тех участках, с которых был удален оксид, путем диффузии фосфора в две стадии формируют кол-

литорные области всех транзисторов и изолирующие области для резисторов (рис. 11.6, б). Первую стадию проводят при более низкой температуре $\sim 1100^\circ\text{C}$ в течение 30–40 мин, вторую – при более высокой температуре (около 1200°C) в атмосфере сухого кислорода в течение времени, необходимого для проникновения фосфора на глубину залегания p – n -перехода коллектор-подложка. Распределение примеси в коллекторных областях подчиняется закону Гаусса.

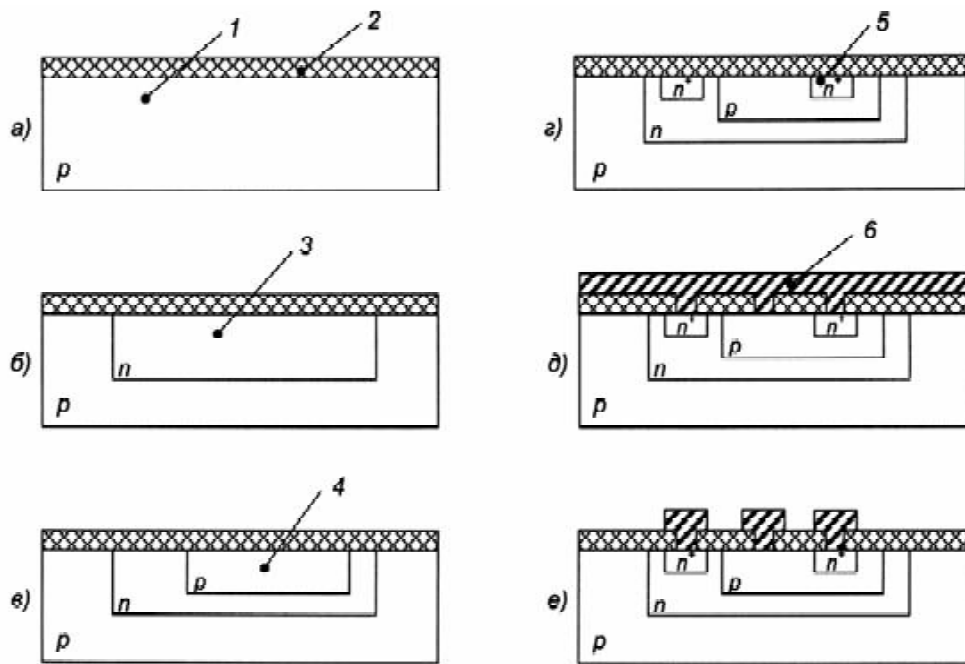


Рис. 11.6 – Последовательность формирования кристалла полупроводниковой ИМС по диффузионно-планарной технологии: 1 – подложка p -типа; 2 – оксид кремния; 3 – коллекторная область n -типа; 4 – базовая область p -типа; 5 – эмиттерная область n^+ -типа; 6 – металлизация

Для создания базовых областей транзисторов, резисторов и диодов в коллекторные области n -типа проводят диффузию акцепторных примесей. Для этого в оксидном слое путем фотолитографии создают окна с размерами, необходимыми для реализации элементов с требуемыми номиналами. Базовую диффузию проводят в две стадии. В качестве примеси используют бор.

Первая стадия (загонка) осуществляется при температуре 900–1000 °С (в зависимости от применяемого источника диффузанта) и начинается в среде аргона и кислорода, а заканчивается в инертной среде – подается один аргон без диффузанта. Загонку осуществляют также ионным легированием. После этого путем травления в азотной или фтористой кислоте с поверхности пластин удаляют боросиликатное стекло.

Вторая стадия (разгонка) проводится при более высокой температуре (1150 °С) в окислительной среде, в результате чего происходит перераспределение бора на определенную глубину. При этом создаются базовые области глубиной 2,5–3,5 мкм с удельным поверхностным сопротивлением 150–300 Ом/□, а на поверхности пластин – слой оксида кремния (рис. 11.6, в).

Затем формируют эмиттерные области n^+ -типа, которые служат эмиттерами транзисторов, катодами диодов, обкладками конденсаторов, омическими контактами к коллекторным областям, а иногда и внутрисхемными соединениями. Для этого пластины подвергают фотолитографии, за счет чего получают окна в оксидном слое под эмиттерные и контактные области к кремнию n -типа. Формирование эмиттерных областей n^+ -типа осуществляется диффузией фосфора в одну стадию. Диффузия фосфора проводится на глубину 0,8–2,0 мкм, при этом создаются высоколегированные области n^+ -типа, удельное поверхностное сопротивление которых составляет единицы ом на квадрат (рис. 11.6, г). Распределение примеси в этих областях подчиняется функции $erfc$.

Заканчивается процесс получения полупроводниковых структур ИМС созданием внутрисхемных соединений и формированием защитного покрытия. Для этого вначале с поверхности пластины удаляют фосфоросиликатное стекло, а затем поверхность пластин окисляют для получения защитного оксида толщиной около 1 мкм. Этот слой оксида является также маскирующим при создании омических контактов металл-полупроводник. С этой целью методом фотолитографии вскрывают окна в слое оксида под омические контакты, поверхность пластин тщательно очищают, а затем термическим испарением в вакууме на поверхность пластин наносят слой алюминия толщиной 1,0–1,5 мкм (рис. 11.6, д). Алюминий наносят равномерно на

всю поверхность пластины как на слой оксида, так и на участки, обработанные путем травления при фотолитографии. Затем поверхность алюминия подвергают фотогравировке с помощью шестой фотолитографии, чтобы получить внутрисхемные соединения необходимой конфигурации и контактные площадки; термообработка пластин дает хорошие контакты. На заключительном этапе наносят защитный слой оксида кремния и фотолитографией в нем вскрывают окна к контактными площадкам. На этом этапе заканчивается процесс формирования кристаллов ИМС. Структура готового кристалла ИМС показана на рис. 11.6, е (защитный слой не показан).

В производственных условиях после каждого этапа формирования ИМС осуществляют контроль. Так, после фотолитографии, очистки, окисления пластины подвергают 100 %-ному контролю визуально. Диффузионные области контролируют после фотолитографии путем измерения удельного поверхностного сопротивления или снятия вольтамперной характеристики на образцах-свидетелях либо по тестовым ячейкам. Пластины с готовыми микросхемами контролируют на функционирование с помощью зондовых установок. Забракованные микросхемы метят магнитной краской. После такого контроля пластины поступают на разделение на кристаллы, забраковку, годные из них – на сборку.

