

**Міністерство освіти і науки України
Прикарпатський національний університет
імені Василя Стефаника**

В.І. Мандзюк, І.Т. Когут

**ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ
МІКРОСИСТЕМНОЇ ТЕХНІКИ**

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

**Івано-Франківськ
2008**

УДК 621.369.6.002.2 – 621.382.82(075)

ББК 32.844.1

М-23

В.І. Мандзюк, І.Т. Когут. Фізико-технологічні основи мікросистемної техніки. Навчальний посібник. – Івано-Франківськ: Нова зоря, 2008. – 154 с.

В посібнику викладені фізико-технологічні основи пристроїв мікросистемної техніки (МСТ). Подано технологію підготовки напівпровідникових пластин з використанням методів механічної і хімічної обробки, процеси формування діелектричних плівок на напівпровідникових пластинах, основи літографічних процесів. Розглянуто основні технології виготовлення і принципи функціонування сенсорних і актюаторних елементів МСТ, які отримали найбільше поширення за останні десятиріччя.

Для студентів технічних спеціальностей вищих навчальних закладів.

Табл. 12. Ілюстр. 112. Бібліогр. 52 назви.

Рекомендовано до друку Вченою радою фізико-технічного факультету Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника
(протокол №1 від 17 квітня 2008 р.)

Рецензенти: Дружинін А.О., доктор технічних наук, професор (Національний університет “Львівська політехніка”)
Новосядлий С.П., доктор технічних наук, професор (Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника)

Зміст

ПЕРЕДМОВА	5
ВСТУП	7
1. Огляд сучасного стану і напрямків розвитку МСТ.	7
2. Аналіз ринку МСТ.	8
3. Основні напрямки і особливості розвитку виробів МСТ.	11
4. Використання мікросистемних технологій.	14
5. Проектування мікросистем.	15
РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЯ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ПІДКЛАДОК ДЛЯ ЕЛЕМЕНТІВ ІМС ТА МСТ	17
1.1. Типи і основні характеристики підкладок.	17
1.2. Структура підкладок та їх маркування.	20
1.3. Різання злитків і пластин.	22
1.4. Шліфування і полірування пластин.	27
1.5. Скрайбування і розламування пластин.	31
РОЗДІЛ 2. ТЕХНОЛОГІЯ ХІМІЧНОЇ ОБРОБКИ ПІДКЛАДОК ДЛЯ ЕЛЕМЕНТІВ ІМС ТА МСТ	34
2.1. Механізм хімічної обробки кремнієвих пластин.	34
2.2. Технохімічна обробка пластин.	41
2.3. Термохімічне (газове) та іонно-плазмове травлення кремнієвих пластин.	45
РОЗДІЛ 3. ФОРМУВАННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ПЛІВОК НА НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПЛАСТИНАХ	49
3.1. Конструктивно-технологічні функції діелектричних плівок.	49
3.2. Технологія формування плівок SiO ₂ термічним окисненням кремнію.	50
3.3. Технологія осадження діелектричних плівок на поверхні пластин.	56
3.4. Параметри якості діелектричних плівок.	59
РОЗДІЛ 4. ОСНОВИ ЛІТОГРАФІЧНИХ ПРОЦЕСІВ	62
4.1. Загальні поняття про фотолітографію.	62
4.2. Фоторезисти та їх основні характеристики.	64
4.3. Основні операції фотолітографічного процесу.	67
4.4. Еліонні методи літографії.	75
4.4.1. Принципи еліонної літографії.	75
4.4.2. Електронно-променева літографія.	75
4.4.3. Рентгенівська літографія.	77
4.4.4. Іонно-променева та голографічна літографії.	79
РОЗДІЛ 5. ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ ВИГОТОВЛЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ МСТ	83
5.1. Технологія об'ємної мікрообробки.	85
5.2. Технологія поверхневої мікрообробки.	89
5.3. LIGA-технологія.	93
5.4. MUMPs-технологія.	95

5.5. SUMMiT-технологія.	97
5.6. Волоконна технологія.	98
РОЗДІЛ 6. СЕНСОРНІ ЕЛЕМЕНТИ МСТ	100
6.1. Сенсори температури на основі термопар.	100
6.2. Сенсори кутових швидкостей.	104
6.2.1. Волоконний оптичний гіроскоп.	104
6.2.2. Мікромеханічні гіроскопи.	105
6.3. Сенсори магнітного поля.	110
6.3.1. Елемент Холла.	110
6.3.2. Двохколекторний магнітотранзистор.	112
РОЗДІЛ 7. МІКРОМЕХАНІЧНІ ЕЛЕМЕНТИ МСТ У СИЛОВОМУ ПОЛІ	114
7.1. Закон Гука.	114
7.2. Момент інерції перерізу.	116
7.3. Жорсткість мікромеханічних елементів при вигині.	119
7.4. Жорсткість мікромеханічних елементів при зсуві (крученні).	120
7.5. Демпфування коливань мікромеханічних елементів.	120
РОЗДІЛ 8. АКТЮАТОРНІ ЕЛЕМЕНТИ МСТ	122
8.1. Мікронасоси.	126
8.1.1. Електрогідродинамічні мікронасоси.	126
8.1.2. Механічні мікронасоси з активними клапанами.	127
8.1.3. Механічні мікронасоси з пасивними клапанами.	128
8.2. Інтегральні мікродзеркала.	130
8.3. Інтегральні мікромеханічні ключі.	138
8.4. Інтегральні мікродвигуни.	143
8.4.1. Електростатичні повітряні планарні мікродвигуни.	144
8.4.2. Електростатичні діелектричні планарні мікродвигуни.	147
8.4.3. П'єзоелектричний мікродвигун.	149
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	151

ПЕРЕДМОВА

Аналіз сучасного стану мікроелектроніки дозволяє зробити висновок про те, що з кінця 80-х – початку 90-х років одним з науково-технічних напрямів, що найбільш динамічно розвиваються, є розробка, дослідження і використання мікросистем.

В якості збірного поняття, що найбільш часто використовується для розширеного тлумачення напряму, пов'язаного із створенням мікросистем, в англійській літературі застосовують скорочення MST (microsystem technology), що дослівно означає “технологія мікросистем”. В Росії найбільше розповсюдження отримав термін “мікросистемна техніка (МСТ)” (microsystem engineering), який містився в документі “Нові пріоритети науки і техніки”, затвердженому урядовою комісією з науково-технічної політики.

Обсяг робіт по розробці, дослідженню і використанню МСТ в 2004 р. перевищив 30 млрд доларів і продовжує рости. Причому обсяг розробок в області систем подачі рідини і газу, аналітичних ДНК-чипів, оптичних і мікромеханічних ключів, мережних затворів і мікродвигунів в цьому ж році склав 9,8 млрд доларів. Такі країни як США, Японія, Німеччина мають національні програми теоретичних і прикладних робіт в даному напрямі.

Елементами мікросистемної техніки називають пристрої з інтегрованими в об'ємі або на поверхні твердого тіла електричними, оптичними і мікромеханічними структурами. Статична або динамічна сукупність цих структур забезпечує реалізацію процесів генерації, перетворення, передачі енергії і механічного руху в інтеграції з процесами сприйняття, обробки, передачі і зберігання інформації, які діють в необхідних умовах експлуатації із заданими функціональними, енергетичними, часовими і надійнісними показниками.

В рамках даного напряму створюються мініатюрні чутливі (сенсорні) і виконавчі (актюаторні) системи, в основі функціонування яких лежить використання класичних принципів механіки, оптики, електротехніки і фізики твердого тіла.

Лідуючими організаціями в області розробки і дослідження елементної бази і засобів проектування МСТ є Berkeley Sensor & Actuator Center (BSAC), University of California (USA), Tanner Research (USA), Tima-CMP (France), Analog Devices (USA), Sandia National Laboratories (USA), Texas Instruments Inc. (USA), Московський інститут електронної техніки (Технічний університет, Росія), Центр мікротехнології і діагностики Санкт-Петербурзького державного електротехнічного університету (Росія) та ін.

У вступі подаються огляд сучасного стану і напрямків розвитку МСТ, аналіз ринку МСТ, використання мікросистемних технологій та приклади проектування мікросистем.

Перша частина посібника (перший – четвертий розділи) присвячена технологіям підготовки напівпровідникових пластин для їх використання у пристроях МСТ, які, по суті, є аналогічні технологіям, що використовуються при виробництві ІМС. Зокрема, в першому розділі приводиться огляд

технологій механічної обробки підкладок. Другий розділ стосується технології хімічної обробки підкладок. В третьому розділі говориться про механізми формування діелектричних плівок на напівпровідникових пластинах. В четвертому розділі висвітлюються питання, пов'язані з проведенням літографічних процесів, та розглядаються основні методи проведення літографії.

В другій частині посібника (п'ятий – восьмий розділи) розглядаються питання, пов'язані безпосередньо з технологією виготовлення пристроїв МСТ. В п'ятому розділі йдеться про технологічні процеси виготовлення елементів МСТ, де подаються основні сучасні методи мікрообробок напівпровідникових пластин, наводяться переваги та недоліки розглядуваних методів. В шостому розділі розглядаються сенсорні елементи МСТ, зокрема, сенсори температури на основі термопар, одні з найскладніших і нових сенсорів – сенсори кутових швидкостей, принцип дії яких базується на тензорезистивному і п'єзоелектричному ефектах, ефекті зміни електричної місткості електромагнітних явищах, ефекті зміни частоти коливань, та сенсори магнітного поля на основі перетворювачів Холла і двохколекторних магнітотранзисторів, принцип дії яких базується на використанні ефектів, що виникають при одночасній дії на напівпровідник електричного і магнітного полів. В сьомому розділі висвітлюється поведінка мікромеханічних елементів МСТ в силових полях, наводяться основні поняття та закони, що описують таку поведінку. У восьмому розділі описуються актюаторні елементи МСТ. Особлива увага приділяється мікронасосам на основі електрогідродинамічного ефекту, механічним мікронасосам з активними і пасивними клапанами, інтегральним мікродзеркалам та інтегральним мікромеханічним ключам. Розглядається принцип їх роботи, переваги і недоліки.

Автори свідомі того, що даний посібник не може охопити весь спектр питань теорії, структури, конструкції мікроелектромеханічних пристроїв, тому нами наведені лише їх основи. Ми з вдячністю сприйmemo критичні зауваження та побажання від спеціалістів, що працюють в напрямку створення та застосування пристроїв, та науково-педагогічних працівників, які готують спеціалістів в базовому напрямку “Твердотільна електроніка електроніка”, “Мікросистемна техніка” та суміжних з ними спеціальностей, щодо покращення даного учбового посібника.

Автори

ВСТУП

1. Огляд сучасного стану і напрямків розвитку МСТ

Мікросистемна техніка є в даний час одним з міждисциплінарних науково-технічних напрямів, які найбільш динамічно розвиваються, що визначає нову революцію в області систем, які реалізуються на мікрорівні. Строго кажучи, мікросистемна техніка (МСТ) – це науково-технічний напрям, метою якого є створення в обмеженому об'ємі твердого тіла або на його поверхні мікросистем, що є впорядкованими композиціями областей із заданим складом, структурою і геометрією, статична або динамічна сукупність яких забезпечує реалізацію процесів генерації, перетворення, передачі енергії і руху в інтеграції з процесами сприйняття, обробки, трансляції і зберігання інформації при виконанні запрограмованих операцій і дій в необхідних умовах експлуатації із заданими функціональними, енергетичними, тимчасовими показниками і показниками надійності. Мікросистеми можуть забезпечувати виконання всіх вищеперелічених функцій або частини з них.

При цьому особливістю мікросистем нового покоління є необхідність забезпечення тривалої їх експлуатації при перенесенні енергії, заряду, інформації не тільки в умовах стаціонарного твердого тіла, але і коли об'єкт (частина об'єкту) мікросистемної техніки або середовище, що контактує з ним, знаходяться у взаємній просторово - часовій динаміці.

Разом з цим перехід на мікрорівень вимагає при створенні мікросистем різного функціонального призначення нового покоління врахування чинників масштабування, геометричних розмірів на властивості матеріалів, а також особливостей їх інтеграції в єдиному об'ємі з позицій кристалохімічної, термомеханічної, електромагнітної, хімічної сумісностей, теплової, електричної, механічної стійкості, стійкості до дії агресивних середовищ і радіації, а також часової стабільності.

За аналогією з мікроелектронікою, яка втілила свій теоретичний заділ в перших інтегральних мікросхемах, створених в 1958-1961 рр., в рамках реалізації цільової функції – поліпшення масогабаритних показників, надійності, швидкодії, відношення функціональної складності до вартості – основним замовником і фінансистом “ранніх” об'єктів МСТ (1975-1987 рр.) у вигляді мікроелектромеханічних приладів (датчиків тиску, акселерометрів) був авіаційно-космічний комплекс. Поява на ринку споживання автомобілебудівників остаточно сформувала вимоги до характеристик “класичних” виробів МСТ: масогабаритні показниках, вартість, надійність, відтворюваність, масовість, номенклатура. Ініціюючим чинником в розвитку МСТ стала поява так званих мікроелектромеханічних систем (англійська аббревіатура MEMS – microelectromechanical systems), в яких гальванічні зв'язки знаходяться в тісній взаємодії з механічними.

Найбільш яскравими конструктивно-технологічними відмітними особливостями МСТ нового покоління є:

- активне використання третього вимірювання (3D-системи);
- інтеграція електричних і оптичних зв'язків з механічними;
- інтеграція фізико-хімічних і технологічних базисів мікро- і біотехнології;
- інтеграція виконувано-технологічних і контрольних-діагностичних процедур в мікрооб'ємах і на поверхні твердого тіла.

З середини 90-х років в якості найбільш часто використовуваного збірного поняття для розширеного тлумачення напряму, пов'язаного із створенням мікросистем, в англійській літературі застосовують скорочення MST (microsystem technology), що дослівно означає "технологія мікросистем". У Росії найбільшого поширення набув термін "мікросистемна техніка".

Країни, які в сучасних умовах фактично визначають науково-технічний прогрес, використовують по відношенню до напрямку "мікросистемна техніка" терміни "критичні технології", тим самим надаючи програмам статус національних, пріоритетних.

В даний час загальноприйнято, що MST має пріоритетне значення для оборонної технології, забезпечення ядерної та екологічної безпеки держави, розвитку біотехнологій та медичного обслуговування населення.

Тому, безперечно, даний напрямок є дуже перспективним для вивчення, дослідження та технологічних розробок.

2. Аналіз ринку MST

Інтеграція досягнень в галузі електроніки, механіки, інформатики і вимірювальної техніки, поєднаної тенденцією до мікромініатюризації, визначили зародження нових інтегральних мікросистемних технологій в кінці 80-х – початку 90-х років минулого століття. Величезна кількість університетів і комерційних компаній США і Японії сконцентрувала свої зусилля на розвитку технологій МЕМС. Аналіз динаміки ринку МЕМС, виконаний NEXUS (органом Європейської Комісії), показав, що об'єм ринку збільшується щорічно в середньому на 18 % і складає в даний час понад 40 млрд. доларів. Більш детально структура ринку МЕМС приведена на рис. 1.

Необхідно відзначити, що за останні роки розроблені нові класи МЕМС на основі кремнію, які забезпечили революційне впровадження нових технічних засобів мобільного зв'язку і оптоелектроніки, у тому числі:

1) Радіочастотні МЕМС-фільтри для мобільних телефонів, що забезпечують в діапазоні частот 3 ... 300 МГц високу добротність – 200 ... 300 (замість 20 ... 30 в мікроелектронному виконанні);

2) Мікродзеркальні комутатори (2 x 2,1 x 4 мм) для оптоволоконних каналів зв'язку на частоти 3 ... 30 ГГц.

У 90-ті роки ХХ століття до суперництва двох світових лідерів в області МЕМС (США і Японія) активно підключилися країни Європи і Південно-Східної Азії. Наприклад, кількість університетів і комерційних

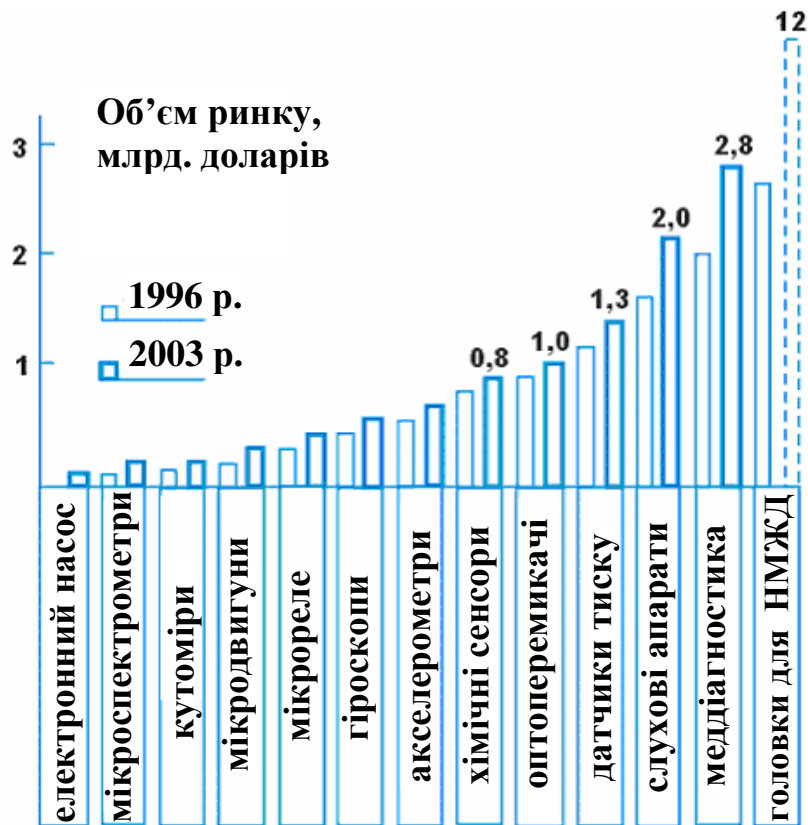


Рис. 1. Структура світового ринку мікросистемної техніки

компаній, що займаються дослідженнями і розробкою в галузі створення МЕМС, в Німеччині до 1997 року стала в 1,5 рази більше, ніж в США і практично зрівнялося з Японією. В 1998 році за замовленням управління перспективних досліджень Міністерства оборони США вперше була прийнята програма по МЕМС, яка називалася “МЕМС – Microelektromechanical Systems”. На розвиток цієї програми США щорічно виділяло по 35 млн. доларів, що перевищує подібні інвестиції інших країн.

Узагальнюючи сучасний стан в області стимулів і чинників, які сприяють розвитку МСТ, можна виділити:

- наявність наукової і технологічної культури, що сформувалася в період становлення і розвитку мікро- і оптоелектроніки;
- наявність базового устаткування, виробничих потужностей і організаційної інфраструктури мікроелектронного виробництва, придатної для реалізації на них об’єктів МСТ;
- активний ринок сенсорних систем різного функціонального призначення і конструктивного виконання;
- тенденції до інтеграції процесів мікро- і біотехнології, принципів функціонування і матеріалів;
- поява на ринку систем обробки інформації і керування перспективного покоління інтегральних схем з нейроподібною структурою, що забезпечують новий рівень “інтелектуальних” можливостей і швидкодію

мікросистем при збереженні або поліпшенні колишніх масогабаритних і енергетичних показників;

- перспективи нового активного ринку в області мініатюрних недорогих діагностичних систем контролю за життєдіяльністю людини на основі концепції економічної доцільності масової профілактики захворювання по відношенню до їх лікування;

- формування ринку устаткування для технологій на мікрорівні (крім мікроелектронних) за рахунок широкого розвитку біотехнології і посилення вимог до роботи з радіоактивними, токсичними, вибухонебезпечними речовинами, що визначає перехід на використання надмалих кількостей речовин в обмежених об'ємах.

В даний час загально визнано, що МСТ має пріоритетне значення для оборонної промисловості, забезпечення ядерної і екологічної безпеки держави, розвитку біотехнології і медичного обслуговування населення.

Створювана в рамках напряму “мікросистемна техніка” продукція характеризується:

- новизною;
- наукоємністю;
- конкурентоспроможністю;
- низькою енергоємністю;
- широким ринком споживання.

Ефект від реалізації робіт в області мікросистемної техніки визначається:

- створенням приладів і машин нового покоління з низькою матеріало- і енергоємністю, які забезпечують рішення традиційних і раніше неприступних задач в умовах скорочення необхідних робочих площ, зниження екологічного впливу на оточуюче середовище, підвищення безпеки роботи людини;

- використанням інтегрально-групових принципів виробництва, що створюють передумову до зниження собівартості продукції, яка стає доступною широкому колу споживачів, включаючи сфери науки, освіти, медицини, малого і середнього бізнесу;

- широким використанням при створенні технологічних мікросистем стандартного устаткування мікроелектронного виробництва, яке в даний час, в Україні, як правило, не розвивається за прямим призначенням;

- можливістю реалізації раніше неприступних процесів в умовах мікрооб'єктів і при використанні надмалих кількостей речовин, що зменшує витрати на стадії проведення досліджень і знижує потребу в дорогих матеріалах;

- високою ефективністю аналітико-діагностичних мікросистем в умовах вирішення задач по профілактиці захворювань, тобто збереженню “людського капіталу”.

3. Основні напрямки і особливості розвитку виробів МСТ

В наш час найбільш поширеною базою є КМОН- технології і структури на цій основі для створення МСТ. В табл. 1 представлені основні напрями розвитку виробів МСТ.

Таблиця 1. Основні напрями і особливості розвитку виробів МСТ

Найменування	Країна	Розробник	Особливості	Примітка
SEMS – Sandia Embedded Micromechanical Systems	США	Лабораторія “Сандія”	Розроблена технологія забезпечує створення МЕМС з мінімальною топологією 0,5 мкм	У лабораторії організовані відділення робототехніки і штучного інтелекту
Оптичний перемикач-мультиплексор	США	Лабораторія “Сандія”	Виконаний на основі МЕМС з набором з 250 мікродзеркал за технологією SUMMiT-Vsurface MEMS	Готується перемикач, що складається з 1000 мікродзеркал
Чутливі елементи датчиків на основі карбїду кремнію	СНД	ЛЕТІ	Датчики забезпечують лінійність вимірювальних характеристик до температури 450°C	Аналогічні зарубіжні кремнієві прилади забезпечують максимальну температуру до 125°C
Мікроелектро-механічний спектрограф	США	Окрїджська лабораторія	Має об’єм 6 см ³ , що в три тисячі раз менше його неінтегрального аналога	Може застосовуватися в моніторингових і аварійних системах безпеки хімічних підприємств
Прототип ЛНК (“Лабораторії на кристалі”)	США	Массачусетський технологічний інститут	Містить 34 мікрорезервуари по 24 нм, сформовані методом наскрізного травлення кремнієвих підкладок і закритих золотими мембранами завтовшки 0,3 мкм	За оцінкою фахівців, може привести до революції в приладобудуванні (для аналізу ДНК людини або контролю шкідливих речовин)
Особливо стійкі МЕМС	США	Ліверморська лабораторія	Розроблені МЕМС забезпечують особливу стійкість до радіаційних, хімічних і теплових дій	Отримання особливо стійких МЕМС забезпечується використанням карбїду кремнію як вихідного матеріалу
Мініатюрний літальний апарат	США	Кооперація організацій	Розмах крил – 15 см; вага – 80 г; висота	Забезпечує передачу відеозображення на

“Black Widow”		і фірм	польоту – 230 м; швидкість – 70 км/год; час польоту – 30 хв; ККД двигуна – 82 %; дві відеокамери по 2 г кожна	відстань до 2 км в реальному масштабі часу
---------------	--	--------	---	--

Аналіз сучасного ринку устаткування для МСТ показує, що останній формується за рахунок активного розвитку біотехнології на фоні боротьби з тероризмом, посилення вимог до роботи з радіоактивними, токсичними і вибухонебезпечними речовинами, що викликає перехід на використання малих кількостей речовин в обмежених об’ємах і створення “лабораторій на кристали” і біокристалів. Можливі напрями використання технічних засобів МЕМС і МСТ для вирішення спеціальних задач приведені в табл. 2.

Таблиця 2. Можливі напрями використання МЕМС в спеціальній техніці

МСТ	Напрямок розробок	Напрямок використання в спеціальній техніці
Мікроелектромеханічні системи і машини	Мікромеханізми, мікропривід, мікродвигуни	Спеціальна робототехніка
Оптико-механічні мікросистеми	Мікрооптика, оптико-механічні інтегральні схеми	Спецзв’язок, акустичний контроль та ін.
Біотехнічні мікросистеми	Мініатюрні автономні системи для діагностики організму і заміщення органів	Спеціальні засоби антитерору
Мікросистеми енергозабезпечення	Автономні мініатюрні джерела енергії, мікротурбіни, мікросистеми рекуперації енергії	Спеціальні технічні засоби
Сенсорні мікросистеми	Мультисенсори, інтелектуальні сенсори, сенсори із зворотнім зв’язком	Захист інформації, об’єктів і особи
Мікроаналітичні системи	Мініатюрні аналітичні прилади	Сучасні криміналістичні засоби
Технологічні мікросистеми	Мікрореактори, мікроінструмент, мікрорегулятори, мікронасоси	Спеціальний інструмент
Міні- і мікро-робототехнічні системи	Автономні багатофункціональні діагностичні і технологічні міні-системи спеціальних умов експлуатації	Спеціальна робототехніка

Необхідно відзначити, що активному розвитку МСТ сприяють три основні обставини:

1) наявність базового устаткування, виробничих потужностей і організаційної інфраструктури мікроелектронного виробництва, придатної для реалізації на них об'єктів МСТ (при існуючому рівні технології в 1 ... 10 мкм);

2) наявність наукової і технологічної культури (в першу чергу, в області мікро- і оптоелектроніки);

3) обширний ринок сенсорних систем різного напрямку (у тому числі, в галузі забезпечення безпеки).

Як вже вказувалося вище, в становленні МЕМС найбільший вплив зробив процес інтеграції сучасних засобів, систем і технологій. Тому для оцінки перспектив розвитку МЕМС скористаємося коефіцієнтом рівня інтеграції

$$K = T \cdot M,$$

де T – число транзисторів, а M – число механічних компонент. Стан і перспективи інтеграції МСТ показано на рис. 2.



Рис. 2. Стан і перспективи інтеграції МСТ:

- 1 – більшість існуючих МЕМС;
- 2 – акселерометр ADXL-50;
- 3 – оптомеханічні дисплеї DMD.

Представлений рисунок добре ілюструє інтеграційні можливості мікросистемної техніки. Так наприклад, для акселерометра ADXL-50, що серийно випускається і виготовляється за технологією з топологічними

нормами 2-10 мкм (що містить 100...200 транзисторів і 1 механічний елемент) коефіцієнт інтеграції $T \cdot M = 10^2$, а для кристала мікродзеркального дисплея (1млн. механічних елементів екрану і 1 млн. керуючих транзисторів) одержимо $T \cdot M = 10^{12}$. Аналогічно побудовані й інші області інтеграції.

4. Використання мікросистемних технологій

Застосування мікросистемних технологій дає можливість отримати ряд переваг, а саме:

– мініатюризація: заощадження матеріалів, заощадження потужності, менший час спрацювання, краща продуктивність;

– інтеграція: інтеграція з ІС та іншими системами, зменшення розмірів системи, витрат, швидкі нейросистеми, адаптери, проводи взаємозв'язку і т.д.;

– групове виробництво: дешево, доступно.

– наближення мікросвіту, якого досі не спостерігалось, можливість мініатюризувати біомедичні системи, катетери тощо.

МЕМС класифікують за принципом дії:

⇒ Механічні перетворювачі:

□ механічні датчики: прилади для вимірювання напруг, акселерометри, гіроскопи, датчики тиску, датчики дотику;

□ механічні актюатори: електростатичні, теплові, сплав пам'яті форми, пневматичні, гідравлічні, п'єзоелектричні, магнітні, хімічні;

□ механічні контури (схеми): механічні резонатори, реле, ВЧ-перемикачі;

⇒ Оптичні перетворювачі:

□ оптичні датчики:

1. прямого вимірювання: фотопровідні датчики (керовані фотодатчики), фотодетектори на *p-n*-переходах, ємнісні фотодатчики;

2. непрямого вимірювання:

□ теплові оптичні детектори;

□ оптичні актюатори: світлові емітери, світлові модулятори (рідкокристалічні дисплеї, відображаючі мікромеханічні модулятори світла, передавальні мікромеханічні модулятори світла);

□ оптичні структури: волоконні оптопари, відбиваючі компоненти (дзеркала), передавальні компоненти (хвилеводи, лінзи), фільтри, інтегровані оптичні системи;

⇒ Теплові перетворювачі:

□ датчики температури: теплорезистивні, терморезистори, контактні (перехідні) теплотатчики, акустичні, тунельні;

□ теплові датчики: теплові газові датчики тиску (газу), датчики потоку (струму, дефектів), датчики вологості;

□ теплові актюатори: рефрижератори, кулери, теплові насоси на ефекті Пельтьє;

- ⇒ Магнітні перетворювачі:
 - магнітні сенсори: на ефекті Холла, на доменних носіях, тунельні, електронно-вакуумні;
 - магнітні актюатори: мотори, детектори вихорів, магнітні головки запису-зчитування;
 - електромагнітні мікроприлади: котушки індуктивності (індуктори);
- ⇒ Хімічні і біологічні перетворювачі:
 - хімічні сенсори: пасивні хімічні сенсори, електрохімічні перетворювачі, датчики акустичних хвиль, біодатчики, хімічні датчики;
 - хімічні актюатори: електрохімічні актюатори, полімерні механічні актюатори, тонкоплівкові батареї;
 - біоелектричні інтерфейсні (погоджувальні) пристрої: проникливі мікрозонди, нейроелектроди відновлення, розвинені клітинні системи (культивовані);
- ⇒ Рідинні пристрої:
 - потокові канали, змішувачі, дифузні екстрактори, рідинні підсилювачі і логіка, насоси, клапани (вентилі), розділювачі (сепаратори), крапельні генератори, фільтри, пастки, взаємозв'язувачі;
 - рідинні датчики: датчики потоку, датчики в'язкості, густини;
- ⇒ Перетворювачі іонізуючої радіації:
 - детектори радіації.

5. Проектування мікросистем

Знання, які потрібні для проектування мікросистем, можна окреслити наступною схемою (рис. 3).

Цикли проектування МЕМС та інтегральних схем відрізняються між собою як тривалістю, так і можливістю внесення змін (рис. 4, 5).

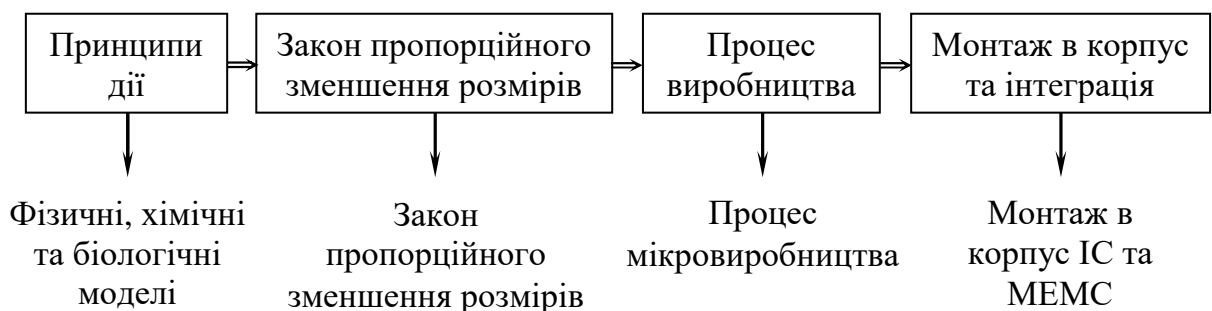


Рис. 3. Типова схема проектування мікросистем

Процес проектування ІС вибирається з обмеженням технології (МОН, біполярна), топологія є єдиною змінною проектування. Типовий час циклу – 3-6 місяців.

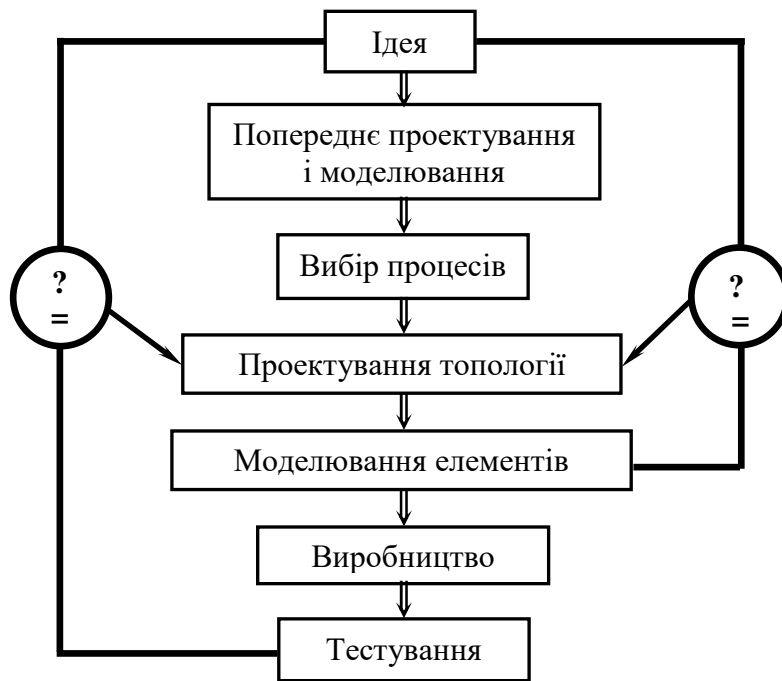


Рис. 4. Типовий цикл проектування інтегральних схем

Простір проектування МЕМС є широко відкритий, завжди доступний для змін. Типовий час циклу – 6-12 місяців.

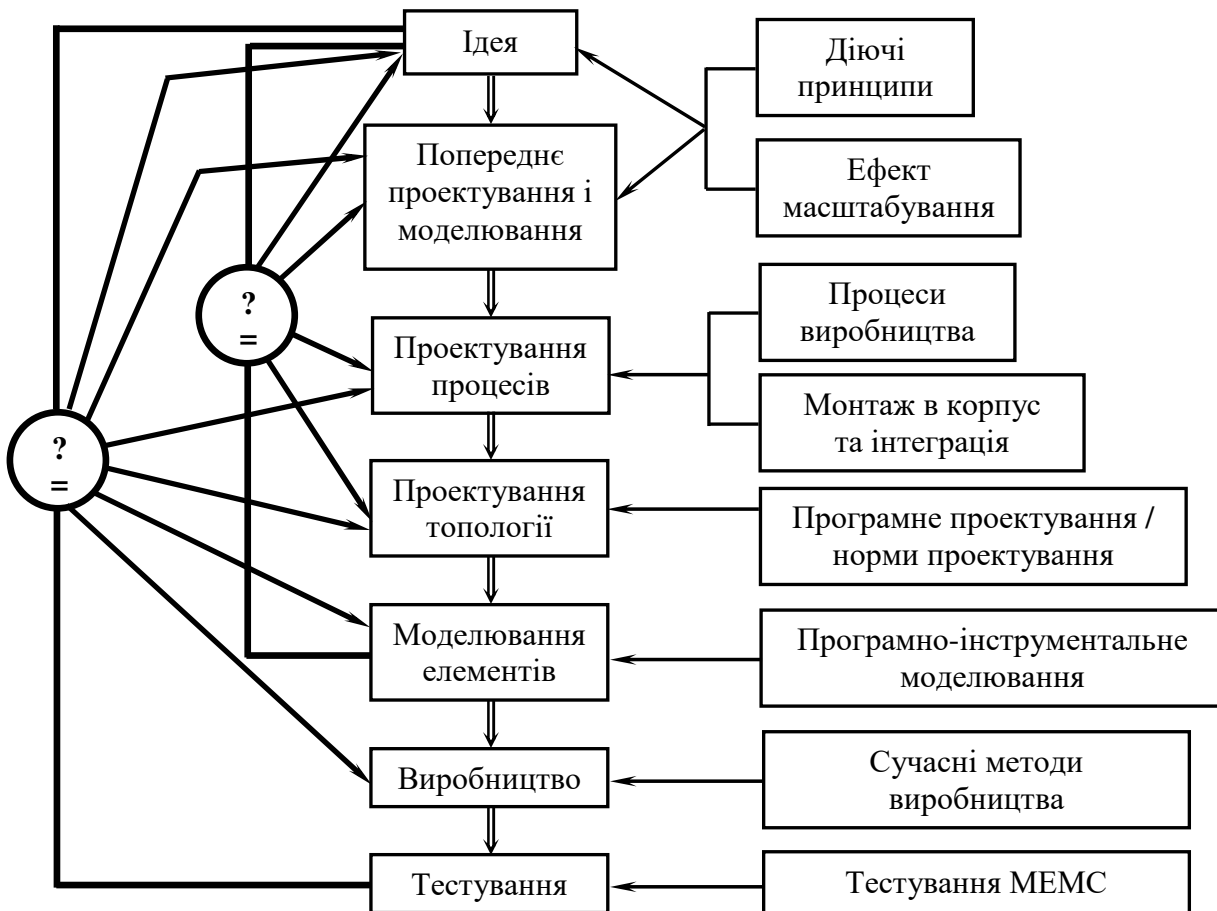


Рис. 5. Типовий цикл проектування МЕМС

Розділ 1 Технологія механічної обробки підкладок для елементів ІМС та МСТ

1.1. Типи і основні характеристики підкладок

Підкладкою (пластиною) називають несучу частину ІМС чи МСТ, на (в) якій формуються шари, елементи і компоненти ІМС чи МСТ. Підкладка виконує як конструктивно-технологічні, так і електричні функції і є, як правило, ізолятором між елементами вказаних пристроїв.

Реальна поверхня підкладки, на (в) якій створюються елементи ІМС чи МСТ, неідеальна. Вона має велику кількість можливих порушень у вигляді мікроскопічного розміру подряпин, сколів, западин, горбиків та інших дефектів. Природно, що ці дефекти сильно впливають на механізм процесів зародження і росту шарів, розчинення (травлення), які протікають на таких поверхнях. При отриманні епітаксійних, дифузійних і тонких полікристалічних шарів наявність дефектів позначається негативно на більшості найважливіших фізико-технологічних властивостей плівок. В той же час при формуванні товстих плівок з композитних паст певний ступінь шорсткості поверхонь підкладок необхідний для стимулювання адгезії до них цих плівок. Тому при створенні різних типів ІМС використовуються різні типи обробки підкладок. Проте, незалежно від матеріалу і технології обробки підкладок необхідно прагнути до того, щоб їх поверхні були однорідними, тобто ступінь шорсткості, глибина порушеного шару, конфігурація поверхневих нерівностей та інші дефекти не мали великих відхилень від середніх величин.

Підкладка є одним з найважливіших конструктивних елементів. Проходячи весь технологічний процес (ТП), вона піддається складним механічним, термічним, фізичним і хімічним впливам. Ці дії різною мірою позначаються на властивостях функціональних елементів ІМС, сформованих на підкладках.

Наявність трьох конструктивно-технологічних варіантів ІМС (рис. 1.1) обумовлює принцип підходу до вибору матеріалів, електрофізичних

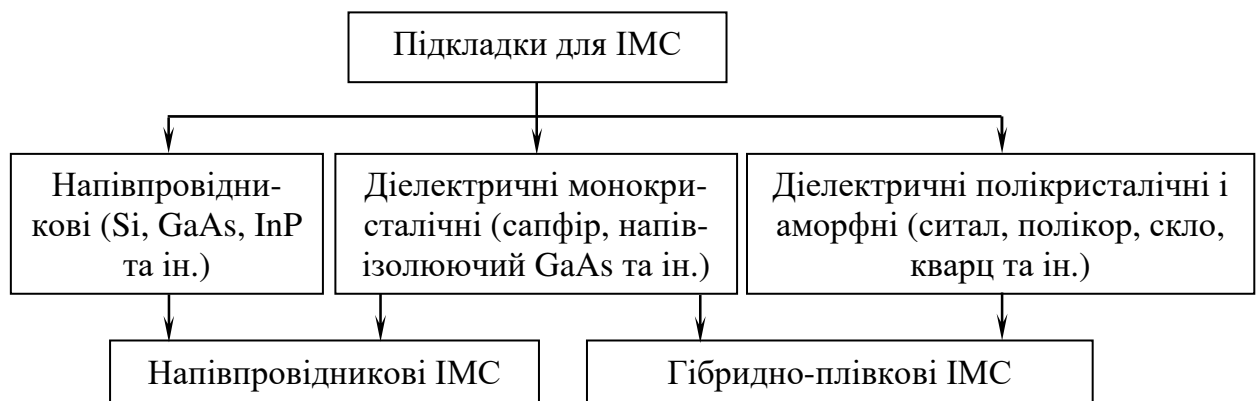


Рис. 1.1. Варіант класифікації підкладок

властивостей, структури і методів обробки підкладок. Найбільш жорсткі вимоги до підкладок пред'являє технологія напівпровідникових ІМС. Поверхня монокристалічних підкладок повинна бути особливо чистою і гладкою, мати досконалу структуру (густина дефектів не більше 10^2 см^{-2}) і строго задані електрофізичні параметри з мінімальним розкидом. При виготовленні тонко- і товстоплівкових ІМС застосовуються відповідно і керамічні підкладки, які, як правило, проходять тільки хімічне очищення.

Якщо підкладки формуються безпосередньо в процесі виготовлення ІМС, то технологія їх отримання повинна забезпечити задані значення електрофізичних параметрів: коефіцієнта термічного розширення (КТР), міцності на згин, теплопровідності та ін.

На рис. 1.2 показана послідовність технологічної обробки підкладок. Проте на практиці можуть використовуватися не всі стадії обробки, вказані на схемі. В той же час в деяких спеціальних випадках вводять додаткові процеси обробки підкладок.

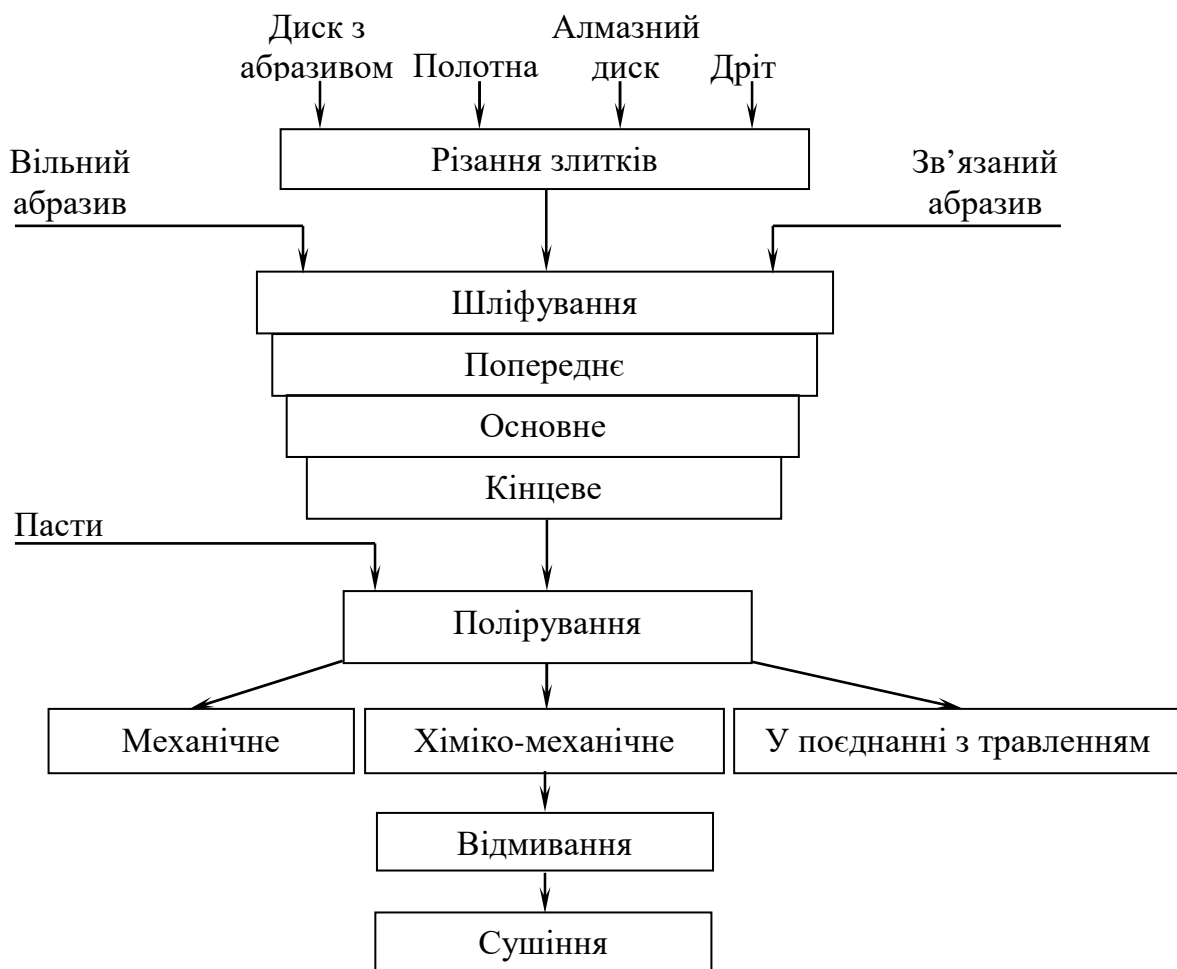


Рис. 1.2. Послідовність технологічної обробки пластин

За технологічною ознакою підкладки напівпровідникових ІМС можна розділити на дві великі групи. До першої відносяться ті, які беруть участь в ТП на перших стадіях виготовлення ІМС. Вони відіграють роль не тільки несучих конструкцій, але і вихідних поверхонь для дифузії чи осадження епітаксійного шару в технологічних операціях виробництва ІМС.

На кінцевих стадіях виготовлення ІМС матеріал таких підкладок цілком або частково видаляється, а отримана на них робоча частина структури ІМС переноситься на інші підкладки, які вже є не тільки несучими конструкціями, але і виконують функціональну роль, забезпечуючи електричну ізоляцію між елементами і компонентами ІМС. Дана функціональна роль зберігається як в подальших операціях виробництва, так і при експлуатації ІМС. Типовий представник першої – групи кремнієві підкладки, використовуються в епік-, декаль-, діак-процесах виготовлення напівпровідникових ІМС.

До другої групи відносяться підкладки, що відіграють роль несучих конструкцій і виконують електронні функції від початку і до кінця ТП, зберігаючи їх і при експлуатації ІМС. Представниками другої групи є: підкладки з напівпровідникових кремнію, арсеніду галію та інші, які здійснюють електричну ізоляцію оборотно-зміщеним $p-n$ -переходом; напівпровідникові підкладки для МОН-ІМС; монокристалічні діелектричні підкладки типу сапфірових для виготовлення структур кремній на сапфірі (КНС) і гранатових для приладів на ПАХ.

Проблема якісної підготовки поверхні підкладок у виробництві напівпровідникових ІМС вкрай важлива для всіх класів виробів. Параметрами якості обробки підкладок вибирають наступні характеристики: товщину оксидів на поверхні підкладок; мікронерівності рельєфу поверхні; мікронапруженість поверхневого шару; густина дислокацій в приповерхневому шарі; ступінь фізичної і хімічної забрудненості поверхні; структурна досконалість епітаксійних шарів, вирощених на підкладці; густина поверхневих станів на межі розділу Si-SiO₂.

Технологічні фактори, що впливають на параметри якості пластин, надзвичайно різноманітні, і ступінь цього впливу з різних позицій вивчався багатьма дослідниками. Складність проблеми пояснюється тим, що хіміко-механічна (або хіміко-динамічна) обробка пластин здійснюється на самих різних стадіях технології ІМС. Тому дефекти, що виникають при цій обробці, можуть з'являтися і проявлятися на різних етапах виробництва ІМС. Але, очевидно, існують якісь загальні закономірності формування якісної поверхні кремнієвих пластин, які пов'язують технологічні фактори і залежні від них параметри якості пластин. Була виявлена технологічна спадковість появи дефектів в структурах, створених на підкладках, що пройшли різні (механічну, хіміко-механічну і термічну) обробки. Встановлено вплив факторів хіміко-механічного полірування пластин кремнію на густина поверхневих станів на межі Si-SiO₂, отриманої окисненням кремнію; способів передепітаксійної обробки на якість епітаксійного шару і т.п.