При изоляции обратнo-смещенным $p-n$ -переходом в эпитаксиально-планарных структурах изолирующие области создаются путем проведения разделительной диффузии на всю глубину эпитаксиального слоя. Транзисторные структуры формируются локальной диффузией в эпитаксиальном слое n -типа. Последовательность формирования структуры на примере транзистора со скрытым слоем представлена на рис. 11.7.

Партию пластин p -типа очищают, а затем окисляют по комбинированной технологии для получения маски для формирования скрытого слоя (рис. 11.7, а). Быстродействие транзистора, его частотные свойства тем лучше, чем меньше величины сопротивления тела коллектора и емкости перехода коллектор-база. Если снижать сопротивление коллектора повышением степени его легирования, то уменьшается напряжение пробоя коллекторного $p-n$ -перехода.

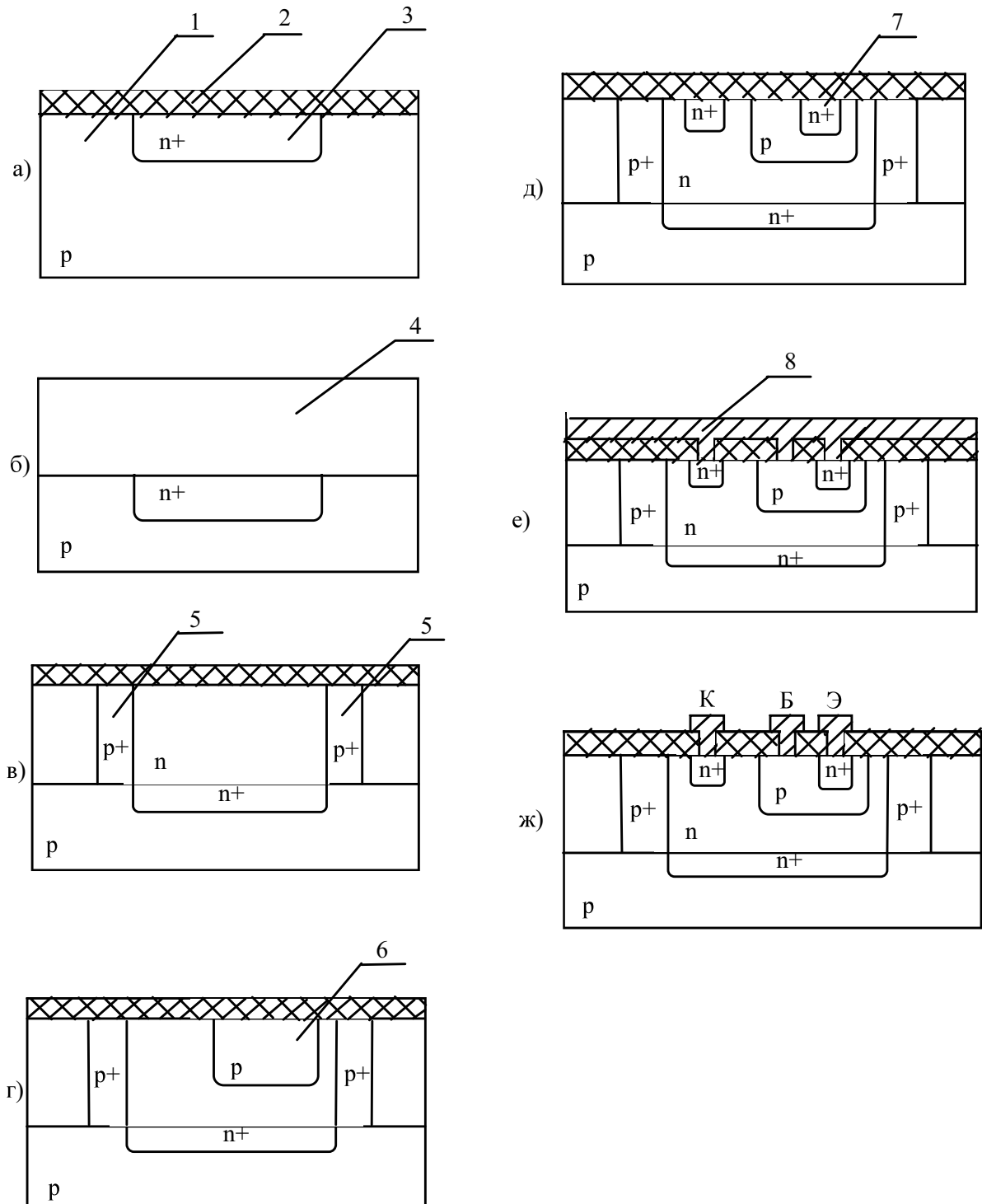


Рис. 11.7 – Последовательность формирования кристалла полупроводниковой ИМС по эпитаксиально-планарной технологии: 1 – подложка; 2 – оксид кремния; 3 – скрытый слой n -типа; 4 – эпитаксиальный слой n -типа; 5 – разделительная область p^+ -типа; 6 – базовая область p -типа; 7 – эмиттерная область n^+ -типа; 8 – металлизация

Чтобы решить эту проблему, под коллектором формируют высоколегированный скрытый n^+ -слой. В качестве легирующей примеси используют мышьяк или сурьму – элементы с низкой скоростью диффузии, что позволяет уменьшить влияние эффекта автолегирования. Диффузию *As* или *Sb* проводят в две стадии (рис. 11.7, а). После этого удаляют оксид кремния со всей поверхности, очищают пластины и осуществляют эпитаксиальное наращивание слоя кремния n -типа (рис. 11.7, б). Эпитаксию чаще всего проводят путем восстановления четыреххлористого кремния $SiCl_4$ водородом при температуре 1000–1200 °С. При этом получают слой кремния толщиной 5–10 мкм с удельным сопротивлением 0,1–1,0 Ом·см. На поверхности пластины с эпитаксиальным слоем повторным термическим окислением создают слой оксида кремния толщиной 0,5–1,0 мкм. С помощью процесса второй фотолитографии с определенных участков поверхности пластины селективно удаляют слой оксида – формируют окна в маскирующем слое под разделительную диффузию. В тех участках, с которых был удален оксид, путем диффузии бора в две стадии формируют изолирующие области p -типа. Первую стадию проводят при более низкой температуре (примерно 1000 °С) в течение нескольких десятков минут, а вторую стадию – при температуре 1150–1250 °С в атмосфере сухого кислорода в течение времени, необходимого для проникновения бора на всю глубину эпитаксиального слоя (рис. 11.7, в). Тем самым создают коллекторные области n -типа, изолированные областями p -типа, причем распределение примеси в коллекторных областях равномерное, а в изолирующих областях p -типа оно подчиняется закону Гаусса. Далее в термическом окисле, полученном на второй стадии разделительной диффузии, методом фотолитографии вскрывают окна под базовую диффузию бора, которую, как уже указывалось выше, проводят в две стадии (рис. 11.7, г). Затем формируют эмиттерные области (рис. 11.7, д), металлизированные соединения (рис. 11.7, е) и защитный слой. Готовая эпитаксиально-планарная структура без защитного слоя представлена на рис. 11.7, ж.