В більшості типових ТП виготовлення ІМС підкладки поступають у виробництво як вихідні матеріали. Тоді процеси їх очищення і “доведення” до потрібної якості можуть розглядатися як підготовчі операції перед основними процесами створення конструкцій (або структур) елементів ІМС. Висока досконалість структури монокристалічних підкладок необхідна для

будь-якого їх застосування, оскільки концентрація дефектів структури безпосередньо впливає на вихід придатних ІМС.

1.2. Структура підкладок та їх маркування

Монокристали кремнію володіють кубічною ґраткою типу алмазу. Положення атомів в алмазних ґратках можна зобразити у вигляді двох гранецентрованих кубів, що частково перетинаються, початок координат яких зміщений один відносно одного по всіх осях на $1/4$. В результаті кожен атом оточений чотирма симетрично розташованими в просторі сусідніми атомами. Арсенід галію володіє ґраткою, яка відрізняється від ґратки алмазу тим, що в її вузлах атоми миш'яку чергуються з атомами галію.

Монокристалічні матеріали володіють анізотропією фізичних, електричних і механічних властивостей, тобто відмінністю цих властивостей в різних кристалографічних площинах і напрямках. Вузли, площини і напрями в кристалічній решітці позначаються індексами Міллера. На рис. 1.3 подано позначення кристалографічних площин і напрямів для кристалів з кубічною ґраткою.

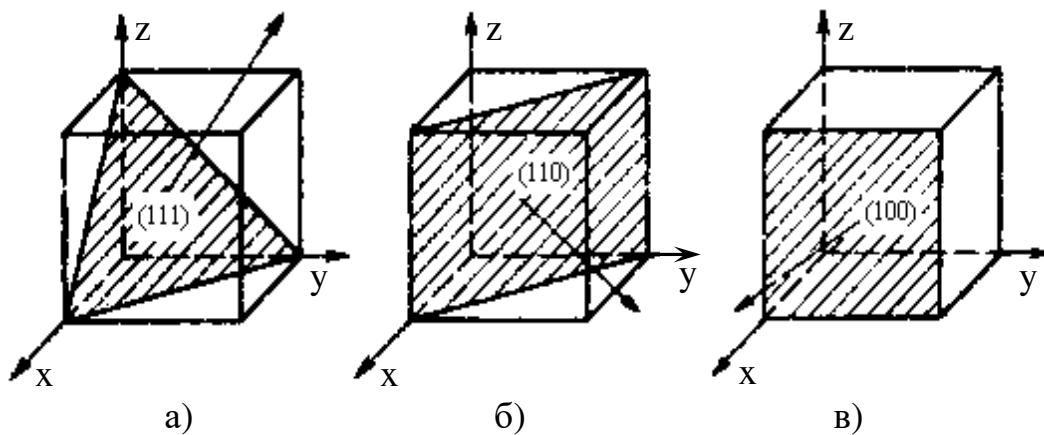


Рис. 1.3. Умовні позначення кристалографічних площин і напрямків для кристалів з кубічною ґраткою:

а) площина (111) з напрямком [111]; б) площина (110) з напрямком [110]; в) площина (100) з напрямком [100].

Для позначення кристалографічних напрямів індекси беруть в квадратних дужках, наприклад [111]; сукупності еквівалентних напрямів в кутові, наприклад $\langle 111 \rangle$; сімейства еквівалентних площин у фігурні, наприклад {100}. У кубічній системі однойменні напрями і площини взаємно перпендикулярні. Кожна площина має певне число атомів, густина упаковки яких здійснює вплив на електрофізичні, фізико-хімічні і механічні властивості матеріалу. Напівпровідникові матеріали вирощують так, щоб їх осі співпадали з напрямом [111]. Як видно з рис. 1.4, з такого злитка можна вирізувати пластини з будь-якою площиною орієнтації. Пластини, орієнтовані в площині (111), мають майже правильну круглу форму

(рис. 1.4, а). Розглядаючи взаємне розташування площин в кристалі (рис. 1.4, б), неважко встановити, що одна із площин (110) перпендикулярна площині (111), а інша розташована до неї під кутом близько 35° . Тому пластини з орієнтацією (110), вирізані із злитка, вирощеного в напрямку [111], мають форму прямокутника або еліпса. Площини (100) знаходяться по відношенню до площини (111) під кутом близько 55° (рис. 1.4, в), а пластини з орієнтацією (100) мають еліптичну форму.

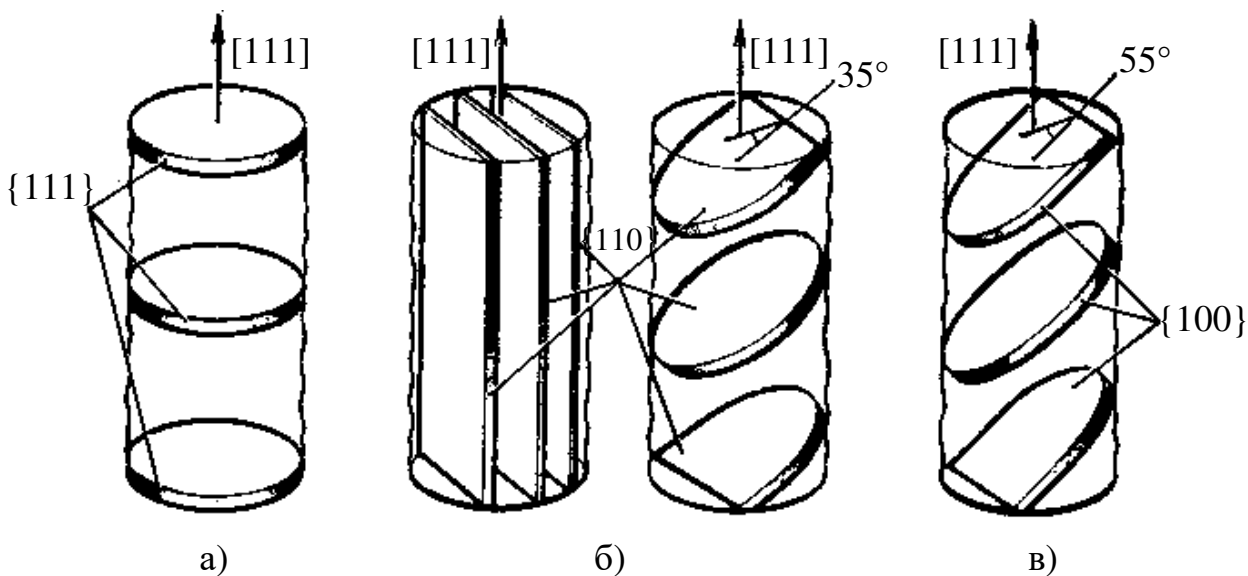


Рис. 1.4. Форма пластин з різною кристалографічною орієнтацією, вирізаних із злитку, вирощеного в напрямку [111]:
 а – пластини з орієнтацією (111); б – пластини з орієнтацією (110);
 в – пластини з орієнтацією (100).

Маркування злитка вказується постачальниками в паспортах на злитки. Воно характеризує злиток за типом провідності, значенням і розкидом питомого опору, видом легуючої домішки і деяким іншим параметрам. В маркування входять буквені позначення, що відносяться до матеріалу злитка і способу його вирощування, наприклад: К – кремній, вирощений методом Чохральського; БК – кремній, вирощений методом безтигельної зонної плавки; АГН – арсенід галію, отриманий горизонтально направленою кристалізацією; АГЧ – арсенід галію, вирощений методом Чохральського витягуванням з-під шару флюсу.

Тип провідності позначається буквами Е (електронна, *n*-тип) і Д (діркова, *p*-тип). Наступна буква є початковою в назві легуючого елементу, наприклад: Ф – фосфор, Б – бор, С – сурма, Г – галій, Т – телур, О – олово, Ц – цинк. Для позначення марок напівізолюючого арсеніду галію використовуються букви П (напівізолюючий) і М (для модуляторів).

В маркуванні кремнію після буквених позначень слідує дріб, чисельник якого вказує номінал питомого опору, а знаменник – дифузійну довжину неосновних носіїв заряду або час їх життя. Цифри, що стоять після дробу, вказують діаметр злитка.

Змішані цифрові і буквені позначення, що стоять перед позначенням матеріалу, характеризують групи і підгрупи марок, що відрізняються інтервалами діаметрів злитків, орієнтацією при вирощуванні і деякими спеціальними електрофізичними властивостями. Наприклад, маркування 1А5б КДБ 7,5/0,1-76 означає: кремній, вирощений методом Чохральського, діркової провідності, легований бором, з питомим опором 7,5 Ом·см, з дифузійною довжиною неосновних носіїв заряду 0,1 мм, групи 1А, підгрупи 5б, діаметр злитка 76 мм.

В маркуванні арсеніду галію цифри, що стоять після букв, вказують: перша – індекс, що характеризує спеціальні технічні вимоги до матеріалу; друга – номінал концентрації носіїв заряду; подальші – показник ступеня десяткового порядку концентрації носіїв заряду. Наприклад, маркування АГЧЦ-2-19 означає: арсенід галію, виготовлений методом витягування по Чохральському, легований цинком, з технічними вимогами, які відповідають індексу 2, і номінальними значеннями концентрації носіїв заряду 10^{19} см⁻³.

1.3. Різання злитків і пластин

Перед різанням злитка на пластини необхідно провести його орієнтацію, тобто встановити величину і напрям відхилення його торця від заданої кристалографічної площини. Перевіряється також орієнтація поверхні пластин після різання, шліфування або полірування. Для орієнтації злитків і пластин використовують два методи: рентгенівський (дифрактометричний і Лауе) і оптичний (метод світлових фігур).

Рентгенівський дифрактометричний метод орієнтації базується на особливості розсіювання рентгенівських променів атомами кристалічної ґратки. При падінні пучка паралельних монохроматичних рентгенівських променів з довжиною хвилі λ під кутом θ до поверхні торця злитка пучок буде відбиватися під тим же кутом, якщо виконується умова Вульфа-Брегга:

$$n \lambda = 2d \sin \theta,$$

де n – ціле додатне число, рівне 1, 2, 3... і т.д. (зазвичай приймають $n = 1$); d – відстань між атомними площинами, якщо кристал розглядати як сукупність паралельних атомних площин.

В іншому випадку пучок буде розсіюватися і можна використовувати схему рентгенівської орієнтації (рис. 1.5). Якщо площина торця злитка співпадає з шуканою кристалографічною площиною, наприклад (111), достатньо встановити її під кутом θ до падаючого рентгенівського пучка, щоб інтенсивність відбитого від площини (111) пучка досягла максимального значення. При відхиленні торця від площини (111) на кут δ (див. рис. 1.5) злиток необхідно повернути на цей кут з тією метою, щоб виконати умову Вульфа-Брегга, тобто встановити площину (111) в положення, яке визначається вимірюваними за допомогою гоніометра кутами α і β між площиною торця злитка і рентгенівським пучком. Кут відхилення δ

обчислюють за формулою $\delta = \frac{\alpha - \beta}{2}$.

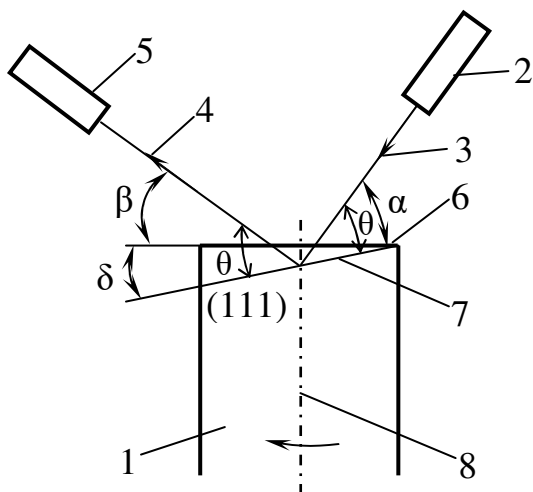


Рис. 1.5. До визначення кристалографічної орієнтації злитків рентгенівським дифрактометричним методом:

1 – злиток; 2 – рентгенівська трубка; 3 – падаючий промінь; 4 – відбитий промінь; 5 – лічильник Гейгера; 6 – площина торця злитка; 7 – площина (111); 8 – вісь обертання зразка.

Рух злитка забезпечується спеціальною приставкою в рентгенівській установці. Оскільки при вимірюванні максимальної інтенсивності необхідно, щоб падаючий і відбитий пучки лежали в одній площині з напрямом [111], злиток повинен повертатися ще і навколо власної осі.

Після орієнтації на торці злитка твердосплавним інструментом наносять стрілку, напрям якої показує, в яку сторону від торця злитка відхилена шукана площина. Значення кута δ вказують у супровідному паспорті злитка.

Оптичний метод орієнтації, більш простий і прийнятний у виробничих умовах, базується на відмінності швидкостей травлення напівпровідникових матеріалів в різних кристалографічних напрямках. При використанні селективних травників на поверхні матеріалу з'являються фігури травлення, конфігурація яких залежить від кристалографічного напрямку цієї поверхні. Так, на поверхні кремнію, близькій до площини (111), видно трьохгранні піраміди, а близької до (100) – чотирьохгранні. При освітленні протравленої поверхні паралельним пучком світла на екрані установки для оптичної орієнтації можна побачити фігури, показані на рис. 1.6. Якщо поверхня має відхилення від відповідної кристалографічної площини, отримані фігури будуть несиметричні. Змінюючи положення злитка по відношенню до світлового пучка, можна досягти симетричного розташування фігур. Ступінь розорієнтації поверхні визначається значенням

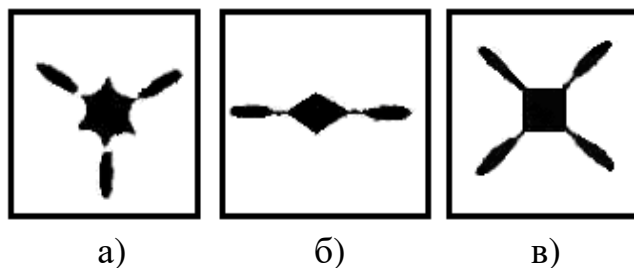


Рис. 1.6. Фігури, отримані на екрані при відбиванні світлового пучка від різних кристалографічних площин кремнію:

а) від площини (111); б) від площини (110); в) від площини (100).

зсуву фігур. Виконавши орієнтацію, на торець злитка наносять відповідну стрілку.

Для різання злитків і пластин в технології ІМС традиційні способи, які використовуються в металообробній промисловості, використовувати не можна, оскільки напівпровідникові матеріали відрізняються високою твердістю і крихкістю. Крім того, звичайне механічне різання було б пов'язане з великими втратами дорогого матеріалу. Тому вибір способу різання повинен передбачати мінімальні відходи матеріалу.

У виробництві ІМС напівпровідникові матеріали ріжуть двічі: злитки – на пластини і пластини після формування на них ІМС – на кристали. Найбільшого поширення набули наступні методи різання:

- ◆ злитків на пластини і пластин на кристали дисками із зовнішньою алмазною ріжучою кромкою;
- ◆ злитків на пластини дисками з внутрішньою алмазною ріжучою кромкою;
- ◆ злитків і пластин сталевими полотнами і дротом із застосуванням абразиву;
- ◆ нанесення рисок на пластини (скрайбування) з подальшим розламуванням їх на кристали.

Різання диском із зовнішньою ріжучою кромкою – найбільш простий спосіб різання. Кромка диска володіє високою ріжучою здатністю, оскільки кожне алмазне зерно, закріплене на основі диска, є мікрорізцем, який знімає найдрібніші стружки з поверхні матеріалу, що обробляється. При високих швидкостях різання (частота обертання диска зазвичай складає близько 5000 хв^{-1}) і одночасній участі в різанні великого числа алмазних зерен досягається висока продуктивність обробки. В процесі різання відбувається деформація матеріалу, що розрізається, і тертя об нього алмазних зерен, за рахунок чого виділяється значна кількість тепла. Тому алмазний диск необхідно безперервно охолоджувати, використовуючи воду або спеціальні охолоджуючі рідини. З метою підвищення продуктивності обробки часто застосовують відразу декілька ріжучих дисків, перемежаючи їх прокладками, товщину яких вибирають залежно від необхідної товщини пластин.

Основний недолік диска із зовнішньою ріжучою кромкою – його невисока жорсткість, яка залежить від співвідношення товщини і зовнішнього діаметру диска. Під дією сил різання, що виникають при різанні, тонкі нежорсткі диски згинаються, зменшуючи точність обробки. Диски в процесі різання починають вібрувати в осьовому напрямі, що приводить до утворення дефектів на поверхні, що обробляється (сколів, тріщин, подряпин), і збільшення ширини пропила.

Необхідно визначати оптимальні розміри диска, що дозволяють отримувати якнайкраще співвідношення між втратами при різанні і дефектами обробки. Співвідношення між товщиною використовуваного для різання диска і його зовнішнім діаметром складає зазвичай від 1/150 до 1/300. При різанні напівпровідникових злитків використовують диски з товщиною

основи 0,3 ... 0,7 мм і діаметром 80 ... 125 мм. Мінімальний проріз при цьому виходить рівним близько 0,45 мм.

Застосування дисків із зовнішньою кромкою для різання злитків на пластини економічно не вигідне, оскільки глибина прорізу невелика, а для забезпечення необхідної жорсткості дисків доводиться збільшувати їх товщину. Тому такі диски застосовують в основному при різанні пластин на кристали і для виконання прорізів в різних касетах (човниках), призначених для утримання пластин.

Різання диском з внутрішньою алмазною ріжучою кромкою (рис. 1.7, а) набуло найбільшого поширення при різанні напівпровідникових злитків на пластини, оскільки цей метод забезпечує вищу продуктивність і якість обробки і менший пропил при різанні, а отже, і меншу втрату матеріалу, ніж попередній метод.

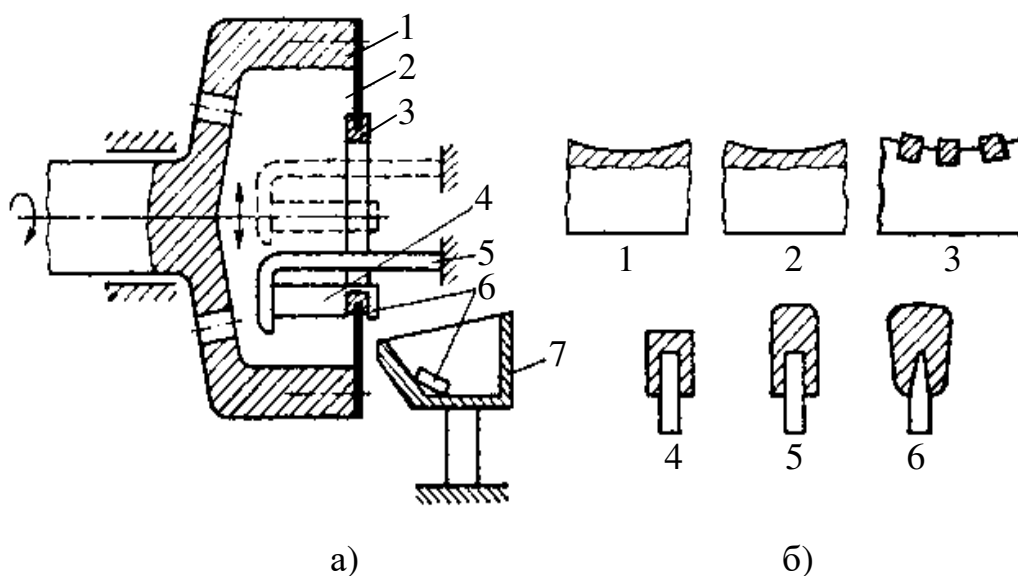


Рис. 1.7. Схема пристрою для різання диском із внутрішньою алмазною кромкою (а) і форми ріжучої кромки (б):

а) 1 – головка шпинделя; 2 – диск; 3 – алмазний шар; 4 – злиток; 5 – тримач; 6 – пластина; 7 – збірник для пластин.

б) 1 – неперервна; 2 – хвилеподібна; 3 – переривчаста (вигляд збоку); 4 – одношарова; 5 - двохшарова; 6 – у вигляді сірника (в розрізі).

Ріжучим інструментом є тонкий металевий диск з центральним отвором, на кромку якого нанесений алмазний шар.

Диски з внутрішньою ріжучою кромкою мають основу значно меншої товщини (0,1 ... 0,15 мм), ніж диски із зовнішньою кромкою. Необхідна при різанні жорсткість дисків забезпечується особливим способом їх кріплення, що дозволяє зменшити вібрації і отримати шорсткість обробленої поверхні напівпровідникової пластини в межах 7 – 8-го класів без глибоких подряпин, сколів і тріщин. Застосовувані диски з внутрішньою ріжучою кромкою, форми якої показані на рис. 1.7, б, утворюють пропил шириною не більше

0,25 ... 0,3 мм, внаслідок чого втрати напівпровідникового матеріалу знижуються майже на 60 % у порівнянні з втратами при різанні диском із зовнішньою алмазною ріжучою кромкою.

В останні роки стало широко застосовуватися різання злитків абразивною суспензією за допомогою сталених полотен (рис. 1.8, а) або дроту (рис. 1.8, б), що здійснюють поворотно-поступальні рухи. Одночасно використовується до 100 полотен завтовшки 0,15 мм, закріплених з фіксованими зазорами. Подача суспензії, приготовленої на основі тонкого абразиву, здійснюється із швидкістю 1,5 ... 2 мл/хв. При цьому на полотнах утворюється шар абразивної суспензії завтовшки 0,05 мм, що працює як ріжучий інструмент. Дріт можна розглядати як ріжуче полотно з меншими розмірами по ширині і товщині (близько 0,1 мм). Полотна і дріт дозволяють різати злитки практично будь-якого діаметру. Для утримання злитків при різанні їх наклеюють по циліндровій поверхні тримача, використовуючи мастики на основі епоксидних смол, що мають міцність на розрив не менше $6 \cdot 10^6$ Н/м². Для підвищення точності і якості різання швидкість подачі диска не повинна перевищувати 20 ... 30 мм/хв.

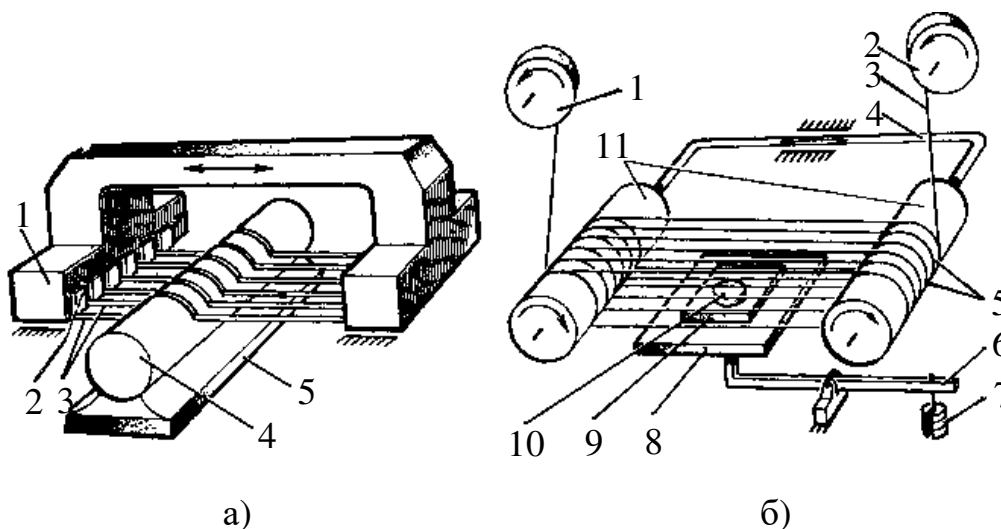


Рис. 1.8. Пристрій для різання багатошаровою пилою (а) і дротиною (б):
 а) 1 – касета; 2 – прокладка; 3 – набір лез; 4 – злиток кремнію; 5 – тримач.
 б) 1 – приймальна котушка; 2 – падаюча котушка; 3 – дротина; 4 – касета; 5 – канавки; 6 – падаючий важіль; 7 – вантаж; 8 – столик; 9 – тримач; 10 – зразок (кремнієва пластина); 11 – ролики.

Різання злитків великого діаметру (100 ... 220 мм) пов'язане з рядом особливостей. При встановленні дисків, полотен або дроту необхідна особлива ретельність. Із-за великих розмірів диска виникає биття диска, що приводить до браку. Тому в даному випадку краще застосовувати ріжучі полотна і дріт.

При різанні злитків великого діаметру товщина відрізуваних пластин зазвичай складає 0,5 ... 0,6 мм. При меншій товщині пластини мають велике прогинання внаслідок зменшення їх жорсткості. Тонкі пластини піддаються

великому коробленню (деформаціям) через напруги, що виникають в них при подальших операціях.

Внаслідок великої площі контакту ріжучої кромки із злитком, що розрізається, і збільшення температури в зоні різання охолодження повинне бути інтенсивнішим.

1.4. Шліфування і полірування пластин

Пластини після різання мають різні дефекти: неплощинність, непаралельність площин, вигин, глибокий порушений шар і великий розкид по товщині. Тому необхідна подальша обробка підкладок шліфуванням і поліруванням, які є важливими процесами для будь-якої технології ІМС.

Шліфування – друга операція обробки пластин, що дозволяє досягти мінімальної шорсткості і нерівності підкладок. Обробка здійснюється на спеціальних установках за допомогою шліфувальних матеріалів, що володіють більшою або співмірною твердістю у порівнянні з матеріалом самих підкладок.

В промисловості застосовуються два основні види шліфування: високошвидкісна обробка кругами із закріпленням абразивом і малошвидкісна обробка за допомогою вільного абразиву. Алмазні круги для першого виду обробки виготовляються пресуванням, спіканням чи гальванічно і відрізняються складом зв'язуючої речовини, концентрацією і зернистістю алмазного абразиву. Частота обертання шліфувального круга досягає десятків тисяч оборотів в хвилину, тому необхідно враховувати вплив на пластини, що обробляються, високих температур. При обробці з допомогою вільного абразиву частота обертання шліфувальних дисків значно менша і підвищення температури пластин незначне.

Механізми руйнування крихких напівпровідникових монокристалів при обробці вказаними вище методами помітно відрізняються.

У випадку шліфування вільним абразивом інтенсивне руйнування відбувається за рахунок перекочування частинок абразиву між поверхнями пластини кремнію і шліфувального круга (чавун, скло та ін.). В результаті багатократних дій частинок поверхневий шар пластини покривається тріщинами, сколами, подряпинами і т.п., густина яких досягає 10^8 см^{-2} . Глибина їх визначається головним чином величиною зерна, тобто маркою абразивного порошку.

При шліфуванні закріпленням абразивом поверхня руйнується внаслідок дряпання і зрізання матеріалу поверхні, що обробляється.

Схема шліфувальної установки показана на рис. 1.9. Шліфувальним матеріалом є алунд. В процесі обробки зшліфовується шар завтовшки 60 ... 100 мкм. Оскільки шліфування проводиться з метою усунення грубої шорсткості і нерівномірності пластин по товщині, то використовуються установки як одностороннього (рис. 1.10, а), так і двостороннього (рис. 1.10, б) шліфування.

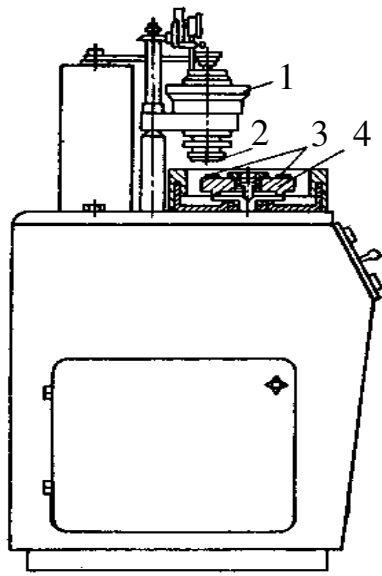


Рис. 1.9. Конструкція шліфувальної установки:
1 – шпиндель; 2 – алмазний круг; 3 – пластини; 4 – столик для пластин.

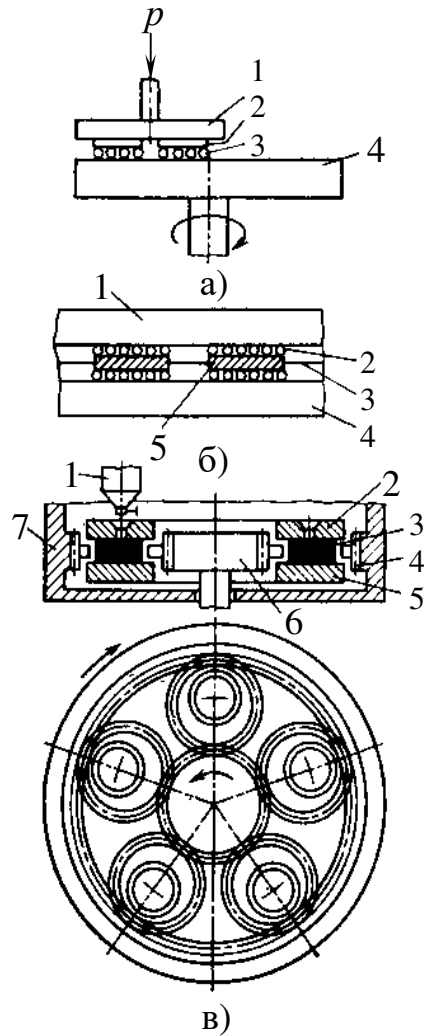


Рис. 1.10. Схеми пристроїв для одностороннього (а) і двохстороннього (б) шліфування пластин, а також конструкція двохстороннього шліфувальника (в):

- а) 1, 4 – верхня і нижня плити; 2 – пластина; 3 – абразив; p – тиск;
- б) 1, 4 – верхня і нижня плити; 2 – абразив; 3 – носій; 5 – пластина;
- в) 1 – дозатор абразивної суспензії; 2, 5 – верхній і нижній шліфувальники; 3 – пластина кремнію; 4 – сепаратори; 6, 7 – центральна і зовнішня шестерні.

Найбільш досконалим устаткуванням для обробки пластин є верстати з двостороннім шліфуванням, на яких обробляються пластини діаметром до 230 мм. Верстати оснащені гідравлічною системою безступінчатого наростання тиску шліфувальника з електронним керуванням. Система керування дозволяє починати обробку із незначним тиском, а потім згідно заданої програми в заданий час вибрати і плавно встановити основне навантаження. Для усунення температурних коливань обидва шліфувальники охолоджуються і в них підтримується постійна температура. Автоматична подача суспензії забезпечує рівномірність товщини плівки суспензії, рівномірну концентрацію і постійне дозування. Після досягнення заданого

розміру пластини верстат автоматично відключається. На рис. 1.10, в показана конструкція двостороннього шліфувальника.

Розкид по товщині пластини не повинен перевищувати 1 мкм, а по плоскопаралельності – 0,5 мкм. В процесі обробки контролюються швидкість шліфування, розмір пластини, час обробки і тиск.

Полірування напівпровідникових пластин – процес, основна мета якого забезпечити високу чистоту поверхні, що обробляється, і залишити мінімальний порушений шар. Так само як шліфування, полірування може бути попереднім і остаточним (тонким). Попереднє полірування проводять алмазними суспензіями і пастами зернистістю від 3 до 1 мкм (АСМ-3, АСМ-1). Алмазну суспензію готують з синтетичних алмазних порошків, годинникового або приладового масла. Остаточне полірування виконують субмікронними алмазними порошками і пастами або м'якими поліруючими складами на основі оксидів алюмінію, хрому, цирконію, кремнію з величиною зерна менше 0,4 мкм. Поліровані поверхні пластин мають 13 – 14-ий класи шорсткості.

Полірування проводять на м'яких доводочних дисках-полірувальниках. За характером дії на поверхню, що обробляється, розрізняють механічне, хімічне і хіміко-механічне полірування.

Механічне полірування здійснюється за рахунок мікрорізання, пластичних деформацій і згладжування. Алмазні зерна, закріплені в полірувальнику, зрізають мікростружку, залишаючи після себе мікроподряпини, розміри яких визначаються розмірами зерен. Тому після алмазного полірування на поверхні пластин залишається “алмазний фон”, що є сіткою мікрорисок, яку можна спостерігати в косих променях світла.

До полірувальників пред'являють високі вимоги: вони не повинні мати порізів, складок, потовщених ниток, що може призвести до появи рисок на поверхні, що обробляється, або розриву полірувального матеріалу і псування всієї партії пластин. Радіальне биття встановленого на верстаті полірувальника, контрольоване спеціальним індикатором, не повинно перевищувати 0,8 мкм.

Алмазні поліруючі склади, застосовувані у вигляді паст і суспензій, наносять на підготовлений полірувальник в дозованих кількостях. Для попереднього полірування кремнію алмазними суспензіями оптимальним режимом є режим, при якому питомий тиск складає $(5 \dots 6) \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2$, а частота обертання полірувальника $30 \dots 40 \text{ хв}^{-1}$. При цьому швидкість знімання кремнію для порошків АСМ-1 і АСМ-2 досягає $4 \dots 7 \text{ мкм/год}$, а для субмікропорошків від 0,1 до 0,35 мкм/год. При використанні паст частоту обертання полірувальника можна збільшити до $70 \dots 100 \text{ хв}^{-1}$, якщо покращити умови тепловідводу шляхом безперервної подачі на полірувальник охолоджуючої рідини з крапельниці. Час полірування залежить від величини припуску і швидкості знімання матеріалу і зазвичай складає від 15 до 30 хв.

Арсенід галію полірують при питомому тиску $(3 \dots 3,5) \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2$ і частоті обертання полірувальника $30 \dots 35 \text{ хв}^{-1}$. При цьому для порошків з розміром зерна 1 мкм швидкість знімання складає близько 10 мкм/год. На початку обробки швидкість знімання більша, ніж в кінці, оскільки алмазні зерна зношуються і дробляться, внаслідок чого їх абразивна здатність погіршується.

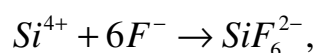
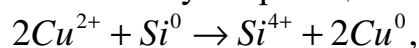
Хімічне полірування здійснюється спеціальними розчинами (травниками), які досить добре розчиняють матеріал пластин і забруднення як фізичної, так і хімічної природи. Наприклад, для кремнію широко використовується рідкий травник складу $\text{HF} : \text{HNO}_3 : \text{CH}_3\text{COOH}$ в співвідношенні 1 : 3 : 2,5. Можливі й інші співвідношення компонентів травника. Хімічне травлення рідкими розчинниками з подальшим відмиванням і сушінням розглядається в технології ІМС як завершальна стадія обробки, в результаті якої стравлюється 10 ... 20 мкм матеріалу з кожного боку пластини.

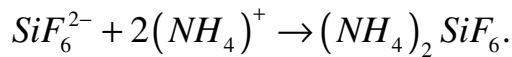
Хіміко-механічне полірування проводиться за допомогою хімічних реакцій і абразивів. Методи її можна поділити на дві групи: полірування діоксидом цирконію (ZrO_2) або кремнію (SiO_2) та іонообмінне полірування. При поліруванні діоксидом цирконію або кремнію в результаті хімічної взаємодії з кремнієм розчинів KOH , NaOH чи етилендіаміну, що входять до складу суспензії, відбувається окислення кремнію і розчинення оксидів в лужному середовищі. При цьому абразивні зерна ZrO_2 чи SiO_2 видаляють розпушений поверхневий шар, що має значно меншу твердість, ніж вихідний матеріал. Цим пояснюється вища продуктивність хіміко-механічного полірування у порівнянні з механічним. Хіміко-механічне полірування дозволяє отримувати пластини, вільні від “алмазного фону”, з шорсткістю по 14-му класу і порушеним шаром, що не перевищує 2 ... 3 мкм.

Полірування діоксидом цирконію виконують на замшевому полірувальнику з частотою обертання від 80 до 120 хв^{-1} при питомому тиску $(6 \dots 8) \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2$ і витраті суспензії 10 ... 20 мл/хв. Швидкість знімання кремнію складає 1 ... 3 мкм/год.

При поліруванні діоксидом кремнію частота обертання замшевого полірувальника складає 100 хв^{-1} , питомий тиск $15 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2$, витрата суспензії 10 ... 25 мл/хв, а швидкість знімання кремнію від 3 до 10 мкм/год.

При іонообмінному поліруванні використовуються суспензії, що містять азотну чи сірчанокислу мідь, азотну кислоту і фтористий амоній. Суть іонообмінного полірування полягає в реакції заміщення, при якій іони міді відновлюються в металеву мідь, а кремній окислюється до Si^{4+} . Мідь осідає на поверхні пластин, а потім стирається полірувальним полотном. Одночасно окислений кремній, взаємодіючи з іонами фтору, розчиняється, утворюючи фторосилікат. Процес відбувається безперервно. В кислому середовищі ($\text{pH} < 5$) протікають наступні реакції:





Іонообмінне полірування проводять на верстатах, деталі робочої зони яких виготовлені з корозійно-стійких матеріалів. Частота обертання полірувальника, виконаного з штучної шкіри або замші, складає 200 хв^{-1} при питомому тиску на пластини $(8 \dots 10) \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2$. Швидкість полірування суспензією з азотно-кислою міддю становить $100 \dots 120 \text{ мкм/год}$, а з сірчаною кислотою $60 \dots 70 \text{ мкм/год}$. Після полірування пластини промивають і сушать. Не дивлячись на високу продуктивність іонообмінного полірування і можливість отримання бездефектної поверхні за рахунок відсутності абразиву, цей метод обробки не набув широкого поширення із-за складності керування процесом і необхідності ретельного видалення залишків міді з поверхні, що обробляється.

1.5. Скрайбування і розламування пластин

Скрайбування (слово “скрайбування” походить від англійського слова *scribe* - риска) і розламування напівпровідникових пластин є завершальною стадією їх обробки і здійснюються тільки після того, як на пластині сформовані всі структури і внутрішні виводи ІМС. Розділення пластин на окремі ІМС (кристали) необхідно проводити з мінімальною шириною розрізу в цілях економії поверхні пластини. В цьому відношенні скрайбування і подальше розламування дають якнайкращі результати в порівнянні з будь-якими процесами різання.

Процес розділення пластин відбувається в два етапи. На першому виконується скрайбування, тобто на поверхню пластини наносяться із заданим кроком паралельні подряпини у взаємно перпендикулярних напрямках відповідно до рисунка на пластині, що відокремлює одну ІМС від іншої. Ці подряпини є областями локального розміцнення. На другому етапі проводиться розламування пластини на окремі кристали під дією розтягуючих або стискаючих зусиль, прикладених перпендикулярно рискам (подряпинам). На практиці використовується скрайбування алмазним різцем із швидкістю $10 \dots 150 \text{ мм/с}$. При підвищенні швидкості зростають сила удару різця по пластині і ймовірність його пружного відскоку, що приводить до появи нескрайбованих ділянок на поверхні пластини. Існують експериментальні залежності, що пов'язують довжину непрорізаних ділянок пластини вздовж подряпин із швидкістю руху різця, його геометричною формою, навантаженням на різець та ін. Геометричні параметри подряпин залежать від форми різця. Різець, який являє собою трьох- чи чотирьохгранну піраміду, встановлюється так, щоб кут між ріжучим ребром різця і поверхнею пластини складав $5 \dots 15^\circ$. На рис. 1.11 представлена залежність ширини подряпини, що створюється чотирьохгранним алмазним різцем, від кута нахилу до його поверхні пластини.

В процесі скрайбування деформації розповсюджуються поблизу риси на ширину $50 \dots 100 \text{ мкм}$, що необхідно враховувати при проектуванні ІМС,

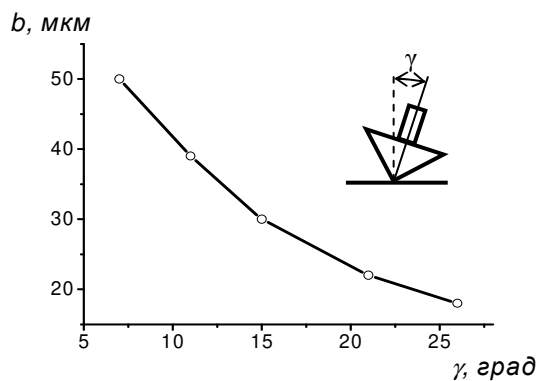


Рис. 1.11. Зміна ширини подряпини b в залежності від кута нахилу γ чотирьохгранного різця

розташовуючи її елементи не ближче 100 мкм від краю кристала. Таким чином, лінії, що розділяють ІМС на кристали, повинні мати ширину не менше 200 мкм.

Скрайбування променем лазера можна проводити при гострому фокусуванні променя ($10^{-5} \dots 10^{-6} \text{ см}^2$) достатньо високої потужності (до 10^8 Вт) і малому часі дії (до 10^{-9} с). Із збільшенням потужності і зменшенням тривалості імпульсу до 10^{-8} с на

поверхні матеріалу, що обробляється, виникає плазмова хмара, що дає при розширенні ударну хвилю, яка стимулює виникнення дефектів структури в монокристалічних пластинах кремнію. Дія лазерного променя приводить до нагрівання кремнію із швидкістю 10^8 град/с , плавлення і часткового випаровування, потім охолодження із швидкістю 10^5 град/с та епітаксійної рекристалізації розплавленого кремнію. Термічні напруги, що виникають внаслідок великих градієнтів температури, генерують велике число дислокацій, що вибудовуються в напрямку розповсюдження тріщин.

З допомогою лазерного променя проводять не тільки скрайбування, але і різання пластин, яке здійснюється при випаровуванні кремнію під дією променя. Тому різання вимагає більшої потужності променя чи тривалості імпульсу, ніж скрайбування, при якому кремній переважно плавиться і лише незначна частина його випаровується.

Скрайбування променем лазера має як переваги, так і недоліки в порівнянні із скрайбуванням алмазним різцем. До перших відносяться: зменшення числа і розмірів мікротріщин і сколів, можливість створення більшої глибини подряпин, вища швидкість скрайбування. Недоліками методу є: розбрикування розплавленого матеріалу, що примушує застосовувати спеціальні покриття для захисту робочої поверхні напівпровідникової пластини; висока вартість устаткування.

В сучасних установках лазерного скрайбування застосовують твердотільні лазери з частотою проходження імпульсів до 10 кГц, тривалістю імпульсу не більше 0,5 мкс і діаметром плями близько 25 мкм, що забезпечує отримання риски шириною близько 30 мкм і глибиною 50 мкм при швидкості скрайбування 100 мм/с. Наскрізне розділення (на глибину 200 мкм) здійснюється із швидкістю 5 ... 10 мм/с.

Розламування скрайбованих напівпровідникових пластин – відповідальна операція технологічного процесу, оскільки неакуратне розламування навіть добре скрайбованих пластин може приводити до браку кристалів із-за утворення нерівних ліній розлому, а також появи подряпин на поверхні пластин і сколів на кромках кристалу. При розділенні пластин на

кристали необхідно виконати наступні умови: розлом повинен здійснюватися тільки по нанесених подряпинах; розміри мікротріщин, сколів і областей механічної напруги, що розповсюджується від краю углиб кристала, повинні бути мінімальні; 100%-ний (чи близький до нього) вихід придатних кристалів; ідентичність електричних параметрів ІМС на пластині і на кристалі.

Всі промислові способи розламування пластин є різновидом трьох основних методів: згину на циліндровій поверхні, консольного згину і згину на сферичній поверхні. Для руйнування (розриву) пластини по подряпині (рисці) необхідно досягти максимальної згинаючої напруги $\sigma_{\text{макс}}$, яка діє вздовж подряпини.

Відзначимо, що згинаюча напруга $\sigma_{\text{макс}}$ обернено пропорційна до ширини пластини, яка при розламуванні в одному напрямі рівна всій довжині (діаметру) пластини. Проте при розламуванні в напрямі, перпендикулярному першому, ширина пластини рівна ширині одного кристала. Тому при прокатуванні циліндра уздовж пластини в цьому випадку розламування протікає значно легше, тобто при меншому згинаючому зусиллі.

На рис. 1.12 показано розламування пластин кремнію на кристали валиком, консоллю і на сферичній опорі. Перш ніж проводити розламування, пластину неробочою стороною наклеюють на пластмасову плівку (адгезійний носій), щоб уникнути переміщення кристалів відносно один одного. При розламуванні пластин на сферичній опорі (рис. 1.12, в) тиск p створюється пневматичним чи гідравлічним способом через діафрагму.

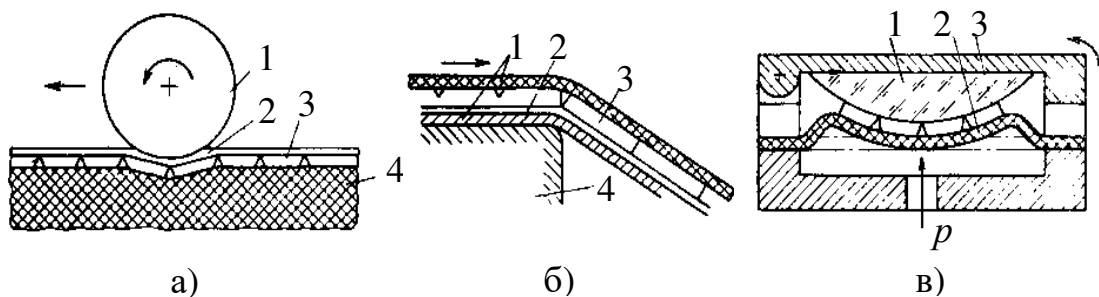


Рис. 1.12. Розламування пластин на кристали валиком (а), консоллю (б) і на сферичній опорі (в):

а) 1 – валик; 2 – пластмасова плівка; 3 – скрайбована пластина; 4 – резина;

б) 1 – гнучка стрічка; 2 - пластмасова плівка; 3 – пластина; 4 – консоль;

в) 1 – сфера; 2 – резинова діафрагма; 3 – пластина; p – тиск (пневматичний чи гідравлічний).

2.1. Механізм хімічної обробки кремнієвих пластин

Механічна обробка забезпечує високу площинність поверхонь пластин, але завжди залишає порушені шари. Отримання достатньо рівних поверхонь пластин без порушених шарів, а також селективне видалення необхідних областей кремнію здійснюються з допомогою хімічної обробки. До хімічної обробки відносяться хімічне, електрохімічне, плазмохімічне і хіміко-термічне травлення кремнію. Розчинення кремнію відбувається, як правило, згідно окисно-відновних реакцій. При цьому особливе значення мають стадії і реакції, що протікають найбільш повільно і тим самим визначають швидкість процесу в цілому. Розрізняють дві основні стадії процесу:

- дифузійну – транспортування реагентів до межі розділу кремній – розчин і відведення їх від межі;
- хімічну – чисто хімічне перетворення.

Хімічний процес починається, як тільки напівпровідник приведений в контакт з рідким розчинником. Добре відомо, що властивості поверхні відрізняються від властивостей об'єму речовини (в даному випадку напівпровідника) і що на поверхні існує некомпенсований заряд. Заряд притягує з розчину іони протилежного знаку, і біля поверхні розділу утворюється подвійний, а точніше, потрійний електричний шар (рис. 2.1). Одна обкладка цього своєрідного конденсатора – кремній із встановленим після контакту з електролітом рівноважним станом носіїв струму і відповідним йому вигином енергетичних зон. Інша обкладка – іонний шар в електроліті, що складається з двох частин: приповерхневого, так званого шару Гельмгольца, розміром не більше іонного радіусу, і дифузійного, який може простягнутися далі в розчин.