11.3 Изготовление биполярных ИМС с диэлектрической изоляцией

Технология изготовления биполярных ИМС с диэлектрической изоляцией предусматривает формирование кристаллов, в которых каждый элемент (транзисторная $n-p-n^+$ структура) изолирован полностью слоем диэлектрика. Для создания изолирующих областей используют оксид и нитрид кремния, поликристаллический кремний, стекло и т.д. Рассмотрим технологию, основанную на получении изолированных областей из сло-

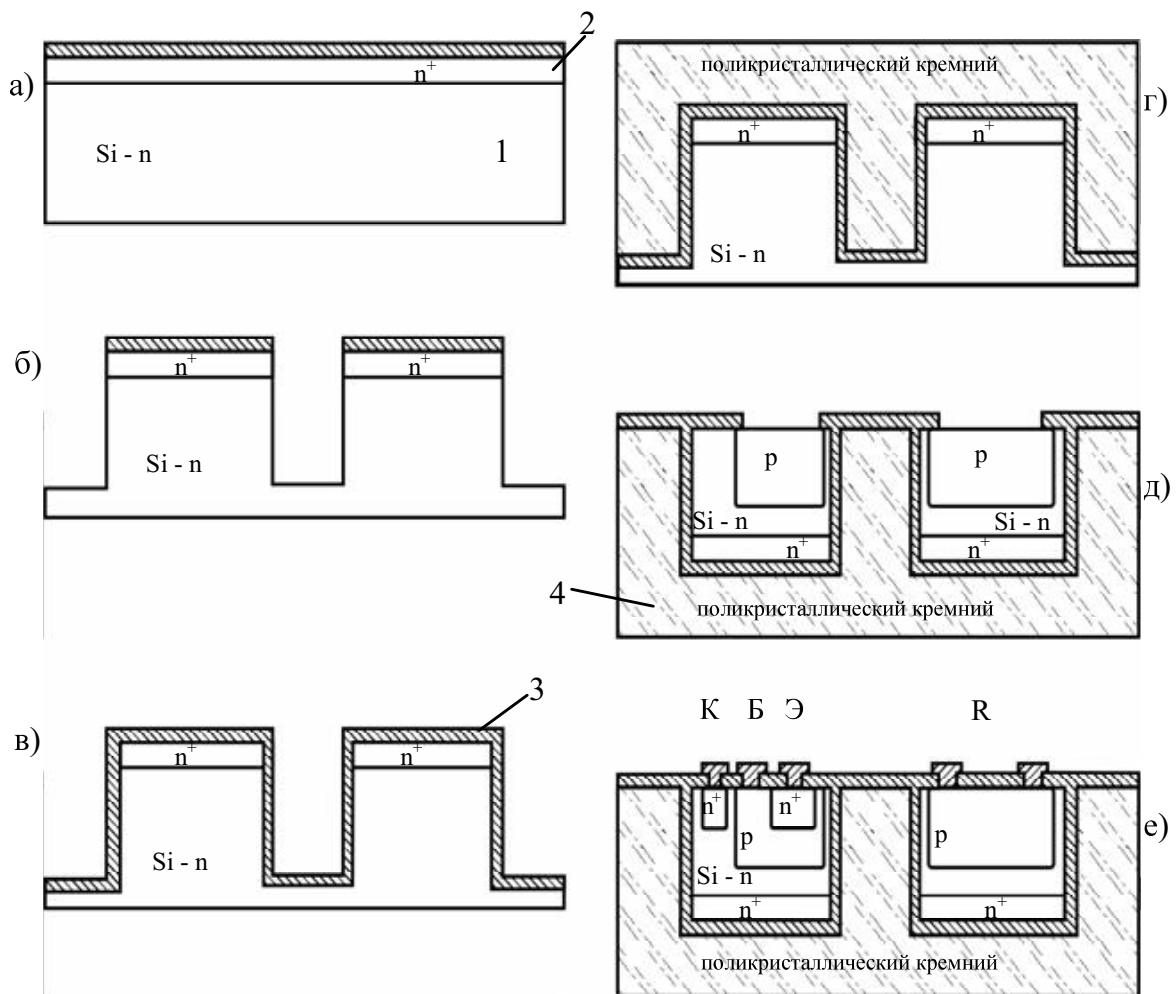


Рис. 11.8 – Последовательность формирования биполярной ИМС с диэлектрической изоляцией: 1 – исходная пластина кремния n -типа; 2 – диффузионный скрытый слой n^+ -типа; 3 – оксид кремния; 4 – поликристаллический кремний

ев оксида (нитрида) кремния и поликристаллического кремния. Последовательность формирования биполярной ИМС с диэлектрической изоляцией представлена на рис. 11.8.

Вначале составляют партию кремниевых пластин n -типа с удельным сопротивлением 0,2–10,0 Ом·см и подвергают их очистке. Затем по всей площади пластины методом двухстадийной диффузии сурьмы или мышьяка образуют высоколегированный скрытый n^+ -слой с глубиной залегания $p-n$ -перехода 2–3 мкм. Термически пластины окисляют со стороны скрытого слоя (рис. 11.8, а). Методом фотолитографии в маске из оксида кремния вскрывают окна под изолирующие области, через которые травят кремний на глубину 8–15 мкм (рис. 11.8, б). Для получения на рельефной поверхности пластины слоя оксида толщиной 1 мкм пластины вновь термически окисляют (рис. 11.8, в). На поверхность кремния со стороны окисленных канавок осаждают поликристаллический кремний толщиной 0,2–0,25 мкм путем разложения силана SiH_4 при температуре подложек 600–650 °С (рис. 11.8, г).

После этого с противоположной поверхности пластины (со стороны кремния n -типа) сошлифовывают слой монокристаллического кремния n -типа до оксидного слоя. Таким образом, получают области кремния n -типа со скрытыми n^+ -слоями, изолированные друг от друга слоем SiO_2 . В этих областях методами окисления, фотолитографии, диффузии, напыления формируют базовые области (рис. 11.8, д), эмиттерные и металлизацию (рис. 11.8, е).