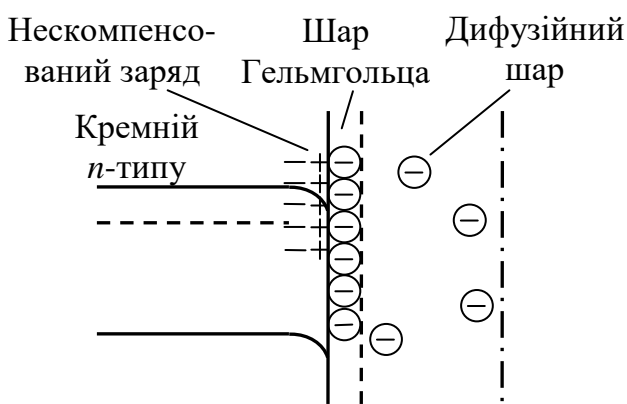


Рис. 2.1. Схема утворення заряджених шарів на поверхні розділу кремнію з електролітом

температури розчину, концентрації і валентності іонів. Основна відмінність напівпровідників від металів – наявність в напівпровідниках ширшої приповерхневої області просторового заряду $10^{-4} \dots 10^{-6}$ см (у металів 10^{-8} см). Падіння потенціалу відбувається головним чином в цій області, і властивості її відіграють найважливішу роль в процесі травлення.

В електронному напівпровіднику дірки – неосновні носії, і доставка їх до поверхні

лімітується негативним просторовим зарядом, що виникає в результаті того, що іони з електроліту підходять до аноду. Велику роль відіграє генерація носіїв в шарі просторового заряду, за рахунок якої на поверхню поставляється основна кількість дірок.

Розглянемо реакцію анодного розчинення кремнію в розчинах їдких лугів чи плавикової кислоти та її солей. Можливі два шляхи протікання реакції:

1) утворення гідратованого оксиду кремнію за рахунок іонів OH^- з подальшою участю іонів фтору F^- , які переводять оксид в розчинний у воді комплекс SiF_6^{2-} (відомі, проте, травники на основі гідразину (N_2H_4) і води, в яких розчинення оксиду відбувається при підвищеній температурі без участі іонів фтору);

2) безпосередня реакція іонів фтору з кремнієм.

Однією з перших стадій реакції є утворення на поверхні кремнію сполук, що містять іони фтору. В розчинах, які не містять іонів фтору, кремній покривається плівкою оксиду, яка перешкоджає розчиненню. Важкорозчинна плівка оксиду завжди присутня на поверхні кремнію, за рахунок чого стаціонарний потенціал його ($-0,1\text{ В}$) відрізняється від розрахункового, а реакції розчинення сповільнюються.

На рис. 2.2 приведені поляризаційні криві анодного розчинення кремнію *n*- і *p*-типу в 2,5 н розчині HF . Якщо *p*-кремній розчиняється майже без обмежень, то для *n*-кремнію спостерігається обмеження струму,

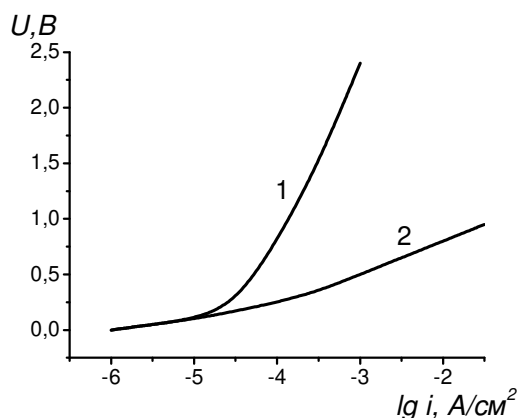


Рис. 2.2. Крива анодної поляризації кремнію в 2,5 н розчині HF :

1 – кремній *n*-типу; 2 - кремній *p*-типу.

Основні катодні реакції на кремнії – виділення водню і відновлення молекул окиснювачів. Адсорбований на кремнії водень створює нові поверхневі рівні, які сильно впливають на властивості поверхні. При катодних реакціях утворюються хімічні сполуки – гідриди кремнію.

Анодні і катодні реакції, які протікають на мікроанодах і мікрокатадах, просторово розділених на поверхні кремнію, можуть протікати одночасно у випадку хімічного травлення кремнію. В залежності від того, яка з реакцій

викликане нестачею дірок. З реакцій, що протікають на аноді, найбільш важкою є відрив атома кремнію від поверхні. Від'ємні іони, наприклад OH^- , легко утворюють зв'язок з поверхневими атомами кремнію, але для відходу цього гідратованого оксиду в електроліт необхідно розірвати зв'язок між атомами кремнію, тобто потрібна дірка. На рис. 2.3 показана схема можливого протікання процесу. Найповільніше відбувається реакція розриву зв'язку між атомами кремнію.

лімітуюча (найповільніша), розрізняють анодне або катодне обмеження процесу травлення.

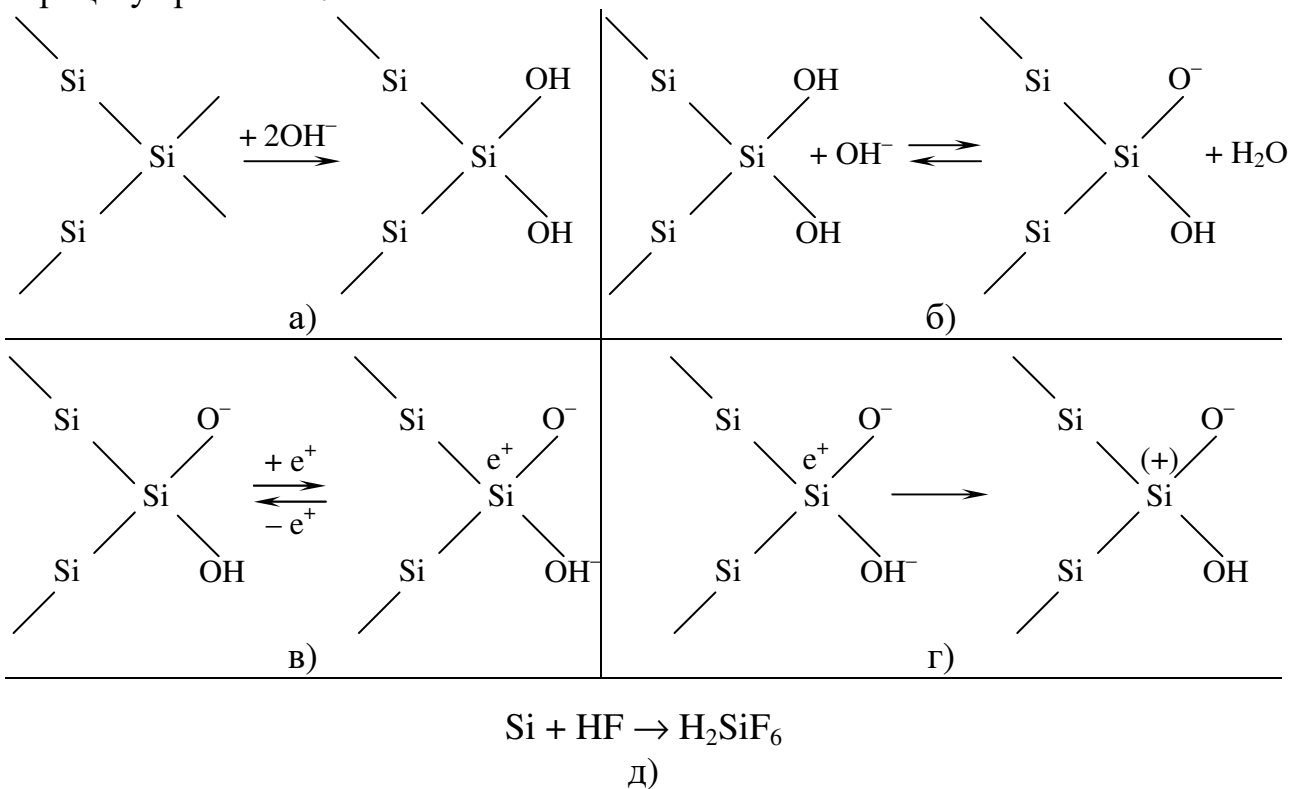
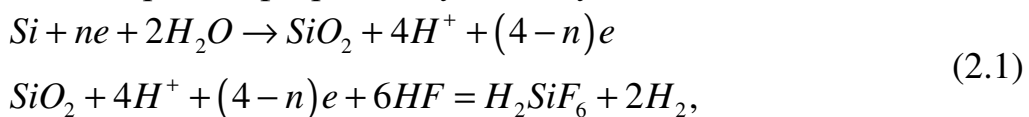


Рис. 2.3. Схема анодного розчинення кремнію:

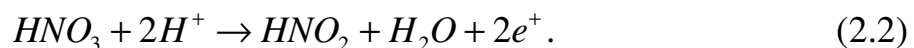
а – приєднання двох іонів OH^- ; б – втрата протона (відщеплення гідроксилу); в – залучення дірки від’ємним кисневим залишком; г – розрив одного із зв’язків (результат приходу дірки) і повний відрив і відведення в розчин гідратованого атома кремнію; д – утворення комплексу H_2SiF_6 за рахунок участі іонів F^- .

Розглянемо, наприклад, травлення кремнію в суміші плавикової (HF) і азотної (HNO_3) кислот. На мікроанодах протікають реакції утворення оксиду і переведення його в кремнійфторводневу кислоту:



де n – число дірок.

На мікрокатодах відновлюється азотна кислота:



Молекули окиснювача HNO_3 , що відновлюються на мікрокатодах, захоплюють електрони, тобто викликають інжекцію дірок безпосередньо в сусідній мікроанод. Регулюючи надходження окиснювача до мікрокатодів за рахунок зміни концентрації його в розчині або дифузії молекул (перемішуванням), можна керувати анодним розчиненням. Таке катодне обмеження дозволяє отримувати гладкі протравлені поверхні.

Анодне обмеження можна здійснити, регулюючи надходження іонів фтору (2.1) до мікроанодів. В основному ж воно протікає самовільно,

оскільки анодні реакції пов'язані з руйнуванням ґраток. Розчинення кремнію при цьому протікає переважно на дефектах поверхні (селективне травлення) або по певних кристалографічних площинах (анізотропне травлення).

Травлення кремнію з катодним обмеженням добре досліджене, оскільки цей процес давно застосовується для отримання пластин з плоскою високоякісною поверхнею. Визначальну роль тут відіграє дифузія окиснювача до поверхні кремнію. Властивості кремнію практично не впливають на процес травлення.

Швидкість розчинення залежить від рельєфу поверхні (рис. 2.4), так як згідно закону Фіка

$$v = \frac{D}{x}(C_p - C_0), \quad (2.3)$$

де v – швидкість дифузії молекул окиснювача до поверхні; D – коефіцієнт дифузії; C_p і C_0 – рівноважні концентрації окиснювача в розчині і на поверхні; x – товщина шару травника, через який відбувається дифузія.

На вершинах поверхні швидкість розчинення вища, ніж у впадинах, за рахунок відмінності у відстанях x_B і x_{BP} (рис. 2.4). Ця різниця тим більша, чим менша відстань від поверхні до деякої площини, яка характеризується постійною концентрацією окиснювача. Наблизити межу постійної концентрації до поверхні кремнію можна, використовуючи властивості потоків в'язкої рідини. Для цього необхідно примусити травник рухатися паралельно поверхні кремнію. Тоді біля поверхні створюється стійкий пограничний шар, товщина якого залежить від швидкості руху. Підбираючи склад травника можна досягти того, щоб при певній швидкості площина постійної концентрації співпадала із зовнішньою стороною пограничного шару. Товщина пограничного шару

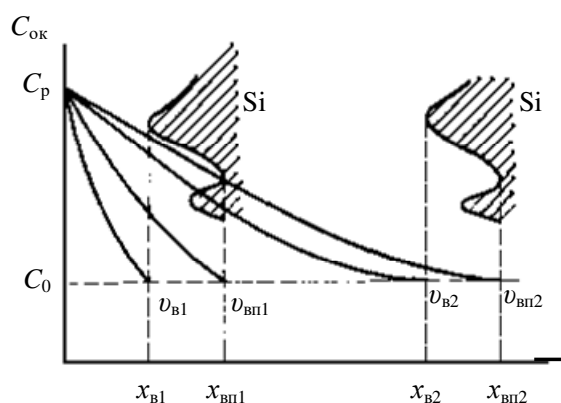


Рис. 2.4. Залежність швидкості травлення від нерівностей (виступів і впадин) поверхні і товщини граничного шару

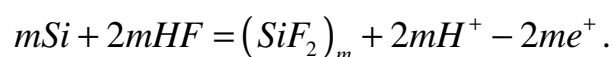
обернено пропорційна швидкості руху рідини. Збільшуючи швидкість і дотримуючи умову співпадіння границі, можна істотно збільшити швидкість травлення матеріалу на вершинах у порівнянні із впадинами. По мірі стравлювання вершин значення x_B і x_{BP} зближуються і різниця в швидкостях травлення зменшується до надзвичайно малого значення. Таке положення відповідатиме нерівності поверхні 0,2 ... 0,3 мкм. Швидкість травлення при цьому складає 6 ... 10 мкм/хв.

Якщо на кремній подати додатне зміщення, то процес анодного розчинення можна зробити більш керованим і підвищити якість обробки поверхні. Відбувається так зване електрополірування. При цьому процесі біля поверхні кремнію утворюється тонка в'язка плівка продуктів розчинення, яка володіє електричним опором, що перевищує опір самого

електроліту. Товщина цієї плівки, яка називається плівкою електрополірування, над вершинами менша, ніж над впадинами, за рахунок чого анодний струм перерозподіляється і вершини травляться швидше. Чим тонша плівка електрополірування, тим краща якість поверхні пластини, що обробляється.

Товщина і опір плівки електроліту залежать від ряду факторів і в першу чергу від складу розчину, швидкості його перемішування, температури. В склад електроліту входять плавикова кислота (або фторид амонію) і гліцерин, який регулює в'язкість.

При малій густині струму анодне розчинення кремнію супроводжується утворенням товстої аморфної плівки коричневого кольору в результаті реакції

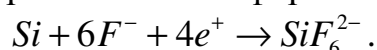


Фтористі сполуки двохвалентного кремнію, з яких складається плівка, повільно розчиняються у воді з виділенням водню:



Цей водень перемішує розчин, і плівка електрополірування не утворюється.

При більшій густині струму процес анодного розчинення прискорюється, але його починає лімітувати нестача молекул плавикової кислоти, які дифундують з об'єму електроліту. У зв'язку з цим ріст товстої аморфної плівки сповільнюється і починається новий електрохімічний акт розчинення кремнію в чотирьохвалентній формі:

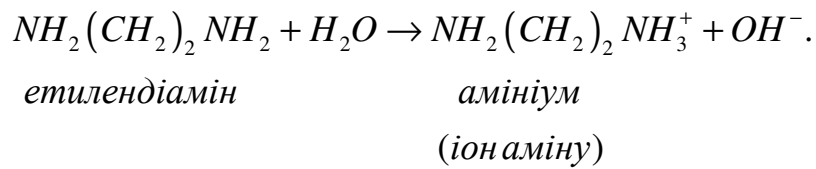


Продуктом реакції є кремнійфторводнева кислота, яка володіє більшим опором, ніж об'єм електроліту. Створюється високоомна плівка біля поверхні кремнію, струм зменшується і починається процес електрополірування, який протікає у вузькому інтервалі густин струму. При великих значеннях густини струму відбувається утворення пасивної плівки діоксиду кремнію.

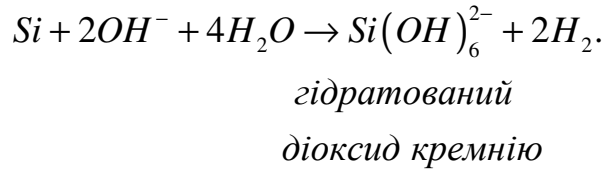
Розглянуті реакції травлення з катодним обмеженням володіють низькими енергіями активації ΔE_a , характерними для процесів, що лімітуються дифузією. Наприклад, для суміші плавикової, азотної і оцтової кислот значення $\Delta E_a = 19,8 \cdot 10^3$ Дж/моль. При травленні в цій суміші добуток швидкості травлення на в'язкість травника є постійним в інтервалі температур 20 ... 50°C, що показово для процесів, швидкість яких лімітована дифузією.

Травники з анодним обмеженням, навпаки, характеризуються високими енергіями активації: 10%-ний розчин їдкою натрію – $54,5 \cdot 10^3$ Дж/моль; етилендіамін ($H_2NCH_2CH_2NH_2$) – пірокатехін ($C_6H_4(OH)_2$) – $46 \cdot 10^3$ Дж/моль. Такі великі значення енергії активації вказують на те, що весь процес визначається хімічною стадією, а не дифузійною.

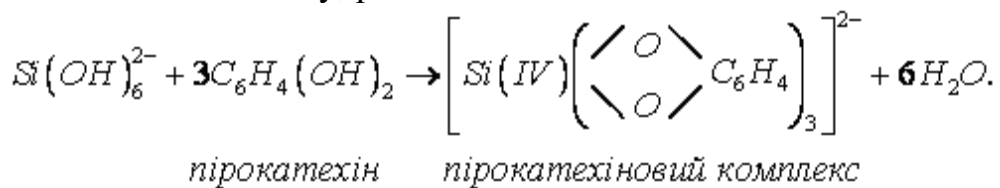
Розглянемо механізм травлення кремнію в суміші етилендіамін – вода – пірокатехін. Перша стадія – іонізація активних гідроксилів:



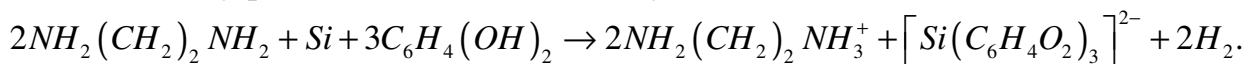
Друга стадія – окиснення кремнію і відновлення водню на мікрокатодних ділянках:



Третя стадія – видалення $Si(OH)_6^{2-}$ в результаті утворення пірокатехінового комплексу, розчинного в амінах:



Загальну реакцію можна записати у вигляді:



В загальній реакції вода не бере участь, оскільки вона регенерується на стадії розчинення кремнію. Це означає, що зміст води не критичний. Проте наявність її як постачальника гідроксильних іонів є обов'язковою.

Найбільш повільною стадією є окиснення кремнію за умови, що вміст пірокатехіну перевищує певне значення (4 % молярних). В іншому випадку нестача комплексоутворювача зменшує швидкість травлення. Високі енергії активації подібних травників приводять до різкої відмінності у швидкостях травлення кремнію по різних кристалографічних площинах, тобто анізотропного травлення.

Для отримання пластин кремнію без порушеного шару застосовується хіміко-динамічне полірування, яке поступово витісняється електрополіруванням, яке забезпечує якіснішу обробку поверхні. Для електрополірування використовують електроліт, що складається з фториду амонію (15 г/л), гліцерину (600 см³), дистильованої води (400 см³). На процес електрополірування впливають і хімічні домішки в електроліті. Наприклад, при вмісті міді більш за 1·10⁻³ г/л погіршується якість обробки поверхні. Електроліт використовується один раз. При густині струму 0,03 ... 0,1 А/см² і напрузі на електродах 10 ... 14 В забезпечується швидкість стравлювання 0,4 ... 1 мкм/хв.

Процеси анізотропного травлення кремнію в даний час використовуються все ширше в технології ІМС. Із-за високої енергії активації анізотропні травники вимагають нагріву до температур, близьких до температур їх кипіння. Типовий склад травника в молярних відсотках: етилендіамін – 35,1 %, пірокатехін – 3,7 %, вода – 61,2 %. Температура

травлення $110 \pm 1^\circ\text{C}$. Співвідношення швидкостей травлення кремнію для основних площин (111), (110), (100) складає 3 : 30 : 50 мкм/год.

Анізотропні травники, за винятком їдкового натрію, практично не травлять діоксид кремнію і алюміній. Наприклад, швидкість травлення термічного оксиду складає 20 нм/год для етилендіамінового травника. Ця властивість успішно використовується для локального травлення V-подібних канавок, глибина яких визначається тільки шириною щілини, витравленої заздалегідь в оксиді.

При виготовленні МДН-ІМС, в структурах яких для підзатворного діелектрика застосовуються оксидні плівки завтовшки $(10 \dots 50) \cdot 10^{-4}$ мкм, найбільш важливими параметрами якості поверхні підкладки є товщина і властивості оксидної плівки, що утворилася після обробки, оскільки ці параметри безпосередньо позначаються на якості МДН-структур. Систематичні дослідження плівки SiO_2 , отриманої в процесі обробки поверхні кремнієвих пластин різними хімічними методами, показали, що її товщина залежить від методу обробки поверхні (табл. 2.1). Найменше значення товщини характерне для обробки пластин у фреоні без відмивання деіонізованою водою.

Таблиця 2.1. Значення товщин поверхневої оксидної плівки на кремнієвих підкладках в залежності від методу хімічної обробки

Метод хімічної обробки підкладок	Товщина поверхневої плівки, 10^{-4} мкм	Похибка вимірювань, 10^{-4} мкм
Травлення в концентрованій плавиковій кислоті	15,9	2,8
Обробка в буферному травнику ($\text{HNO}_3 - \text{HF} - \text{CH}_3\text{COOH}$)	11,2	1,1
Кип'ятіння в органічних розчинниках, а потім в лужному розчині перекису водню	9,8	1,1
Кип'ятіння в лужному, а потім в кислому розчині перекису водню	9,3	1,3
Обробка у фреоні з подальшим відмиванням в деіонізованій воді	7,2	0,9
Обробка у фреоні без відмивання деіонізованою водою	6,1	0,8

Для видалення адсорбованих молекул води з поверхонь підкладок останні після завершення фінішної обробки піддають сушінню в центрифугі, сушінню при 150°C , відпалу в атмосфері водню при 1000°C . В результаті цих операцій товщина оксиду зменшується.

Оскільки вода адсорбується плівкою SiO_2 у вигляді конденсату, а також у вигляді вільних і зв'язаних водневих груп (зв'язок $\text{Si} - \text{OH}$), то природно,

що для видалення кожного виду води потрібна своя технологічна обробка. Той факт, що товщина поверхневої плівки на підкладках, оброблених у фреоні і потім відпалених при температурі 1000°C у водні, не змінюється в подальших процесах обробки, доводить відсутність гідратації оксиду при такому способі обробки підкладок.

В технологічних процесах виготовлення ІМС важливо також знати, наскільки змінюється товщина поверхневої плівки при зберіганні її в різних умовах. Коливання значень товщини пояснюються коливаннями вологості в атмосфері і відповідними змінами констант адсорбції (або десорбції) води. Дані в табл. 2.1 показують, що при підготовці підкладок для виготовлення МДН-ІМС краще відмовитися від промивання водою.

2.2. Технохімічна обробка пластин

До технохімічних процесів у виробництві напівпровідникових пристроїв відносять: очищення поверхні кремнієвих пластин, проявлення фоторезисту, травлення діелектричних і металічних плівок, видалення фоторезисту. Тому технічний рівень технології напівпровідникових пристроїв в значній мірі визначається досконалістю цих ТП.

Операція очищення поверхні кремнієвих пластин, як правило, передуює нанесенню фоторезисту, окисненню, епітаксії і дифузії. Від ступеня чистоти поверхні кремнієвих пластин залежать якість виконання названих технологічних процесів, параметри і вихід придатних приладів.

Можна говорити про два види забруднення поверхні: фізичний – наявності пилюки, жирових та інших забруднень – і хімічний, який виникає за рахунок хімічних реакцій поверхні пластини з навколишнім середовищем (оксиди, сульфід, карбонати та ін.). Домішки першого виду утримуються на поверхні за рахунок слабких адсорбційних сил, тоді як домішки другого виду – за рахунок сильних хімічних і хемосорбційних зв'язків.

Типовими фізичними забрудненнями є: віск, смоли, жири, залишки органічних розчинників, частинки пилюки і т.п. До хімічних забруднень поверхні відносяться оксидні плівки, іони металів, хемосорбовані із травників і паст, які використовуються при поліруванні і т.п.

Як правило, на поверхні підкладок присутні всі види домішок, тому технологія очищення пластин зазвичай включає процеси, що забезпечують послідовне видалення домішок різної природи. Принципова схема технологічного очищення представлена на рис. 2.5. Спочатку видаляються домішки органічного походження (знежирення) в перекисно-аміачних розчинах ($\text{H}_2\text{O}_2 - \text{H}_2\text{O} - \text{NH}_4\text{OH}$) при 75 ... 80°C. Органічні забруднення видаляються протягом 5 ... 7 хв шляхом окиснюючого розкладання їх перекисом водню з подальшим гідродинамічним відмиванням поверхні. Крім того, гідроксид амонію NH_4OH утворює комплексні сполуки з рядом металів (Cu, Ag, Ni, Co, Cd та ін.), що полегшує їх видалення з поверхні пластин.

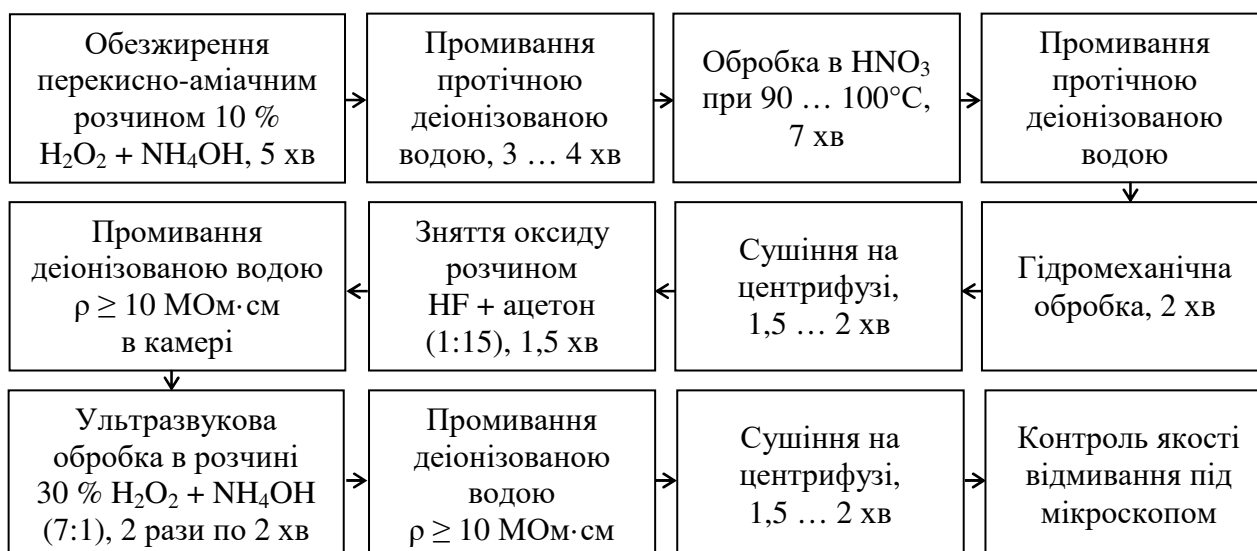


Рис. 2.5. Принципова схема технологічного очищення кремнієвих пластин

Для очищення домішок, що залишаються на поверхні після знежирення, використовуються концентровані розчини азотної кислоти, яка окислює як органічні, так і неорганічні речовини.

Домішкові скупчення можуть забиватися в найдрібніші пори і щілини на поверхні, і без хіміко-механічної обробки видалити їх не вдається. В результаті такої обробки пластин, як вказувалося вище, на поверхні утворюється оксидний шар з діоксиду кремнію. Тому пластини проходять гідродинамічне і ультразвукове відмивання в деіонізованій воді.

Широке застосування при серійному виробництві напівпровідникових пристроїв знайшли наступні види очищення поверхні кремнієвих пластин: ультразвукова, в парах органічних розчинників, в об'ємі реактиву, струменева.

Ультразвукове очищення базується на зануренні кремнієвих пластин у ванну з розчином, який перемішується за допомогою ультразвуку. Звукові коливання (від 20 до 40 кГц), які спричиняють одночасно перемішування і кавітацію в рідкому розчині, надають йому велику енергію, за рахунок якої забруднення швидко і легко видаляються з важкодоступних ділянок.

При погано підібраних режимах ультразвукові коливання можуть привести до руйнування пластин кремнію. Ефективність ультразвукової обробки залежить від природи адсорбованих домішок. Так, розчинення адсорбованих домішок металів, наприклад міді, прискорюється при використанні ультразвуку. Для видалення ж іонних домішок енергія коливань недостатня. Якість очищення поліпшується, якщо використовувати поєднання ультразвукових коливань з добавкою комплексоутворювачів, які досить ефективно десорбують іонні домішки. Схема установки для ультразвукового очищення показана на рис. 2.6.

Очищення в парах органічних розчинників здійснюється таким чином. Кремнієві пластини розташовуються в спеціальній реакційній камері, яка забезпечує конденсацію пари нагрітого розчинника на поверхні пластин. В

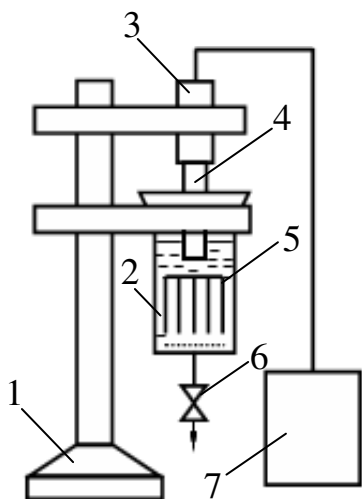


Рис. 2.6. Схема установки для ультразвукового очищення в розчині:

- 1 – штатив;
- 2 – кварцовий стакан;
- 3 – акустична головка;
- 4 – випромінювач;
- 5 – касета з пластинами;
- 6 – кран;
- 7 – генератор ультразвукових коливань.

результаті цього кремнієві пластини багато разів обробляються свіжим розчином. Для даного методу очищення найширше використовуються трихлоретилен і розчини на основі фреона-113. Очищення в парах органічних розчинників ефективно тільки за наявності малих кількостей забруднень.

Очищення в об'ємі хімічного реактиву набуло найбільш широкого поширення. Операції очищення виконуються в об'ємі хімічних реактивів на спеціальних установках. В них здійснюються процеси видалення фоторезисту, очищення від органічних і неорганічних забруднень перед окисненням, фотолітографією, дифузіїю, напиленням металів та ін.

Струменеве очищення проводиться, як правило, гарячими розчинниками, якими є органічні розчинники (толуол, ацетон, спирти і т.п.), кислоти і деіонізована вода. При обертанні касети підкладки багато разів омиваються струменем відповідного реактиву. Припинивши подачу розчинника і збільшивши частоту обертання центрифуги, здійснюють сушіння пластин. Вертикальне розташування касети з пластинами дозволяє уникнути забруднення пластин краплями розчинників, які могли б потрапляти на них з кришки камери і з форсунок при горизонтальному розташуванні касети.

На процес відмивання пластин впливають наступні фактори: час обробки, частота обертання центрифуги, температура обробки, тиск струменя на пластини та ін. У випадку використання дефіцитних розчинників здійснюється їх циркуляція після фільтрації, очищення і регенерації.

Перевагами методу є: безперервна зміна розчинника і ефективно видалення домішок за рахунок дії струменя і відцентрових сил. Недолік методу – велика витрата реактивів.

Всі перераховані методи очищення поверхонь можуть застосовуватися як для фізичного видалення забруднень, так і для хімічного полірування і травлення підкладок.

Очищена поверхня кремнієвих пластин повинна бути захищена від подальших забруднень. Для цього використовують декілька прийомів:

- моментальну передачу очищених пластин в умовах чистого навколишнього середовища на наступну технологічну операцію;
- зберігання очищених пластин в герметичній тарі, заповненій чистим інертним газом;
- захист поверхні кремнієвих пластин спеціальними технологічними плівками, наприклад, покриття їх спеціальним лаком.

Видалення фоторезисту здійснюється декількома способами:

- хімічною деструкцією в сірчаній кислоті;
- у суміші сірчаної кислоти з перекисом водню у співвідношенні 3:1;
- у розчині оксиду хрому із сірчаною кислотою;
- розчиненням в органічних розчинниках (наприклад, в диметилформаміді);
- окислювальною деструкцією (у кисні або кисневмісних газах).

Органічні розчинники застосовуються для видалення фоторезисту з тонких металевих плівок. Фоторезисти, полімеризовані при низькій температурі, видаляються ацетоном і диметилформамідом. Процес видалення протікає при низькій температурі (70 ... 90°C) і забезпечує достатньо хороше очищення поверхні кремнієвих пластин.

Після всіх видів очищення проводиться промивання пластин в потоці деіонізованої води. При цьому пластини піддаються обробці на центрифугі (з безперервною подачею деіонізованої води) і сушінні центрифугуванням. Ця технологічна операція необхідна, оскільки при висиханні крапель розчинника на поверхні кремнієвих пластин залишаються забруднення.

Поряд з хімічними реакціями, які є основою технохімічної обробки, важливе значення мають численні механічні і фізико-хімічні процеси. До таких процесів відносяться: переміщення рідин, газів і твердих пластин; нагрівання і охолодження речовин; сушіння та ін. Від способу проведення вказаних процесів залежить ефективність технохімічної обробки. В залежності від виконуваних процесів типові функціональні вузли і їх кількість в установках можуть змінюватися. Типовими функціональними вузлами є пилезахисна камера, камера обробки (реактор), електромагнітні і пневматичні клапани, резистивні або променисті нагрівачі, фільтри, дозатори, датчики температури і витрати хімічних реактивів.

Якість очищення поверхні, надійність хіміко-технологічної установки в цілому залежать від прийнятого способу хімічної обробки, від конструктивної досконалості і надійності застосовуваних функціональних вузлів, а також корозійної стійкості матеріалів, з яких вони виготовлені. Для різних процесів обробки пластин застосовуються різні функціональні вузли.

Закономірності процесів очищення такі, що чим більше використовується операцій і реагентів, тим менше гарантія отримати особливо чисту поверхню, оскільки з кожною новою операцією і кожним новим реагентом на поверхню пластини можуть вноситися нові домішки і дефекти. Тому слід прагнути до мінімального числа операцій і реагентів. Мабуть, важко знайти такий універсальний хімічний процес, який дозволяв

би отримувати поверхні високого ступеня чистоти і структурної досконалості. Тому особливо привабливі методи, які суміщають фізичні і хімічні процеси, але не використовують рідкі реактиви, очищення яких завжди було самостійною проблемою. До таких методів відносяться термохімічне, іонно-плазмове і плазмохімічне травлення (очищення) підкладок для ІМС і елементів МСТ.

2.3. Термохімічне (газове) та іонно-плазмове травлення кремнієвих пластин

В основі термохімічного процесу обробки пластин лежить утворення летких продуктів реакції кремнію з газоподібними речовинами; галогенами F_2 , Cl_2 , Br_2 ; галогеноводнями HF , HBr , HCl , HI ; парами води; сполуками сірки H_2S , SF_6 . Ці речовини додають в невеликих кількостях до потоку газоподібного водню і вводять в кварцовий реактор. Обробка проводиться при температурах від 700 до 1300°C.

Процес термохімічного травлення зазвичай трактується як зворотний епітаксійному нарощуванню і описується тими ж реакціями і законами, що і епітаксія. Проте при епітаксійному нарощуванні зазвичай нехтують стадією видалення в газовий потік продуктів реакції від поверхні кремнію. При термохімічному травленні, навпаки, ця стадія є визначальною. Наприклад, при травленні кремнію в HCl протікає реакція $Si + 4HCl = SiCl_4 + 2H_2$.

Коефіцієнт дифузії молекул $SiCl_4$ в три рази менший, ніж молекул HCl , тому визначальною стадією буде дифузія продукту реакції $SiCl_4$ від поверхні кремнію. Парціальний тиск пари може бути знайдений за відомим значенням тиску парів $SiCl_4$: $p_{SiCl_4} = k(p_{HCl})^4$, де p – тиск, k – константа реакції рівноваги, яка дорівнює 1,32 при 1227°C.

При вмісті HCl у водні близько 1 % на поверхні кремнію утворюється 0,02 % $SiCl_4$.

При травленні кремнію парами бромистого водню HBr протікає аналогічна реакція, причому продукт реакції $SiBr_4$ має ще менший коефіцієнт дифузії, ніж $SiCl_4$. В результаті процес ще більш обмежений дифузійною стадією і залежність швидкості травлення від температури слабша, ніж у випадку травлення парами HCl , а якість обробки поверхні краща.

Одна із особливостей методу термохімічної обробки полягає в тому, що, підбираючи режими травлення, можна надати процесу орієнтований (анізотропний) характер. Наприклад, для 5 %-ої суміші HCl з H_2 при 1200°C швидкості травлення кремнію, орієнтованого по площинам (111), (110) і (100), складають відповідно 1,48; 3,0 і 3,4 мкм/хв. Особливо різко виражена ця залежність при травленні кремнію галогенами, зокрема хлором. При температурах біля 700°C газоподібний хлор є прекрасним селективним травником, що виявляє дислокації, дефекти упаковки та інші порушення на поверхні кремнію.

Термохімічне травлення може застосовуватися для формування локальних заглиблень в пластині. При цьому як маскує покриття виступає

шар оксиду, в якому за допомогою фотолітографії створюються вікна необхідної конфігурації. Найкращі результати травлення досягаються при використанні SF_6 як травника, який, на відміну від HCl , забезпечує отримання заглиблень з плоским дном.

У виборі того чи іншого газового травника для вирішення конкретних завдань технології ІМС може допомогти табл. 2.2, в якій представлені режими процесу травлення. Для коректування режимів служать криві залежності швидкості травлення від концентрації травника і температури процесу. У виробництві ІМС найширше застосовується травлення кремнію хлористим воднем (іноді з додаванням пари води). Тому розглянемо практичне здійснення цього процесу. Спочатку через нагрітий реактор пропускають інертний газ, наприклад аргон, поки не встановиться теплова рівновага при заданій температурі. Потім в реактор вводять касету з пластинами кремнію і витримують 5 ... 10 хв для того, щоб знову встановилась теплова рівновага. Після цього подають травник в заданому співвідношенні з воднем. Після закінчення необхідного часу травлення подачу травника припиняють і починають подачу водню. Через 2 ... 3 хв знову подають аргон, а ще через 2 ... 3 хв припиняють подачу водню. В потоці аргону лодочка з підкладками охолоджується.

Чистота використовуваних в процесі травлення газів має особливо важливе значення. Водень чистоти 99,94% додатково очищається безпосередньо перед введенням в реактор.

Наявність в хлористому водні 10^{-4} ... 10^{-2} % азоту приводить до утворення частинок нітриду на поверхні кремнію. Якщо на підкладці з включеннями нітриду виростити епітаксійну плівку, то біля p - n -переходів спостерігається зменшення пробивної напруги. Гранична концентрація кисню в газовій суміші, вище за яку починається окислення кремнію, складає 0,1 ... 0,2 %.

Термохімічне травлення оцінюється, крім швидкості процесу, безпосередньо – за якістю отримуваної поверхні і опосередковано – за параметрами епітаксійних шарів, вирощених на очищеній підкладці.

В епітаксійних шарах, вирощених на підкладках, оброблених термохімічним травленням, спостерігається низька густина дефектів упаковки.

Для всіх газових травників вона не перевищує 10 ... 50 см^{-2} , а при травленні в SF_6 може бути зведена до нуля. При механічному поліруванні підкладок густина дефектів упаковки не менше 10^3 см^{-2} . Про якість епітаксійних шарів судять по тому, який відсоток p - n -переходів, створених на межі підкладка – епітаксійний шар, володіє високою пробивною напругою. Наприклад, при обробці підкладок в хлористому водні пробивну напругу 100 В мали 54 % p - n -переходів, в парах води – 75 %, а в суміші хлористого водню з водою – 82 %. Ці дані дозволяють судити про ефективність методів термохімічного травлення.

Термохімічне травлення добре тим, що забезпечує максимально досягну чистоту поверхні і сумісне з термічними операціями, епітаксією, окисненням, дифузією. Висока чистота обробки досягається за рахунок того, що кремній і практично будь-які забруднення на поверхні переводяться в

Таблиця 2.2. Практичні відомості про газове травлення кремнію

Травник	Хімічна реакція	Концентрація травника у водні, мол. %	Робоча температура, °С	Швидкість травлення, мкм/хв
Хлористий водень HCl	$Si + 4HCl = SiCl_4 + 2H_2$	0,2 ... 5,0	1150 ... 1300	$10^{-2} \dots 10$
Бромистий водень HBr	$Si + 4HBr = SiBr_4 + 2H_2$	0,1 ... 5,0	1260	1 ... 10
Гексафторид сірки SF ₆	$Si + SF_6 = SiF_4 + SF_2$	0,05 ... 1,0	1050 ... 1250	0,2 ... 4,0
Хлор (в гелії) Cl ₂	$Si + 2Cl_2 = SiCl_4$	0,2	700 ... 1000	0,7 ... 1,0
Суміш хлористого водню з парами води HCl + H ₂ O	$Si + 4HCl = SiCl_4 + 2H_2$	$3 \cdot 10^{-2} \dots 1 \cdot 10^{-1}$	> 1230	$10^{-2} \dots 10^{-1}$

газову фазу і легко видаляються, а ймовірність додаткового забруднення при використанні чистих газів зведена до мінімуму. Недоліки термохімічного травлення: високі температури обробки, досить складне устаткування і необхідність застосовувати особливо чисті гази.

Іонно-плазмове травлення поверхні підкладок відбувається за рахунок бомбардування її позитивними іонами, енергія яких повинна перевищувати енергію зв'язку атомів речовини, що обробляється (для діоксиду кремнію, наприклад, 60 еВ). Швидкості іонного травлення різних речовин мало відрізняються. Так, швидкості травлення алюмінію і вольфраму відрізняються всього в два рази.

Для бомбардування використовуються іони інертних газів, що доставляються за допомогою дрейфу в електричному або електромагнітному полі з області тліючого розряду. Розряд запалюється між анодом і катодом при тиску інертного газу 0,133 ... 6,67 Па. Наявність спеціального анода необов'язкова, оскільки його роль можуть відіграти заземлені частини установки; катодом служить речовина, що обробляється. Іони поступають перпендикулярно поверхні катода, внаслідок чого відсутнє бічне підтравлювання. Побічним ефектом бомбардування є радіаційні порушення. Проте в застосовуваному діапазоні прискорюючих напруг (до 1,5 кВ) їх роль мало помітна.

В установці для іонного травлення джерело живлення забезпечує потужність близько 1 кВт і працює на частоті 13,56 МГц. На катоді може розташовуватися до десятка пластин кремнію. Напруга, що прикладається до електродів, може бути постійною або змінною. Використовуючи змінну прискорюючу напругу з частотою 10 ... 20 МГц, можна травити будь-які матеріали – від фоторезисту до вольфраму, що відкриває можливість селективної обробки при фотолітографії. Застосовуючи для захисту товсті шари фоторезисту, можна локально травити металеві плівки.

Керування швидкістю обробки зазвичай досягається зміною ВЧ-потужності, що підводиться. Для малих густин потужностей ($0,5 \dots 1 \text{ Вт/см}^2$) характерна лінійна залежність швидкості травлення від потужності, що дозволяє точно регулювати кількість речовини, що видаляється. Для прикладу на рис. 2.7 приведені основні характеристики процесу травлення SiO_2 , за якими можна вибирати режим обробки. Іонне травлення забезпечує видалення шарів речовини з точністю $\pm 30 \text{ нм}$. Висока роздільна здатність методу обумовлює його використання при отриманні рисунка схем в процесах фотолітографії.

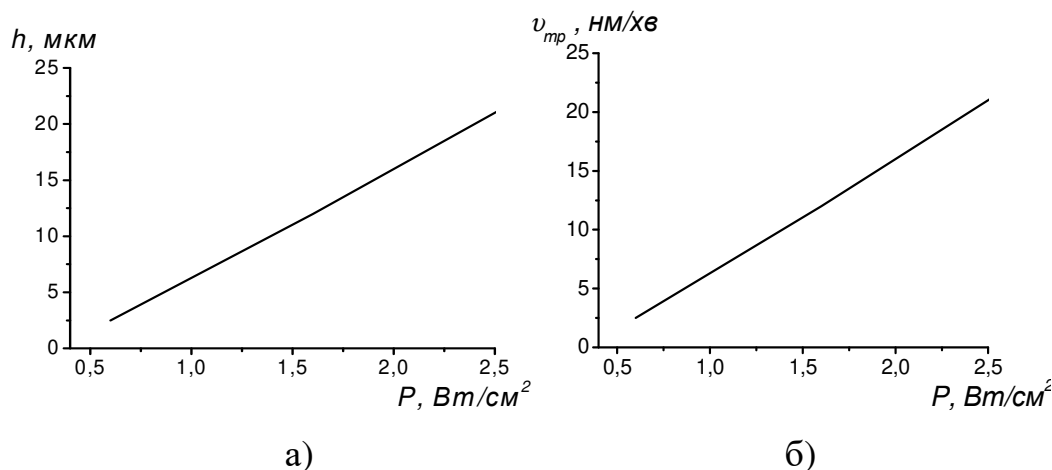


Рис. 2.7. Основні залежності процесу іонного травлення при $T_{\text{підкл}} = 190^\circ\text{C}$; $p_{\text{Ar}} = 0,147 \text{ Па}$:
 а) товщина видаленого шару h в залежності від часу травлення τ при $P = 1,6 \text{ Вт/см}^2$;
 б) швидкість травлення v в залежності від питомої потужності P при $U = 1200 \text{ В}$.

При густинах ВЧ-потужності, що перевищує $2,5 \text{ Вт/см}^2$, швидкість травлення росте швидше за рахунок нагрівання поверхні, що обробляється, і лінійна залежність порушується. Сильний вплив на швидкість травлення здійснює участь в процесі активних газів – кисню і водню. При додаванні 10 % будь-якого з цих газів швидкість травлення органічних речовин, зокрема фоторезисту, зростає, а неорганічних зменшується, так що селективність обробки збільшується. Органічні речовини видаляються швидше, оскільки до іонного травлення додається хімічний процес.

Основна перевага іонного травлення – універсальність. Метод можна застосовувати для обробки практично будь-яких матеріалів при невисокій температурі ($100 \dots 200^\circ\text{C}$). Іонне травлення може бути використане для травлення багат шарових (наприклад, підкладка – резист) структур, “несумісних” з точки зору рідинної і термохімічної обробки шарів. Унікальна особливість іонного травлення – відсутність бічного підтравлювання при створенні локальних заглиблень.

Іонно-плазмові методи обробки мають свої недоліки. Один з них – низька селективність. Наприклад, в результаті травлення шару оксиду разом з ним може бути видалений і поверхневий шар кремнію.

Розділ 3 Формування діелектричних плівок на напівпровідникових пластинах

3.1. Конструктивно-технологічні функції діелектричних плівок

Створення, розвиток і широке впровадження в промисловість планарної технології значною мірою зобов'язане тому, що на поверхні кремнію можна сформувати діелектричну плівку, що володіє хорошими маскувальними і пасивуючими властивостями. При цьому найбільш поширеним і якісним діелектриком був і залишається діоксид кремнію.

Використання окисненої поверхні кремнію як маски обумовлено хімічною інертністю діоксиду кремнію SiO_2 по відношенню до багатьох реагентів. Достатньо сказати, що плівка SiO_2 розчинна тільки в плавиковій кислоті і концентрованих розчинах лугів. Проте роль таких плівок не вичерпується застосуванням їх як масок при формуванні елементів ІМС та МСТ і захисту цих елементів від впливу зовнішніх дій (домішок, вологи, випромінювання і т.п.). Діелектричні плівки використовуються також для електричної ізоляції окремих приладів і комутаційних (особливо багатошарових) провідників. Нарешті, не менш важливе використання плівок SiO_2 як підзатворного діелектрика в МДН-ІМС. Такі пристрої називають МОН (метал - оксид - напівпровідник)-ІМС.

В залежності від функцій, які виконуються діелектричними плівками, до них висуваються різні вимоги. Для плівок, які використовуються як маски, основними вимогами є:

- селективність по відношенню до тих чи інших технологічних факторів (до розчинів, опромінення, газів, плазми і т.п.);
- відсутність пор і тріщин;
- рівномірність товщини, структури і фізико-хімічних властивостей за площею і глибиною маски;
- хороша адгезія до пластини.