Данный технологический процесс позволяет получить хорошую изоляцию между элементами как по постоянному, так и по переменному току. По такой технологии целесообразно изготавливать микромощные и быстродействующие цифровые и высокочастотные аналоговые ИМС. Но стоимость технологического процесса высока по сравнению с процессами изоляции $p-n$ -переходами.

11.4 Изготовление биполярных ИМС с комбинированной изоляцией

В основу изготовления полупроводниковых биполярных ИМС с комбинированной изоляцией положены процессы, обеспечивающие формирование элементов с изоляцией $p-n$ -переходами их горизонтальных участков и диэлектриком – вертикальных боковых областей. Основные технологии для получения комбинированной изоляции:

- изопланарная технология;
- полипланарная технология.

Изопланарная технология в качестве исходных пластин использует подложки p -типа с тонким (2–3 мкм) эпитаксиальным слоем n -типа. Последовательность формирования биполярной ИМС по изопланарной технологии представлена на рис. 11.9.

Методом химического осаждения на пластины наносят пленку нитрида кремния в результате реакции между силаном SiH_4 и аммиаком NH_3 при температуре 900 °С (рис. 11.9 а). В пленке нитрида кремния Si_3N_4 фотолитографией вскрывают окна под изолирующие области, через которые травят кремний на глубину, равную примерно половине толщины эпитаксиальной пленки H (рис. 11.9, б). Протравленные изолирующие области термически окисляют на всю толщину эпитаксиальной пленки (рис. 11.9, в). Поскольку, как уже указывалось, для получения оксида кремния толщиной H требуется 0,44 H кремния, то в результате окисления получается гладкий рельеф. Пленка нитрида кремния Si_3N_4 является надежной маской при окислении. Далее нитрид кремния стравливают, а пластины вновь окисляют для получения маски для диффузии (рис. 11.9, г). Фотолитографией вскрывают окна под базовую диффузию бора, которую проводят в две стадии (рис. 11.9, д). После этого фотолитографией, диффузией и напылением последовательно формируют эмиттерные области, окна под контакты и металлизацию (рис. 11.9, е).

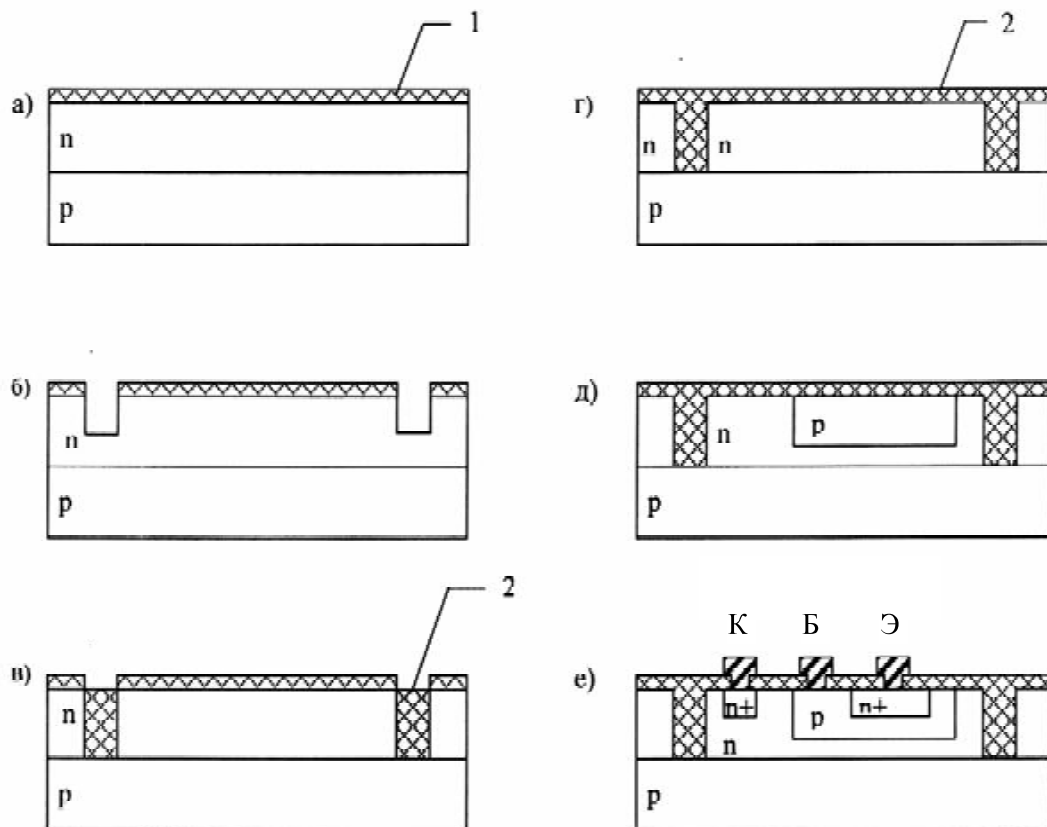


Рис. 11.9 – Последовательность формирования биполярной ИМС по изопланарной технологии: 1 – нитрид кремния; 2 – оксид кремния

Изопланарная технология позволяет создавать тонкие базовые области и небольшие коллекторные области с оксидными боковыми стенками и тем самым обеспечивает получение транзисторных структур малых размеров и высокого быстродействия.

Полипланарная технология использует вертикальное анизотропное травление кремния с ориентацией 100° , что позволяет формировать в эпитаксиальном слое V -образные разделительные области для межэлементной изоляции. Последовательность формирования биполярных ИМС по полипланарной технологии представлена на рис. 11.10.

Используют партию двухслойных пластин p -типа с эпитаксиальным слоем n -типа и скрытым слоем n^+ -типа. Методом локальной диффузии бора в две стадии создают базовые области (рис. 11.10, а). С помощью фотолитографии удаляют слой оксида для создания изоляции. Через окна в оксиде в кремнии вы-

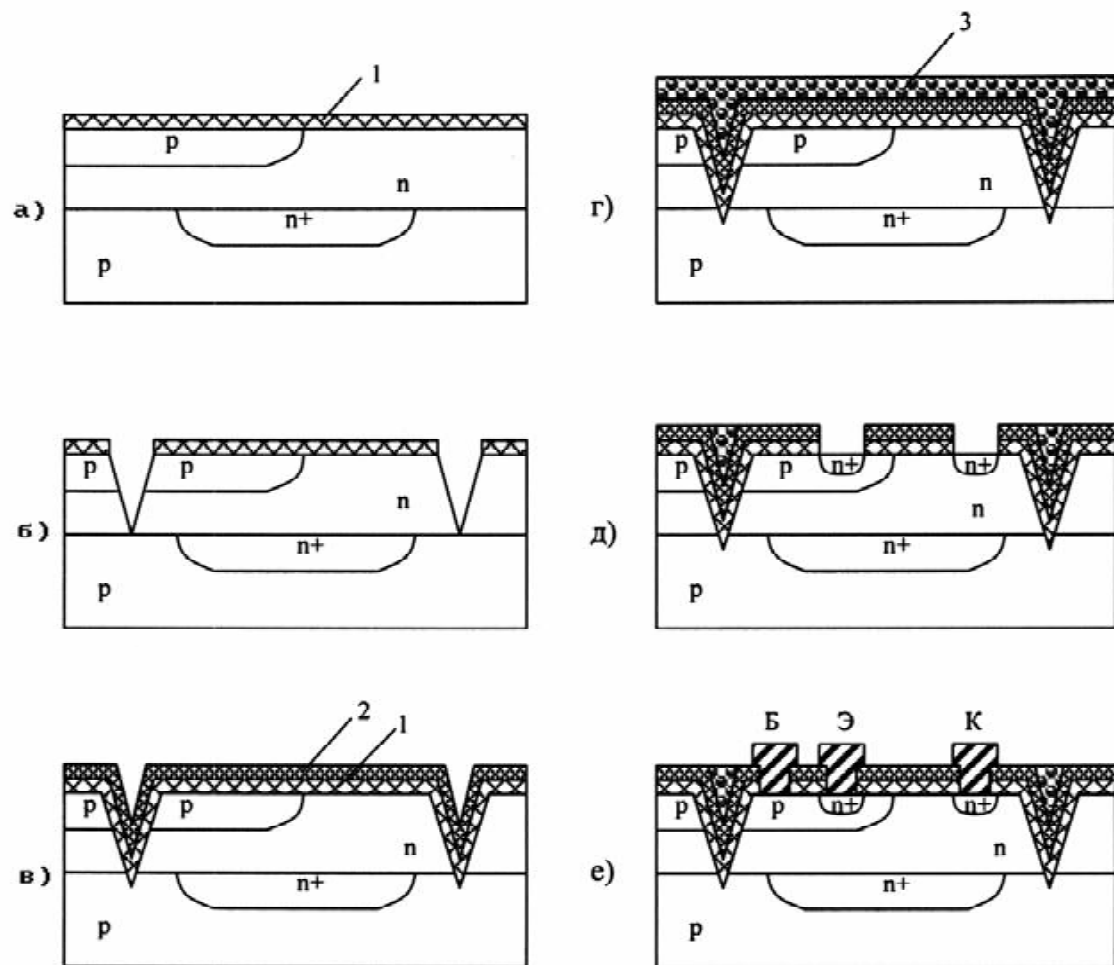


Рис. 11.10 – Последовательность формирования биполярной ИМС по полипланарной технологии: 1 – оксид кремния; 2 – нитрид кремния; 3 – поликристаллический кремний

травливают *V*-образные канавки на всю толщину эпитаксиальной пленки (рис. 11.10, б), которые покрывают термически выращенным оксидом кремния и химически осажденным нитридом кремния (рис. 11.10, в). Для повышения механической прочности канавки заращивают поликристаллическим кремнием (рис. 11.10, г), лишнюю часть которого удаляют полированием до слоя нитрида кремния. Далее формируют эмиттерные области (рис. 11.10, д) и металлизацию (рис. 11.10, е), как по обычной технологии.

Полипланарная технология обеспечивает создание ИМС, которые по удельной плотности размещения элементов и электрическим характеристикам аналогичны ИМС, изготовленным

по изопланарной технологии, но имеют меньшую площадь изоляции. Однако эти процессы более трудоемки.

11.5 Изготовление МДП ИС

Существенное повышение плотности размещения элементов и упрощение технологии имеет место в МДП ИМС. Это обусловлено, прежде всего, тем, что при изготовлении МДП ИМС на транзисторах с каналами одного типа проводимости не требуется дополнительных мер изоляции. Действительно, области истоков и стоков всегда ограничены $p-n$ -переходами, смещенными в обратном направлении, а перенос основных носителей заряда происходит в тонком приповерхностном слое полупроводника между истоком и стоком. Однако широко используются структуры, содержащие МДП-транзисторы обоих типов, которые позволяют на 2–3 порядка по сравнению с n - или p -МДП-структурами снизить мощность, потребляемую устройством в статическом режиме. Такие структуры получили название структур на дополняющих МДП-транзисторах или комплементарных МДП-структурах. Для создания транзисторов с каналами разного типа проводимости необходимо создавать две области монокристаллического кремния n - и p -типов.

Для МДП ИС на транзисторах с каналами одного типа проводимости разработаны n -канальная и p -канальная технологии. На рис. 11.11 приведена последовательность изготовления МДП ИС по p -канальной технологии.

В качестве исходного материала используются кремниевые пластины n -типа с удельным сопротивлением 2,5–10,0 Ом·см. После очистки поверхности пластин термическим окислением получают маскирующий окисел SiO_2 (рис. 11.11 а), в котором методом фотолитографии формируют окна под области истока и стока. Затем проводят двухстадийную диффузию бора, создавая высоколегированные области глубиной 1–2 мкм (рис. 11.11 б). Далее проводят фотолитографию под тонкий диэлектрик (под затвором) и тщательно очищают поверхность. Затем в сухом кислороде наращивают оксид кремния толщиной 0,1–0,12 мкм

(рис. 11.11 в). Методом фотолитографии вскрывают окна под контакты к истоку и стоку и напыляют пленку алюминия термическим испарением (рис. 11.11 г), в которой формируют рисунок межсоединений (рис. 11.11 д).