В багатьох ТП виробництва ІМС та МСТ (дифузії, фотолітографії, імплантації та ін.) діелектричні маски використовуються для створення в кремнієвій пластині локальних областей із заданими властивостями і конфігурацією.

Якщо діелектрична плівка застосовується як ізоляція, то важливими її характеристиками є: питомий електроопір, тангенс кута діелектричних втрат ($\text{tg } \delta$), діелектрична проникність (ϵ), а також рівномірність і стабільність цих властивостей.

Найбільш жорсткі вимоги до діелектричної плівки при використанні її як підзатворного діелектрика висуває технологія МДН-ІМС. Підзатворний діелектрик повинен володіти особливо високою чистотою і досконалістю (або рівномірністю) структури, повною відсутністю яких-небудь пор, тріщин, сколів та інших порушень. Все це необхідно для задовільної роботи приладів даного типу.

3.2. Технологія формування плівок SiO₂ термічним окисненням кремнію

Найбільш широко застосовуваний метод формування плівок SiO₂ – окиснення кремнію при високих температурах – термічне окиснення.

Плівки SiO₂ завтовшки 0,5 ... 1 нм утворюються на кремнії вже при кімнатній температурі як при зберіганні на повітрі, так і при обробці в різних розчинниках, які використовуються для очищення або травлення поверхні. При окисненні відполірованого монокристалічного кремнію формується шар аморфного діоксиду кремнію. При температурах, близьких до кімнатної, плівка виявляється вельми стійкою. При вищих температурах (до 1200°C), які застосовуються в процесах окиснення кремнію, аморфний діоксид кремнію термодинамічно нестійкий і переходить в стійку кристалічну фазу. Такому переходу сприяють центри кристалізації, що створюються домішками або недосконалістю структури. Проте швидкість цього переходу при температурах нижче 1000°C надзвичайно мала. Механізм переходу подібний до того, який діє в переохолодженій рідині, яка швидко перетворюється на тверде тіло при введенні маленької твердої частинки (затравки), наприклад порошинки, яка утворює центр кристалізації. Подібний процес кристалізації в SiO₂ може привести до виникнення безлічі локальних кристалічних областей або інших недоліків структури, які небажані у всіх випадках застосування SiO₂ в технології ІМС.

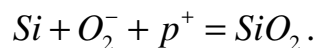
В результаті реакції кремнію з киснем, водою та іншими сполуками, що мають у своєму складі кисень, при порівняно високих температурах утворюється так званий термічний діоксид:



або



На відміну від термічних анодними діоксидами називаються такі, які отримуються в рідкому електроліті чи плазмі за рахунок реакції іонів, які рухаються під дією електричного поля:



де p – додатній заряд від зовнішнього джерела.

На практиці термічне окиснення кремнію проводиться як в сухому (3.1), так і у вологому кисні (3.2) при температурах від 850 до 1300°C. При більш низьких температурах швидкості окиснення дуже малі, що різко знижує продуктивність процесу. Оскільки швидкість реакції (3.2) дещо вища, ніж (3.1), то для підвищення продуктивності доцільніше використовувати як реагент вологий кисень.

Після утворення першого шару SiO₂ на поверхні кремнію подальше зростання шару діоксиду може протікати за двома механізмами. Перший механізм припускає дифузію кисню через приповерхневий шар SiO₂ до поверхні кремнію і реакцію на цій поверхні з утворенням нового моноатомного шару SiO₂. Згідно другого механізму до поверхні діоксиду

дифундує кремній і з'єднується там з киснем. Експериментальними дослідженнями показано, що другий механізм не відіграє істотної ролі в процесі окиснення, оскільки швидкість дифузії кремнію в діоксидах на декілька порядків менше швидкості дифузії кисню.

Таким чином, механізм окиснення кремнію складається з декількох послідовних стадій:

- дифузії кисню (або іншого окиснювача) з газового потоку до поверхні кремнієвої пластини;
- адсорбції кисню цією поверхнею;
- реакції окиснення кремнію згідно рівняння (3.1) чи (3.2) – утворенням первинного шару SiO_2 ;
- дифузії окиснювача через цей шар до поверхні кремнію, де і протікає наступна реакція окиснення.

Схематично цей процес показаний на рис. 3.1.

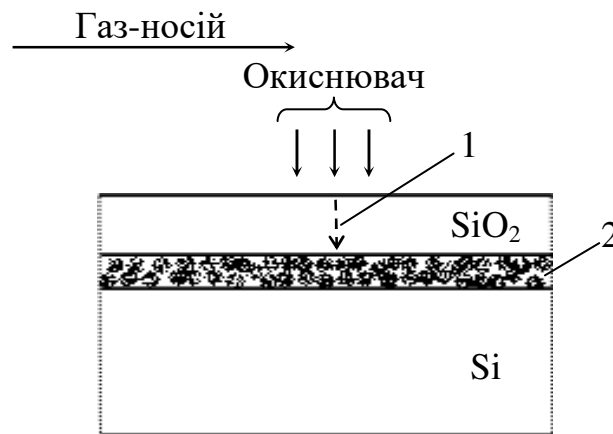


Рис. 3.1. Пояснення механізму окиснення кремнію із газової фази:

- 1 – дифузія окиснювача до поверхні кремнію;
- 2 – зона реакції окиснювача з кремнієм.

Найповільнішою із вказаних стадій є дифузія кисню через шар діоксиду, тому вона і лімітуватиме швидкість процесу в цілому.

Для стаціонарного процесу швидкості потоків кисню у всіх стадіях повинні бути рівні. Оскільки адсорбція відбувається миттєво, то

$$j_1 = j_2 = j_3, \quad (3.3)$$

де j_1, j_2, j_3 – швидкості масопередачі кисню з газового потоку до поверхні пластини, дифузії кисню через окислений шар до поверхні кремнію і реакції окиснення кремнію відповідно.

Потік окиснювача згідно рівняння Фіка описується співвідношенням

$$j_2 = D \frac{C_n - C_m}{x_{\text{SiO}_2}}, \quad (3.4)$$

де D – коефіцієнт дифузії окиснювача в шарі діоксиду, C_n, C_m – концентрації кисню на поверхні пластини (діоксиду) і на межі кремній - діоксид відповідно, x_{SiO_2} – товщина шару діоксиду, тобто глибина дифузії.

Швидкість взаємодії кремнію з киснем за рівнянням (3.1) описується реакцією першого порядку, тобто

$$j_3 = KC_M, \quad (3.5)$$

де K – константа швидкості реакції окиснення кремнію. Оскільки для стаціонарного процесу $j_1 = j_2$, то

$$D \frac{C_n - C_M}{x_{SiO_2}} = KC_M,$$

звідси

$$C_M = \frac{C_n}{1 + K x_{SiO_2} / D}. \quad (3.6)$$

Для потоку окислювача, що досягає поверхні розділу між діоксидом і кремнієм,

$$N \frac{dx_{SiO_2}}{dt} = K \frac{C_n}{1 + K x_{SiO_2} / D}, \quad (3.7)$$

де N – число молекул окиснювача в одиниці об'єму діоксиду, $\frac{dx_{SiO_2}}{dt}$ – швидкість росту діоксиду.

Будемо вважати, що при $t = 0$ $x_{SiO_2} = x_i$. Величина x_i являє собою товщину діоксиду, отриманого при попередньому окисненні (припускаємо, що окиснення здійснюється в декілька етапів). З рівняння (3.7) виведемо співвідношення між часом окиснення і товщиною вирощеного діоксиду:

$$x_{SiO_2}^2 + Ax_{SiO_2} = B(t + \tau), \quad (3.8)$$

де $A = 2D/K$, $B = 2DC_n/N$.

З (3.8) $\tau = \frac{x_{SiO_2}^2 + Ax_{SiO_2}}{B}$. Розв'язуючи рівняння (3.8), отримуємо

$$\frac{x_{SiO_2}}{A/2} = \sqrt{1 + \frac{t + \tau}{A^2/4B}} - 1. \quad (3.9)$$

Співвідношення (3.9) має два граничні випадки. Якщо час великий, тобто $t + \tau \gg A^2/4B$, то окиснення описується параболічним законом:

$$x_{SiO_2}^2 = B(t + \tau),$$

де B – стала параболічного закону окиснення.

Для малих часів окиснення, тобто при $t + \tau \ll A^2/4B$, закон окиснення має лінійний характер: $x_{SiO_2} = B(t + \tau)/A$, де B/A – стала лінійного закону окиснення.

На рис. 3.2 показана експериментальна залежність товщини оксиду від часу окиснення.

Залежність B від температури визначається температурною залежністю коефіцієнта дифузії D окислювача в оксиді. На рис. 3.3 представлені експериментальні результати температурної залежності B для окиснення в

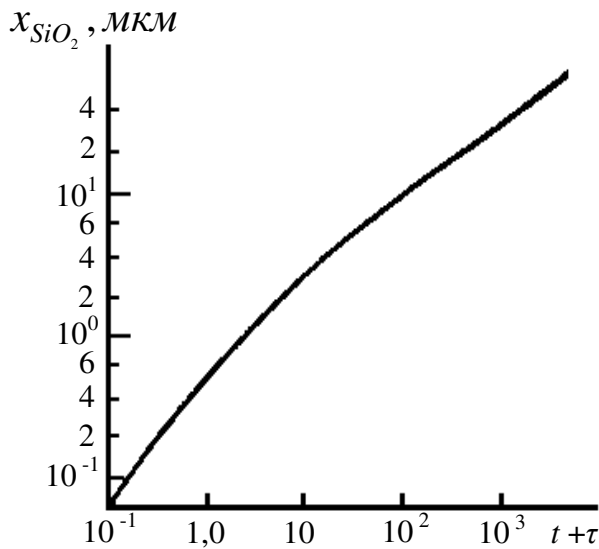


Рис. 3.2. Залежність товщини діоксиду кремнію від часу окиснення

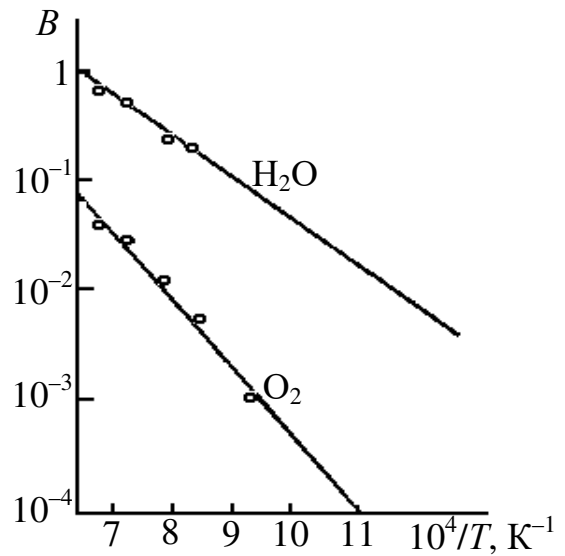


Рис. 3.3. Зв'язок постійної B параболічного закону окиснення з температурою

сухому кисні і в парах води. Дані відносяться до кремнію, орієнтованого по площині (111). Окиснення характеризується енергією активації, яка в сухому кисні рівна $1,98 \cdot 10^{-19}$ Дж, а в парах води $1,14 \cdot 10^{-19}$ Дж. Ці значення дуже близькі до енергій активації для дифузії кисню і парів води через аморфну плівку SiO_2 . Використовуючи дані по коефіцієнтах дифузії, можна розрахувати для кисню і води значення C_n . Виявляється, що для кисню $C_n = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, а для води $C_n = 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Ці значення близькі до граничних розчинностей кисню і води в аморфній плівці SiO_2 .

Співпадіння значення товщини діоксиду, вирощеного в сухому кисні, з розрахунковим значенням спостерігається, якщо припускати, що на початку окиснення поверхня кремнію була покрита шаром SiO_2 товщиною близько 20 нм.

Швидкий ріст SiO_2 в приповерхневому шарі можна пояснити тим, що окислювач дифундує через діоксид не в нейтральному, а в зарядженому стані. Якщо молекула O_2 , потрапляючи в діоксид, дисоціює на іон O_2^- і позитивно заряджену дірку p^+ , яка володіє в діоксиді дуже високою рухливістю, то при дифузії цих частинок до межі діоксид-кремній може виникнути поле, яке прискорює дифузію іонів O_2^- . Таке прискорення буде ефективно позначатися в початковий момент окиснення, а після досягнення товщини SiO_2 близько 15 нм швидкість окиснення зменшується. При окисненні в парах води приповерхневий шар має товщину близько 0,5 нм, тобто практично відсутній.

Питання впливу електричного поля на кінетику росту шару SiO_2 досить важливе. Експерименти показують, що при окисненні в атмосфері кисню з накладенням електричного поля окиснюючий агент дифундує через SiO_2 в

негативно зарядженому стані. Це говорить про наявність в оксидному шарі негативно заряджених іонів кисню, які збільшують швидкість росту оксиду.

Розглянута модель термічного окиснення справедлива як для окиснення в чистому сухому кисні, так і в чистих парах води. На практиці при термічному окисненні використовується суміш кисню і парів води (вологий кисень).

Кількісний аналіз процесу окиснення у вологому кисні досить складний із-за великого числа можливих реакцій в системі і одночасній дифузії в оксидному шарі двох окислювачів – кисню і водяної пари. Проте в загальному випадку процес можна описати параболічним законом:

$$x_{SiO_2}^2 = k_1 p^m t \exp\left(\frac{-E_A}{kT}\right), \quad (3.10)$$

де k_1 – стала, m – величина, яка рівна приблизно 0,5 при високому тиску водяних парів (0,2 ... 0,5 атмосферного) і зменшується до 0,1 ... 0,2 при більш низькому тиску пари, p – тиск водяної пари, E_A – енергія активації.

При практичному здійсненні окиснення у вологому кисні тиск водяної пари зазвичай регулюється зміною температури барботера, через який пропускається потік газу, що містить кисень. Кращі властивості діоксиду забезпечуються при нижчому тиску водяної пари (нижче 0,15 атмосферного), який досягається при температурі барботера нижче 60°C.

Плівки SiO_2 , вирощені в парах води і у вологому кисні, володіють гіршими електричними і захисними властивостями, ніж плівки, вирощені в сухому кисні. В зв'язку з цим термічний діоксид формується при комбінованих режимах. Чергуються етапи вирощування в сухому і вологому кисні. Після окиснення у вологому кисні проводиться окиснення в атмосфері сухого кисню. При цьому швидкість росту і товщина шару визначаються першим етапом. Під час другого етапу видаляється вода з шару SiO_2 , відбувається додатковий незначний ріст шару діоксиду, а головне, ущільнюється вирощений на першому етапі шар і заростають порожнини та різні дефекти.

Зупинимося на деяких особливостях кінетики термічного окиснення кремнію, що не описуються розглянутою основною моделлю. При вирощуванні в сухому кисні шарів діоксиду великої товщини (понад 1 ... 1,5 мкм), для чого потрібні десятки годин, залежність товщини оксиду від часу описується законом

$$x_{SiO_2} = const t^n, \quad (3.11)$$

де n міняється в межах від 0,637 при 900°C до 0,518 при 1150°C.

Механізм, що приводить до такої залежності, пов'язаний з дифузією, яка відбувається при рухомій межі Si-SiO₂ і оборотній реакції, що одночасно відбувається між дифузантом і середовищем, в якому відбувається дифузія. В результаті швидкість росту шару може бути більша, ніж при чисто параболічному законі.

Вивчення термічного окиснення чистого кремнію і кремнію, легованого донорними і акцепторними домішками, показало, що наявність

домішок впливає на швидкість окиснення. Цей вплив обумовлений або зміною коефіцієнта дифузії окиснювача в шарі, або зміною швидкості реакції окиснення на межі розділу Si-SiO₂. Так, при окисненні бор прагне перейти з кремнію в оксид, тому шар, що росте, збагачений бором. Коефіцієнт дифузії через такий шар росте. Отже, кремній, сильно легований бором, окиснюється швидше високоомного (чистого) кремнію як при високих температурах, де справедливий параболічний закон росту діоксиду, так і при нижчих температурах, де виконується лінійний закон. Фосфор, яким може бути легований кремній *n*-типу, не має тенденції переходити в шар діоксиду. Тому дифузія окиснювача в такому шарі не відрізняється від дифузії в діоксиді, який росте на чистому кремнії. Проте наявність фосфору в кремнії збільшує швидкість хімічної реакції на поверхні кремнію, внаслідок чого кремній, сильно легований фосфором, при температурах нижче 1100°C окиснюється швидше, ніж чистий кремній (так як при низьких температурах швидкість окиснення визначається реакцією на поверхні Si). Особливо різко ця відмінність виявляється при 700 ... 800°C. При температурах вище 1100°C збільшення швидкості росту діоксиду на кремнії, легovanого фосфором, практично непомітне.

На швидкість термічного окиснення впливають не тільки домішки, що містяться в кремнієвій підкладці, але і домішки в шарі діоксиду, що росте, в першу чергу домішки іонів гідроксилу і натрію. Іони гідроксилу, які утворюються в багатоступінчатій реакції кремнію з парами води, збільшують швидкість окиснення. Що стосується натрію, то його наявність на межі розділу між діоксидом і кремнієм приводить до каталітичної дії на реакцію окиснення кремнію, яка сильніше позначається за наявності іонів гідроксилу, тобто при окисненні в парах води або вологому кисні.

Окиснення кремнію в кисні в інтервалі температур 1100 ... 1300°C при малому тиску газу (1,198 ... 13,33 Па) характеризується рядом особливостей. В таких умовах кремній може утворювати леткі оксиди, що випаровуються з його поверхні, що приводить до збільшення швидкості окиснення. При тиску 1,2 ... 5,3 Па на поверхні кремнію взагалі не утворюється шар SiO₂, а єдиним продуктом окиснення є леткий монооксид SiO. При тиску кисню 13,33 Па утворення шару SiO₂ на поверхні кремнію відбувається з високою швидкістю.

Графіки залежності товщини діоксиду від часу окиснення в сухому кисні і в парах води при різних температурах показані на рис. 3.4.

Термічне окиснення кремнію, яке дає можливість отримати високоякісний діелектрик на поверхні кремнію, володіє в той же час рядом обмежень і недоліків. До них відноситься перш за все висока температура процесу, що створює великі труднощі в технології, особливо при окисненні пластин, на (в) яких вже сформовані структури елементів ІМС та МСТ. Ці структури при тривалій високотемпературній обробці значно змінюють свої характеристики. Тому доводиться вводити істотні поправки в розрахунки, що враховують вплив дифузійних процесів в структурах ІМС та МСТ при високих температурах.

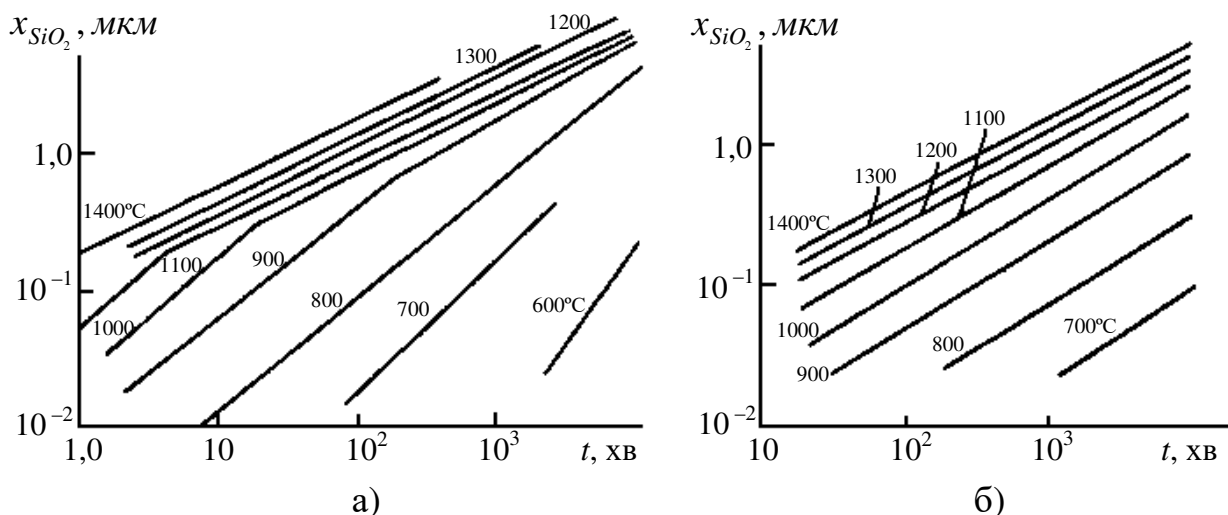


Рис. 3.4. Залежність товщини діоксиду кремнію від часу і температури при окисненні в парах води (а) і в сухому кисні (б)

Крім того, термічним окисненням можна отримувати тільки SiO_2 , а технологія ІМС та МСТ використовує й інші діелектрики, особливо для пристроїв, що виконуються не з кремнію, а з різних напівпровідникових сполук (GaAs , GaP , Si_3N_4 і т.п.).

При виготовленні НВЧ ІМС на основі кремнію термічне окиснення затрудняє формування прецизійних структур, оскільки не дозволяє формувати точні конфігурації областей вигинів.

Для подолання цих недоліків в технології ІМС та МСТ були розроблені методи формування діелектричних плівок осадженням їх з газової або парової фаз за допомогою хімічних реакцій або термовакuumного випаровування.

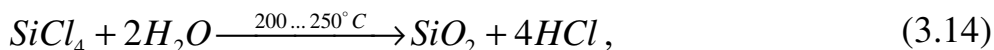
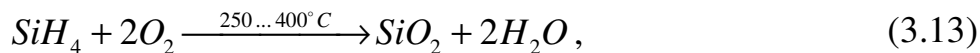
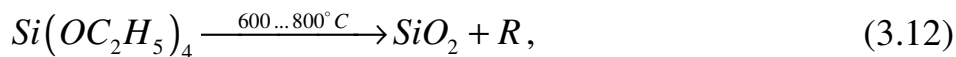
3.3. Технологія осадження діелектричних плівок на поверхні пластин

Хімічне осадження діелектричних плівок з газової фази найбільш поширене на практиці внаслідок простоти, універсальності і високої продуктивності процесу.

Простота процесу пояснюється:

- простотою устаткування і доступністю (недефіцитністю) вихідних матеріалів;
- універсальністю – можливістю осаджувати плівки різних матеріалів;
- високою продуктивністю – значно більшою швидкістю хімічних реакцій осадження у порівнянні з процесом окиснення.

Для осадження плівок SiO_2 використовуються реакції піролізу, окиснення або гідролізу легколетких сполук кремнію: тетраетоксисилану $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$, силану SiH_4 , тетрахлориду кремнію SiCl_4 та ін. Ці реакції можна описати рівняннями:



де R – органічні радикали C_2H_5 , CH_3 та ін.

Для отримання SiO_2 за схемою (3.12) використовуються й інші етоксисилани, що є продуктами заміщення в молекулі SiH_4 (чи SiCl_4) атомів водню (чи хлору) на групу OC_2H_5 . Ступінь заміщення може змінюватися від 0 до 4. Найбільш стабільним етоксисиланом є тетраетоксисилан $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ з температурою кипіння 167°C . Пари $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ розкладаються при $600 \dots 800^\circ\text{C}$ з утворенням SiO_2 , SiO і різних органічних радикалів. Швидкість росту плівки SiO_2 при температурі вище 700°C достатньо велика, що дозволяє отримувати шари товщиною в декілька мікрон за $10 \dots 15$ хв. Для піролізу етоксисилану використовується установка, схема якої показана на рис. 3.5. В цій установці над кремнієвими підкладками пропускається потік газу-носія (аргону, азоту або водню), що містить пари етоксисилану.

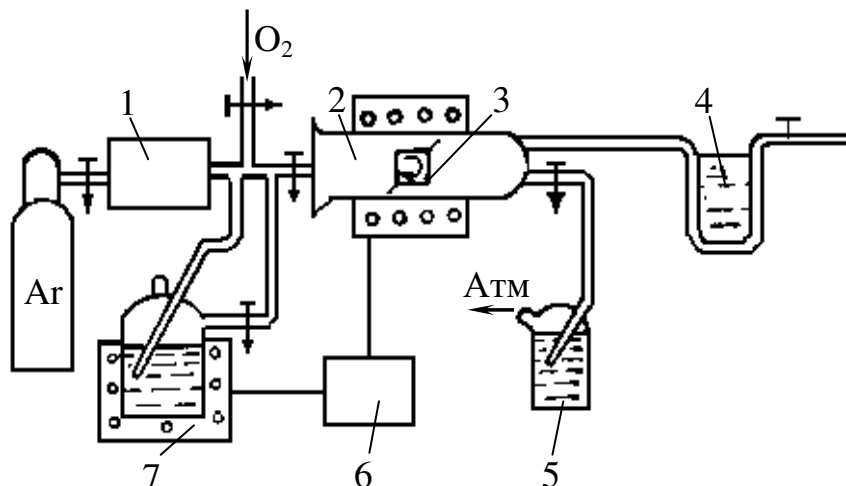


Рис. 3.5. Схема установки для проведення піролізу в потоці інертного газу: 1 – очищення газу; 2 – камера із кварцового скла; 3 – підкладка, що обертається; 4 – система відкачування з пасткою; 5 – гідрозатвор; 6 – система керування і контролю процесами; 7 – термостат і барботер з вихідним матеріалом.

Піроліз тетраетоксисилану при температурах нижче 700°C буде неповним, і шар SiO_2 , що росте, виявиться забрудненим проміжними продуктами розкладання $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$. Вище 750°C шар забруднюється вуглецем, карбідом кремнію і смоляними продуктами піролізу. Щоб уникнути попадання вуглецю в плівки SiO_2 , іноді для піролізу використовують кремнійорганічні речовини, що повністю розкладаються при нижчих температурах і тому не забруднюють плівку SiO_2 вуглецем. Так, застосування тетраацетоксисилану $\text{Si}(\text{OCOCH}_3)_4$ і олігоацетоксисилоксану $\text{Si}_n\text{O}_{n-m}(\text{OCOCH}_3)_{2(n-m)}$ дає можливість отримувати якісні шари SiO_2 при температурах осадження 500°C і нижче.

Використовувані для осадження шарів етоксисилани можуть містити неконтрольовані донорні і акцепторні домішки, які при подальшій дифузії забруднюють розташовані під оксидом області кремнію до рівня 10^{18} ат/см³. Для усунення цього недоліку застосовується етоксисилан, отриманий з особливо чистого силану, причому осадження проводиться не у відкритій трубі в потоці газу-носія, а у вакуумній системі, яка наповнюється після відкачування парами етоксисилану. В результаті рівень забруднення кремнію під поверхнею плівки знижується до $10^{15} \dots 10^{16}$ ат/см³.

На відміну від реакції піролізу кремнійорганічних сполук (3.12) реакції окиснення (3.13) і гідролізу (3.14) протікають без утворення органічних залишків, тобто в чистіших умовах, що сприяє формуванню дуже чистих плівок. Однак низькі температури процесу приводять до утворення нещільних плівок. Щоб уникнути цього, необхідно строго регулювати концентрацію силану в газовій фазі і подавати його безпосередньо на поверхні пластин, запобігаючи тим самим зародженню і росту SiO₂ в газовій фазі. Хоча реакція (3.13) може протікати без зовнішнього нагріву, для отримання якісних щільних шарів на поверхні пластин необхідно підтримувати гетерогенну реакцію при температурах 300 ... 350°C, які забезпечують десорбцію молекул води з утвореної плівки.

Швидкість росту плівки лінійно росте із збільшенням швидкості потоку силану. Проте при підвищенні температури швидкість осадження SiO₂ збільшується дуже різко. Це зростання можна компенсувати відповідним розбавленням газу або зменшенням відношення O₂/SiH₄, як показано на рис. 3.6.

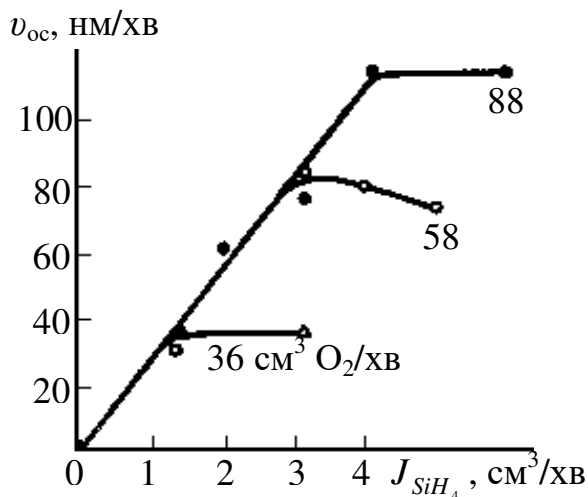


Рис. 3.6. Залежність швидкості росту діоксиду кремнію від швидкості потоку силану при реакції між SiH₄ і O₂

Процес, що описується реакцією (3.14), протікає вже при кімнатній температурі, і утворений в парах діоксид кремнію осідає на поверхню у вигляді рихлих осаджень. Для покращення якості осаджуваної плівки, як і у попередньому випадку, необхідно підтримувати температуру на рівні 500 ... 550°C і подавати пари SiCl₄ (чи SiF₄) безпосередньо на поверхню пластини.

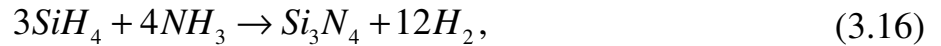
Переваги процесів осадження шарів згідно реакцій (4.13) і (4.14) – можливість їх поєднання з епітаксійним нарощуванням кремнію в одному апараті і висока чистота сформованих плівок.

Крім діоксиду кремнію використовуються й інші плівкові діелектрики. До них відносяться: нітрид кремнію Si₃N₄, оксид алюмінію Al₂O₃, діоксид титану TiO₂, п'ятиокис танталу Ta₂O₅.

Формування плівок Si_3N_4 прямим азотуванням пластин кремнію за реакцією



практично не застосовується із-за високих температур (1300°C) і надзвичайно малих швидкостей процесу. Як і при формуванні шарів SiO_2 , найкращі результати отримуються при використанні газофазних реакцій:



де Γ – галоген (Cl, Br, I).

Процеси осадження Si_3N_4 протікають із задовільною швидкістю (від 1 до 20 нм/хв) при температурах $600 \dots 1100^\circ\text{C}$. Аморфні шари, вирощені при високих температурах ($1000 \dots 1200^\circ\text{C}$), прозорі, володіють високою густиною і хорошою маскуючою здатністю. На рис. 3.7 показана залежність швидкості росту плівок Si_3N_4 від температури в системі $\text{SiH}_4 - \text{NH}_3$ (силановий процес) при відношенні концентрацій 1 : 20. При недостатньо ретельному очищенні поверхні пластин домішки можуть стати зародками кристалітів в плівці, що приведе до різкого погіршення її однорідності, а отже, і якості.

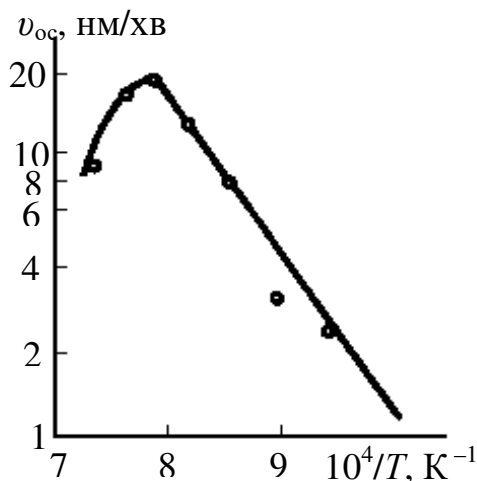


Рис. 3.7. Температурна залежність швидкості росту плівки Si_3N_4 в силановому процесі, який здійснюється в атмосфері водню

В технології МДН-ІМС часто використовуються шари не тільки з чистого SiO_2 , але і двошарові структури $\text{SiO}_2 - \text{Si}_3\text{N}_4$. В цих випадках ІМС називаються не МОН-, а МНОН (метал – нітрид – оксид – напівпровідник) ІМС.

Шари оксиду алюмінію зазвичай отримують анодним окисненням алюмінію або осадженням Al_2O_3 , як і SiO_2 , із металорганічних сполук алюмінію. Інтерес до плівок Al_2O_3 пояснюється їх високими діелектричними і оптичними властивостями. Діелектрична проникність цих плівок $\varepsilon = 8 \dots 9$, а показник заломлення $n = 1,6 \dots 1,68$ (у монокристалічного сапфіру $n = 1,76$).

Використовуючи як вихідні продукти суміші металоорганічних сполук кремнію і алюмінію, неважко отримувати плівки алюмосилікатів ($n\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot m\text{SiO}_2$), що володіють проміжними властивостями у порівнянні з Al_2O_3 і SiO_2 .

3.4. Параметри якості діелектричних плівок

В залежності від області застосування діелектричних плівок до їх параметрів якості пред'являються різні вимоги.

При використанні SiO_2 як технологічної маски для її травлення зазвичай використовуються розчини плавикової кислоти (HF) у воді з

різними добавками. Встановлено, що плівки, вирощені термічним окисненням, мають найменшу швидкість розчинення (як більш щільніші), а плівки, осаджені термовакуумним випаровуванням, – найбільшу (як менш щільні). Якщо отримані піролізом плівки відпалити при високих температурах, то можна досягти такої ж якості їх, як і при термічному окисненні.

Швидкість травлення плівок залежить від температури розчинення, мало залежить від швидкості перемішування розчинника і практично не залежить від того, чи піддавалися перед окисненням пластини механічному чи хімічному поліруванню і як проводилося вирощування діоксиду кремнію – в сухому чи вологому кисні або в парах води. В технології виготовлення ІМС важливо, щоб швидкість розчинення мало залежала від концентрації розчинника. Для вирішення цього завдання були створені так звані буферні травники, до складу яких входить фтористий амоній NH_4F . Наприклад, травник, що складається з 10 см^3 48%-ого водного розчину HF і 100 см^3 40%-ого водного розчину NH_4F , розчиняє термічно вирощений діоксид із швидкістю 20 нм/хв.

Наявність домішок підвищує швидкість травлення плівок SiO_2 , особливо коли домішки потрапляють в SiO_2 із газової фази. В процесі фотолітографічної обробки одночасно травляться ділянки діоксиду кремнію, які не містять і містять домішки.

Неоднакова швидкість травлення цих ділянок може приводити до підтравлювання, яке викликає значне розширення областей, з яких видаляється оксид, за рахунок проникнення травника в бічному напрямі під шар резисту.

В технології ІМС часто хімічна обробка діоксиду проводиться на всій поверхні пластини без захисту окремих ділянок фоторезистом. При цьому наявність в діоксиді домішок там, де їх не повинно бути, може призвести до локального збільшення швидкості травлення, а отже, видалення потрібної ділянки діоксиду, нехай навіть невеликого розміру. Це може стати згодом причиною виникнення браку.

В процесі створення шарів SiO_2 на поверхні кремнієвих пластин в них можуть виникати різного роду дефекти, які в подальшому приводять до погіршення або нестабільності параметрів елементів ІМС. Розглянемо стисло основні види таких дефектів. Ці дефекти можуть мати атомні чи більші розміри. Перші обумовлені нестачею або надлишком іонів кисню, наявністю в діоксиді атомів чи іонів просторових домішок і утворенням ненасичених зв'язків на межі між кремнієвою підкладкою і шаром діоксиду. Великі дефекти – це пори або канали в оксидному шарі, мікротріщини чи межі між кристалічними і аморфними ділянками шару. Багато дефектів подібного роду виникають в оксидному шарі при термічному окисненні підкладок, що мають порушення на поверхні. В місцях розташування цих порушень можуть утворитися дефекти типу точкових проколів чи ділянки з підвищеною швидкістю травлення. Такі дефекти і приводять згодом до погіршення параметрів напівпровідникових пристроїв. На підкладках достатньо високої

якості можна виростити SiO_2 без подібних дефектів. В залежності від умов термічного окиснення на поверхні кремнію може бути сформований не тільки аморфний, але і кристалічний діоксид кремнію (у модифікації α і β кристобаліту). Його утворення пов'язане з вищою температурою окиснення. В подальшому при термообробках можуть з'являтися тріщини в кристалічних шарах SiO_2 і на межах між кристалічними і аморфними ділянками.

Одна з причин утворення дефектів в шарах SiO_2 і на їх границі з кремнієм – механічні напруги. Такі напруги з'являються в шарах, отриманих різними способами: термічним нарощуванням, піролізом $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ і низькотемпературним окисненням силану. Напряга виникає із-за відмінності термічних коефіцієнтів розширення підкладки і оксидного шару; змін, що відбуваються в шарах при подальших термообробках; деяких явищ, пов'язаних з характером зародження і росту шару, але не пов'язаних з відмінністю коефіцієнтів розширення шару і підкладки (так звана “власна” напруга). Напруги в шарі SiO_2 , вирощеного на кремнієвій підкладці при високій температурі, є напругами стиску, оскільки термічний коефіцієнт розширення кремнію в кілька разів вищий, ніж у SiO_2 . Напруги мають значення порядку 10^8 Па. Очевидно, що значення напруг та їх роль тим більша, чим більша товщина шару.

Напруги в шарах приводять до появи в них тріщин і відшаровування їх від підкладки. Мала напруга може не викликати цих дефектів, але сприяти концентрації вакансій біля межі розділу з підкладкою, що приводить до зміни густини енергетичних станів на межі між оксидом і кремнієм. Вплив напруги в шарі SiO_2 позначається при його фотолітографічній обробці. Неоднорідний розподіл напруг приводить до неоднорідного травлення шару, яке спостерігається як в місцях концентрації напруги, так і в місцях скупчення забруднень. Забруднення можуть з'являтися на підкладці перед окисненням або потрапляти на поверхню SiO_2 в подальших технологічних операціях. В результаті після часткового травлення шару SiO_2 можуть утворитися точкові отвори – проколи. Ці проколи – одне з серйозних джерел браку в технології напівпровідникових пристроїв.

З точки зору дефектності найкращими є шари, вирощені термічним окисненням на вільних від дефектів підкладках, найгіршими – отримані анодним окисненням в розчинах електролітів без подальшої термічної обробки.

Значення густин плівок SiO_2 , вирощених різними способами, практично мало відрізняються і складають $2,2 \text{ г/см}^3$. Питомий електроопір дуже сильно залежить від технології отримання плівок, особливо від концентрації домішок і дефектів в них. Кращі плівки мають питомий опір $10^{15} \dots 10^{16} \text{ Ом}\cdot\text{см}$, гірші – $10^{12} \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Діелектрична проникність складає від 3 до 3,8 залежно від методу вирощування плівок. Електрична міцність міняється від 10^6 до 10^7 В/см , але може різко зменшуватися при появі в плівках дефектів. Для плівок, які використовуються як підзатворні діелектриків в МДН-ІМС, всі параметри повинні бути якнайкращими.

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, який здатний під дією опромінювання певної довжини хвилі змінювати необоротно свої властивості і характеризується насамперед стійкістю 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.

4.1. Загальні поняття про фотолітографію

Фотолітографія – це сукупність фотохімічних процесів, серед яких можна виділити три основних етапи: формування на поверхні матеріалу шару фоторезисту (ФР), передавання зображення з шаблону на цей шар, формування конфігурації елементів пристроїв за допомогою маски з

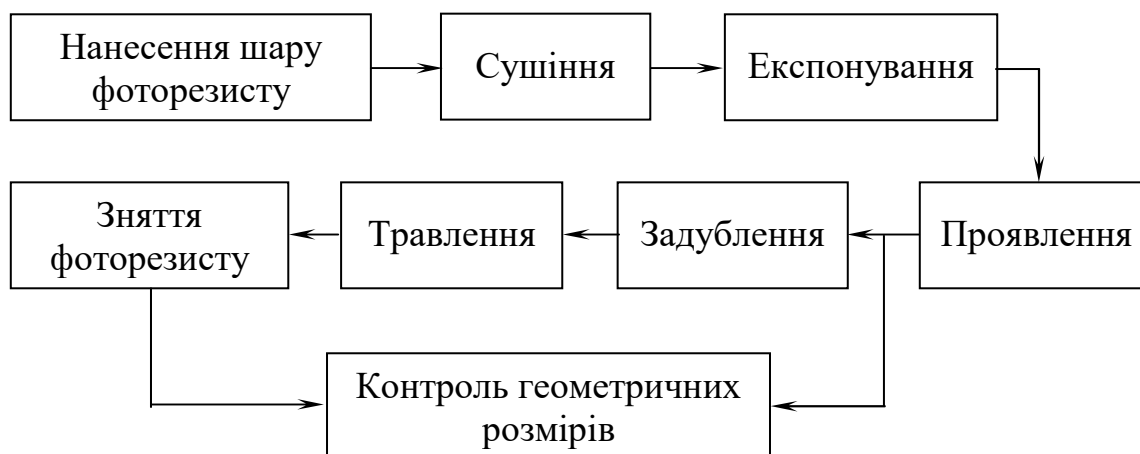


Рис. 4.1. Схема процесу фотолітографії

фоторезисту (ФР). Схема процесу фотолітографії (ФЛ) показана на рис. 4.1.

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

В загальному випадку резисти являють собою органічні композиції, які складаються з чутливої до використовуваного опромінення органічної сполуки – полімеру, розчинників і добавок, які модифікують властивості сумішей. За ознаками, обумовленими різними реакціями, які протікають в

плівок під дією опромінення, і характеру змін їх властивостей, резистин діляться на негативні та позитивні

Фоторезисти, в яких розчинність експонованої ділянки зменшується, називаються негативними, а ФР, розчинність яких після опромінювання зростає – позитивними. Після обробки експонованого ФР в суміші, яка

Шар фоторезисту

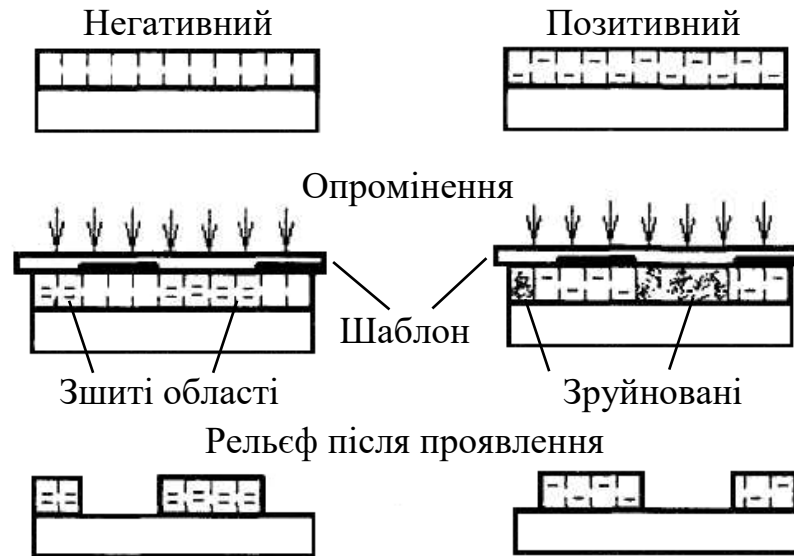


Рис. 4.2. Утворення рельєфу при використанні негативних і позитивних ФР

усуває розчинні ділянки, утворюється рельєфне зображення (рис. 4.2), яке повинне бути стійким до дії технологічних факторів.

Обидва типи резистів повинні задовольняти наступним основним вимогам:

- висока чутливість до опромінення;
- висока селективність до дії проявників при обробці експонованих плівок з метою видалення опромінених чи неопромінених ділянок;
- здатність формування тонких покриттів, які володіють однорідністю і мінімальною дефектністю.

До основних переваг фотолітографічного процесу можна віднести:

- можливість отримання елементів ІМС та МСТ досить малих розмірів (до 1 мкм) практично будь-якої конфігурації;
- універсальність методу, який дає можливість виготовляти трафарети для напилення плівок і сіткографії, селективно травити напилені плівкові шари, витравлювати “вікна” в оксидних плівках для створення масок при локальних дифузії, епітаксії, імплантації, здійснювати глибинне травлення в напівпровідникових і діелектричних підкладках;
- можливість застосування групової технології, яка забезпечує отримання мільйонів елементів за одну операцію і на одному виді обладнання.

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.

4.2. Фоторезисти та їх основні характеристики

Як згадувалось вище, фоторезист – це багатокомпонентний матеріал, який складається з полімерної основи і різних добавок, які забезпечують, в першу чергу, підвищення світлочутливості, а також такі властивості, як кислотостійкість, в'язкість, змочування та ін.

Як полімерну основу більшості фоторезистивних матеріалів використовуються полівініловий спирт, поліефіри, поліаміди, фенолформальдегідні і епоксидні смоли, полівінілацетат, каучуки та ін. На даний час розроблено багато світлочутливих композицій, які володіють великим квантовим виходом (квантовий вихід – це здатність молекул до фотохімічного перетворення, який рівний відношенню кількості молекул, що прореагували, до кількості поглинутих квантів; позначається γ). Проте далеко не всі вони можуть застосовуватися в якості ФР при виробництві ІМС та МСТ. Найбільш важливими у ФЛ характеристиками резистів є наступні:

Світлочутливість - величина, обернена експозиції H , яка потрібна для переведення ФР в розчинний або нерозчинний (в залежності від виду резисту) стан.

$$S = \frac{1}{H} = \frac{1}{Et}, \quad (4.1)$$

де t – час опромінення, E – освітленість.

В даному випадку мова йде про інтегральну світлочутливість при використанні всього енергетичного потоку. В той же час чутливість будь-якого резисту має спектрально вибіркового характер. В зв'язку з цим часто зустрічається поняття спектральної чутливості ФР S_λ при опроміненні плівок монохроматичним світлом. Володіючи сукупністю значень S_λ для ряду довжин хвиль, можна побудувати криву спектральної чутливості.

Висока світлочутливість матеріалів досягається введенням в полімерні композиції світлочутливих добавок, які дозволяють проводити однонаправлені фотохімічні процеси з достатньо високим квантовим виходом; введенням в макромолекули полімерів певних хімічних груп, фотохімічні реакції яких приводять до необхідної зміни властивостей матеріалу; створенням композицій, які містять речовини, здатні до фотополімеризації.

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

$$R = \frac{1000}{2l}, \quad (4.2)$$

де l – ширина лінії.

В останні роки все частіше роздільну здатність визначають найменшою шириною лінії чи найменшою відстанню між лініями (в мікрометрах) які вдається досягти у фотолітографічному ТП.

Можливість отримання мінімальних розмірів заданого рельєфу залежить від якості резисту, режимів технологічних операцій і особливо від досконалості обладнання. Фізична межа роздільної здатності звичайної оптики обмежена довжиною хвилі джерела випромінювання світла. Мінімальний розмір світлової плями

$$R_0 = \frac{\lambda}{A}, \quad (4.3)$$

де λ – довжина хвилі, A – числова апертура оптичної системи.

Слід розрізняти роздільну здатність ФР і процесу ФЛ в цілому. Так, при роздільній здатності ФР близько 1000 лін./мм процес ФЛ дозволяє отримати роздільну здатність близько 600 лін./мм. Це пояснюється наявністю процесів, які призводять до недосконалості перехідних ділянок (від покритих ФР до непокритих) в захисному рельєфі рисунка після проявлення. До таких явищ належить дифракція, інтерференція, розсіювання і відбивання світла в системі підкладка – фоторезист – фотошаблон.

В результаті паразитного опромінення шару негативного ФР при експонуванні (рис. 4.3, а) за рахунок дифракції світла на краю непрозорого елемента фотошаблону, дифузійного розсіювання в шарі і часткового відбивання від підкладки відбувається “зшивання” незначної частини шару ФР, яка лежить поблизу межі прозорого і непрозорого елементів фотошаблону. Проте після проявлення (рис. 4.3, б) залишається тільки ділянка резисту (“ореол”), яка безпосередньо прилягає до підкладки і утримується силами адгезії. Очевидно, що чим товстіший фоторезистивний шар, тим більший “ореол”. Ділянки резисту, які розташовані під непрозорими елементами фотошаблону і зшиті паразитними опроміненнями незначної інтенсивності, легко видаляються при проявленні.