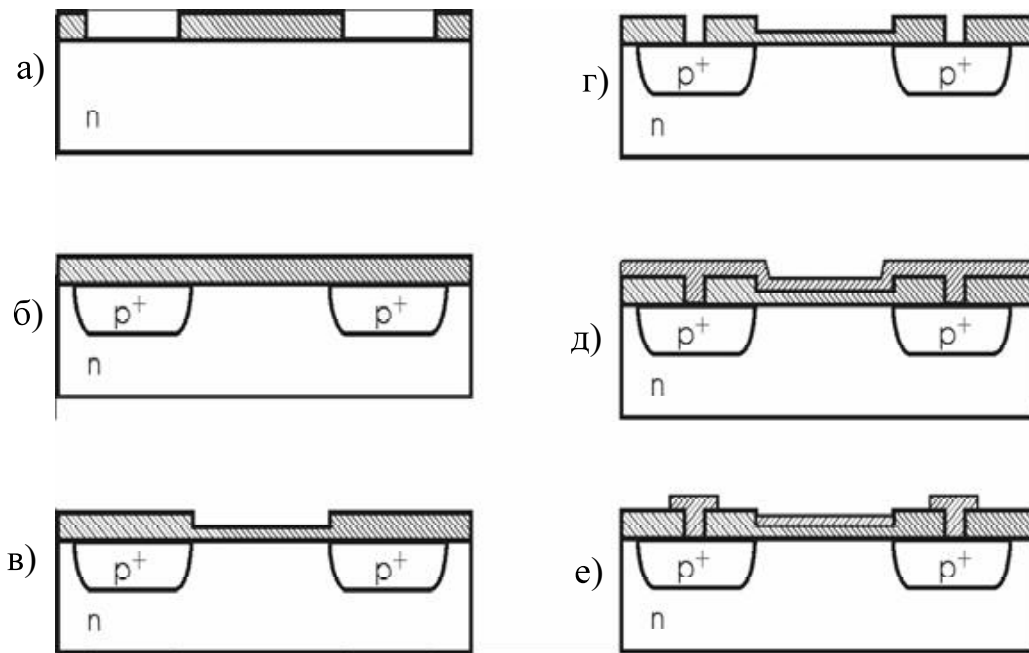


Рис. 11.11 – Последовательность изготовления МДП ИС по p -канальной технологии

По такой же схеме осуществляется n -канальная технология с той лишь разницей, что используются пластины p -типа, а для формирования областей истока и стока проводят диффузию фосфора.

Для изготовления МДП ИС на комплементарных транзисторах для получения двух монокристаллических областей n - и p -типа создают «карман» p -типа в кремнии n -типа с помощью локальной диффузии. На рис. 11.12 приведена технологическая схема изготовления КМДП ИС.

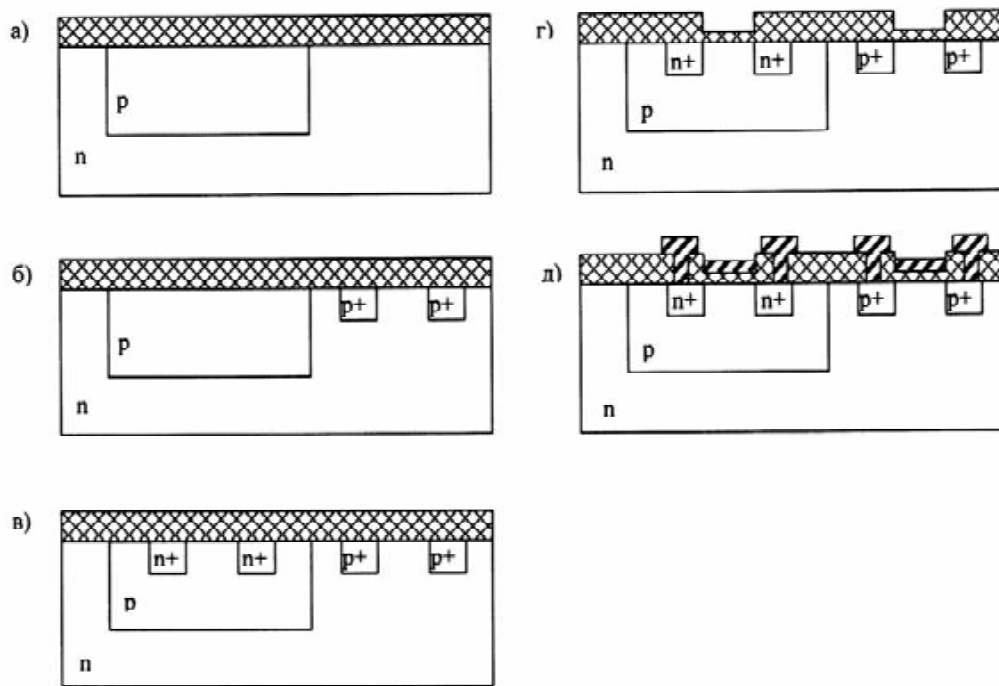


Рис. 11.12 – Последовательность формирования КМДП ИС

Партию пластин n -типа очищают и окисляют для получения маскирующего окисла для диффузии «кармана». В две стадии проводят диффузию бора на необходимую глубину для получения диффузионного «кармана» p -типа с низкой (10^{17} см^{-3}) концентрацией (рис. 11.12, а). Затем проводят фотолитографию и диффузию, поочередно формируя области истока и стока p -канальных и n -канальных транзисторов. Диффузию бора проводят в две стадии (рис. 11.12, б), а диффузию фосфора в одну стадию (рис. 11.12, в). Затем проводят фотолитографию под тонкий диэлектрик, окисление в сухом кислороде (рис. 11.12, г), фотолитографию контактных окон и металлизацию (рис. 11.12, д).

Сравнительно простая технология изготовления МДП ИС имеет ряд технологических проблем, которые сказываются на качестве ИМС и стабильности их параметров.

1. Наличие в оксиде под затвором положительных и отрицательных зарядов, обусловленных кислородными вакансиями, ионами щелочных металлов или водорода, приводит к неста-

бильности параметров МДП-транзисторов в случае приложения к структуре электрического поля вследствие дрейфа зарядов.

2. При определенных значениях потенциалов на шинах металлизированной разводки возможны образования паразитных МДП-транзисторов, что приводит к образованию каналов проводимости под слоем оксида, расположенным под шиной разводки, и тем самым к возникновению токов утечки между диффузионными областями. Кроме того, для МДП ИМС опасным является короткое замыкание металла затвора или разводки на подложку, особенно на высоколегированные области истока и стока, вследствие «проколов» оксидного слоя.

3. Существенной проблемой изготовления МДП ИМС является совмещение затвора с областями истока и стока. Так, отсутствие перекрытия канала металлом затвора приводит к неработоспособности МДП-транзистора, а слишком большое перекрытие (расположение металла затвора над диффузионными областями) – к образованию больших емкостей затвор-исток и затвор-сток, что снижает быстродействие ИМС.

Для решения этих проблем разработаны различные технологические приемы. Так, для стабилизации параметров ИМС на МДП-транзисторах применяют специальные методы обработки (очистки) поверхности кремния перед созданием оксида под затвор, наносят фосфоро-силикатное стекло на поверхность оксида под затвором, а также производят низкотемпературный отжиг кристаллов в восстановительной среде.

Эффективным методом очистки поверхности пластин перед окислением является обработка в плавиковой кислоте с последующим длительным кипячением в воде для удаления фтора, который включается в решетку кремния и приводит к образованию дополнительного заряда. Фосфоро-силикатное стекло, создаваемое при нагреве окисленной пластины в парах при температуре около 1000 °С, геттерирует ионы натрия из оксида и является хорошим барьером против проникновения примесей из металла в оксид. Важен при этом режим создания оксида, требующий подачи окислителя (кислорода) в строго контролируемом дозированном количестве и предварительно очищенном состоянии при температуре, близкой к температуре процесса окисления.

С целью предотвращения образования паразитных МДП-транзисторов под шинами разводки металлизацию выполняют по слою оксида с относительно большой толщиной (порядка 1,5 мкм), который получают при первичном окислении. Процесс изготовления МДП ИМС с использованием толстого оксида называют **МТОП-технологией** (**металл-толстый оксид-полупроводник**). Последовательность изготовления МДП ИС с использованием толстого оксида представлена на рис. 11.13.

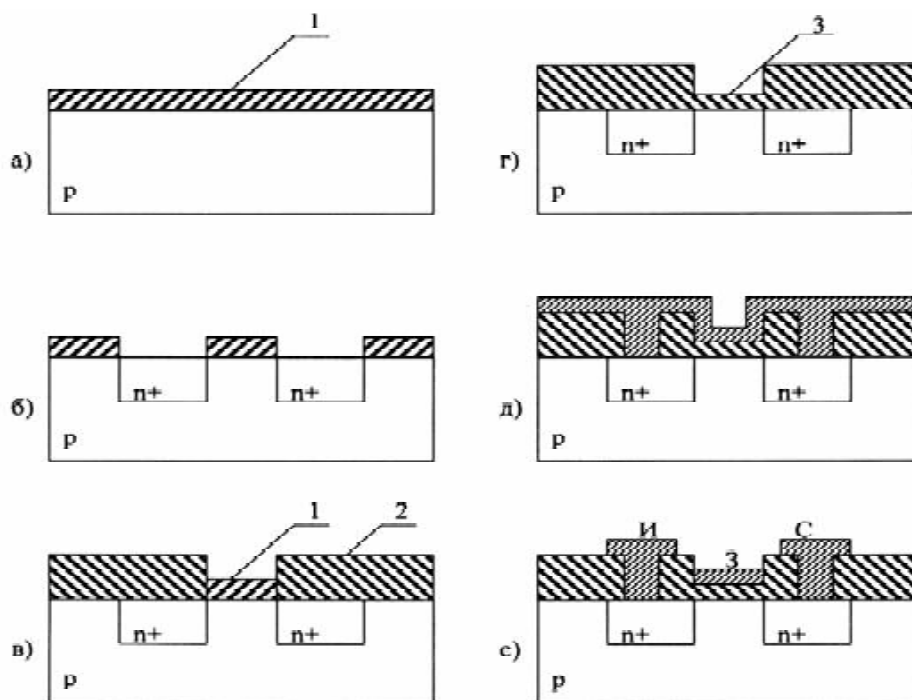


Рис. 11.13 – Последовательность изготовления МДП ИС с толстым оксидом: 1 – нитрид кремния; 2 – толстый оксид кремния; 3 – тонкий оксид кремния (подзатворный диэлектрик)

Партия пластин p -типа очищается и методом химического осаждения из газовой фазы на пластину осаждается маскирующий слой нитрида кремния (рис. 11.13, а). После фотолитографии через окна в нитриде кремния проводится диффузия фосфора в одну стадию – формируются области истока и стока (рис. 11.13, б). Следующей фотолитографией удаляют нитрид кремния со всей пластины, кроме областей над каналом. Затем проводят окисление по комбинированной технологии, используя повышенное давление окислителя. Нарращивают окисел толщи-

ной 1,5 мкм (рис. 11.13, в). Стравливают нитрид кремния и после тщательной очистки пластин получают подзатворный диэлектрик SiO_2 термическим окислением в сухом кислороде (рис. 11.13, г). Далее проводят фотолитографию, создавая контактные окна (рис. 11.13, д) и металлизацию (рис. 11.13, е).

Для обеспечения совмещения затвора с областями истока и стока разработана технология с молибденовыми затворами (рис. 11.14).

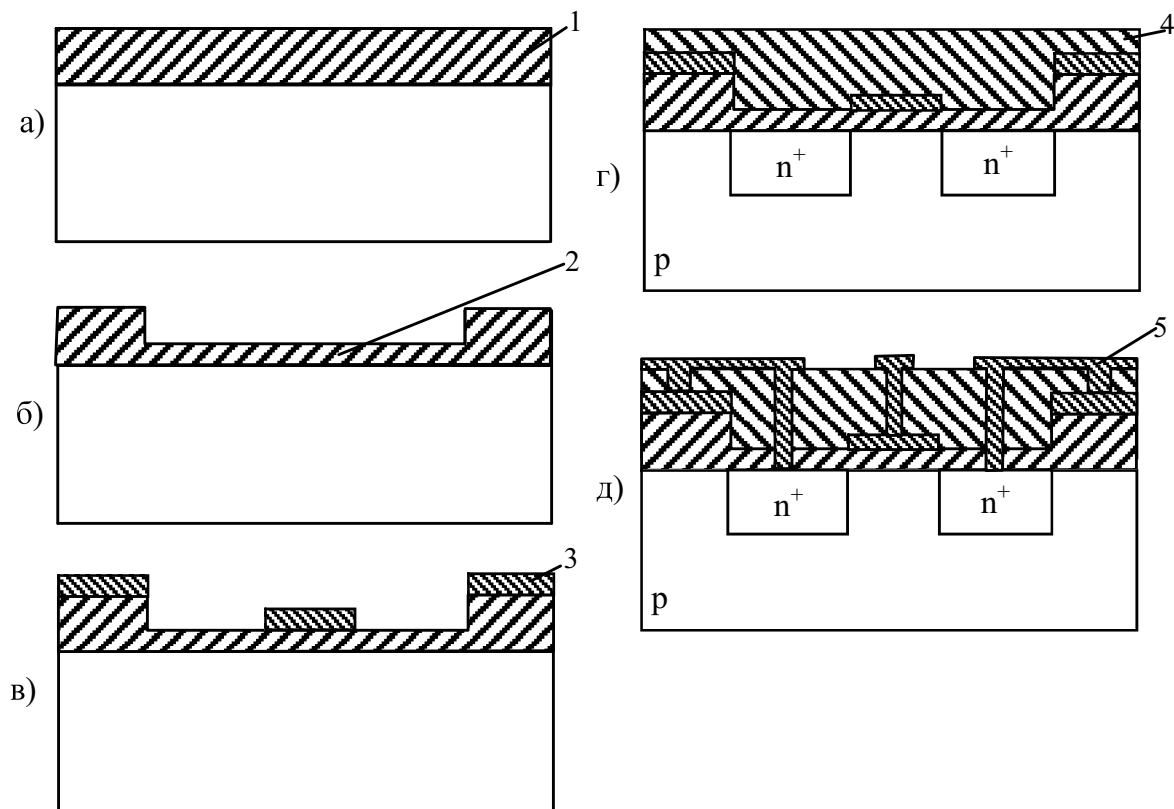


Рис. 11.14 – Последовательность изготовления МДП ИС по самосовмещенной технологии с молибденовым затвором: 1 – толстый оксид кремния; 2 – тонкий оксид кремния; 3 – молибден; 4 – фосфорно-силикатное стекло; 5 – алюминий