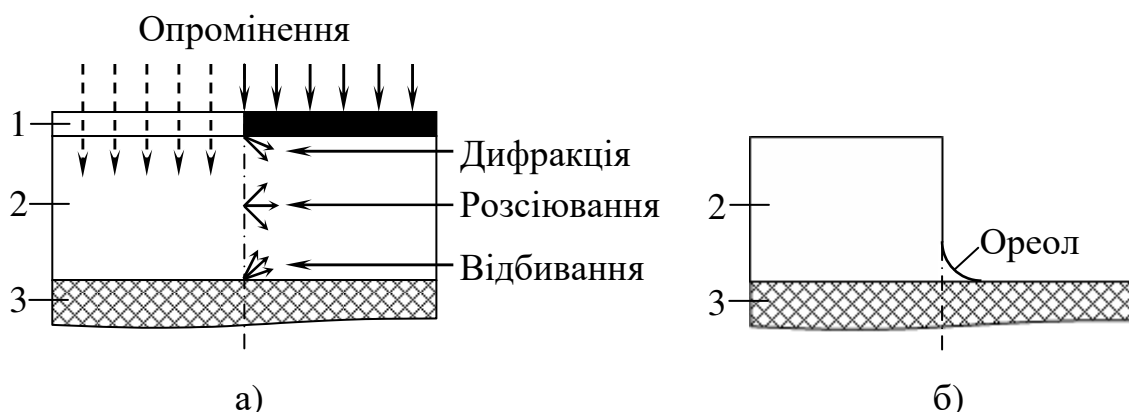


Рис. 4.3. Поглинання випромінювання шаром негативного ФР:
а – області переважального впливу дифракції, розсіювання і відбивання світла від підкладки; б – рельєф ФР після проявлення;
1 – фотошаблон, 2 – ФР, 3 – підкладка.

Роздільна здатність процесу ФЛ зменшується також через бокове підтравлювання матеріалу підкладки під шаром ФР на межах захисного бар'єру (рис. 4.4). Бічне підтравлювання збільшується при використанні товстих плівок.

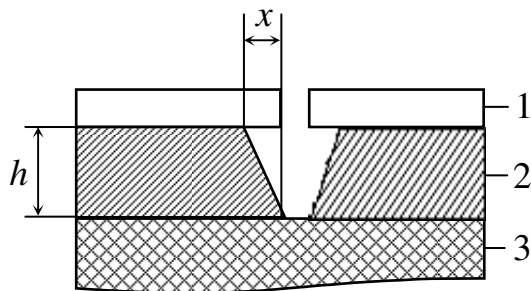


Рис. 4.4. Бічне підтравлювання під шаром ФР:

1 – ФР, 2 – плівка, яку необхідно стравити, 3 – підкладка;

h – глибина травлення, x – бічне підтравлювання

Роздільна здатність процесу визначається в значній мірі досконалістю використовуваних фотошаблонів і джерел УФ-випромінювання. Для високоякісних шаблонів і однорідних джерел УФ-випромінювання можна отримати роздільну здатність тонкого шару ФР порядку 800 лін./мм, тобто близько 1,5 мкм.

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).

ФР повинні володіти високою стійкістю до дії кислот і лугів, оскільки в процесі травлення чи електролітичного осадження захисний рельєф значний час (до декількох хвилин) контактує з концентрованими кислотами (плавиковою, азотною, соляною, ортофосфорною, сірчаною) і лугами (їдкими калі і натром). Кислотостійкість ФР визначається в основному хімічним складом його полімерної основи. Для підвищення кислотостійкості в склад ФР вводять різні кислотостійкі добавки, наприклад, хлорований новолак, епоксидні смоли та ін. Високою кислотостійкістю володіють резисти на основі каучуків, які дозволяють травити кремній до глибини 100 мкм.

Кислотостійкість ФР часто оцінюють фактором травлення

$$K = \frac{h}{x}, \quad (4.4)$$

де h – глибина травлення, x – бокове підтравлювання.

Деякі позитивні ФР відрізняються невисокою стійкістю до дії лугів, що пояснюється наявністю в композиції фенольних смол, які розчиняються в лугах на неопромінених ділянках захисного рельєфу при проявленні. Стійкість таких резистів підвищується шляхом заміщення частини фенольних гідроксилів радикалами, які є інертними до лугів.

Стійкість ФР до хімічних дій залежить також від товщини і стану фоторезистивного покриття.

Дефекти в плівці ФР (наскрізні пори – “проколи”, пилюка, пустоти) локально пропускають травники на захищених ділянках рельєфу. Ці дефекти виникають в результаті механічних напруг в процесах нанесення шару, його сушіння, експонування і задублення. При цьому чим тонший шар резисту, тим ймовірніша поява подібних дефектів.

Стійкість фоторезистивного покриття залежить також від адгезії шару до підкладки. З формули (4.4) видно, що, чим краща адгезія фоторезистивного шару до підкладки, тим менше x , і, отже, при даному h вища кислотостійкість.

Рівномірність фоторезистивного покриття розглядається як на окремо взятій підкладці (градієнтна похибка), так і при переході від однієї підкладки до другої (відтворюваність покриття). Градієнтна похибка товщини ФР та її невідтворюваність в серії підкладок погіршують інтегральні світлочутливість і кислотостійкість і в кінцевому призоводять до зменшення відсотка виходу придатних виробів, точності і стабільності їх параметрів.

Рівномірність фоторезистивного шару залежить від методу і умов його формування і визначається такими фізико-хімічними властивостями ФР, як в'язкість, густина, змочуваність ним підкладки.

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

Крім перерахованих вище властивостей існує ще ряд вимог, які необхідно виконувати при виборі ФР:

- забезпечення мінімального забруднення виробів продуктами фотохімічних реакцій;
- недефіцитність матеріалів;
- стійкість композицій та їх складових при зберіганні;
- нетоксичність;
- простота застосування.

4.3. Основні операції фотолітографічного процесу

Процес ФЛ складається із ряду операцій, суть, призначення і послідовність яких є, за рідким виключенням, загальними для будь-якого виробництва, де вони застосовуються. Схема типового фотолітографічного процесу зображена на рис. 4.5.

Із матеріалу, нанесеного на підкладку, формується рельєф маски заданої конфігурації шляхом стравлювання засвічених позитивних чи незасвічених негативних ділянок фотоемульсії. Потім обробляються незахищені ФР ділянки підкладки. Вид обробки залежить від призначення процесу ФЛ. Це частіше всього хімічне, іонно-плазмове чи плазмохімічне травлення матеріалу підкладки чи нанесеного на нього шару.

На завершальній стадії процесу, як правило, проводиться видалення використаної фоторезистивної маски, причому, якщо при нарощуванні

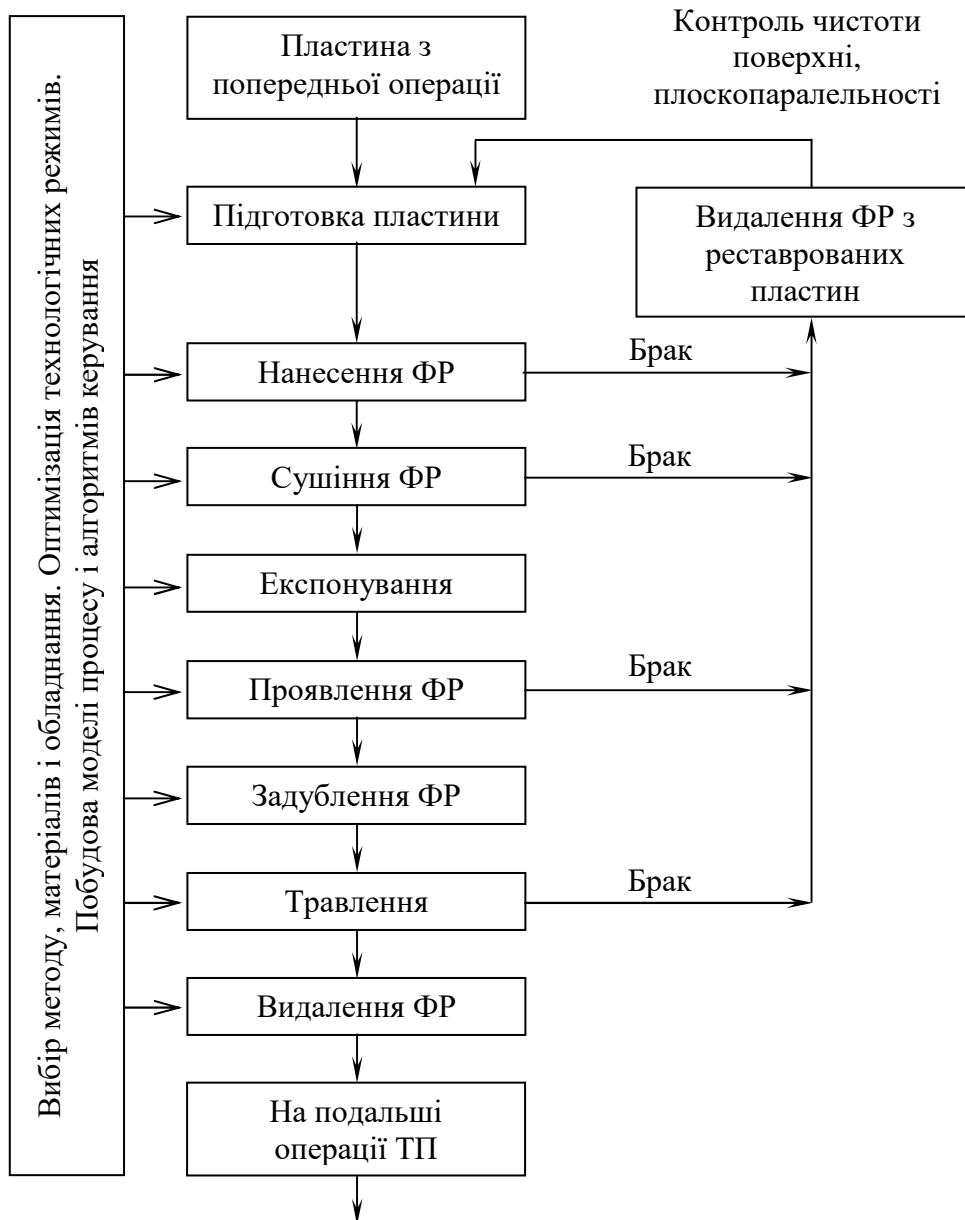


Рис. 4.5. Схема типового фотолітографічного процесу

матеріал осаджувався на фоторезистивний шар, то разом з останнім видаляється і непотрібна частина осаджуваного матеріалу.

Розглянемо призначення і суть основних операцій типового процесу ФЛ.

Підготовка поверхні підкладок передуює операції нанесення ФР і служить для забезпечення якості фоторезистивного покриття і його адгезії до підкладки. Для підготовки поверхні підкладки використовують обезжирювання, фізико-хімічну чи плазмохімічну обробку.

Технологія очищення пластин була описана в розділі 2. Та ж сама технологічна схема застосовується і для очищення пластин у фотолітографічному процесі. Розчинник вибирають, виходячи із вимог максимального ступеня очищення при мінімальній дії розчинника на мікрорельєф матеріалу підкладки.

В багатьох випадках операції ФЛ проводяться у проміжках між термічними процесами (окиснення, іонно-плазмового травлення, епітаксії, дифузії і т.п.). При цьому краще не використовувати рідинне очищення пластин, оскільки дія розчинників негативно позначається на чистоті поверхні пластин із-за неконтрольованого окиснення кремнію, адсорбції домішок з розчинів і т.п. В більшості сучасних ліній ФЛ передбачені апарати для сухого очищення пластин плазмохімічними методами.

Найбільша перевага надається завантаженню пластин в установку для нанесення ФР одразу ж після попередньої операції, наприклад окиснення. Необхідно виключити контакт пластин з навколишнім середовищем, щоб запобігти можливості забруднення. Якщо через нерівномірність ТП пластини повинні зберігатися протягом декількох годин, то їх потрібно тримати в герметичній (краще вакуумній) місткості із скла чи пластмаси.

На будь-якій операції фотолітографічного процесу при контролі можуть виявитися ті чи інші дефекти у фоторезистивному шарі. В цьому випадку пластини направляються на операцію видалення резисту і повертаються на початкову операцію. Після видалення резисту на пластині залишаються “сліди” у вигляді тонких плівок. Тому регенерацію пластин необхідно проводити досить ретельно.

Формування фоторезистивного шару на поверхні підкладки – одна із основних операцій фотолітографічного процесу. Умовами і методами проведення цієї операції визначається більшість із названих вище вимог, якими повинні володіти ФР.

Найчастіше ця операція здійснюється методом центрифугування (рис. 4.6, а). 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 ФР.

При центрифугуванні на поверхні залишається шар товщиною

$$h = A \sqrt[3]{\frac{\nu}{\omega}} \quad \text{або} \quad h = \frac{k C^2}{\sqrt{\frac{\omega}{1000}}},$$

де A – коефіцієнт пропорційності, ν – кінематична в'язкість, ω – кутова частота обертання диску, k – постійна центрифуги, C – концентрація сухої речовини у ФР.

Із збільшенням швидкості центрифугування зменшується не тільки середнє значення товщини ФР, але й її розкид. При досягненні деякого значення числа обертів товщина плівки стає постійною, а розкид мінімальним. Це число обертів називається критичним. Воно відповідає рівновазі відцентрових сил і сил когезії при плівкоутворенні.

Метод центрифугування дає змогу формувати ФР 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,

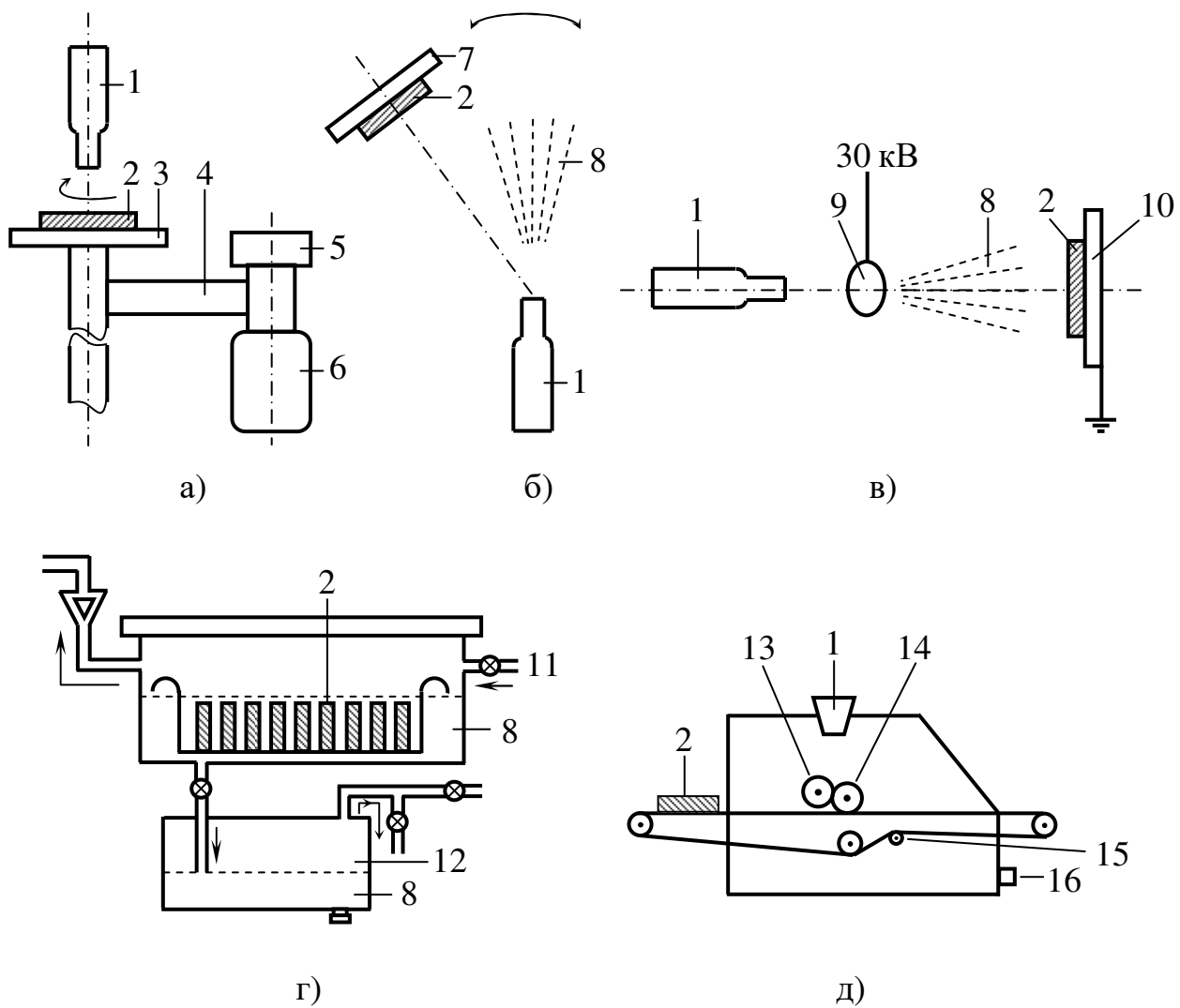


Рис. 4.6. Способи нанесення ФР:

а) центрифугування; б) розпилення; в) електростатичне нанесення; г) занурення; д) валиковий метод.

1 – дозатор для подачі ФР; 2 – підкладка; 3 – столик центрифуги; 4 – привід; 5 – тахометр; 6 – двигун; 7 – планшайба, що нагрівається; 8 – резист; 9 – кільце для зарядження ФР; 10 – заземлена основа; 11 – фільтроване стиснене повітря; 12 – місткість для збирання ФР; 13 – ведучий ролик; 14 – ролик нанесення; 15 – натяжний ролик; 16 – регулювання натягу.

максимальною частотою обертання, прискоренням та сповільненням центрифуги, температурою та вологістю доквілля, 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 більш рівномірним по всій поверхні підкладки. Потовщення шару до краю підкладки (валик) зменшується при вищих частотах обертання.

Нанесення ФР *розпиленням* (рис. 4.6, б) дає змогу одержувати широкий інтервал товщини шарів, причому підкладка може мати неплоску поверхню. Формування плівки при розпиленні відбувається із осаджених на підкладку дискретних крапель, які зливаються в суцільний шар. ФР наноситься з пневматичного розпилювача. В розпилювач по трубопроводу подається газ-носії, який в три рази важчий від повітря. В якості газу-носія зазвичай використовують фреон.

У порівнянні з методом центрифугування розпилення ФР має ряд переваг:

- можливість точного контролю товщини покриття;
- рівномірність плівки за товщиною (при товщині 1 ... 10 мкм) в межах всієї площі підкладки, тобто відсутність крайового потовщення, що робить метод розпилення особливо ефективним при нанесенні фотошару на прямокутні підкладки;
- мінімум внутрішніх напруг і дефектів в шарі через відсутність відцентрових сил;
- висока адгезія плівки ФР до підкладки.

Параметри шару залежать від тиску і температури повітря, відстані від сопла до підкладки, в'язкості ФР і концентрації сухого продукту, типу розчинника.

При електростатичному нанесенні (рис. 4.6, в) ФР диспергується за допомогою форсунки, або саме електричне поле подрібнює рідину на дрібні краплини діаметром приблизно 10 мкм. Заряджені краплини прискорюються полем і осаджуються на підкладку. Електростатичне нанесення здійснити важче, ніж просте розпилення, оскільки необхідно додатково враховувати електричні властивості резистів – питомий опір і діелектричні втрати. Наприклад, для того щоб процес електростатичного заряджання був ефективним, ФР повинні володіти питомим опором 10^5 Ом·см. В'язкість резистів також слід зменшувати для отримання більш якісної плівки. При напрузі 40 ... 45 кВ і відстані між розпилювачем і підкладкою 15 см можна наносити плівки ФР товщиною 0,5 мкм і більше. Основною проблемою є видалення пилюки, яка притягується електростатичним полем.

Для нанесення ФР використовуються методи *поливання* або *занурення* (рис. 4.6, г) – найпростіший метод покриття, коли підкладку занурюють у ФР і виводять з нього з регульованою швидкістю. Даний метод, який широко використовується у виробництві друкованих плат, не застосовується в технології ІМС через нерівномірність шару по товщині (клиноподібність), а також неминучості покриття ФР обох сторін підкладки, що приводить до ряду технологічних труднощів в процесі ФЛ.

Для нанесення ФР використовується також валиковий метод, схема установки якого показана на рис. 4.6, д. Конвеєрний тип установки забезпечує рівномірність товщини шару в межах ± 5 %.

Сушіння являє собою операцію, яка завершує формування шару ФР. Воно проводиться в два етапи: низькотемпературна витримка нанесеного шару і високотемпературна. В процесі низькотемпературної витримки

(10 ... 15 хв) відбувається поступове видалення розчинника та орієнтоване укладання макромолекул полімеру. Останнє є обов'язковою умовою адгезії шару до підкладки.

Високотемпературне сушіння плівки приводить до інтенсивного випаровування розчинника і переходу макромолекул полімеру в стійкий стан. Цей процес релаксаційний і потребує деякого часу. Занадто швидке сушіння може призвести до виникнення механічних напруг в плівці. Межею підвищення температури сушіння є термічне задублення шару, яке може перешкоджати проявленню після експонування.

Зазвичай час і температура сушіння для певного ФР і процесу підбираються експериментально. Неякісне сушіння послаблює зчеплення резисту з оксидом, що може призвести до подальшого його відшарування при проявленні. Довготривале сушіння покращує адгезію ФР до оксидів, металів і напівпровідників.

Нагрівання підкладок для сушіння ФР здійснюється в сушильних камерах, які обігріваються гарячим повітрям, ІЧ-випромінюванням чи НВЧ-енергією. При цьому основною вимогою є рівномірність температури по підкладці і партії підкладок.

Найбільш широко в автоматичних лініях використовується ІЧ-термообробка завдяки зручності її монтування в ці лінії. Крім того, при ІЧ-випромінюванні процес сушіння починається на межі розділу пластина - резист, що зумовлює отримання високоякісного покриття без пор, раковин, складок та інших дефектів, які з'являються при інших методах сушіння, коли розчинник спочатку видаляється з поверхні резисту.

Довгохвильове (від 6 до 20 мкм) ІЧ-випромінювання спочатку досягає межі розділу підкладка - резист і, відбившись від підкладки, сильно нагріває нижні прилеглі до підкладки шари резисту. Виникає такий температурний градієнт по товщині резисту, що найхолоднішою частиною покриття буде поверхня, а найгарячішою – нижні шари, в яких випаровування розчинника майже завершено. Такий механізм видалення розчинників виключає захват розчинників, які при іншому механізмі сушіння могли б утворювати бульбашки чи пори в масці.

Оскільки більшість матеріалів добре поглинають ІЧ-випромінювання, то легко вибрати розчинник і оптимізувати процес сушіння.

Для вибору джерела нагріву можна провести складний тепловий розрахунок системи, який потім необхідно перевірити експериментально. На практиці застосовують емпіричні залежності довжини хвилі від температури джерела. Звичайними джерелами випромінювання є скляні ІЧ-лампи з температурою розжарювання нитки 2044°C і температурою поверхні скла 650 ... 820°C, розміщені на відстані 150 ... 200 мм над підкладками з резистом.

Процеси експонування та проявлення нерозривно пов'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 окисненого 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 сушіння, 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 та ФР, 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 ФР 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 160°C концентрованої кислоті або в її суміші з двохромовоокислим калієм (хромпіком) або з перекисом водню.

Усунення ФР хімічною деструкцією сірчаної кислоти неприпустиме для металізованих підкладок, крім того, нагрівання сірчаної кислоти вище 160°C приводить до утворення плівки сірчистого кремнію, що впливає на процеси окиснення 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. Добавка 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 щільною 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. 4.7).

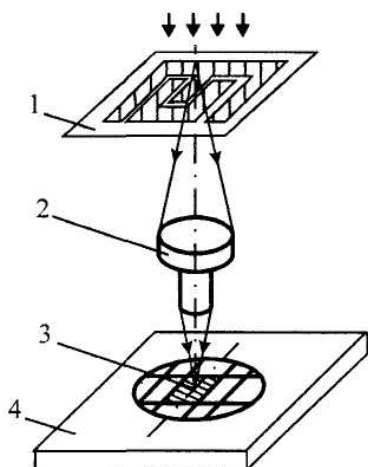


Рис. 4.7. Схема проекційного крокового сканування з одночасними зменшенням та мультиплікацією за двома координатами:

- 1 – об'єкт фотошаблону;
- 2 – об'єктив;
- 3 – площина зображення;
- 4 – двохкоординатний стіл.

4.4. Еліонні методи літографії

4.4.1. Принципи еліонної літографії.

Процес ФЛ досяг на даний час високого ступеня досконалості. На сучасних автоматичних лініях пластини кремнію обробляються без участі людини. Проте роздільна здатність ФЛ досягла теоретичної межі, рівної ширині лінії в 0,8 ... 1 мкм. Для створення субмікронних розмірів ліній необхідно переходити до інших методів опромінення резистів, використовуючи інші довжини хвиль випромінювання, наприклад опромінення електронами, рентгенівськими квантами та іонами. Ці методи об'єднуються під загальною назвою *еліонної літографії*.

Еліонна літографія (ЕЛ) дозволяє розширити межі ФЛ за рахунок більш високої роздільної здатності. Оскільки довжина хвилі електронів при енергії 10 ... 25 кеВ менша 10^{-4} мкм, а довжина хвилі рентгенівського випромінювання 2 ... 10 нм, то дифракційні та інтерференційні ефекти досить незначні. Роздільна здатність ЕЛ обмежується абераціями відхиляючих систем і взаємодією частинок одна з одною.

4.4.2. Електронно-променева літографія.

Метод електронолітографії характеризується високою роздільною здатністю. Ефекти дифракції, що обмежують роздільну здатність в оптичному та субоптичному діапазонах і пов'язані з більшою довжиною хвилі експонуючого випромінювання ($\lambda = 350 \dots 400$ 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 багатошарових структур та неплочинності поверхні пластини. Застосування ЕОМ для безпосереднього керування електронним променем (ЕП) дає змогу легко перебудувувати 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 фотошаблонів для рентгено - і фотолітографії глибокого ультрафіолету.

Процес ЕПЛ показано на рис. 4.8. 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 ФР) або неекспонована (негативний ФР) частина. Сформований з ФР рельєф (топологічний рисунок) і є маскою для різних технологічних операцій. Вікна в плівці ФР 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:

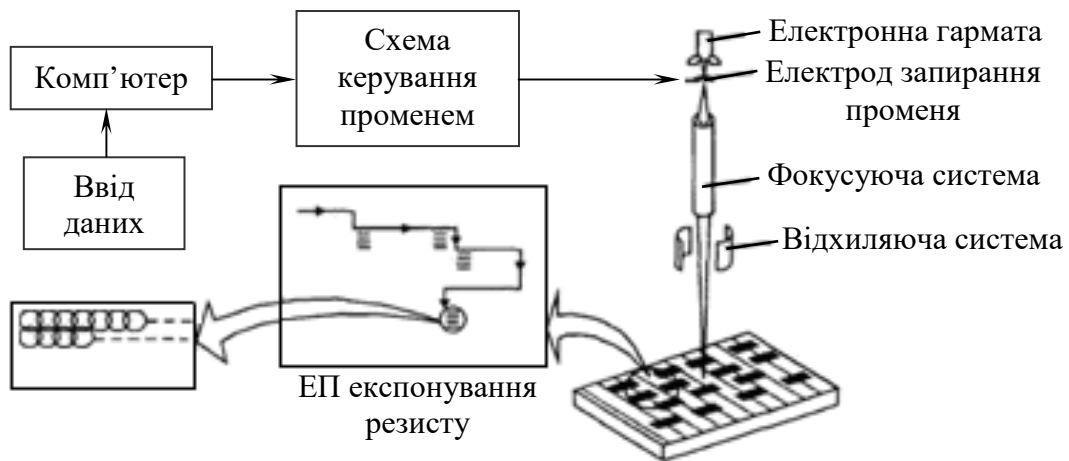
- висока чутливість до експонуючих електронів,
- висока роздільна здатність (можливість відтворення елементів розміром до 0,2 ... 0,3 мкм),
- низька мікродфектність плівки резисту (до $0,1 \text{ см}^{-2}$),
- добра адгезія до напівпровідникових матеріалів,
- висока термічна, плазмохімічна та хімічна стійкість під час процесів, пов'язаних з мікрогравіруванням напівпровідникових шарів.

Методи електронно-променевого експонування. Для одержання рисунків методом ЕПЛ застосовуються два способи:

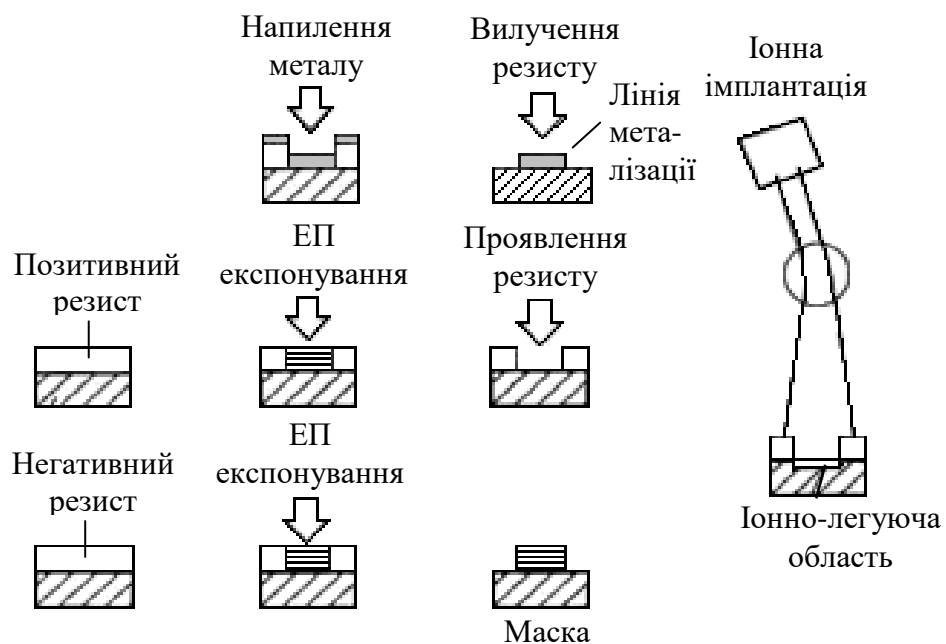
- електронний промінь, керований комп'ютером, переміщується по заданій траєкторії поверхнею підкладки;
- електронний пучок проходить через маски.

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. 4.9. Вони полягають у безконтактному репродукуванні рисунка ФР за допомогою електронного (рис. 4.9, а, б) або рентгенівського (рис. 4.9, в) променя. Серед цих проєкційних методів рентгенолітографія забезпечує



а)



б)

Рис. 4.8. Послідовність операцій ЕПЛ:

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

найвищу роздільну здатність. Доцільно використовувати шаблони, одержані за допомогою ЕПЛ і проекційної ФЛ з дзеркальною системою (рис. 4.9, г) в поєднанні з ультрафіолетовим випромінюванням, щоб звести до мінімуму ефекти дифракції.

4.4.3. Рентгенівська літографія.

Основу рентгенівської літографії (РЛ) становлять принципи контактного або безконтактного друку при використанні для експонування низькоенергетичного (1 ... 10 кеВ) рентгенівського випромінювання. В цьому

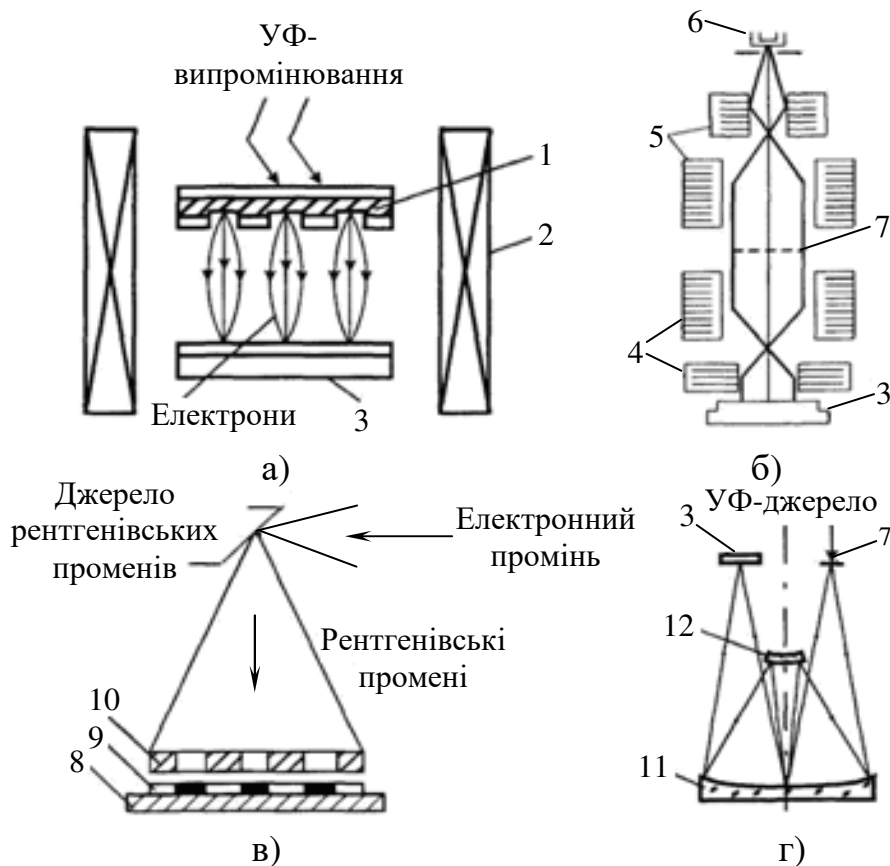


Рис. 4.9. Методи репродукування за допомогою електронного (а, б), рентгенівського (в) випромінювання та проекційної ФЛ з дзеркальною системою (г):

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.

випадку можна знехтувати явищем дифракції, яке властиве ФЛ, а також явищем зворотного розсіювання, що виникає під час ЕПЛ. Принцип РЛ ілюструється рис. 4.10. 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.

Маски для РЛ. 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

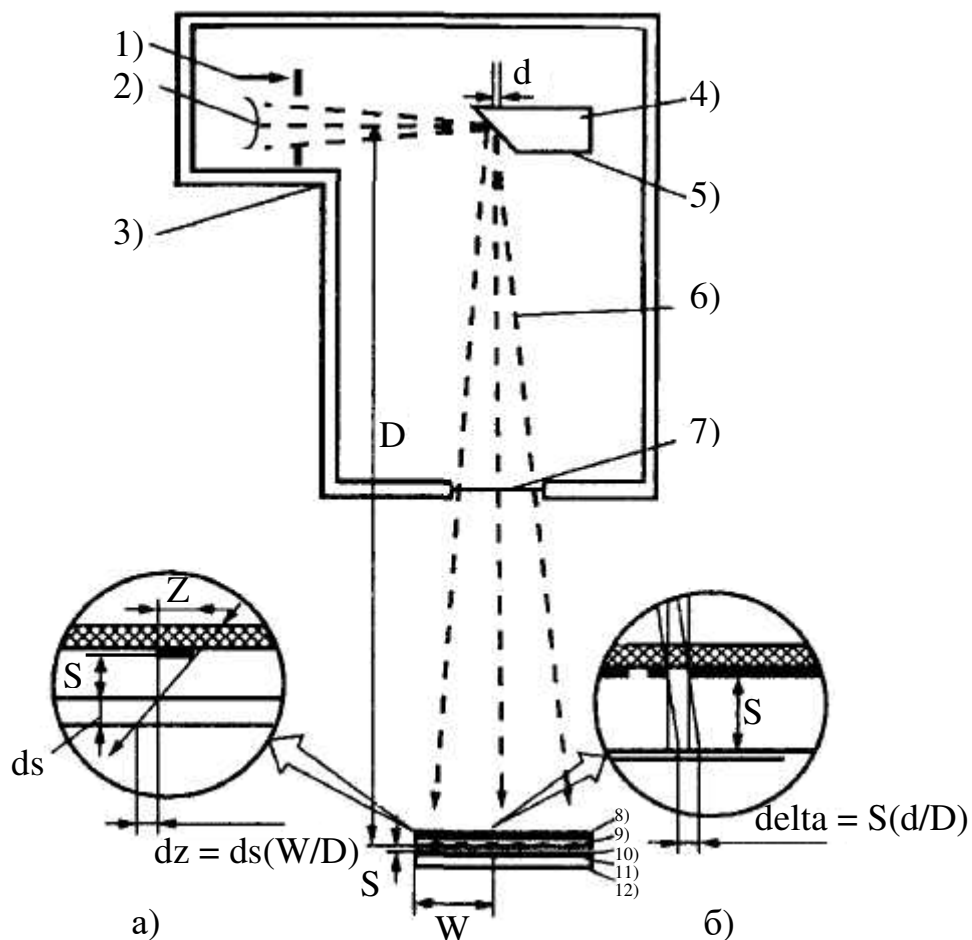


Рис. 4.10. Принципи РЛ та спотворення при експонуванні резисту в системі проєкційного друку: а) геометричні; б) напівтіньові.

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

мембран – органічні та неорганічні (поліаміди, кремній, двоокис кремнію, алюміній та їх сполуки).

4.4.4. 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 сотой 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,
- рідко металічний
- 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. 4.11.

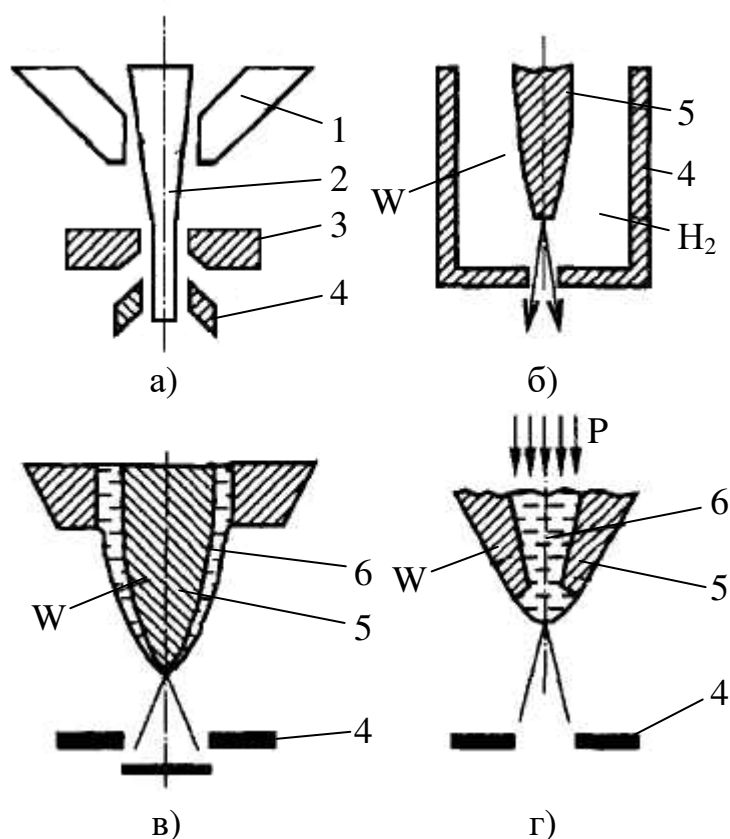


Рис. 4.11. Принципові схеми іонних джерел:

а) дуоплазмотрон; б) газофазне 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.

Експонування колімованим іонним пучком. Установки ІПЛ, в яких використовуються широкі пучки протонів (рис. 4.12), нагадують установки іонного легування.

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 (~ 0,5 мкм) плівки аморфного (монокристалічного) матеріалу з нанесеною на неї плівкою (0,5 ... 1 мкм) важкого металу, що поглинає протонне

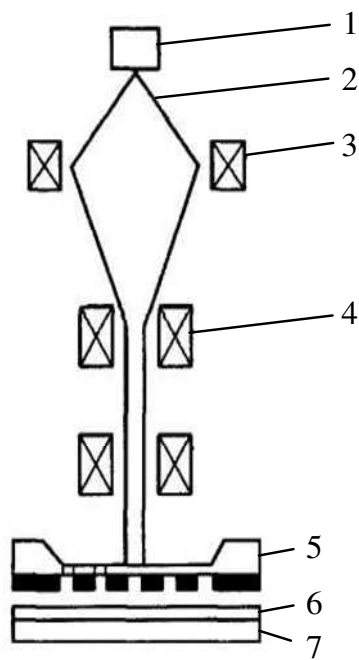


Рис. 4.12. Схема експонування колімованим іонним пучком:
 1 – джерело іонів; 2 – іонний пучок; 3 – колімуюча система; 4 – керуюча система; 5 – шаблон; 6 – плівка матеріалу, що не пропускає іони; 7 – підкладка.

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 проекційній 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.

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

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 $1,0 \dots 2,0 \text{ кеВ}$, струм пучка 1 мкА . При вказаній енергії протони мають малу довжину пробігу в матеріалі основи шаблону ($1 \dots 2 \text{ мкм}$), 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. 4.13). Якщо таку голограму

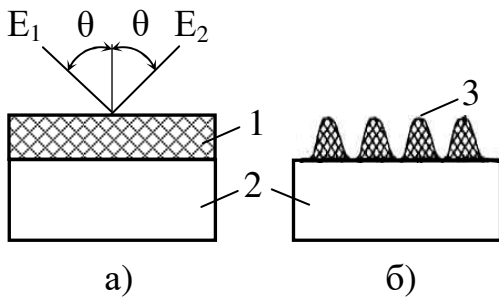


Рис. 4.13. Принцип використання голографічної літографії:

а) експонування; б) рельєф після травлення резиста.

1 – резист; 2 – підкладка; 3 – задублений резист.

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. ФР забезпечує усунення спотворень голограми при реєстрації, однак залежність глибини рельєфу від експозиції лінійна лише в певних режимах проявлення.

Розділ 5 Технологічні процеси виготовлення елементів МСТ

Елементи МСТ являють собою сформовані на одній підкладці сенсорні і актюаторні пристрої, схеми керування, прийому, обробки і передачі інформації. На відміну від типових елементів планарних ІС елементи МСТ мають тривимірну структуру.

Для виготовлення елементів МСТ застосовують технологічні операції, які використовуються в мікроелектроніці: окиснення, фотолітографія, травлення, легування, металізація і т.д. Також спеціально розроблені технологічні операції – анізотропне і селективне травлення для формування структур, метод анодного зварювання або плавлення для з'єднання пластин. Проте при схожості процесів виготовлення елементів ІС і МСТ між ними існують відмінності, які були пов'язані з різними вимогами до геометричних розмірів елементів.

В табл. 5.1 наведені типові розміри елементів ІС і МСТ та їх технологічні норми виготовлення.

Таблиця 5.1. Топологічні розміри і технологічні норми виготовлення

Параметр	Елементи ІС	Елементи МСТ
Товщина плівки, мкм	< 1	1 – 6
Аспектне відношення	2 : 1	6 : 1
Топографічний крок, мкм	< 1	2 – 10
Типовий розмір елемента, мкм	1	100

При створенні мікросистем фактично виділяють дві групи матеріалів:

1. Конструкційні (скло, монокристалічний, полікристалічний, пористий кремній, діоксид і нітрид кремнію, поліімід, вольфрам, нікель, мідь, золото, алмазо-подібний вуглець) використовуються для формування:

- несучих конструкцій;
- струморозводки;
- мастила.

2. “Активні, розумні” (нікель/титан, пермалой, кварц, окисел цинку, п'езокераміка, матеріали групи A^3B^5 , A^4B^6), які виконують за рахунок електростатичних, електромеханічних, п'езоелектричних, магнітних, оптичних явищ і ефекту пам'яті форми функції:

- джерел руху;
- механізмів передачі руху;
- сенсорних і активуючих середовищ.

При створенні мікросистем різного функціонального призначення на основі композицій різнорідних матеріалів повинні враховуватися наступні параметри:

- кристалохімічна сумісність;
- термомеханічна сумісність;

- теплова стійкість (допустиме теплове навантаження, що враховує температуру Дебая, точку Кюрі, а для напівпровідників і температуру переходу в стан, коли концентрація власних носіїв заряду близька до домішкової; здатність речовини віддавати енергію в оточуюче середовище за рахунок теплопровідності, а при високих температурах і за рахунок тепловипромінювання);

- електрична стійкість;
- механічна стійкість;
- механічна стомленість.

Механічні властивості матеріалів, що використовуються як структурні шари елементів МСТ, приведені в табл. 5.2.

Таблиця 5.2. Механічні властивості структурних матеріалів

Структурний матеріал	Модуль Юнга E , ГПа	Модуль зсуву G , ГПа	Коефіцієнт Пуассона μ	Густина ρ , кг/м ³
Кремній (Si)	130	50	0,28	2320
Полікремній (poly Si)	169	69	0,22	2100
Карбід кремнію (SiC)	270	103	0,31	3200
Оксид кремнію (SiO ₂)	75	32	0,17	2190
Нітрид кремнію (Si ₃ N ₄)	270	106	0,27	3440

У рамках технології мікросистем розвиваються наступні технологічні напрями:

1. Групова технологія поверхневої мікромеханіки на основі процесів тотального нанесення і вибіркового видалення шарів.

2. Групові технології об'ємної мікромеханіки, які реалізуються у вигляді:

- технології глибокого об'ємного травлення;
- LIGA-технології (технології матричного мікрокопіювання);
- SIGA-технології;
- волоконної технології.

3. Технологія індивідуального формоутворення методами локального стимулювання росту (полімеризації), корпускулярно-променевої і електростатичної мікропрофілізації, а також алмазного фрезерування.

Таким чином, до стандартних технологій мікромеханічної обробки (мікрообробки), які застосовуються при виготовленні інтегральних елементів МСТ, можна віднести передньосторонню об'ємну мікрообробку, задньосторонню об'ємну мікрообробку, комбінацію передньо- і

задньосторонніх об'ємних методів виготовлення, поверхневу мікрообробку, LIGA-технологію, SIGA-технологію, MUPS-технологію і SUMMiT-технологію.

Здійснимо короткий аналіз сучасних групових технологій поверхневої і об'ємної мікромеханіки, розглянемо основні переваги і недоліки перерахованих вище технологій мікрообробки, які використовуються при виготовленні сенсорних і актюаторних елементів МСТ.

5.1. Технологія об'ємної мікрообробки

Технології об'ємної мікромеханіки дозволяють активно розвивати в конструкторсько-технологічному плані третій вимір і тому за технологічними прийомами і устаткуванням вони істотно відрізняються від традиційних операцій планарного процесу, відомого з кремнієвої технології.

Розрізняють наступні способи об'ємної мікрообробки:

- а) передньостороння;
- б) задньостороння;
- в) задньостороння з керуючими отворами;
- г) комбінована.

Передньостороння об'ємна мікрообробка базується на селективному травленні передньої (лицьової) поверхні підкладки. Основною перевагою об'ємної мікрообробки є формування інтегральних елементів МСТ селективним травленням на останньому етапі процесу виготовлення безпосередньо в об'ємі підкладки. В якості маски при травленні можуть бути використані металізовані або пасивуючі шари.

На рис. 5.1 наведена консольна балка, виготовлена за технологією передньосторонньої об'ємної мікрообробки.

Задньостороння об'ємна мікрообробка базується на травленні підкладки із задньої сторони. Існують два способи виготовлення сенсорних і актюаторних елементів при задньосторонній об'ємній мікрообробці. При першому способі створення елементів МСТ на передню сторону підкладки наноситься епітаксійний шар, який виконує функцію стоп-шару, і виконується додаткове маскування задньої сторони підкладки. Далі проводиться селективне травлення задньої сторони підкладки до стоп-шару.

На рис. 5.2 показана мембрана, виготовлена за допомогою селективного травлення методом задньосторонньої об'ємної мікрообробки з використанням стоп-шару.

При застосуванні даного способу селективного травлення задньосторонньої мікрообробки необхідно забезпечити високу селективність системи підкладка - стоп-шар.

Дана техніка виготовлення дозволяє стравлювати до декількох сотень мікрометрів матеріалу підкладки і зупинятися на глибині, точно визначеної стоп-шаром. Таким чином, дана техніка виготовлення дозволяє створювати елементи МСТ з малою товщиною.

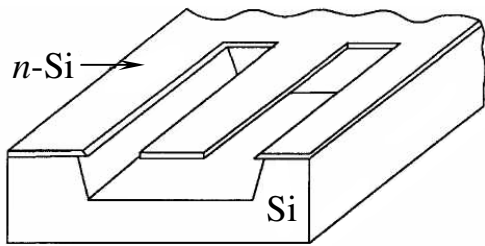


Рис. 5.1. Приклад елемента МСТ, виготовленого з допомогою передньосторонньої об'ємної мікрообробки

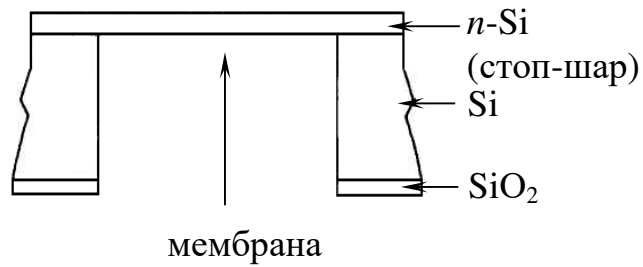


Рис. 5.2. Приклад елемента МСТ, виготовленого з допомогою задньосторонньої об'ємної мікрообробки

При другому способі створення сенсорних і актюаторних елементів використовуються спеціальні керуючі отвори, які спочатку створюються з передньої сторони підкладки, а також виконується додаткове маскування задньої сторони підкладки. Глибина керуючих отворів визначає товщину елементів МСТ, що створюються. Травлення зупиняється, коли передньосторонні керуючі отвори стають видимими.

На рис. 5.3 наведена мембрана, виготовлена методом задньосторонньої об'ємної мікрообробки з керуючими отворами.

Дана техніка виготовлення дозволяє створювати елементи МСТ великої товщини безпосередньо в підкладці. Істотним недоліком даного способу виготовлення є неможливість створення структур сенсорних і актюаторних елементів з маленькою товщиною.

Комбінований метод об'ємної мікрообробки базується на використанні передньосторонньої і задньосторонньої об'ємних технологій виготовлення елементів МСТ.

На рис. 5.4 показана мембрана, виготовлена методом комбінованої об'ємної мікрообробки.

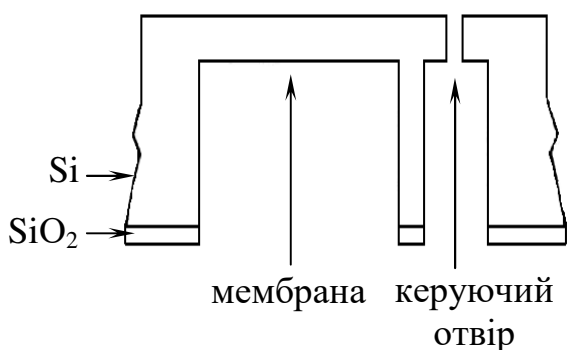


Рис. 5.3. Приклад елемента МСТ, виготовленого з допомогою задньосторонньої об'ємної мікрообробки з керуючим отвором

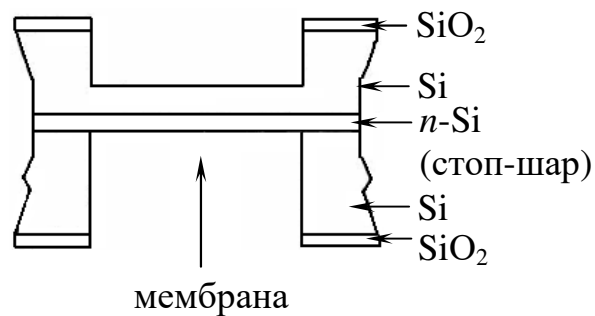


Рис. 5.4. Приклад елемента МСТ, виготовленого з допомогою комбінованої об'ємної мікрообробки

При застосуванні технології об'ємної мікрообробки використовуються ізотропне і анізотропне травлення матеріалу підкладки.

Ізотропне травлення є одним з найвідоміших і поширених способів локальної мікрообробки. Характерною особливістю ізотропного травлення є той факт, що кристалографічна орієнтація підкладки не впливає на профіль травлення.

На рис. 5.5 наведений приклад об'ємної мікрообробки підкладки з монокристалічного кремнію за допомогою ізотропного травника.

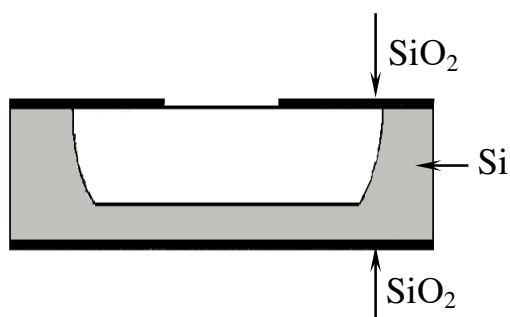


Рис. 5.5. Приклад об'ємної мікрообробки при ізотропному травленні

В якості ізотропних травників використовуються травники на основі плавикової і азотної кислот. Повільний травник містить $\text{HNO}_3 : \text{HF} : \text{CH}_3\text{COOH}$ (7 : 1 : 3) і використовується для отримання дрібних рельєфів при швидкості травлення близько 0,1 мкм/хв. Швидкий травник має такий же склад, але в співвідношенні 3 : 1 : 1, і використовується для отримання глибоких рельєфів при швидкості близько 4 ... 8 мкм/хв.

Швидкість травлення підкладки залежить від великого числа факторів: тип травника, його температура, швидкість відведення продуктів травлення, наявність або відсутність дефектів в матеріалі підкладки і т.п. Більшість цих факторів погано піддається контролю. Таким чином, невідтворюваність швидкості травлення вносить основний внесок в невідтворюваність геометрії мікроелементів МСТ.

Специфічна форма об'ємної мікрообробки, а також складність забезпечення локального захисту від тривалої дії травника не дозволяє розглядати ізотропне травлення як перспективний спосіб мікрообробки.

В процесі анізотропного травлення видалення матеріалу підкладки відбувається з різною швидкістю залежно від кристалографічної орієнтації підкладки. Це пояснюється різною густиною упаковки атомів в різних площинах, а також різним характером зв'язку поверхневих атомів між собою і з атомами, розташованими в об'ємі підкладки. Швидкість травлення залежно від кристалографічного напрямку відповідає наступному ряду:

$$V_{\langle 100 \rangle} > V_{\langle 110 \rangle} > V_{\langle 210 \rangle} > V_{\langle 211 \rangle} > V_{\langle 221 \rangle} > V_{\langle 111 \rangle}.$$

Для отримання мікроелементів МСТ підкладки частіше за все орієнтують в площинах (100), (110), (111).

Типове значення відношення швидкості травлення в напрямі $\langle 100 \rangle$ до швидкості травлення в напрямі $\langle 111 \rangle$ складає:

$$V_{\langle 100 \rangle} : V_{\langle 111 \rangle} = 400 : 1.$$

Анізотропні травники являють собою багатокомпонентні розчини, що складаються з окиснювача кремнію до гідратованого двоокису, розчинника окису і сповільнювача або прискорювача процесу травлення.

Процес анізотропного травлення є поетапним видаленням атомних шарів з поверхні підкладки, тобто в процесі травлення на поверхні підкладки

утворюються мікроскопічні сходинки. Таким чином, анізотропне травлення не дає дзеркальних поверхонь і мікромеханічна структура обробляється протягом 30 с в поліруючому розчині ізотропного травника, що складається з суміші плавикової, оцтової і азотної кислот в пропорції 1 : 1,2 : 6,2. Поліруючий розчин усуває мікросорсткість поверхні, що підвищує межу міцності мікромеханічних структур елементів МТС в 3 ... 4 рази.

На рис. 5.6 наведено приклади об'ємної мікрообробки монокристалічного кремнію за допомогою анізотропного травлення.

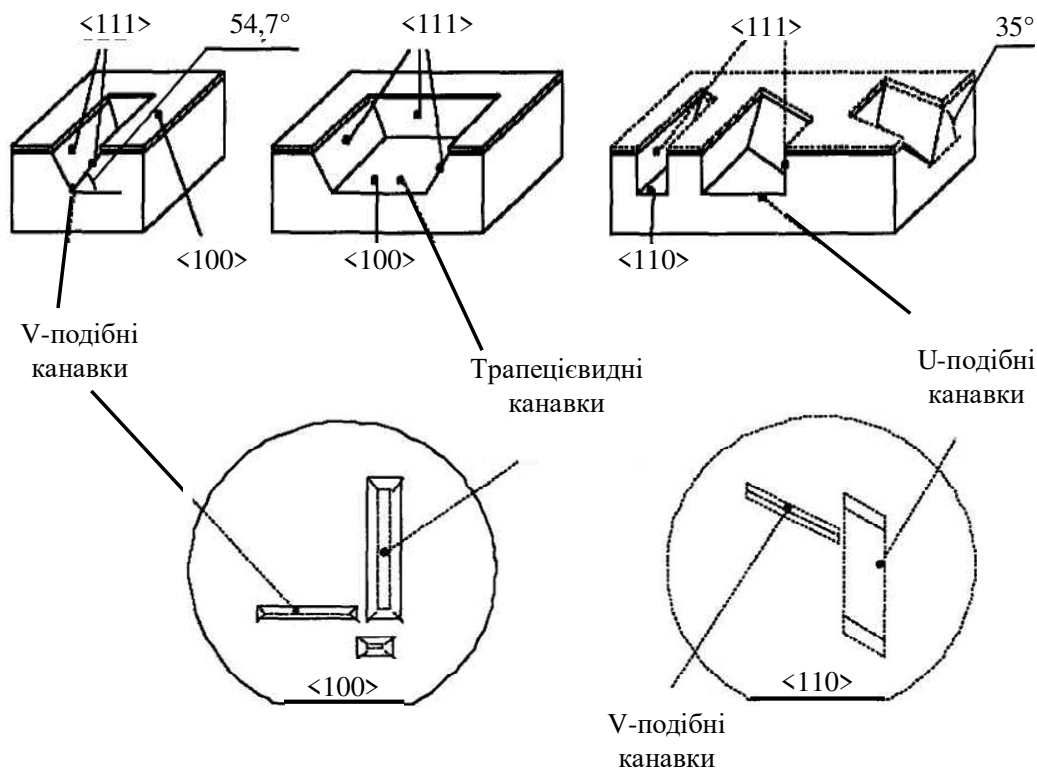


Рис. 5.6. Анізотропне травлення підкладки в площинах (100) і (110)

Можливість отримання практично перпендикулярних бічних стінок дозволяє економити площу підкладки більш ніж на 30 %.

У порівнянні з ізотропним травленням монокристалічного кремнію травлення полікристалічного кремнію приводить до дещо гіршої відтворюваності форми мікромеханічних структур елементів МТС через істотно більшу неоднорідність полікристалу. Проте, у порівнянні з ізотропним травленням, цей процес характеризується певною спрямованістю.

Бічне підтравлювання під край маски відбувається повільніше, ніж травлення в глибину. Форма одержуваного при травленні полікремнію профілю наведена на рис. 5.7.

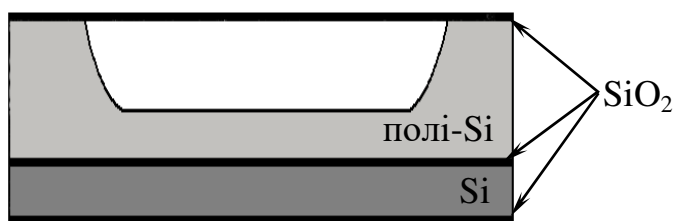


Рис. 5.7. Форма профілю при травленні полікремнію

Крім ізотропного та анізотропного травлення в технології об'ємної мікрообробки застосо-

вують також сухе (плазмове) травлення – метод селективного видалення немаскованих ділянок поверхні. Особливості процесу полягають в тому, що цей процес можна комбінувати з технологією тонких плівок і з технологією КМОН. Також за допомогою фізико-хімічного травлення контролюється профіль травлення. Переваги та недоліки даного методу травлення подано в табл. 5.3.

Таблиця 5.3. Особливості методу сухого травлення

Параметри процесу	Переваги	Недоліки
1.Параметри плазми: склад газу; напруга зміщення; температура підкладки; густина плазми; тиск процесу.	1.Отримується потрібне горизонтальне зображення	1.Обробка пластин поодинці
2. Маскування полімерами і тонкими плівками: термічно SiO ₂ ; хімічним осадженням з парової фази при зниженому тиску SiO ₂ або Si ₃ N ₄ ; нанесення ФР; металізація (Cr, Al).	2.Змінний профіль	2. Збільшення часу травлення
3. Хімічна дія: із зворотної сторони (мембрани, отвори) – геометрична форма визначається шаблоном маски; з передньої сторони (консолі, канали, затвори) – геометрична форма визначається підтравлюванням.	3.Можливе отримання рельєфних зображень	3.Немає власного обмежувача травлення і визначення зображення
4.Гази травника: SF ₆ - CBrF ₃ при t < 270 К; SF ₆ - O ₂ при t < 100 К; CHF ₃ - O ₂ при t < 100 К; CHCl ₃ при t < 270 К.		

Технологія об'ємної мікрообробки має обмеження у можливості створення поверхневих топологічних фігур сенсорних і актюаторних елементів МСТ, оскільки їх конфігурація визначає і об'ємний результат травлення (нахил стінок і глибину травлення).

5.2. Технологія поверхневої мікрообробки

Поверхнева мікрообробка – метод одержання трьохвимірних мікро-механічних структур формуванням багаточислової структури та структурованих тонких плівок.

У класичній мікромеханіці, орієнтованій на базові кремнієві мікротехнології, в даний час панує так звана поверхнева мікротехнологія з жертвним (технологічним) шаром. В її основі лежать два основні процеси нанесення технологічного, а потім і робочого шарів, та видалення через отвір в робочому шарі технологічного шару для формування об'ємних порожнин між робочим шаром і підкладкою. Як основний матеріал найбільш поширена структура “кремній на діоксиді кремнію”, де як жертвний шар виступає діоксид кремнію.

В якості жертвних шарів також можуть бути використані наступні матеріали: Si_3N_4 , GaAs, AlGaAs, Al, фосфоросилікатне скло (ФСС, PSG), боросилікатне скло (БСС, BSG), AlN та ін. Інші комбінації структурних і технологічних шарів подано в табл. 5.4.

Таблиця 5.4. Комбінації структурних та технологічних шарів в поверхневій мікрообробці

Структурний шар		Технологічний шар	
Матеріал	Типова товщина, мкм	Матеріал	Типова товщина, мкм
Poly Si	1 – 4	ФСС, SiO_2	1 – 7
Si_3N_4	0,2 – 2	ФСС, SiO_2	2
SiO_2	1 – 3	Poly Si	1 – 3
Поліімід	10	Al	1,5 – 3
W	2,5 – 4	SiO_2	8
Mo	0,5	Al	0,7
SiN	1,5	SiO_2	1,5
TiNi	8	Поліімід	3
		Au	2
NiFe	2,5	Al	7
		Cu	7
Poly Si - ZnO	2 – 0,95	ФСС	0,6
Poly Si - Si_3N_4 - Poly Si	1 – 0,2 – 1	ФСС	2

Послідовність технологічних операцій при реалізації поверхневої мікромеханіки зводиться, фактично, до відомих послідовностей, що використовуються в планарній технології:

- формування шару діоксиду кремнію на кремнії;
- нанесення на діоксид кремнію шару полікристалічного кремнію;
- нанесення маскувального шару на полікристалічний кремній і проведення операцій обробки фотолітографії для розкриття вікон в масці;
- травлення полікристалічного кремнію через маску для формування вікон для подальшого вибіркового видалення жертвного шару з діоксиду кремнію;
- вибіркоче травлення діоксиду кремнію;
- промивання об'ємних порожнин, що утворилися.

Приклади структур, одержаних поверхневою мікрообробкою, подано на рис. 5.8 і 5.9.

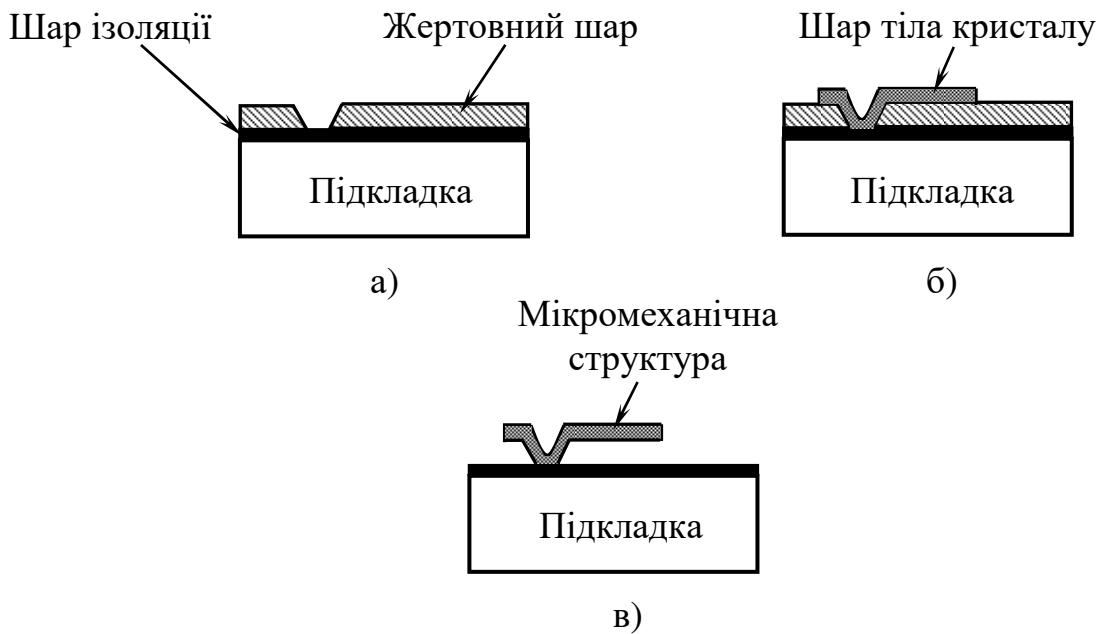


Рис. 5.8. Поверхнева мікрообробка: а) нанесений рисунок технологічного шару; б) нанесений рисунок структурного шару; в) підвішена балка після травлення технологічного шару.

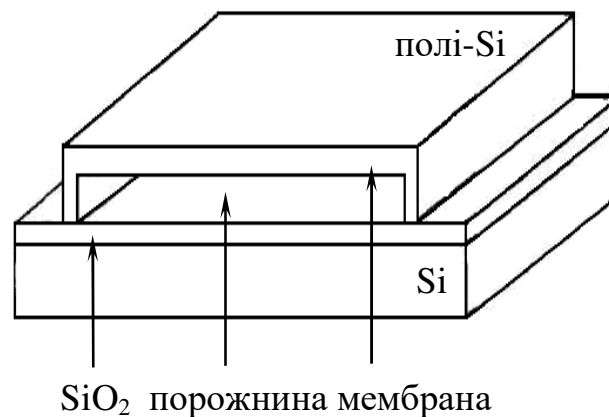


Рис. 5.9. Інтегральний сенсор тиску ємнісного типу

На відміну від структур, виготовлених об'ємною мікрообробкою, які загалом більш схильні до спотворень, що веде до реальних втрат кремнію, поверхнева мікрообробка дозволяє виготовляти комплексні датчики та актюатори шляхом формування багат шарової структури і формуванням рисунка тонких шарів, оскільки формування багаторівневої структури є важким в об'ємній мікрообробці. Крім цього, поверхнева мікрообробка дозволяє виготовляти сенсорні і актюаторні елементи МСТ меншої товщини, ніж аналогічні структури, виготовлені з використанням об'ємної мікрообробки.

Технологія поверхневої мікрообробки має наступні переваги над об'ємною мікрообробкою:

1. Виготовляються менші датчики чи актюатори (розмірів порядку 100 мкм).

2. Сумісна з багатьма сучасними процесами виробництва ІС.

3. Краща чіткість топологічних елементів, товщина може бути контрольована у субмікронному діапазоні, проте це важко виконати при одержанні товщин, більших 10 мкм.

4. Більший вибір матеріалів.

Головною особливістю цієї технології є те, що вона сумісна з напівпровідниковою технологією (для мікрообробки використовується КМОН-технологія).

Детально приклад етапів кремнієвої поверхневої мікрообробки представлені на рис. 5.10.

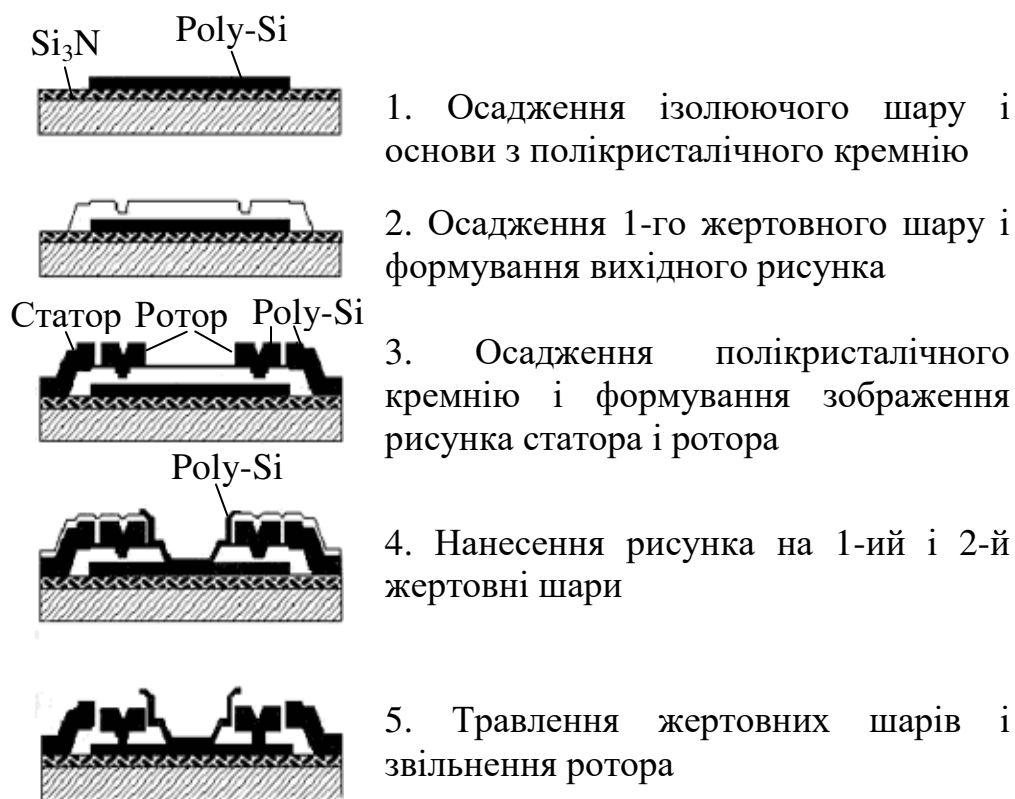


Рис. 5.10. Послідовність етапів кремнієвої поверхневої мікрообробки

До переваг технології поверхневої мікрообробки можна віднести можливість створення великої кількості різних сенсорних і актюаторних елементів МСТ в одному і тому ж процесі виготовлення при незначних змінах і сумісність з технологією ІС.

До недоліків технології поверхневої мікрообробки слід віднести прилипання тонких підвішених частин елементів МСТ до підкладки, яке виникає в процесі промивання продуктів травлення жертвних шарів і при роботі елемента.

5.3. LIGA-технологія

Основними технологічними операціями в процесі виготовлення елементів МСТ, як і в ІС, є літографія і травлення. Проте при виготовленні елементів ІС основною задачею є зміщення процесу літографії в субмікронну область, тоді як при виготовленні елементів МСТ – досягнення більшої глибини тривимірного рельєфу топологічного рисунка.

Для отримання високих аспектних відношень мікромеханічних структур елементів МСТ (від 50 : 1 до 100 : 1 при існуючому сучасному рівні 6 : 1 (див. табл. 5.1)) використовується LIGA-технологія.

LIGA-технологія (аббревіатура німецьких слів: **L**itographie (літографія), **G**alvanoformung (гальваноосадження) і **A**bformung (мікроформування)), яка базується на послідовності процесів літографії, гальваноосадження і мікроформування, пропонує широкий спектр матеріалів для створення ультраточних тривимірних елементів МСТ з вертикальними бічними сторонами, товщиною до 100-1000 мкм і поперечними розмірами в межах декількох мікрон.

Технологія була розроблена в Німеччині приблизно 30 років тому. Суть процесу полягає у використанні рентгенівського випромінювання від синхротрона для отримання глибоких з прямовисними стінками топологічних картин в полімерному матеріалі. Випромінювання синхротрона має надмалий кут розходження пучка ($0,006^\circ$), тобто формується пучок паралельних променів. Джерелом випромінювання є високоенергетичні електрони (енергія $E > 1$ ГеВ), які рухаються з релятивістськими швидкостями. Глибина проникнення випромінювання досягає одиниць міліметрів. Це обумовлює високу ефективність експонування при малих часових витратах. Для досягнення більшої товщини (висоти) елементів МСТ використовується товстий шар резиста, що наноситься на підкладку. Як абсорбент використовується золото, що наноситься на тонку пластину. Створення фотоелектронного рисунка в резисті проводиться з використанням рентгенівського проміння від синхротрона, яке проходить через товстий шар резиста з дуже маленькою бічною експозицією.

Існують деякі варіації LIGA-технології, коли дороговартісна рентгенолітографія замінюється електронно-променевою або лазерною літографією. На рис. 5.11 наведено основні етапи виготовлення мікромеханічної структури елемента МСТ на основі LIGA-технології.

Процес виготовлення мікромеханічних структур елементів МСТ починається із створення фотоелектронного рисунка в резисті. Подальше проявлення резиста і гальваноосадження металу дозволяють отримати металеву мікроструктуру. Після видалення резиста металева мікроструктура може бути використана або безпосередньо як мікромеханічна структура елементів МСТ, або застосована як форма (шаблон) для виготовлення мікромеханічних структур сенсорних і актюаторних елементів з термопластику, смол або кераміки.

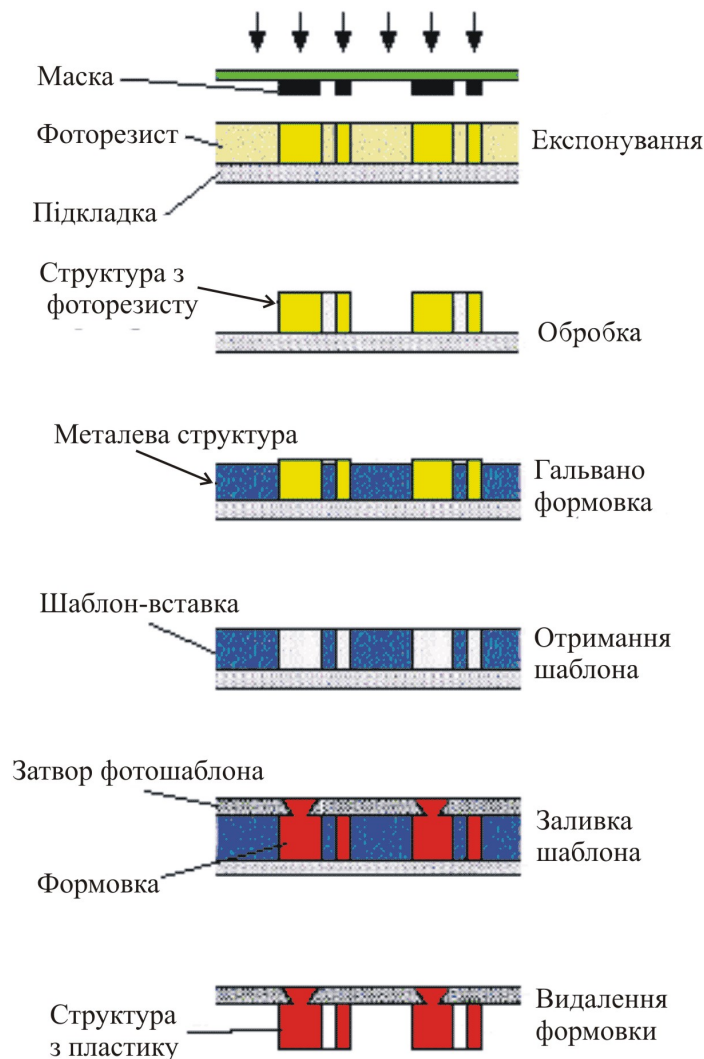


Рис. 5.11. Основні етапи виготовлення елементів МСТ з використанням LIGA-технології

В процесі гальваноосадження застосовуються як стандартні матеріали і сплави, що використовуються в напівпровідниковій промисловості, так і нові розроблені матеріали і сплави. В табл. 5.5 приведені матеріали, що використовуються в процесі гальваноосадження в LIGA-технології.

Перевагою LIGA-технології є можливість створення елементів МСТ великої товщини з вертикальними сторонами, а також можливість створення сенсорних і актюаторних елементів з різних матеріалів – металу, пластику і кераміки. Крім цього, можливість багатократного тиражування за рахунок інтегральних принципів обробки дозволяє виготовляти об'ємні структури заввишки до 1 мм в кількостях до 1000 шт. на одній пластині.

Основними недоліками даної технології є необхідність використання унікальних джерел синхротронного випромінювання і нетрадиційність технології, пов'язана з гальванопластикою на мікрорівні. Крім того, наявність в процесі виготовлення елементів МСТ операції мікрозбірки не дозволяє використовувати LIGA-технологію для їх групового виготовлення.

Таблиця 5.5. Матеріали, які використовуються для формування елементів МСТ в LIGA-технології

Застосування	Матеріали		Сплави	
	Стандарт	Нові	Стандарт	Нові
Формування	Ni, Cu	–	Ni-Co	Ni-W, Co-W
Абсорбенти для рентгенолітографії	Al	–	–	–
Мікромеханізми	Ni	–	Ni-Co,	Ni-B
Актюаторні елементи	Fe	–	Ni-Fe	–
Сенсорні елементи	–	Pd	–	Ni-W
Жертовні шари	Cu, Zn	–	–	–
Функціональне покриття	Ag, Al, Cu, Zn	Cr, Pd	–	Cu-Zn
Електричні контакти	Al, Cu	Pd	–	–
Інші	Ag, Cu	–	–	Sm-Co

5.4. MUMPs-технологія

MUMPs-технологія (**M**ulti **U**ser **M**EMS **P**rocess – багатокористувацька MEMC технологія) являє собою трьохшаровий полікремнієвий процес стандартної технології поверхневої мікрообробки, розроблений на початку 1990-х років у Berkeley Sensor & Actuator Center, University of California (USA).

MUMPs-технологія є комерційною програмою, яка підтримується більшістю підприємств напівпровідникової промисловості, університетів і лабораторій, що спеціалізуються на розробці і виробництві МСТ.

Процес MUMPs-технології складається із створення шару ізоляції Si_3N_4 , осадженого шару полікремнію (poly0), двох структурних шарів полікремнію (poly1 і poly2), двох жертовних шарів (ox1 і ox2) і одного шару металу (metal). Як жертовні шари можуть бути використані ті ж матеріали, що і в технології поверхневої мікрообробки. Перший шар полікремнію (poly0) являє собою жорстку плату, на якій розташовуються рухомі частини елементів МСТ, побудовані на основі інших двох полікремнієвих шарів (poly1 і poly2).

Проблема прилипання підвішених частин елементів МСТ, виготовлених за MUMPs-технологією, була вирішена за допомогою запобіжників (dimple), які розміщуються під першим структурним шаром полікремнію.

На рис. 5.12 показано основні етапи виготовлення актюаторного елемента МСТ на основі MUMPs-технології.

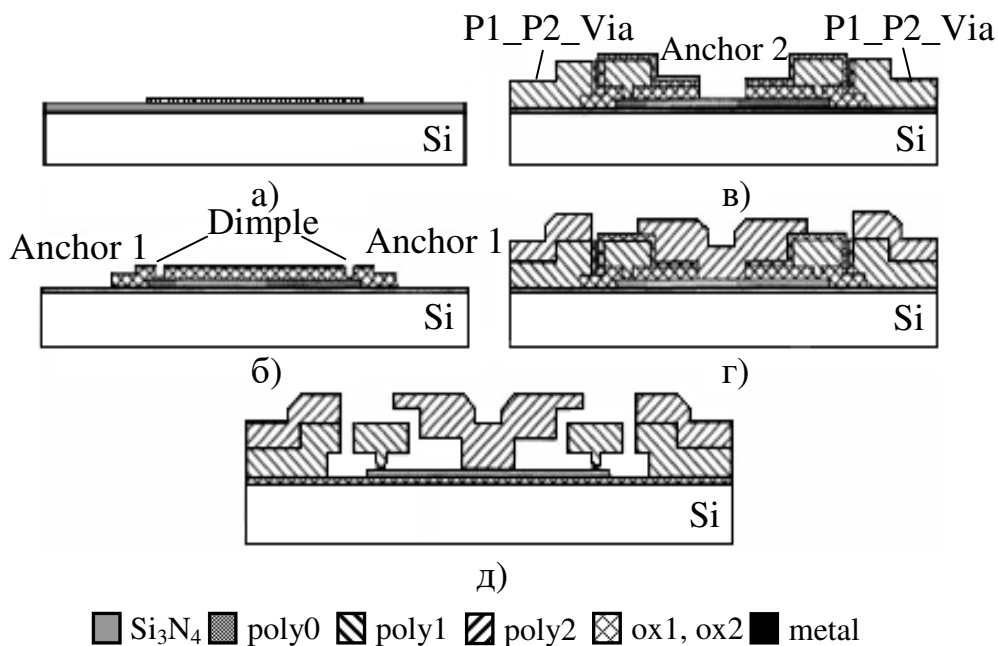


Рис. 5.12. Основні етапи виготовлення елементів МСТ з використанням MUMPs-технології:

а) створення шару ізоляції і осадження poly0; б) осадження ox1, формування запобіжників і контактів; в) осадження poly1 і ox2, формування структури елемента; г) осадження poly2 і формування структури елемента МСТ; д) осадження metal і видалення ox1 і ox2.

Процес починається із створення дифузійного шару нітриду кремнію (nitride) і осадження шару полікремнію (poly0) (рис. 5.12, а). Потім проводиться осадження першого жертвовного шару (ox1) і формування в ньому запобіжників (dimple) і контактів (якорів) першого структурного шару (anchor1) до підкладки і/або poly0 (рис. 5.12, б). Після нанесення першого структурного шару (poly2) проводиться формування мікромеханічних структур елементів МСТ і нанесення другого жертвовного шару (ox2). За допомогою травлення в другому жертвовному шарі формуються контакт другого структурного шару (anchor2) до підкладки і/або poly0 і контакти другого структурного шару до першого (P1_P2_Via) (рис. 5.12, в). Потім проводиться осадження другого структурного шару і формування в ньому різних частин елементів МСТ (рис. 5.12, г). На останньому етапі процесу проводиться металізація і звільнення структури елементів МСТ за допомогою видалення першого і другого жертвовних шарів (рис. 5.12, д).

За даною технологією виготовляється більшість планарних елементів МСТ. Використання полікремнію як структурного матеріалу сенсорних і актюаторних елементів МСТ в MUMPs-технології обґрунтовується тим, що даний матеріал володіє добрими механічними властивостями. Налаштована технологія і методи ФЛ дозволяють створювати сенсорні і актюаторні елементи МСТ в одному технологічному процесі з мікроелектронними пристроями ІС.

Недоліком даної технології є неможливість виготовлення елементів МСТ з іншого матеріалу, окрім як з полікремнію.

Перевагою MUMPs-технології (як і поверхневої мікрообробки) є можливість створення великої кількості різних за функціональним призначенням елементів МСТ в одному процесі виготовлення з незначними змінами, а також можливість інтегрального створення сенсорних і актюаторних елементів на одній підкладці з елементами обробки, передачі і зберігання інформації. Крім того, планарні багаторівневі актюаторні елементи мають велику функціональність в порівнянні з конструкціями тих же розмірів, створених з використанням об'ємної мікрообробки.

В табл. 5.6 приведено фізико-топологічні параметри шарів, що використовуються в MUMPs-технології.

Таблиця 5.6. Фізико-топологічні параметри шарів, які використовуються в MUMPs-технології

Шари	Товщина, мкм	Залишкові напруги, МПа			Питомий опір, Ом/□		
		min	типові	max	min	типовий	max
nitride	0,6	0	90	180	–		
poly0	0,5	0	-25	-150	15	30	45
ox1	2,0	–			–		
poly1	2,0	0	-10	-20	1	10	20
ox2	0,75	–			–		
poly2	1,5	0	-10	-20	10	20	30
metal	0,5	0	50	100	0,05	0,06	0,07

На даний час ведеться розробка п'ятишарового процесу MUMPs-технології. Відмінністю п'ятишарового процесу MUMPs-технології від трьохшарового є використання чотирьох структурних шарів і наявність операції механічного полірування. Операція мікромеханічного полірування покликана зменшити текстуровання поверхонь верхніх структурних шарів полікремнію.

5.5. SUMMiT-технологія

SUMMiT-технологія (Sandia Ultra-planar, Multi-level MEMS Technology) являє собою чотирьохшаровий полікремнієвий процес стандартної технології поверхневої мікрообробки, розроблений в Sandia National Laboratories (USA).

Як зазначалося вище, використання великого числа структурних шарів приводить до появи текстуровання поверхонь верхніх шарів. Для зменшення похибки виготовлення інтегральних елементів МСТ, пов'язаної з текстурованням, компанія Sandia розробила метод планаризації, який базується на хіміко-механічному поліруванні. Дана операція здійснюється

над верхніми шарами полікремнію і дозволяє зберегти планарність процесу виготовлення елементів МСТ.

В табл. 5.7 наведено топологічні параметри шарів в порядку нанесення на підкладку, що використовуються в SUMMiT-технології.

Таблиця 5.7. Топологічні параметри шарів, які використовуються в SUMMiT-технології

Шари	Товщина, мкм
Оксид кремнію (SiO ₂)	0,63
Нітрид кремнію (Si ₃ N ₄)	0,8
Шар полікремнію (poly0)	0,3
Перший жертвний (технол.)	2,0
Перший структурний шар	1,0
Другий жертвний (технол.)	0,5
Другий структурний шар	1,5
Третій жертвний (технол.)	2,0
Третій структурний шар	2,25

Залишкова напруга структурних шарів, які використовуються в SUMMiT-технології, складає менше 5 МПа. На даний час розроблена SUMMiT V-технологія, яка являє собою п'ятишаровий полікремнієвий процес. Відмінність даної технології від SUMMiT-технології полягає в додаткових жертвному (ox4) і структурному (poly4) шарах, завтовшки 2,0 і 2,25 мкм відповідно, що дозволяє створювати елементи МСТ на платформах, що переміщуються. Крім того, можуть бути виготовлені більш “високі елементи” МСТ (порядку 12 мкм товщиною).

Недоліком даної технології є неможливість виготовлення елементів МСТ з іншого матеріалу, окрім як з полікремнію.

Перевагою SUMMiT-технології (як і MUMPs-технології) є можливість інтегрального створення великої кількості різних за функціональним призначенням елементів МСТ в одному процесі виготовлення з елементами ІС, що дозволить зменшити вартість пристроїв.

5.6. Волоконна технологія

Кілька років тому в Росії були ініційовані роботи в області використання скловолоконної технології для створення пристроїв мікроелектромеханіки із значними розмірами по третьому виміру.

Вироби з скла з малим поперечним перерізом у вигляді певної мікроструктури і технологія їх виготовлення відомі достатньо давно (мікроканалні пластини, рентгеношаблони із скловолокна, пристрої волоконної оптики). Суть скловолоконної технології полягає в спіканні пучка скляних волокон (порожнистих або суцільних), що розрізняються вибірковістю до травлення по відношенню до розчинника, витяганні цього

пучка до необхідного поперечного розміру, розрізанні витягнутої частини пучка на шматки і витравленні потім з шматка розчинних волокон. Укладання волокон в пучок здійснюється таким чином, що нерозчинні волокна утворюють в перетині пучка структуру (топологию) мікроструктури, що виготовляється, в деякому масштабі.

Оскільки для виробів мікромеханіки характерна наявність отворів і поверхонь різних конфігурацій, потрібен підбір матеріалів і геометрії волокон. Дані процеси збірки пучка і його витягання не є тривіальними, але дозволяють виготовляти деталі з мінімальними поперечними розмірами отворів до 0,2 мкм при висоті (глибині, довжині) від 100 мкм до 1 см.

Особливо слід зазначити можливість виготовлення деталей з гвинтоподібними поверхнями шляхом скручування витягнутого пучка навколо його осі. Такі поверхні, як відомо, характерні для гвинтів, черв'ячних і косозубих коліс і принципово не можуть бути реалізовані за допомогою LIGA-технології.

Волоконна технологія може бути віднесена до групової технології, оскільки однотипні вироби тиражуються в даному випадку у складі одного волоконного пучка.

Розділ 6 Сенсорні елементи МСТ

Сенсор – цей пристрій, який перетворює вхідну дію різної фізичної природи в електричний сигнал.

Сенсорні елементи МСТ складають один з класів твердотільних датчиків, чия основна особливість – конструктивно-технологічна і функціональна інтеграція на одному кристалі спільно з пристроями ІС.

Сенсорні елементи МСТ не працюють самостійно. Звичайно, вони є частиною великої мікросистеми, що складається з набору різних за функціональною ознакою сенсорів і аналого-цифрових ланцюгів обробки сигналу.

В якості сенсорних елементів МСТ використовуються як елементи ІС (резистори, конденсатори, діоди і транзистори), виготовлені за традиційними технологіями ІС, так і мікромеханічні структури (мембрани, балки), що виготовляються з використанням технологій МСТ.

На даний час класифікація сенсорів проводиться за різними ознаками:

1. За технологією виготовлення – гібридно-плівкові, твердотільні біполярні або МДН-структури і т.д.
2. За вихідним електричним сигналом – ємнісні, резистивні, індуктивні і т.д.
3. За параметром, що вимірюється – сенсори температури, тиску, магнітного поля і т.д.

З погляду формування сигналу, сенсорні елементи діляться на активні і пасивні. Активний сенсор вимагає наявності зовнішнього джерела збудження, тоді як пасивний сенсор генерує свій вихідний сигнал без використання зовнішнього джерела струму або напруги. Прикладами активних сенсорів є тензодатчики і акселерометри, сенсори магнітного поля і хімічного складу газових засобів. До пасивних сенсорів можна віднести термоелементи і фотодіоди, які утворюють термоелектричні напруги або фотодіодний струм, відповідно, без зовнішніх джерел енергії.

6.1. Сенсори температури на основі термопар

Розвиток МСТ привів до створення одного з численних видів сенсорів температури, в основу роботи яких покладені термоелектричні явища.

Термоелектричні явища виникають в результаті взаємодії теплових і електричних процесів. До основних термоелектричних явищ відносяться – ефект Зеебека, Пельтьє і Томсона.

Ефект Зеебека полягає в появі термо-ЕРС в замкнутому ланцюзі, складеному з різнорідних напівпровідників, контакти між якими підтримуються при різних температурах.

Розглянемо напівпровідник, уздовж якого існує градієнт температури (рис. 6.1). Рухомі носії в області з високою температурою володіють високою кінетичною енергією і швидкістю, ніж в області з більш низькою

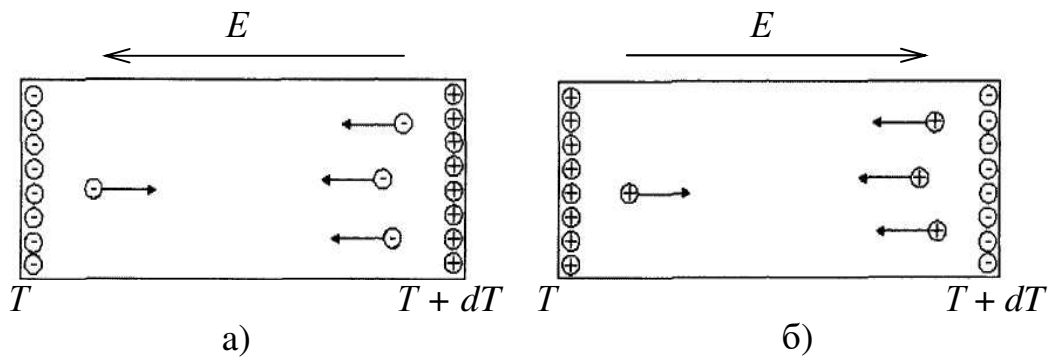


Рис. 6.1. До пояснення термоелектричних ефектів:
 а) напівпровідник *n*-типу; б) напівпровідник *p*-типу.

температурою. Внаслідок цього носії починають дифундувати з більш гарячої області в більш холодну область. Не дивлячись на те, що одночасно відбувається також і рух носіїв з холодної області в гарячу, потік носіїв з гарячої області в холодну переважає. Тому на холодному кінці напівпровідника відбувається накопичення об'ємного заряду одного знака, а на гарячому – іншого.

Поява об'ємних зарядів приводить до утворення в напівпровіднику електричного поля.

Якщо напівпровідник *n*-типу, то напрям напруженості електричного поля, що утворилося, співпадатиме з напрямом теплового потоку носіїв (рис. 6.1, а). Оскільки технічно рух електронів відбувається від мінуса до плюса, то з холодної області починається відтік електронів в більш гарячу область. Якщо напівпровідник *p*-типу (рис. 6.1, б), то напрям напруженості електричного поля, що утворилося, буде протилежний напрямку теплового потоку носіїв. Оскільки технічно рух дірок відбувається від плюса до мінуса, то з холодної області починається відтік носіїв в більш гарячу частину напівпровідника.

Через деякий час утворений електричний потік компенсує тепловий потік носіїв і встановлюється динамічна рівновага.

За умов динамічної рівноваги різниця потенціалів, яка виникла за рахунок об'ємних зарядів, буде являти собою термо-ЕРС. В напівпровіднику *n*-типу гаряча область виявляється зарядженою позитивно, а холодна – негативно. В напівпровіднику *p*-типу гаряча область заряджається негативно, а холодна – позитивно.

Величина термо-ЕРС визначатиметься наступним виразом:

$$dU = \alpha dT, \quad (6.1)$$

де α – диференціальний коефіцієнт термо-ЕРС, T – абсолютна температура.

Знак коефіцієнта термо-ЕРС залежить від типу провідності напівпровідника: для *n*-типу α має негативний знак, а для *p*-типу – позитивний.

Значення коефіцієнта α для різних напівпровідників сильно залежить від виду і концентрації домішок в напівпровіднику і може досягати 1000 мкВ/град.

Якщо з'єднати в замкнутий ланцюг два різні матеріали, то в ланцюзі потече струм і результуюче значення термо-ЕРС буде рівне:

$$dU = dU_1 - dU_2 = (\alpha_1 - \alpha_2) dT, \quad (6.2)$$

де dT – різниця температур між матеріалами.

Як видно з виразу (6.2), для того, щоб отримати максимальну величину термо-ЕРС dU , потрібно вибирати матеріали, в яких коефіцієнти мають найбільші значення і протилежні знаки.

За допомогою явища Зеєбека, крім температури, можна визначати й інші фізичні величини, вимірювання яких може бути зведено до вимірювання температур: сили змінного струму, потоку променистої енергії, тиску газу і т.д.

Для збільшення чутливості термоелементи сполучають послідовно в термобатарей. При цьому, всі парні спаї підтримуються при одній температурі, а всі непарні – при іншій. ЕРС такої батареї рівна сумі термо-ЕРС окремих елементів.