Процесс начинают с создания оксида на очищенной поверхности пластины кремния p -типа. По комбинированной технологии выращивают защитный оксид кремния толщиной 1,3 мкм (рис. 11.14, а). С помощью фотолитографии проводят селективное удаление оксида в местах формирования областей

истока, стока и затвора. В полученных окнах термическим окислением в сухом кислороде получают оксид толщиной 0,1 мкм (рис. 11.14, б), после чего на пластину осаждают сплошной слой молибдена. Затем проводят фотолитографию и травление молибдена, в результате чего формируют металлические затворы и первый слой соединительной металлизации над толстым слоем оксида (рис. 11.14, в). После этого на пластину наносят слой легированного фосфором стекла, из которого при температуре порядка 1000 °С проводится диффузия. Фосфор диффундирует только через тонкий слой оксида (рис. 11.14, г). Толстый оксид и молибденовый затвор служат масками при диффузии. Тем самым достигается самосовмещение затвора с легированными областями – истоком и стоком.

На последнем этапе с помощью фотолитографии осуществляют одновременное вскрытие контактных окон к молибдену и диффузионным областям, напыляют алюминий и фотогравировкой по алюминию формируют завершающий слой соединений (рис. 11.14, д).

Аналогичная технология используется при формировании затвора из поликристаллического кремния.

Самосовмещение истока и стока с затвором достигается также при использовании ионного легирования (рис. 11.15).

На пластинах кремния *n*-типа выращивают оксид кремния толщиной 1,0–1,3 мкм (рис. 3.15, а), по которому проводят фотолитографию для вскрытия окон под исток и сток. Диффузией бора в две стадии формируют области истока и стока транзисторных структур (рис. 3.15, б). Затем проводят фотолитографию окон под тонкий диэлектрик и после тщательной очистки проводят окисление в сухом кислороде для получения оксида кремния толщиной 0,1 мкм (рис. 3.15, в). Далее вскрывают окна под контакты и напыляют алюминий (рис. 3.15, г). Проводят фотогравировку по алюминию (рис. 3.15, д). На последней стадии применяют ионное легирование. Ионы бора проходят через тонкий диэлектрик в промежутке между истоком и затвором и между стоком и затвором, осуществляя тем самым их совмещение.

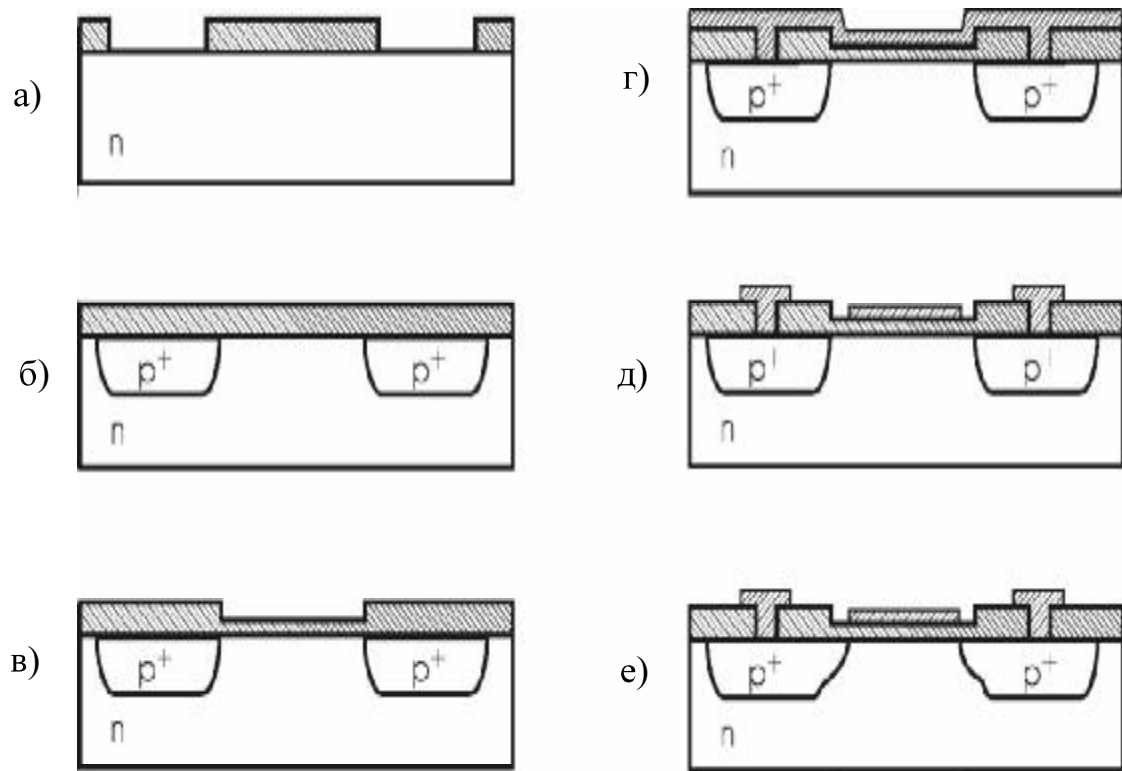


Рис. 11.15 – Последовательность изготовления МДП ИС по самосовмещенной технологии с использованием ионного легирования:

1 – толстый оксид кремния; 2 – тонкий оксид кремния;
3 – алюминий

По рассмотренным технологическим процессам изготавливают подавляющее большинство цифровых и аналоговых ИМС массового потребления. Дальнейшее совершенствование процессов технологии ИМС направлено на уменьшение геометрических размеров элементов и повышение их быстродействия, что особенно актуально при создании БИС и СБИС.