Мініатюрні термобатарей (так звані термостовпчики) з успіхом застосовують для вимірювання інтенсивності світла (як видимого, так і невидимого). У поєднанні з чутливим гальванометром вони володіють величезною чутливістю і здатні знаходити теплове випромінювання людської руки.

Термобатарей використовуються і як генератори електричного струму. Проте для перетворення теплової енергії в електричну необхідно використовувати тільки напівпровідникові матеріали.

Ефект Пельтье полягає в тому, що при протіканні електричного струму через контакти a і b напівпровідників 1 і 2 в області контакту виділяється або поглинається тепло (рис. 6.2).

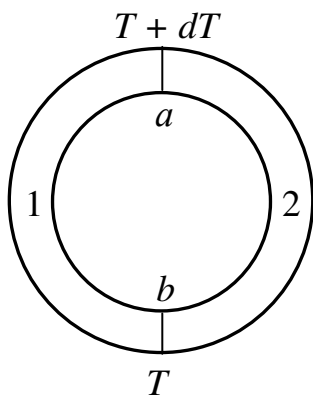


Рис. 6.2. До пояснення ефекту Пельтье

Як наголошувалося вище, кінетична енергія носіїв в напівпровіднику визначається температурою. Тому якщо напрям струму в ланцюзі такий, що носії переходять з області, де їх кінетична енергія більша, в область, де ця енергія менше, то поблизу контакту вони передають свою надлишкову енергію кристалічній ґратці напівпровідника. В цьому випадку температура другої області підвищується. При іншому напрямі струму носії поповнюють свою кінетичну енергію за рахунок енергії кристалічної ґратки, що приводить до зменшення температури напівпровідника.

Кількість тепла, що виділяється або поглинається поблизу контакту за одиницю часу, можна виразити в наступному вигляді:

$$Q_{\pi} = \Pi \cdot I, \quad (6.3)$$

де I – сила струму, Π – інтегральний коефіцієнт Пельтье, який визначається властивостями пари матеріалів, що контактують між собою.

Основні напрями практичного використання ефекту Пельтьє в напівпровідниках:

- отримання холоду для створення термоелектричних охолоджуючих пристроїв;
- підігрів з метою опалювання;
- термостатування;
- керування процесом кристалізації в умовах постійної температури.

Термоелектричний метод охолодження володіє рядом переваг в порівнянні з іншими методами охолодження. Термоелектричні пристрої відрізняються простотою керування, можливістю тонкого регулювання температури, безшумністю, високою надійністю роботи. Основний недолік термоелектричних пристроїв – мала величина ефективності, що не дозволяє їх використовувати для промислового отримання “холоду”.

Термоелектричні охолоджуючі пристрої застосовуються в побутових і транспортних холодильниках, термостатах, для охолодження і термостатування термочутливих елементів радіоелектронної і оптичної апаратури, для управління процесом кристалізації, в медико-біологічних приладах і т.д.

Ефект Томсона полягає в наступному. Якщо уздовж напівпровідника, по якому протікає електричний струм, існує градієнт температури, то окрім джоулевого тепла виділяється або поглинається кількість теплоти Q_T , пропорційна силі струму і градієнту температури. Коли напрям струму співпадає з напрямом градієнта температури, то при дрейфі носіїв від більш гарячого кінця до більш холодного їх надлишкова енергія передається кристалічній ґратці напівпровідника. Це приводить до підвищення температури більш холодної частини напівпровідника. При іншому напрямі протікання струму носії поповнюють нестачу своєї кінетичної енергії за рахунок енергії кристалічної ґратки в більш гарячій області напівпровідника. Це приводить до поглинання тепла і пониження температури гарячої області.

Кількість тепла, що виділяється (поглинається), визначається наступним виразом:

$$Q_T = \tau I(T_2 - T_1), \quad (6.4)$$

де τ – коефіцієнт Томсона.

В замкнутому ланцюзі, що складається з різнорідних матеріалів, за наявності градієнта температури одночасно виникають всі три термоелектричні ефекти. Зв'язок коефіцієнтів Зеебека, Пельтьє і Томсона виражається наступною залежністю:

$$\alpha = \frac{\Pi}{T}, \quad (6.5)$$

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{\tau_1 - \tau_2}{T}, \quad (6.6)$$

де τ_1, τ_2 – коефіцієнти Томсона для двох матеріалів замкнутого ланцюга.

Ефект Томсона не має технічних використань, проте повинен враховуватися у відносно точних розрахунках термоелектричних пристроїв.

6.2. Сенсори кутових швидкостей

Механічні величини можна розділити на три групи.

До першої групи відносяться лінійні і кутові розміри. Це геометричні параметри різних об'єктів, характеристики профілів і шорсткості поверхонь, відстань, параметри зносу частин, що труться, і т.д.

До другої групи відносяться різні силові дії. Це механічні напруги в деталях і конструкціях, прикладена сила, обертові моменти, тиски рідин і газів, різниці тиску і т.д.

Третю групу механічних величин складають параметри руху. Це переміщення об'єктів в просторі, лінійні і кутові швидкості переміщення, прискорення.

Для створення сенсорів механічних величин використовують мембранні або балкові пружні елементи з різними топологічними параметрами.

Принцип дії сенсорів кутових швидкостей (гіроскопів) базується на оптичних і п'єзоелектричних ефектах, ефекті зміни електричної ємності (пружні елементи є обкладаннями конденсатора в ємнісних сенсорах механічних величин), ефекті зміни частоти коливань (мікромеханічний резонатор).

Для виготовлення сенсорів механічних величин можуть застосовуватися як технології об'ємної і поверхневої мікрообробки, так і LIGA-технологія. В даний час найбільше розповсюдження отримали волоконні оптичні і мікромеханічні гіроскопи.

6.2.1. Волоконний оптичний гіроскоп.

Волоконний оптичний гіроскоп (ВОГ) – це оптико-електронний прилад, створення якого стало можливим лише з розвитком і вдосконаленням елементної бази квантової електроніки. Прилад призначений для вимірювання кутової швидкості і кутів повороту рухомого об'єкту. Можливість створення реального високочутливого ВОГ з'явилася лише з промисловою розробкою одномодового діелектричного світловода з малим затуханням. Принцип дії ВОГ базується на ефекті Саньяка.

Суть ефекту Саньяка полягає в наступному. Якщо в замкнутому оптичному контурі в протилежних напрямках розповсюджуються два світлові промені, то при нерухомому контурі фазові набіги обох променів, які пройшли весь контур, будуть однаковими. При обертанні контуру навколо осі, нормальної до площини контуру, фазові набіги променів неоднакові, а різниця фаз променів пропорційна кутовій швидкості обертання контуру.

Розглянемо принцип роботи ВОГ на прикладі ідеального кільцевого оптичного контуру (рис. 6.3).

Промінь світла приходить в точку А і за допомогою дзеркал Дз₁ і Дз₂ розщеплюється на два промені, один з яких поширюється за годинниковою стрілкою в контурі, а інший – проти годинникової стрілки. За допомогою цих

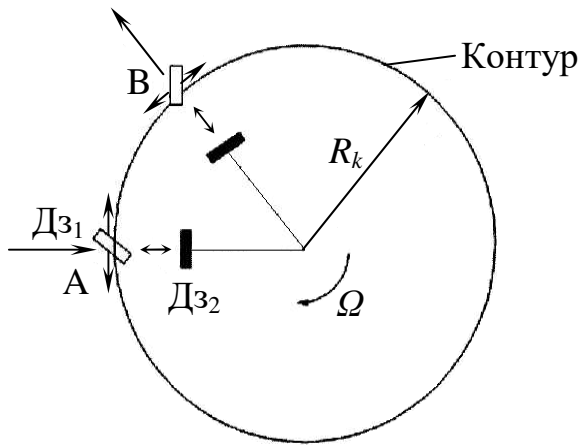


Рис. 6.3. Ефект Саньяка в кільцевому оптичному контурі

же дзеркал після поширення в контурі промені об'єднується і прямують по одному шляху. При нерухомому контурі шляхи проходження променів однакові і рівні

$$2\pi R_k = c\tau, \quad (6.7)$$

де R_k – радіус контуру, c – швидкість світла, τ – час проходження периметра контуру променем.

Обидва промені приходять в точку А на розділювач у фазі. Якщо контур обертається з постійною кутовою швидкістю Ω , то промінь, що поширюється за годинниковою стрілкою, перш ніж потрапить на розділювач, що переміщається, пройде шлях рівний

$$2\pi R_k + R_k \Omega \tau_+ = c\tau_+. \quad (6.8)$$

Це викликано тим, що за час проходження променя по замкнутому контуру розділювач, що знаходився раніше в точці А, перейде в точку В. Для променя, що поширюється проти годинникової стрілки, шлях складе

$$2\pi R_k - R_k \Omega \tau_- = c\tau_-. \quad (6.9)$$

Як видно з виразів (6.8) і (6.9), шляхи поширення протилежно напрямлених променів різні. Оскільки швидкість світла величина постійна, це еквівалентно різним часам τ_+ і τ_- проходження променів, що поширюються в протилежних напрямках замкнутого контуру, що обертається. Різниця часів поширення визначається виразом:

$$\Delta\tau = \tau_+ - \tau_- = \frac{2\pi R_k^2 \Omega}{c^2 - R_k^2 \Omega^2}. \quad (6.10)$$

В наближенні першого порядку вираз (6.10) можна записати у вигляді:

$$\Delta\tau = \frac{2\pi R_k^2 \Omega}{c^2}. \quad (6.11)$$

Як видно з виразу (6.11), різниця часу поширення протилежно напрямленими променями однієї і тієї ж відстані буде прямо пропорційною кутовій швидкості об'єкту.

6.2.2. Мікромеханічні гіроскопи.

Всі мікромеханічні гіроскопи за своїм принципом функціонування є вібраційними.

Вібраційний гіроскоп був вперше представлений на початку 50-х років минулого століття для заміни гіроскопів, що обертаються, в космічній техніці. Вібраційні мікромеханічні гіроскопи відрізняються від інших складністю їх функціонування. Інформаційний сигнал не формується на

виході пристрою без механічного збудження інерційних мас. Для отримання інформаційного сигналу необхідно привести інерційні маси в коливальний лінійний чи кутовий рух. Сигнал дуже малий, тому потрібне механічне підсилення його у формі поєднання частот збудження коливань і резонансної частоти коливань інерційних мас гіроскопа.

Розрізняють два типи мікромеханічних гіроскопів: камертонні і карданові.

Принцип роботи мікромеханічних гіроскопів камертонного типу полягає в наступному (рис. 6.4).

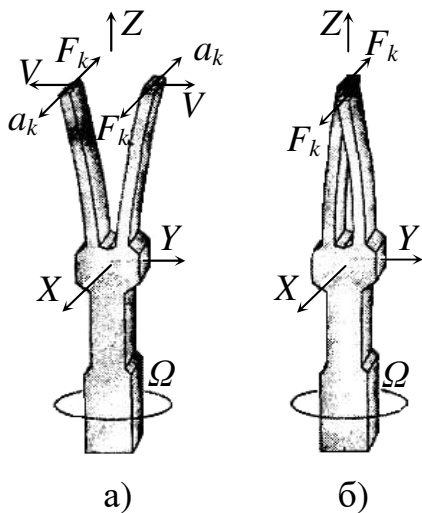


Рис. 6.4. Принцип роботи камертонних гіроскопів

Інерційні маси гіроскопа приводяться в протифазний коливальний рух в площині YZ . При цьому вони починають переміщатися з деякою швидкістю V . При виникненні обертання основи гіроскопа з деякою кутовою швидкістю Ω навколо осі Z виникає прискорення Коріоліса a_k , яке визначається виразом:

$$a_k = V \Omega. \quad (6.12)$$

Напрямок вектора прискорення Коріоліса визначається правилом Н.Е. Жуковського: для визначення напрямку вектора прискорення Коріоліса a_k необхідно вектор відносної швидкості точки V повернути в площині, перпендикулярній вектору кутової швидкості на 90° за напрямом обертання пристрою.

Сила інерції F_k визначається виразом:

$$F_k = 2 m a_k = 2 V \Omega m, \quad (6.13)$$

де m – маса, яка називається силою Коріоліса, буде направлена протилежно прискоренню a_k . Таким чином, інерційні маси під дією сили F_k починають здійснювати протифазні коливання в площині XZ . Амплітуда цих коливань буде пропорційна величині кутової швидкості, а їх фаза – напрямку.

На рис. 6.5 представлено мікромеханічний гіроскоп з однією віссю чутливості компанії Draper Laboratory (США).

Даний гіроскоп відноситься до типу камертонних і дозволяє вимірювати величину кутової швидкості при обертанні його основи навколо осі X , розташованої в площині підкладки (див. рис. 6.5). Реєстрація амплітуди коливань інерційних мас під дією сил Коріоліса проводиться за допомогою ємнісних перетворювачів переміщень, які утворюються інерційними масами і нерухомими електродами, розташованими під ними.

Інерційні маси за допомогою трьох електростатичних приводів приводяться в коливальний рух в площині підкладки. Вектори швидкостей інерційних мас знаходяться в протифазі один одному. При виникненні кутової швидкості навколо осі X під дією сил Коріоліса одна інерційна маса буде підніматися над площиною підкладки, а інша опускатися. Таким чином, інерційні маси починають здійснювати протифазні коливання

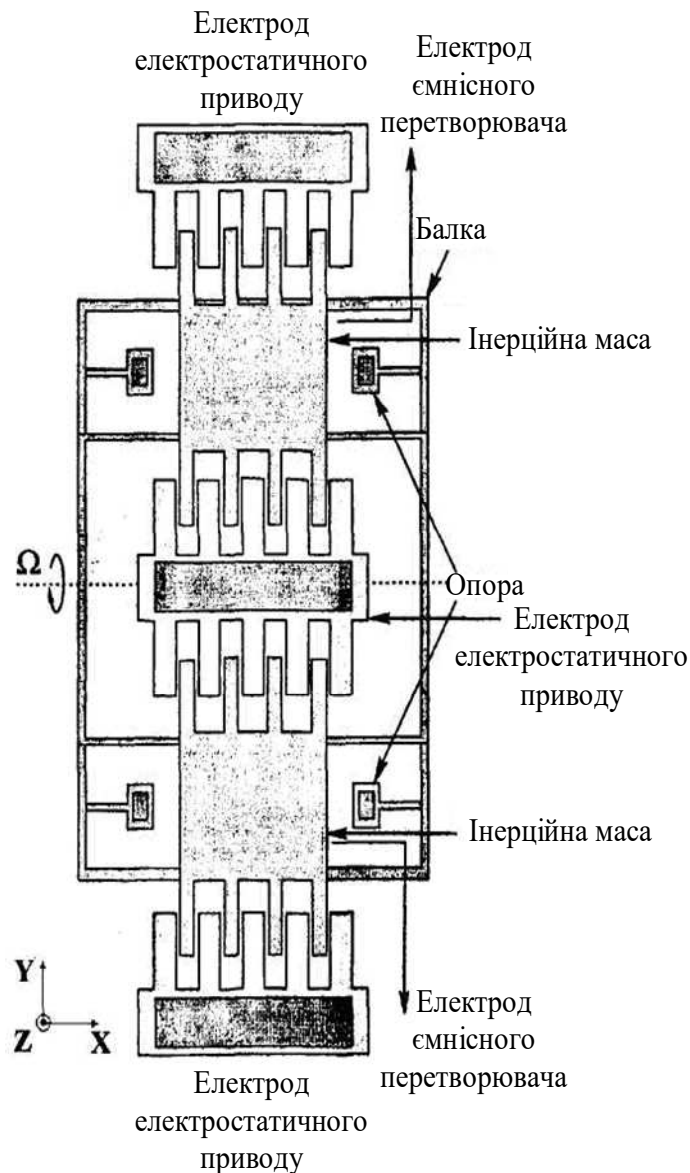


Рис. 6.5. Мікромеханічний гіроскоп із однією віссю чутливості

перпендикулярно площині підкладки. Ємнісні перетворювачі переміщень формують вихідний сигнал гіроскопа, пропорційний величині кутової швидкості.

На рис.6.6 подано структуру одновісного мікромеханічного гіроскопа.

На рис.6.7 представлено інтегральний мікромеханічний гіроскоп з двома осями чутливості.

Даний гіроскоп відноситься до типу камертонних гіроскопів і дозволяє вимірювати величини кутових швидкостей при обертанні його навколо двох взаємно перпендикулярних осей X і Y , розташованих в площині підкладки.

Принцип роботи даного мікромеханічного пристрою аналогічний попередньому. Відмінність тільки в тому, що інерційна маса одна, і вона здійснює оборотно-поступальний рух навколо своєї опори в площині підкладки. При виникненні кутової швидкості навколо осі X інерційна маса

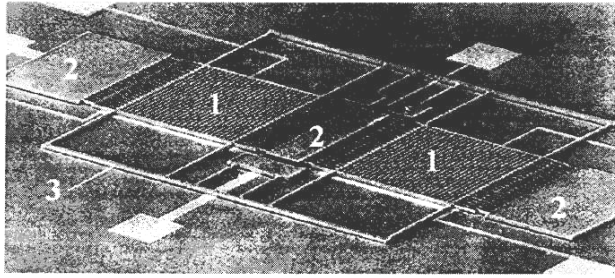
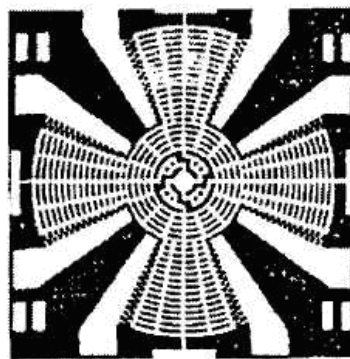
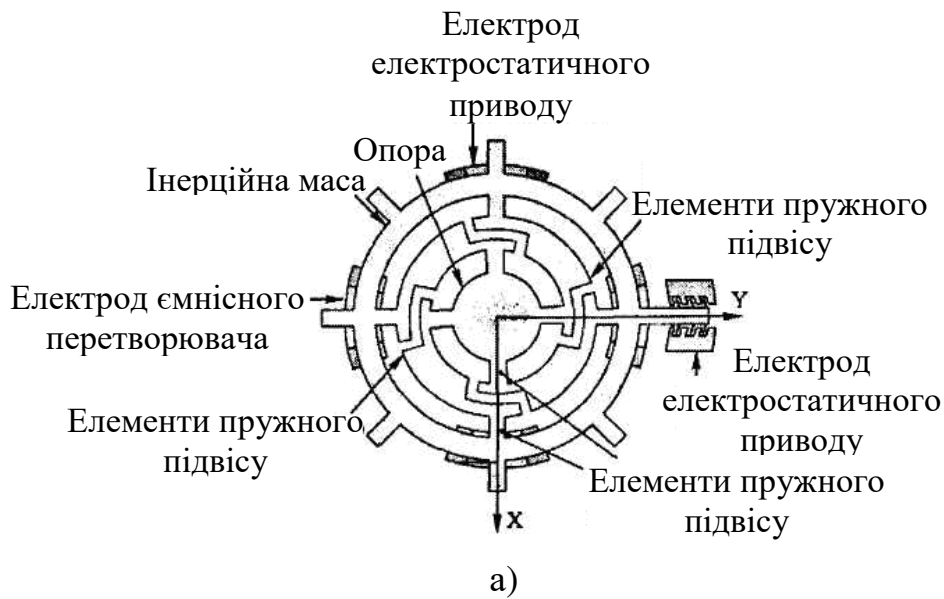


Рис. 6.6. Структура одновісного мікромеханічного гіроскопа: 1 – інерційна маса, 2 – нерухомі електроди електростатичних приводів, 3 – пружний підвіс.



б)

Рис. 6.7. Мікромеханічний гіроскоп з двома осями чутливості: а – структура, б – топологія.

починає здійснювати коливання навколо осі Y . При виникненні кутової швидкості навколо осі Y – інерційна маса коливається навколо осі X .

Вихідний сигнал гіроскопа формують перетворювачі ємностей переміщень, утворені інерційною масою і електродами ємнісних перетворювачів, розташованими під нею.

На рис. 6.8. представлено двохвісний мікромеханічний гіроскоп, виготовлений за технологією поверхневої мікрообробки.

На рис. 6.9 приведено мікромеханічний гіроскоп з однією віссю чутливості карданового типу. Інерційна маса приводиться в коливальний рух навколо осі X за допомогою електростатичних приводів, утворених зовнішньою рамкою і електродами електростатичних приводів. При виникненні кутової швидкості навколо осі Z внутрішня рамка під дією гіроскопічного моменту починає здійснювати кутові коливання навколо осі Y за рахунок кручення пружних торсійнів. Амплітуда коливань внутрішньої рамки буде пропорційна величині кутової швидкості, а фаза – напряду. Вихідний сигнал формується ємнісними перетворювачами переміщень, утворених внутрішньою рамкою і електродами ємнісних перетворювачів.

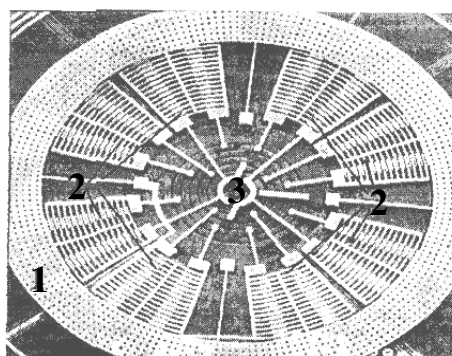


Рис. 6.8. Двохвісний мікромеханічний гіроскоп: 1 – інерційна маса, 2 – нерухомі електроди електростатичних приводів, 3 – опора.

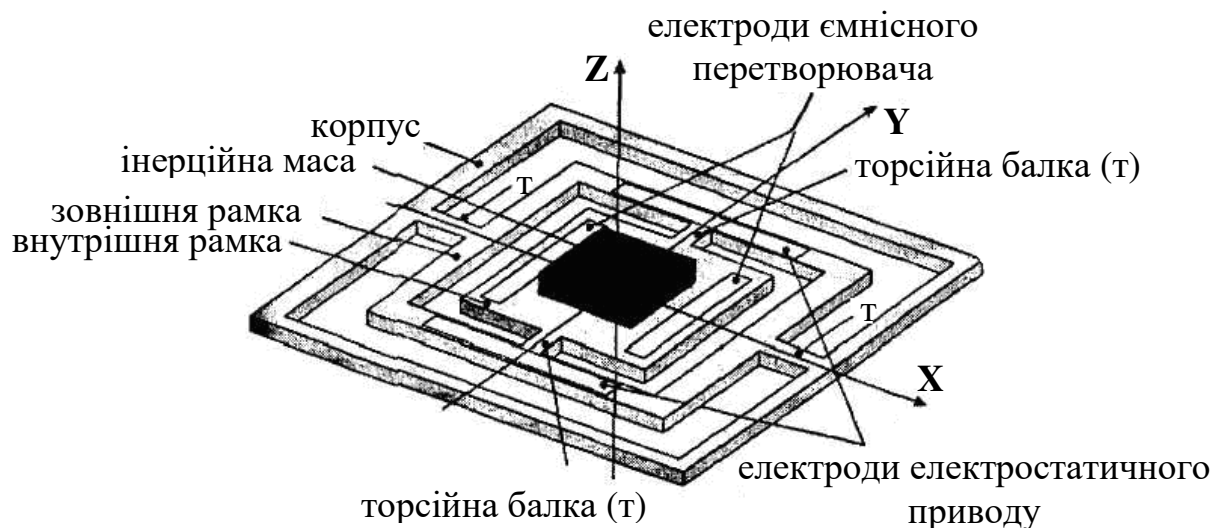


Рис. 6.9. Мікромеханічний гіроскоп із однією віссю чутливістю

6.3. Сенсори магнітного поля

Сенсор магнітного поля являє собою вхідний елемент вимірювальної схеми, що перетворює магнітне поле в електричний сигнал.

Для виготовлення інтегральних напівпровідникових сенсорів магнітного поля використовуються методи, які використовуються в технології інтегральних схем. На даний час розробляються все нові типи інтегральних сенсорів, призначених для різних областей використання, що пояснюється тими перевагами, які дає інтеграція на одному кристалі сенсорного елемента і схем обробки сигналу. Кінцева мета полягає в створенні різноманітних недорогих, високоякісних сенсорів, які виготовляються за груповою технологією і пов'язані з цифровими системами обробки сигналів, які знаходять все більш широке використання.

Існують дві групи використання сенсорів магнітного поля: безпосередні і непрямі використання.

6.3.1. Елемент Холла.

До першої групи відносяться вимірювання індукції магнітного поля, зчитування з магнітних стрічок або дисків, розпізнавання рисунка магнітним чорнилом на банкнотах і кредитних картках і т.д.

На рис. 6.10 подано конструкцію плівкового елемента Холла, призначеного для вимірювання індукції магнітного поля.

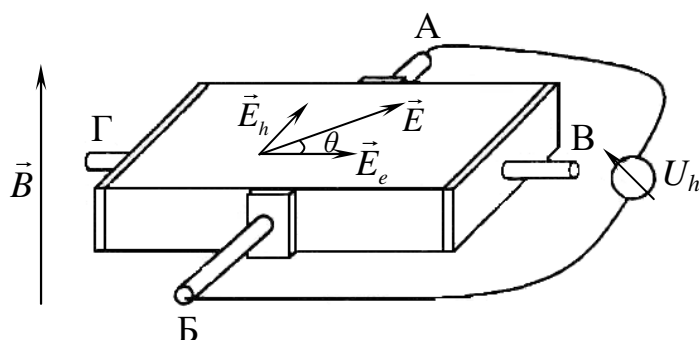


Рис. 6.10. Елемент Холла

В основі функціонування більшості типів магнітних сенсорів лежать ті чи інші ефекти, обумовлені дією сили Лоренца на носії заряду напівпровідника, що рухаються в електричному полі.

Сила Лоренца визначається виразом:

$$\vec{F} = \pm q (\vec{V} \times \vec{B}), \quad (6.14)$$

де q – заряд електрона, \vec{V} – дрейфова швидкість носіїв зарядів, \vec{B} – індукція перпендикулярного магнітного поля.

У виразі (6.14) знак “+” ставиться, якщо носіями заряду є дірки, а знак “-” – електрони.

Дрейфова швидкість носіїв заряду визначається виразом:

$$\vec{V} = \pm \mu_n \vec{E}_e, \quad (6.15)$$

де μ_n – рухливість носіїв заряду, \vec{E}_e – напруженість електричного поля.

Підставивши вираз (6.15) в (6.14), отримаємо:

$$\vec{F} = q \mu_n (\vec{E}_e \times \vec{B}), \quad (6.16)$$

тобто напрям сили Лоренца не залежить від знака носіїв, отже, електрони і дірки відхилятимуться в одну сторону.

Якщо елемент Холла n -типу провідності помістити в перпендикулярне магнітне поле, то основні (електрони) і неосновні (дірки) носії заряду відхиляються до електроду А і нагромаджуються біля нього. Але оскільки основних носіїв набагато більше, ніж неосновних, то біля електроду А буде надлишок електронів, а біля електроду Б їх неолік. Між електродами А і Б виникає додаткове електричне поле, направлене від Б до А. Електричне поле, що виникає, називають полем Холла. Його напрям перпендикулярний вектору магнітного поля і електричному струму, який протікає між електродами В і Г (рис. 6.10).

Поле Холла буде зростати до тих пір, поки не скомпенсує силу Лоренца:

$$-q \vec{E}_h = q (\vec{V} \times \vec{B}), \quad (6.17)$$

де \vec{E}_h – поле Холла.

Після досягнення цієї умови носії заряду течуть по напівпровіднику тільки під дією електричного поля, тобто магнітне поле як би відсутнє. Проте сумарна напруженість поля в зразку буде рівною:

$$\vec{E} = \vec{E}_e + \vec{E}_h, \quad (6.18)$$

а її вектор виявиться поверненим на деякий кут θ , який називається кутом Холла. Між електродами А і Б виникає різниця потенціалів, яка називається ЕРС Холла або холлівською напругою, яка визначається виразом:

$$U_h = \vec{E}_h w = R_h \vec{j} w B, \quad (6.19)$$

де R_h – постійна Холла, j - густина струму, w – ширина сенсора, B – індукція магнітного поля.

Густина струму визначається виразом:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}_e, \quad (6.20)$$

де σ – питома провідність напівпровідника:

$$\sigma = q n \mu_n, \quad (6.21)$$

де n – концентрація електронів.

Постійна Холла визначається виразом:

$$R_h = (q n)^{-1}. \quad (6.22)$$

Кут Холла визначається з допомогою виразу:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{E_h}{E_e} = \frac{U_h}{U_e} \cdot \frac{l}{w} = \mu_n^* B, \quad (6.23)$$

де U_e – напруга електричного поля, l – довжина сенсора, μ_n^* – рухливість Холла:

$$\mu_n^* = \sigma R_n. \quad (6.24)$$

6.3.2. Двохколекторний магніотранзистор.

До другої групи використання сенсорів магнітного поля відноситься виявлення немагнітних сигналів:

- виявлення електричного струму за його магнітним полем;
- реєстрація механічного переміщення;
- визначення напрямку дії магнітного поля.

Домінуючу роль в даній групі застосувань сенсорів магнітного поля відіграватимуть мініатюрні системи орієнтації, навігації і керування.

При використанні в даних системах сенсори магнітного поля об'єднують в магніточутливі мікросистеми, які містять інтегральні двоколекторні горизонтальні і вертикальні біполярні магніотранзистори, багатостокові МОН-транзистори.

Біполярні магніотранзистори більш універсальні і можуть застосовуватися для вимірювання всіх компонентів вектора індукції магнітного поля і визначення напрямку його дії. Крім того, сенсори магнітного поля на основі двоколекторних біполярних магніотранзисторів у порівнянні із сенсорами магнітного поля на основі МОН-транзисторів володіють більш низьким температурним коефіцієнтом магніточутливості.

Двохколекторні магніотранзистори являють собою біполярні транзистори з колектором, розділеним на два, причому кожний колектор із своїм виводом (рис. 6.11). Обидва колектори розташовано симетрично по відношенню до емітера. Тому при відсутності магнітного поля носії заряду порівну розподіляються між колекторами:

$$I_k = I_{k1} + I_{k2}. \quad (6.25)$$

При дії магнітного поля з індукцією \vec{B} носії заряду під дією сили Лоренца відхиляються від первинного положення на кут Холла (рис. 6.11, а).

Це еквівалентно збільшенню площі одного із колекторів і зменшенню площі іншого. В результаті відбувається збільшення струму одного колектора і зменшення струму іншого колектора. Відстань, на яку відхиляються носії заряду під дією індукції магнітного поля, визначається наступним виразом:

$$\Delta x = W_k \operatorname{tg} \theta = W_k \mu_n^* B, \quad (6.26)$$

де W_k – товщина колектора.

Таким чином, зміна струмів першого і другого колекторів під дією зовнішнього магнітного поля описується наступним виразом

$$\Delta I_{k1,k2} = \pm \frac{\Delta x}{L_e} = \pm 2 \cdot \frac{W_k \mu_n^* B}{L_e} \cdot I_k. \quad (6.27)$$

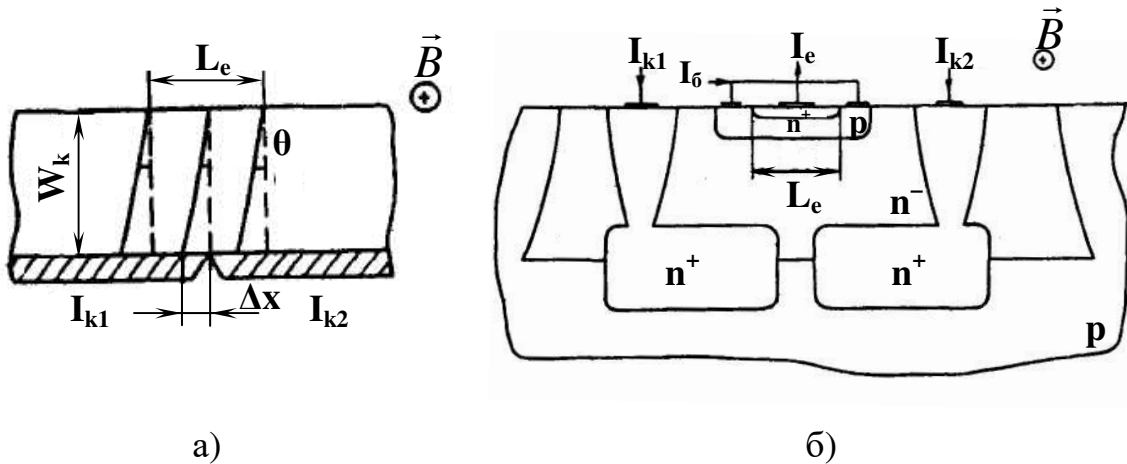


Рис. 6.11. Двохколекторний біполярний магнітотранзистор

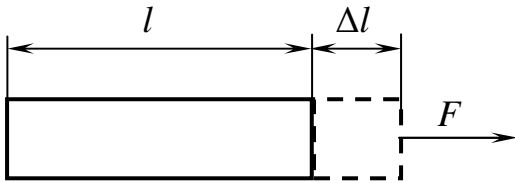
Сенсори магнітного поля, у порівнянні з сенсорами механічних величин, мають істотну перевагу при використанні їх як елементної бази систем орієнтації, навігації і керування. Ця перевага полягає в тому, що сенсори магнітного поля можуть визначати положення об'єкту в просторі, що знаходиться в стані спокою, тоді як сенсори механічних величин – тільки в стані руху.

Технологія виготовлення сенсорів магнітного поля МСТ повністю сумісна з технологією виготовлення ІС, що дозволяє створювати сенсорні елементи даного вигляду спільно з пристроями обробки, зберігання і передачі інформації на одному кристалі.

Розділ 7 Мікромеханічні елементи МСТ у силовому полі

7.1. Закон Гука

В 1676 році англійський учений Роберт Гук відкрив фундаментальну закономірність між силами і викликаними ними переміщеннями: сила розтягу або стиску, прикладена до тіла у формі стержня, викликає зміну довжини тіла (рис. 7.1).



Величина зміни довжини тіла залежить від розмірів тіла, матеріалу і величини сили:

$$\frac{F}{S} = E \frac{\Delta l}{l} \quad (7.1)$$

Рис. 7.1. До поняття закону Гука

де F – зовнішня сила, S – площа поперечного перерізу тіла, E – модуль

Юнга (пружності), Δl – зміна довжини тіла, l – довжина тіла.

Оскільки

$$\begin{aligned} \frac{F}{S} &= \sigma, \\ \frac{\Delta l}{l} &= \varepsilon, \end{aligned} \quad (7.2)$$

то вираз (7.1) набуде вигляду

$$\sigma = E \varepsilon, \quad (7.3)$$

де σ – механічна напруга, ε – відносна деформація.

Необхідно відзначити, що модуль Юнга є фізичною сталою матеріалу і визначається експериментально.

На основі закону Гука (7.3) можна сказати, що модуль Юнга рівний відношенню прикладеної напруги до викликаного нею відносного видовження:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}. \quad (7.4)$$

Величина, обернена модулю Юнга, називається коефіцієнтом пружності

$$\alpha = \frac{1}{E} = \frac{\varepsilon}{\sigma}. \quad (7.5)$$

Необхідно пам'ятати, що закон Гука виконується тільки в області пружних деформацій.

Абсолютне значення відношення відносної поперечної деформації $\varepsilon_{\text{попер}}$ до відносної подовжньої деформації $\varepsilon_{\text{повзд}}$ при розтязі або стиску в області дії закону Гука, називається коефіцієнтом Пуассона:

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon_{\text{попер}}}{\varepsilon_{\text{повзд}}} \right|. \quad (7.6)$$

Якщо на тіло уздовж його осі діє деяка зовнішня сила (див. рис. 7.1), то згідно закону Гука відносна подовжня деформація визначатиметься наступним виразом:

$$\varepsilon_{\text{повзд}} = \frac{\sigma_{\text{повзд}}}{E}. \quad (7.7)$$

Відносна поперечна деформація визначається виразом:

$$\varepsilon_{\text{попер}} = -\frac{\sigma_{\text{попер}}}{E}. \quad (7.8)$$

Якщо на тіло діють зовнішні сили уздовж трьох осей X, Y, Z (рис. 7.2), то відносна деформація тіла по цих осях вже залежатиме від всіх діючих на тіло сил.

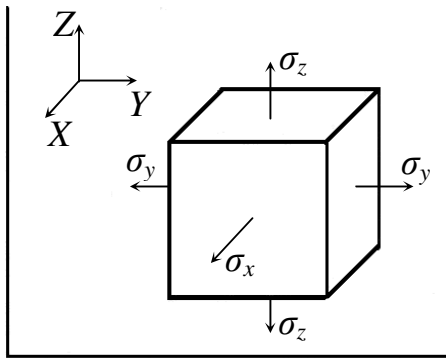


Рис. 7.2. До поняття узагальненого закону Гука

Розглянемо дію сил уздовж осі X . Від дії напруги σ_x , напрямленої уздовж осі X , відносна лінійна деформація по даній осі складе

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E}. \quad (7.9)$$

Від дії напруги σ_y , напрямленої уздовж осі Y , відносна лінійна деформація по осі X складе

$$\varepsilon_x = -\mu \frac{\sigma_y}{E}. \quad (7.10)$$

Від дії напруги σ_z , направленої уздовж осі Z , відносна лінійна деформація по осі X складе

$$\varepsilon_x = -\mu \frac{\sigma_z}{E}. \quad (7.11)$$

Склавши вирази (7.9) - (7.11), отримаємо:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)]. \quad (7.12)$$

Аналогічно одержуємо вирази для відносної лінійної деформації по осях Y, Z :

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)], \quad (7.13)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)]. \quad (7.14)$$

Вирази (7.12) - (7.14) є аналітичним виразом узагальненого закону Гука.

Закон Гука при зсуві матиме наступний вигляд (рис. 7.3):

$$\tau = \frac{F}{S} = G \gamma, \quad (7.15)$$

де τ – дотична напруга, F – сила, паралельна площі S , S – площа поверхні, G – модуль зсуву (пружності), γ – кутова деформація.

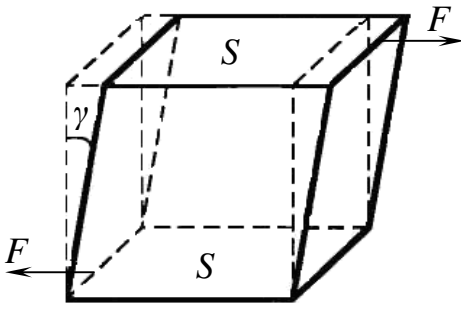


Рис. 7.3. До поняття закону Гука при зсуві

Необхідно відзначити, що модуль зсуву, як і модуль Юнга, є фізичною сталою матеріалу і визначається експериментально.

Модуль зсуву пов'язаний з модулем Юнга і коефіцієнтом Пуассона наступним виразом:

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}. \quad (7.16)$$

Величина, обернена модулю зсуву, називається коефіцієнтом зсуву:

$$\beta = \frac{1}{G} = \frac{2(1 + \mu)}{E}. \quad (7.17)$$

7.2. Момент інерції перерізу

Осьовим моментом інерції перерізу відносно даної осі називається сума добутків елементарних площ dA на квадрат їх відстаней до даної осі (наприклад, x або y), яка розповсюджується на всю площу перерізу A . Так, осьові моменти інерції (рис. 7.4) відносно осей x і y рівні:

$$J_x = \int_A y^2 dA, \quad (7.18)$$

$$J_y = \int_A x^2 dA. \quad (7.19)$$

Полярним моментом інерції перерізу відносно даної точки (поліус O) називається сума добутків елементарних площ dA на квадрати їх відстаней до цієї точки, яка розповсюджується на всю площу перерізу A . Отже,

$$J_\rho = \int_A \rho^2 dA. \quad (7.20)$$

Осьові і полярний моменти інерції завжди додатні і виражаються в см^4 або м^4 .

Відзначимо цікаву властивість: полярний момент інерції J_ρ рівний сумі осьових моментів інерції J_x і J_y щодо будь-якої пари взаємно перпендикулярних осей x і y , які проходять через поліус O .

Дійсно, як видно з рис. 7.4, $\rho^2 = x^2 + y^2$, і

$$J_\rho = \int_A \rho^2 dA = \int_A (x^2 + y^2) dA = \int_A x^2 dA + \int_A y^2 dA = J_x + J_y. \quad (7.21)$$

Якщо осі x і y повернути щодо поліуса O на деякий кут α (рис. 7.4), то $\rho^2 = x_1^2 + y_1^2$, і, отже, $J_\rho = J_{x_1} + J_{y_1}$, тобто при будь-якому повороті осей відносно початку координат (поліуса O) сума осьових моментів інерції залишається постійною:

$$J_x + J_y = J_{x_1} + J_{y_1} = J_\rho = \text{const}. \quad (7.22)$$

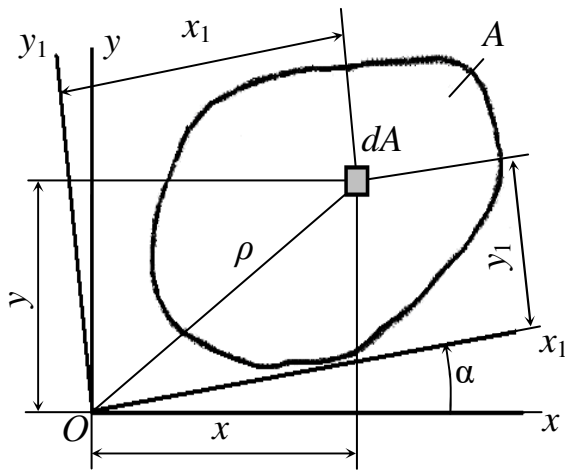


Рис. 7.4. Осевий момент інерції

Відцентровим моментом інерції перерізу щодо осей координат (наприклад, осей x і y) називається сума добутоків елементарних площ dA на їх відстані до цих осей, яка розповсюджується на всю площу перерізу A . Таким чином,

$$J_{xy} = \int_A x \cdot y \cdot dA. \quad (7.23)$$

Відцентровий момент інерції J_{xy} виражається в см^4 або м^4 і може бути додатним, від'ємним і рівним нулю залежно від положення перерізу щодо осей координат.

Якщо переріз займає положення відносно осей x та y , як показано на рис. 7.5, а, то в цьому випадку $J_{xy} > 0$, оскільки координати x та y додатні. Повернемо осі координат на 90° проти ходу годинникової стрілки (рис. 7.5, б). Тепер $J_{xy} < 0$, оскільки $x > 0$, а $y < 0$. Звідси слідує, що при повороті осей на деякий кут $\alpha < 90^\circ$ відцентровий момент може бути рівний нулю: $J_{xy} = 0$.

Для деяких перерізів можна відразу вказати осі, відносно яких $J_{xy} = 0$. Розглянемо переріз, що має вісь симетрії (рис. 7.6). Відцентрові моменти інерції напівперерізів, розташовані по різні сторони від осі y , рівні між собою але відрізняються знаками. Отже, $J_{xy} = 0$.

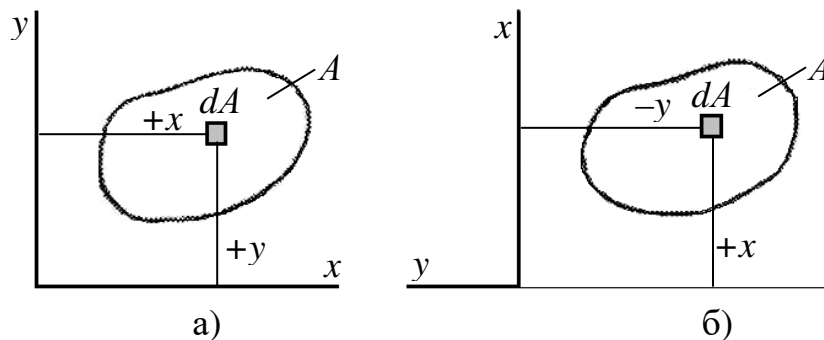


Рис. 7.5. Відцентровий момент інерції

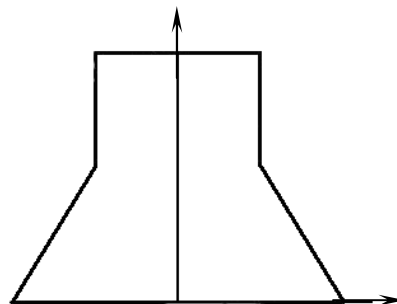


Рис. 7.6. Відцентровий момент інерції для симетричних осей

Момент інерції залежить від виду перерізу консольної балки (рис. 7.7):

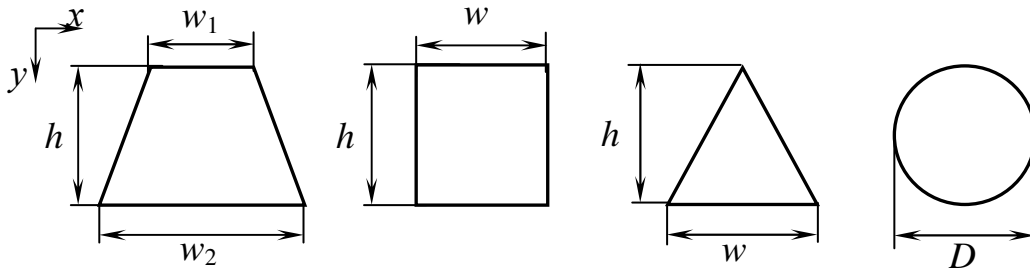


Рис. 7.7. Види перерізу балки

- з трапецієвидним перерізом:

$$J_x = \frac{(w_1 + w_2)}{24} h^3, \quad (7.24)$$

$$J_y = \frac{(w_1 + w_2)(w_1^2 + w_2^2)}{48} h, \quad (7.25)$$

де w_1 – ширина поверхні балки, w_2 – ширина основи балки, h – товщина балки.

Ширина поверхні і ширина основи консольної балки з трапецієвидним перерізом пов'язані наступним виразом:

$$w_1 = w_2 - 2htg\phi. \quad (7.26)$$

де ϕ – кут травлення консольної балки.

- з прямокутним перерізом:

$$J_x = \frac{wh^3}{12}, \quad (7.27)$$

$$J_y = \frac{wh^3}{12}, \quad (7.28)$$

де w – ширина балки.

Відцентровий момент інерції $J_{xy} = 0$, оскільки осі x та y є осями симетрії.

- з трикутним перерізом:

$$J_x = \frac{wh^3}{36}, \quad (7.29)$$

$$J_y = \frac{wh^3}{48}. \quad (7.30)$$

Відцентровий момент інерції $J_{xy} = 0$, оскільки осі x та y є осями симетрії.

- з круглим перерізом:

$$J_x = J_y \approx 0,05D^4, \quad (7.31)$$

$$J_\rho \approx 0,1D^4. \quad (7.32)$$

де D – діаметр балки.

7.3. Жорсткість мікромеханічних елементів при вигині

Під дією зовнішньої сили $F_{зовн}$ консольна балка відхиляється від первинного положення (рис. 7.8). За законом Гука, силі $F_{зовн}$, яка діє на балку, буде протидіяти сила пружності $F_{пр}$, рівна за модулем зовнішній силі і протилежна за напрямом:

$$F_{зовн} = -F_{пр} = k y, \quad (7.33)$$

де k – жорсткість консольної балки, y – переміщення, яке здійснює балка під дію сили $F_{зовн}$.

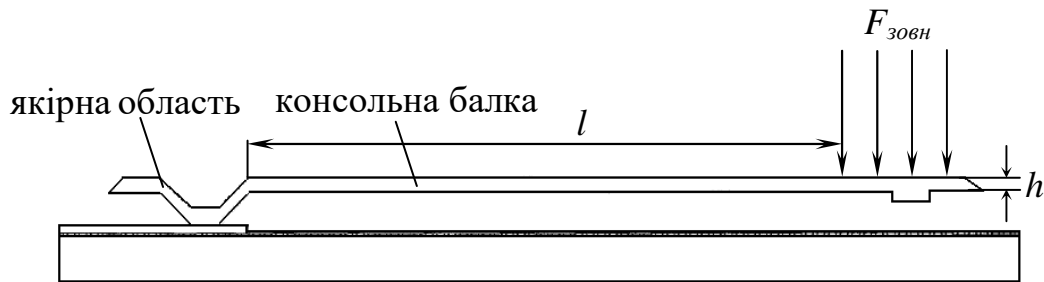


Рис.7.8. Структура консольної балки

Переміщення y визначається виразом:

$$y = l \sin \gamma, \quad (7.34)$$

де l – відстань від якірної області консольної балки до точки прикладання зовнішньої сили, γ – кут повороту балки.

При малих кутах відхилення (менш 10°) $\sin \alpha = \alpha$.

Таким чином, вираз (7.34) набуде наступного вигляду:

$$y = l \gamma. \quad (7.35)$$

Визначимо жорсткість консольної балки. Під дією зовнішньої сили $F_{зовн}$, балка згинатиметься по колу з центром в точці O , радіусом вигину ρ і кутом вигину γ (рис. 7.9). Кут вигину γ визначається наступним виразом

$$\gamma = \frac{l}{\rho}, \quad (7.36)$$

де ρ визначається згідно виразу:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EJ}, \quad (7.37)$$

де M – згинаючий момент, який діє на балку, E – модуль Юнга, J – момент інерції перерізу консольної балки.

Згинаючий момент, який діє на балку, визначається наступним виразом:

$$M = k \gamma l^2. \quad (7.38)$$

Підставивши (7.37) і (7.38) в (7.36), отримаємо вираз для визначення жорсткості консольної балки, наведеної на рис. 7.8:

$$k = \frac{EJ}{l^3}. \quad (7.39)$$

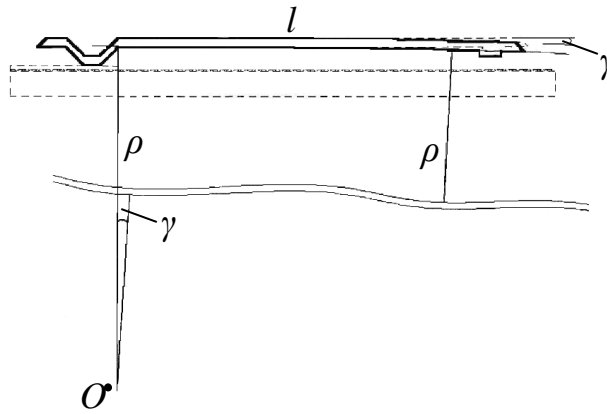


Рис. 7.9. Модель руху консольної балки

7.4. Жорсткість мікромеханічних елементів при зсуві (крученні)

Електростатичний обертовий момент сили, який діє на торсіонну балку, визначається наступним виразом:

$$M_{el} = F_{el} l, \quad (7.40)$$

де l – відстань від торсіонної балки до точки додатку зовнішньої сили.

Під дією електростатичного обертового моменту сили M_{el} дзеркальний елемент відхиляється від первинного положення за рахунок кручення торсіонної балки. Згідно закону Гука:

$$M_{el} = k_{\gamma} \gamma, \quad (7.41)$$

де k_{γ} – кутова жорсткість торсіонної балки, γ – кут повороту торсіонної балки під дією обертового моменту сили M_{el} .

Кутова жорсткість торсіонної балки визначається наступним виразом:

$$k_{\gamma} = 2 \frac{G J_{\rho}}{l_b}, \quad (7.42)$$

де l_b – довжина торсіонної балки.

7.5. Демпфування коливань мікромеханічних елементів

Демпфування коливань мембрани здійснюється за рахунок перетікання в'язкого середовища (газу або рідини) з підмембранної порожнини через калібрувальні отвори. На рис. 7.10 показано один з таких отворів.

Припускаючи, що режим перебігу рідини є ламінарним, вважаємо, що швидкість в подовжньому перерізі отвору змінюється за відомим параболічним законом:

$$V = V_0 \left[1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right], \quad (7.43)$$

де V_0 – швидкість по осі отвору, r_0 – радіус калібрувального отвору.

Сила демпфування F_{δ} рівна силі тертя F_{mp} в'язкого середовища об стінки отвору:

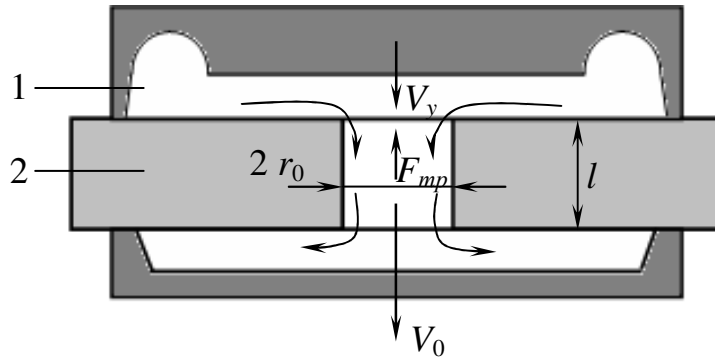


Рис. 7.10. До визначення абсолютного коефіцієнту демпфування

$$F_{\partial} = F_{mp} = -k_{\partial} V_y, \quad (7.44)$$

де V_y – швидкість переміщення жорсткого центру мембрани, k_{∂} – абсолютний коефіцієнт демпфування, який визначається виразом:

$$k_{\partial} = -\frac{F_{mp}}{V_y}. \quad (7.45)$$

Сила тертя в'язкого середовища визначається виразом:

$$F_{mp} = \frac{2\pi r_0}{\tau_{mp}}, \quad (7.46)$$

де τ_{mp} – дотична напруга тертя в'язкого середовища на стінках отвору, яка задається рівністю:

$$\tau_{mp} = \mu \left(\frac{dV}{dr} \right) \Big|_{r=r_0}, \quad (7.47)$$

де μ – коефіцієнт динамічної в'язкості середовища.

З урахуванням (7.43), отримаємо

$$\left(\frac{dV}{dr} \right) \Big|_{r=r_0} = -2 \frac{V_0}{r_0}, \quad (7.48)$$

і, отже

$$F_{mp} = -4\pi V_0 \mu l, \quad (7.49)$$

де l – товщина мембрани.

Швидкість V_0 можна визначити з умови рівності об'ємних витрат в'язкого середовища:

$$V_0 S_2 = V_y S_1, \quad (7.50)$$

де S_2 , S_1 – площі поперечних перерізів калібрувального отвору і підмембранної порожнини, відповідно.

З урахуванням виразу (7.50) отримаємо вираз для абсолютного коефіцієнта демпфування мембрани з калібрувальними отворами:

$$k_{\partial} = \frac{4\pi \mu l S_1}{n_0 S_2}, \quad (7.51)$$

де n_0 – число калібрувальних отворів.

Розділ 8 Актюаторні елементи МСТ

Актюатор – це механічний пристрій, який перетворює різні види енергії (електричну, хімічну або термічну) в механічну роботу, випромінювання тепла і світла (рис. 8.1).

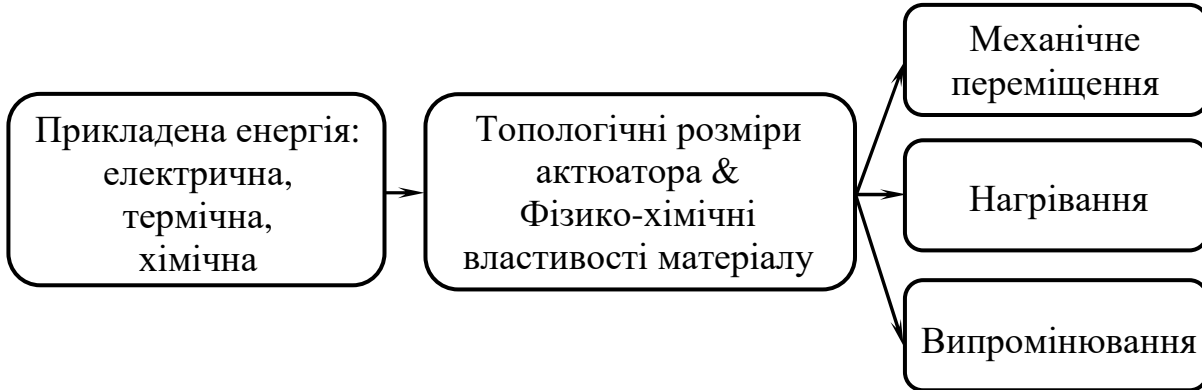


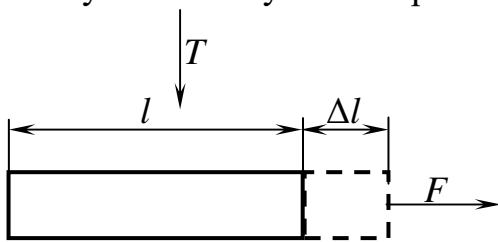
Рис. 8.1. Перетворення вхідної енергії в роботу актюатора

На даний час розроблено термічні, термопневматичні, п'єзоелектричні, електростатичні і магнітні актюатори.

Термоактюатори були розроблені одними з перших і використовувалися в сенсорах вимірювання і визначення потоків рідини і газів як нагрівальні елементи.

Основне використання термоактюатори знайшли в механізмах горизонтального і вертикального повороту структур елементів МСТ.

Принцип роботи термоактюаторів базується на тепловому розширенні структурних матеріалів елементів МСТ. Якщо при однорідному нагріванні температура твердого тіла зростає на ΔT , то тіло набуває деформацію ε , яка описується наступним виразом (рис. 8.2):



$$\varepsilon = \alpha \Delta T, \quad (8.1)$$

де α – коефіцієнт теплового розширення.

Деформацією твердого тіла називається зміна його розмірів і об'єму:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (8.2)$$

Рис. 8.2. Деформація термоактюатора при нагріванні

де Δl – абсолютне видовження, l – початковий розмір тіла.

Підставивши (8.2) в (8.1), отримаємо вираз, що дає можливість визначати абсолютне видовження термоактюатора:

$$\Delta l = l \alpha \Delta T. \quad (8.3)$$

Напругою називається фізична величина, рівна пружній силі, що припадає на одиницю площі перерізу тіла:

$$\sigma = \frac{F_m}{S}, \quad (8.4)$$

де F_m – сила, S – площа перерізу, розташована перпендикулярно нормалі сили F_m .

Згідно закону Гука, сила розтягу чи стиску, прикладена до тіла у формі стержня, викликає зміну довжини тіла Δl . Величина Δl залежить від розмірів стержня, матеріалу і величини прикладеної сили:

$$\sigma = E \varepsilon, \quad (8.5)$$

де E – модуль Юнга.

Підставивши (8.1) і (8.4) в (8.5), отримаємо вираз для визначення сили, яка створюється термоактюатором:

$$F_m = wh E \alpha \Delta T, \quad (8.6)$$

де w – ширина, h – товщина.

Теплова деформація залежить від кристалографічної орієнтації структурного матеріалу. Для анізотропних середовищ вираз (8.1) набуде вигляду

$$\varepsilon_{ij} = \alpha_{ij} \Delta T. \quad (8.7)$$

Термоактюаторні елементи МСТ виготовляються за технологією поверхневої мікрообробки і MUMPs-технологією.

Подальший розвиток термоактюатори отримали у вигляді термопневматичних актюаторів. Даний тип актюаторів містить нагрівальний елемент і герметичну порожнину з пружною мембраною (рис. 8.3).

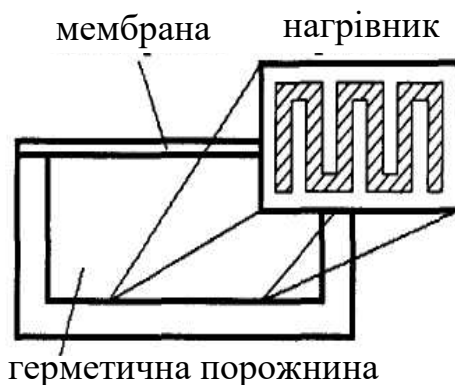


Рис. 8.3. Термопневматичний актюатор

Нагрівник являє собою напівпровідниковий резистор меандрового типу. Електричний струм, протікаючи через резистор, нагріває його. Кількість теплоти, що виділяється в нагрівнику, визначається таким чином:

$$Q = \frac{U^2}{R} t \quad (8.8)$$

де U – напруга на нагрівнику, t – час проходження струму через нагрівник, R – опір нагрівника.

В результаті відбувається розширення газового середовища в герметичній області, що у свою чергу приводить до деформації мембрани. Оскільки об'єм герметичної порожнини залишається постійним, то зміна тиску в порожнині описується виразом:

$$p_T = p_0 \beta T, \quad (8.9)$$

де p_0 – тиск газу до нагрівання, β – коефіцієнт об'ємного розширення, T – температура нагрівання.

Коефіцієнт об'ємного розширення практично однаковий у всіх газів і з добрим наближенням рівний коефіцієнту об'ємного розширення ідеального газу: $\beta = 0,003661 \text{ K}^{-1}$.

Сила, яка створюється термопневматичним актюатором, визначається виразом

$$F_{mn} = S p_0 \beta T, \quad (8.10)$$

де S – площа мембрани.

Термопневматичні актюатори виготовляються за технологією об'ємної мікрообробки і LIGA-технологією.

Більш простим варіантом термопневматичного актюатора є п'єзоелектричний актюатор. Даний тип актюаторів містить п'єзоелектричний диск і пружну мембрану (рис. 8.4).

В основі роботи п'єзоелектричних актюаторів лежить зворотний п'єзоелектричний ефект: під дією електричного поля в п'єзоелектриках появляється механічна деформація.

При зворотному п'єзоелектричному ефекті електричне поле і деформацію актюатора пов'язують ті ж п'єзоелектричні коефіцієнти, які пов'язують напругу і поляризацію при прямому ефекті:

$$\varepsilon_{ij} = \pi_{ij} E_i, \quad (8.11)$$

де ε_{ij} – тензор відносної деформації, π_{ij} – тензор п'єзоефіцієнтів матеріалів, E_i – напруженість електричного поля.

Як матеріали п'єзоелектриків використовуються кварц, LaTaO_3 і ZnO . Даний тип актюаторних елементів виготовляється з використанням технології об'ємної мікрообробки і LIGA-технології.

Наступним типом актюаторних елементів МСТ є електростатичні актюатори. В загальному вигляді електростатичний актюатор містить рухомий і нерухомий електроди (рис. 8.5).

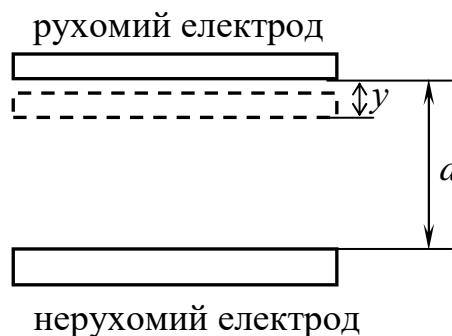
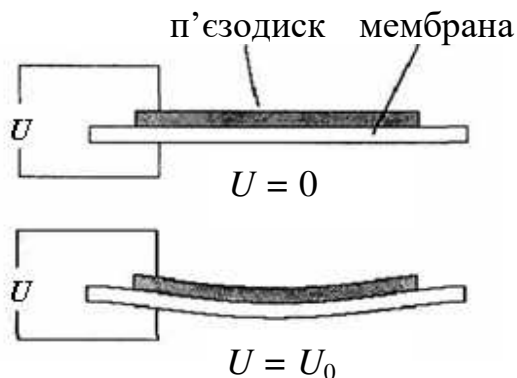


Рис. 8.4. Структура п'єзоелектричного актюатора

Рис. 8.5. Електростатичний актюатор

В якості рухомого електрода виступають консольні балки і мембрани.

Принцип дії даних актюаторів базується на виникненні електростатичної сили між рухомим і нерухомим електродами.

При подачі відхиляючої напруги на нерухомий електрод відносно рухомого, на останній починає діяти електростатична сила, яка визначається виразом:

$$dF_{en} = E dq, \quad (8.12)$$

де E – напруженість електричного поля, q – заряд електрона.

Оскільки

$$dq = C dU, \quad (8.13)$$

$$E = \frac{U}{d}, \quad (8.14)$$

вираз (8.12) набуде вигляд

$$dF_{el} = \frac{C}{d} U dU. \quad (8.15)$$

Тому електростатична сила, яка діє на рухомий електрод, буде визначатися виразом:

$$F_{el} = \frac{C}{d} \int_0^U U dU = \frac{CU^2}{2d}, \quad (8.16)$$

де U – відхиляюча напруга, d – відстань між рухомим і нерухомим електродами, C – ємність, яка створюється рухомим і нерухомим електродами і визначається виразом:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}, \quad (8.17)$$

де ε – відносна діелектрична проникність повітряного зазору, ε_0 – електрична постійна ($8,85 \cdot 10^{12}$ Ф/м), S – площа рухомого електроду.

Підставивши (8.17) у (8.16), отримаємо вираз для визначення сили, яка діє на рухомий електрод:

$$F_{el} = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d^2} U^2. \quad (8.18)$$

При подачі відхиляючої напруги U між рухомим і нерухомим електродами виникає електростатична взаємодія і рухомий електрод притягується до нерухомого. У міру відхилення рухомого електроду від первинного положення відстань між електродами d зменшуватиметься, що, згідно виразу (8.18), приводить до збільшення електростатичної сили F_{el} . Отже, при розрахунку електростатичної сили, яка діє на рухомий електрод відносно нерухомого, необхідно враховувати вже здійснене відхилення:

$$F_{el} = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{(d - y)^2} U^2. \quad (8.19)$$

При виготовленні електростатичних актюаторів можуть використовуватися технології поверхневої та об'ємної мікрообробок і MUMPs-технологія.

Магнітні актюатори є новим типом актюаторних елементів МСТ. Принцип їх роботи базується на деформації полікремнієвих балок або мембран, з нанесеним на них шаром пермалою (NiFe), під дією зовнішнього магнітного поля (рис. 8.6).

При поміщенні в зовнішнє магнітне поле генеруються дві компоненти магнітної сили F_1 і F_2 , які визначаються виразами:

$$F_1 = q_m H, \quad (8.20)$$

$$F_2 = -q_m H, \quad (8.21)$$

де q_m – магнітний заряд, H – напруженість зовнішнього магнітного поля.

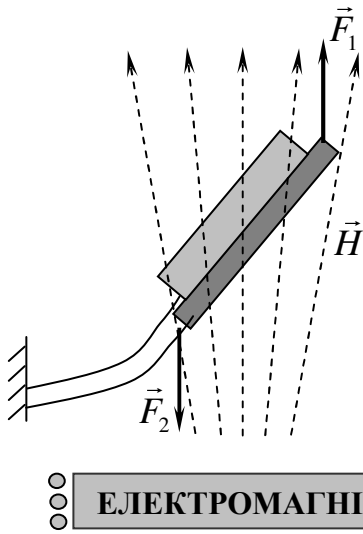


Рис. 8.6. Магнітний актюатор

Обертний момент, який створюється магнітним актюатором, визначається виразом:

$$M = q_m l_{NiFe} H \sin \alpha \quad (8.22)$$

де l_{NiFe} – довжина шару $NiFe$, α – кут між напрямом напруженості магнітного поля і площиною актюатора.

Даний тип актюаторів знайшов широке застосування в інтегральній мікрозбірці елементів МСТ.

Основний недолік магнітних актюаторів – необхідність використання зовнішніх джерел магнітного поля.

Даний тип актюаторів виготовляється за MUMPs-технологією.

На даний час актюаторні елементи МСТ широко використовуються при створенні актюаторних мікросистем, таких як мікронасоси, інтегральні мікродзеркала і мікромеханічні ключі.

8.1. Мікронасоси

За принципом функціонування мікронасоси діляться на два класи. До першого класу відносяться немеханічні мікронасоси (що не містять рухомих мікромеханічних частин). Даний клас включає мікронасоси на основі електрогідродинамічного, електроосмотичного і ультразвукового ефектів. До другого класу, найбільш поширеного, відносяться механічні мікронасоси (що містять рухомі мікромеханічні частини) з активними і пасивними клапанами.

8.1.1. Електрогідродинамічні мікронасоси.

Найбільше розповсюдження в класі немеханічних мікронасосів отримали електрогідродинамічні.

Електрогідродинамічний мікронасос являє собою інжекційний мікронасос, що складається з двох електродів сіткової структури, розміщених один над іншим і розділених шаром діелектрика (рис. 8.7).

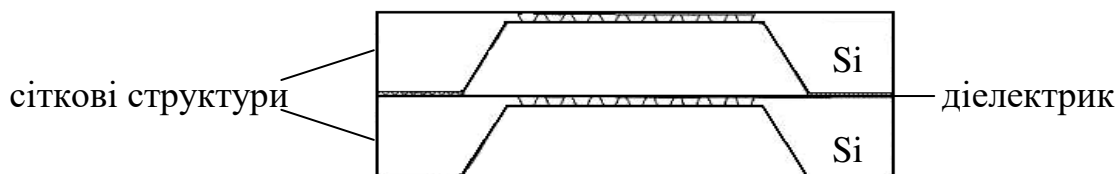


Рис. 8.7. Мікронасос гідродинамічного типу

Якщо мікронасос занурити в полярну рідину (що містить іони і диполі) і до двох сіткових структур прикласти напругу, то в результаті взаємодії між високими електричними полями та іонами або диполями рідини виникнуть сили, що діють на частинки рідини. Частинки рідини будуть прискорюватися між структурами, і виникне рух рідини через сопла в одному напрямі. Перебудова роботи електрогідродинамічного мікронасоса полягає тільки в прикладанні до структур зворотної напруги.

За допомогою електрогідродинамічних мікронасосів можна перекачувати різні масла і полярні рідини (етилловий і метиловий спирти, ацетон, фреон) і безліч інших непровідних рідин з питомим опором, який лежить в діапазоні від 10^{10} до 10^{14} Ом·см. Звичайну воду таким шляхом перекачувати не можна, оскільки під впливом електричних полів в ній починається електроліз.

Можливими застосуваннями даного класу мікронасосів є мініатюрні системи охолодження електронних компонентів, які базуються на використанні етилового і метилового спиртів. В інших можливих застосуваннях найдоцільніше застосовувати мікронасоси другого класу, що містять рухомі мембрани і клапани.

8.1.2. Механічні мікронасоси з активними клапанами.

В якості активаційного механізму в механічних мікронасосах з активними клапанами використовуються п'єзоелектричні і термопневматичні актюатори. Мікронасоси даного виду містять декілька активних клапанів, розташованих послідовно один за одним (рис. 8.8).

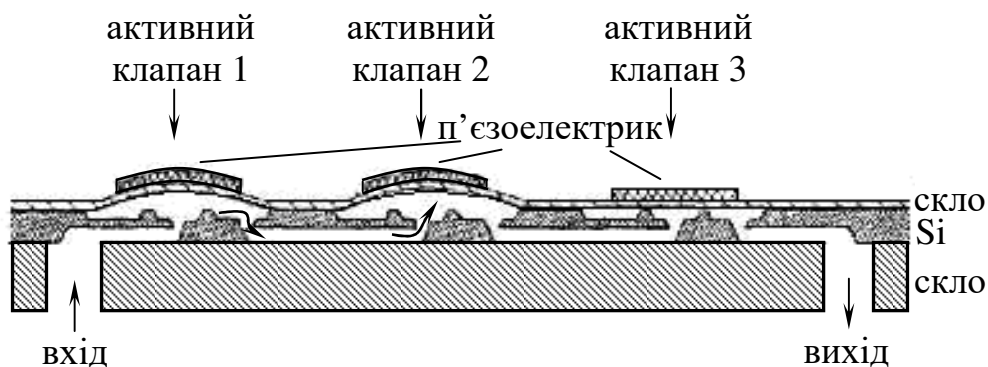


Рис. 8.8. Механічний мікронасос з активними клапанами

При включенні актюатора першого активного клапана відбувається деформація мембрани, що приводить до відкриття першого клапана. Рідина із входу мікронасоса через відкритий перший клапан поступає на вхід другого активного клапана. Виключення актюатора першого клапана відбувається одночасно з включенням актюатора другого клапана. Коли другий клапан відкривається, рідина поступає на вхід третього клапана. Далі проводиться одночасне відкриття першого і третього клапанів та закриття другого. Рідина з входу третього клапана потрапляє на вихід мікронасоса, а рідина з входу

мікронасоса потрапляє на вхід другого активного клапана. Далі цикл повторюється.

Перевагою механічних мікронасосів з активними клапанами є те, що вони дозволяють перекачувати рідину в обох напрямках без зміни конструкції. Перебудова роботи мікронасоса полягає тільки в зворотній послідовності включення актюаторів активних клапанів.

8.1.3. Механічні мікронасоси з пасивними клапанами.

Поршневий механічний мікронасос з пасивними клапанами містить робочу область з рухомою мембраною, яка керується актюатором, вхідний і вихідний клапани, які керуються потоком рідини (рис. 8.9).

За принципом дії використовуваного актюатора поршневі механічні мікронасоси розділяють на електростатичні, п'єзоелектричні (рис. 8.9, а), магнітні і термопневматичні (рис. 8.9, б).

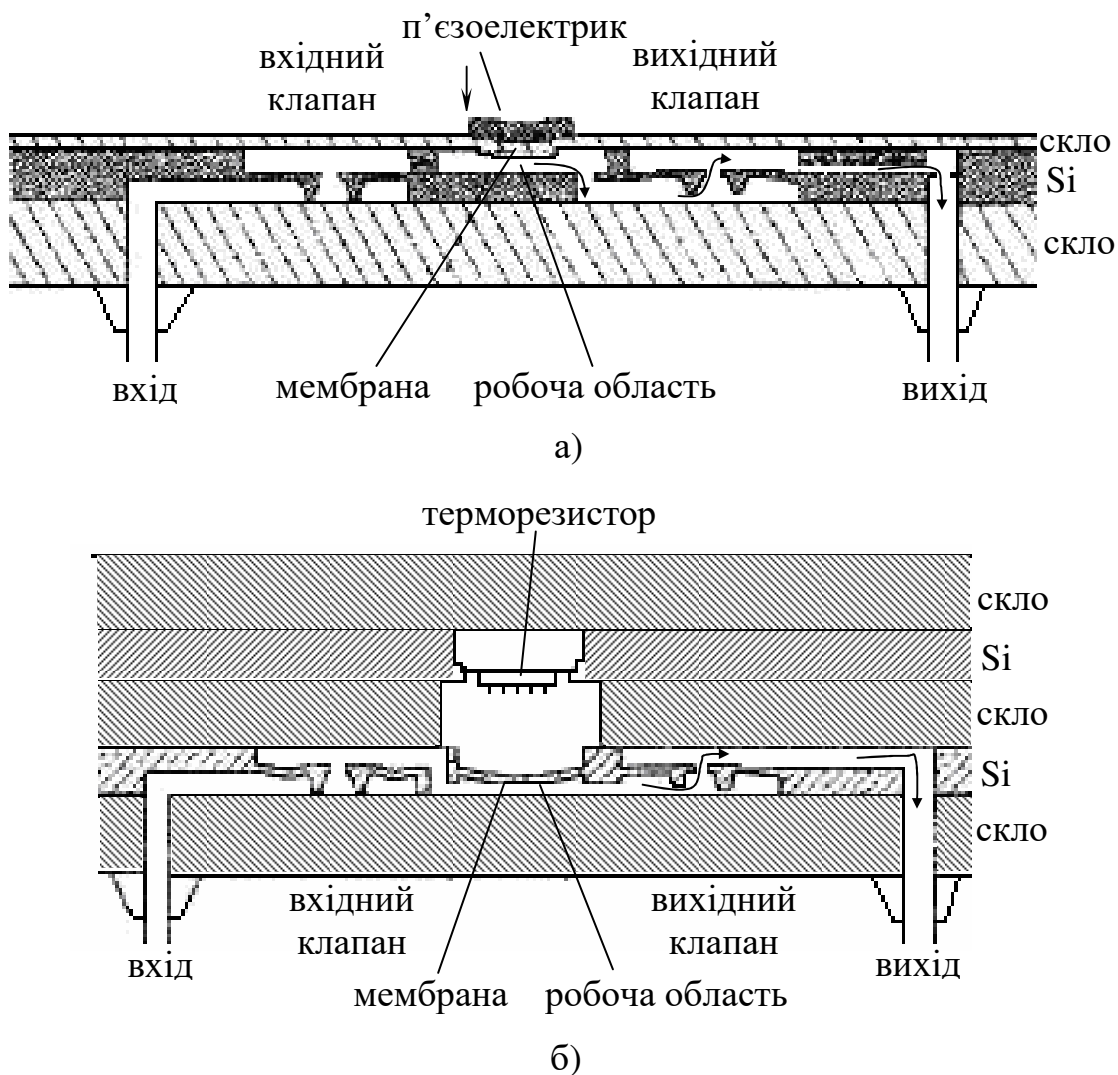


Рис. 8.9. Поршневий механічний мікронасос:
а) п'єзоелектричний;
б) термопневматичний.

При включенні актюатора відбувається деформація рухомої мембрани, що у свою чергу приводить до зміни об'єму робочої області мікронасоса. У результаті виникає різниця тиску рідин, що знаходяться в робочій області, на вході і на виході мікронасоса. Під впливом рідини, що знаходиться в робочій області, вхідний клапан закривається, а вихідний – відкривається. При цьому надмірна рідина видаляється з робочої області мікронасоса через вихідний клапан. Тиск рідини в робочій області на вході і виході мікронасоса вирівнюються.

При виключенні актюатора рухома мембрана повертається в початкове положення і об'єм робочої області мікронасоса відновлюється. В результаті знову виникає різниця тиску рідин, що знаходяться в робочій області, на вході і на виході мікронасоса. Під впливом рідини, що знаходиться на вході мікронасоса, вхідний клапан відкривається, а під впливом рідини, що знаходиться на виході мікронасоса, вихідний клапан закривається. Робоча область заповнюється рідиною через вхідний клапан.

Поршневі механічні мікронасоси набули ширшого поширення, ніж механічні мікронасоси з активними клапанами, оскільки вони дозволяють перекачувати більший діапазон рідин.

Для збільшення об'ємів перекачуваної рідини мікронасоси виготовляють з декількома робочими областями.

На рис. 8.10 представлена конструкція двокамерного механічного мікронасоса з п'єзоелектричною активацією.

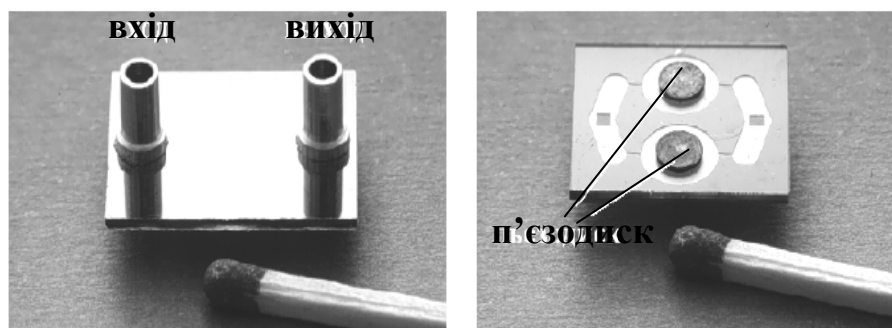


Рис. 8.10. Двохкамерний п'єзоелектричний мікронасос

На основі поршневих механічних мікронасосів будуються механічні мікрозмішувачі. Основна відмінність мікрозмішувачів від мікронасосів полягає в тому, що конструкція мікрозмішувача містить декілька вхідних клапанів і лише один вихідний.

В даний час не існує інтегральних конструкцій механічних мікронасосів і мікрозмішувачів. Окремі частини мікронасосів (мікрозмішувачів) виготовляються в різних підкладках за допомогою технологій об'ємної мікрообробки або LIGA-технології. Потім виготовлені частини збираються за допомогою операції мікрозбірки.

8.2. Інтегральні мікродзеркала

Інтегральні мікродзеркала з електростатичною активацією знаходять широке застосування в мініатюрних робототехнічних системах (як оптичні ключі) і системах аналізу і обробки зображень (для відхилення лазерного променя і/або світлового потоку).

На рис. 8.11 наведена структура мікродзеркала, виготовленого за допомогою технології об'ємної мікрообробки.

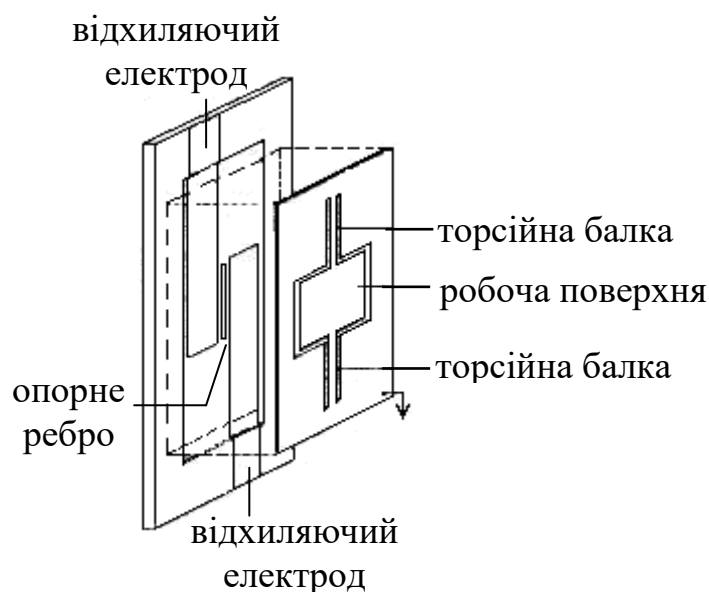


Рис. 8.11. Мікродзеркало з електростатичною активацією, виготовлене з використанням технології об'ємної мікрообробки

Для відхилення структури мікродзеркала використовуються два електростатичних актюатори, що створюються структурою мікродзеркала і двома електродами, розташованими під структурою мікродзеркала. Структуру мікродзеркала заземляють і на відхиляючі електроди по чергово подають напругу. Між структурою мікродзеркала і відхиляючими електродами виникає електростатична сила, яка відхиляє мікродзеркало то в одну, то в іншу сторону. Рух мікродзеркала здійснюється за рахунок кручення торсійних балок.

Виготовлення даного мікродзеркала за допомогою технології об'ємної мікрообробки затрудняє його використання в інтегральних мікрооптико-електромеханічних системах.

На рис. 8.12 приведена структура інтегрального мікродзеркала з електростатичною активацією, виготовленого з використанням MUMPs-технології.

Відхилення структури мікродзеркала здійснюється за допомогою електростатичного актюатора, що створюється пластинами, виконаними з шару полікремнію (poly0) і другого структурного шару (poly2).

Структуру мікродзеркала заземлюють (poly2) і на відхиляючий електрод (poly0) подають напругу. Між структурою мікродзеркала і від-

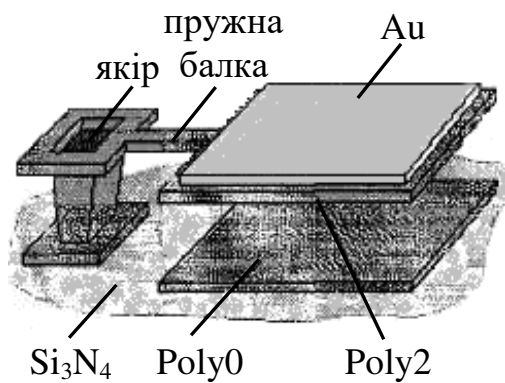


Рис. 8.12. Інтегральне мікродзеркало з електростатичною активацією, виготовлене з використанням технології MUMPs-технології

дзеркала з електростатичною активацією, що виготовляється за технологією поверхневої мікрообробки.

хилляючим електродом виникає електростатична сила, яка відхиляє мікродзеркало. Рух мікродзеркала здійснюється за рахунок вигину пружної консольної балки.

Недоліками даної структури є відсутність функціональної можливості відхилення мікродзеркала в обидві сторони і втрата площі кристала, пов'язана з необхідністю розміщення якоря і пружної консольної балки мікродзеркала.

На рис. 8.13 приведена структура інтегрального мікродзеркала з електростатичною активацією,

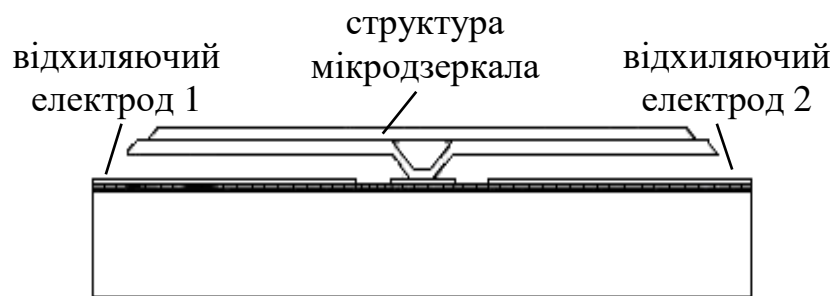


Рис. 8.13. Структура інтегрального мікродзеркала з електростатичною активацією

При подачі напруги на один з відхиляючих електродів між ним і структурою мікродзеркала виникає електростатична сила, яка притягає мікродзеркало до відхиляючого електроду. Коли відхиляюча напруга забирається, мікродзеркало під дією сили пружності повертається в початкове положення.

Електростатична сила F_{ai} , що виникає між відхиляючим електродом і структурою мікродзеркала, визначається виразом:

$$F_{ai} = \frac{1}{2} \frac{\epsilon \epsilon_0 L_{ai} W_{ai}}{d^2} U_{ai}^2, \quad (8.23)$$

де L_{ai} , W_{ai} – довжина і ширина частини відхиляючого електроду, розташованої під структурою мікродзеркала, U_{ai} – відхиляюча напруга.

У виразі (8.23) індекс i приймає значення 1, 2 для відповідних відхиляючих електродів.

Під дією сили F_{ai} структура мікродзеркала притягується до відхиляючого електроду. Згідно закону Гука, силі F_{ai} , що діє на мікродзеркало, протидіятиме сила пружності F_{np} , рівна за модулем електростатичній силі і протилежна за напрямом:

$$F_{ai} = F_{np} = 2k y. \quad (8.24)$$

Жорсткість пластин кріплення визначається виразом:

$$k = \frac{E J}{l_{\kappa}^3}, \quad (8.25)$$

де l_{κ} – довжина пластин кріплення.

Під дією електростатичної сили F_{ai} пластини кріплення згинатимуться по колах з центром в точці O , радіусом вигину R і кутом вигину γ (рис. 8.14).

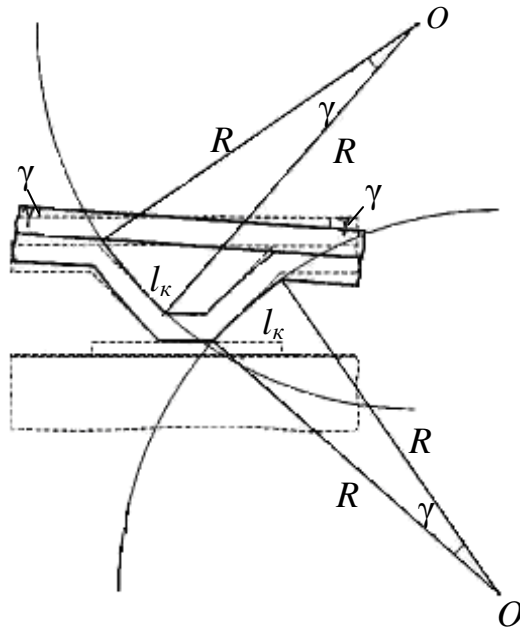


Рис. 8.14. Модель руху структури мікродзеркала

Кут вигину пластин кріплення визначається виразом:

$$\gamma = \frac{1}{4} \frac{\epsilon \epsilon_0 L_{ai} W_{ai}}{k l_{\kappa} (d - x_{ai})^2} U_{ai}^2, \quad (8.26)$$

де x_{ai} – відхилення, що здійснюється структурою мікродзеркала у бік відхиляючого електроду.

Напруга замикання, при якій відбудеться контакт структури мікродзеркала і відхиляючого електроду, визначається виразом:

$$U_{ai}^* = \frac{4}{3} \gamma_{\max} \sqrt{\frac{k l_{\kappa} d}{3 \epsilon \epsilon_0 W_{ai}}}. \quad (8.27)$$

На рис. 8.15 представлена залежність відхилення структури мікродзеркала x від відхиляючої напруги U_{ai} .

Зріз залежності відхилення структури мікродзеркала x від відхиляючої напруги U_{ai} (рис. 8.15) відповідає режиму замикання структури мікродзеркала і відхиляючого електроду.

Як видно з рис. 8.15, при досягненні відхиляючою напругою значення напруги замикання виникає ефект неконтрольованого електростатичного притягання, тобто мікромеханічна структура втрачає стабільність. Це виникає із-за переважання електростатичної сили над силою пружності.

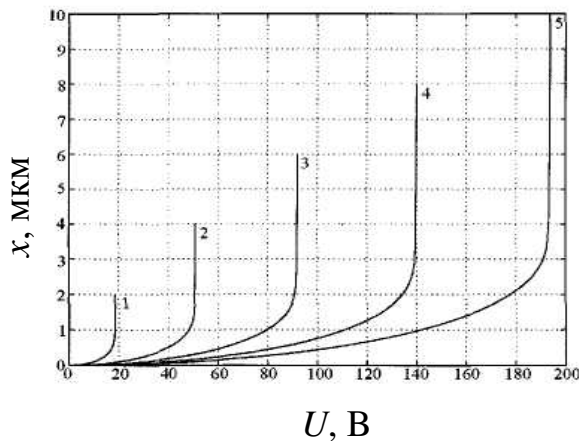


Рис. 8.15. Залежність відхилення структури мікродзеркала x від відхиляючої напруги U_{ai} :
 1 – $d = 2$ мкм; 2 – $d = 4$ мкм; 3 – $d = 6$ мкм; 4 – $d = 8$ мкм; 5 – $d = 10$ мкм.

знижує інтеграцію елементів МСТ з ІС. Для усунення даного недоліку при виготовленні мікродзеркал за технологіями поверхневої обробки застосовується самозбірка з використанням електростатичних двигунів.

На рис. 8.18 представлено інтегральне двохвісне мікродзеркало, що

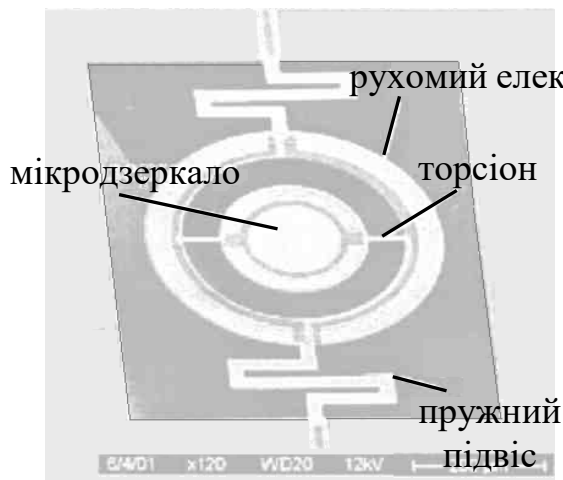


Рис. 8.16. Інтегральну двохвісне мікродзеркало, виготовлене за технологією об'ємної мікрообробки

виготовляється з використанням технології самозбірки за допомогою електростатичних мікродвигунів (ЕМД).

Даний мікромеханічний пристрій виготовляється в рамках MUMPs-технології.

Для зменшення енергоспоживання електростатичних актюаторів, що входять до складу мікродзеркал, доцільно використовувати гребінчасті структури, що володіють більшою ємністю у порівнянні з плоскими.

В даний час розроблена чимала кількість одно- і двохвісних мікромеханічних дзеркал з електростатичною активацією.

На рис. 8.16 - 8.17 представлені структури інтегральних мікродзеркал з електростатичною активацією, що набули найбільш широкого поширення.

Для отримання великих кутів відхилення мікродзеркал необхідно забезпечити більшу відстань між структурою мікродзеркала і відхиляючими електродами. Використання технології поверхневої мікрообробки при виготовленні мікродзеркал не дозволяє отримати великих зазорів, а застосування об'ємної мікрообробки

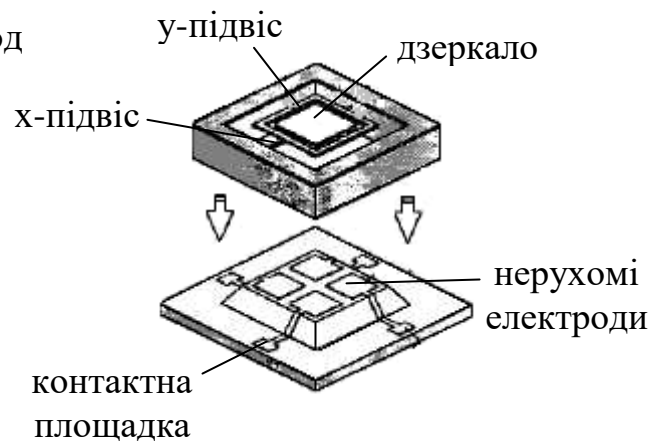


Рис. 8.17. Двохвісне мікродзеркало, виготовлене з використанням операції мікрозбірки

На рис. 8.19 представлено інтегральне мікромеханічне дзеркало з гребінчастими електростатичними актуаторами.

При подачі відхиляючої напруги на рухомий електрод щодо

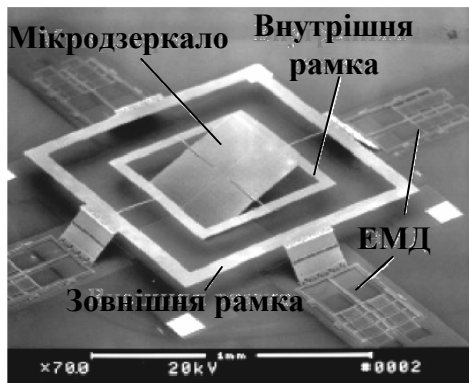


Рис. 8.18. Інтегральне дзеркало з ЕМД

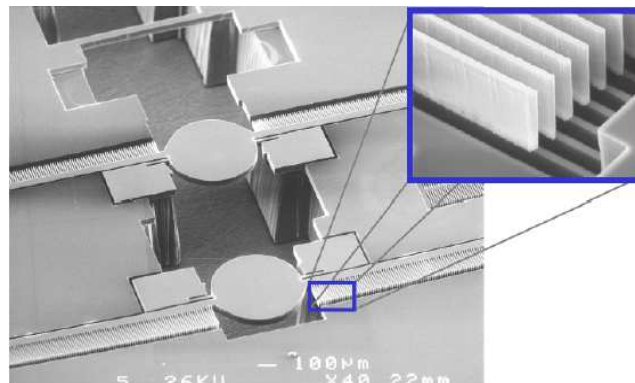


Рис. 8.19. Інтегральне мікромеханічне дзеркало

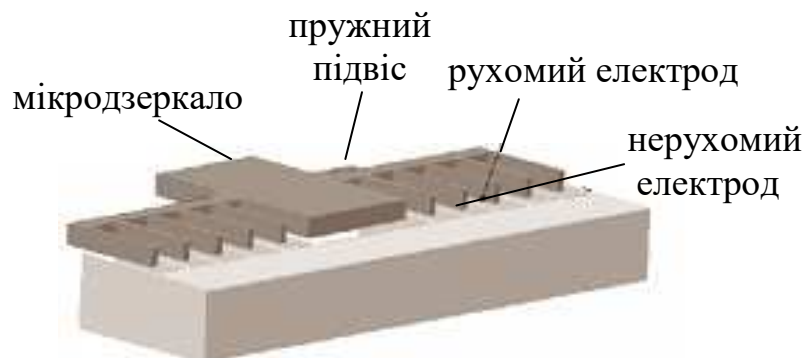
нерухомого, на пружний підвіс починає діяти обертовий момент сили, який визначається виразом:

$$M = \frac{1}{2} U^2 \frac{dC}{d\theta}, \quad (8.28)$$

де U – напруга, $\frac{dC}{d\theta}$ – зміна ємності між рухомим і нерухомим електродами по мірі відхилення мікродзеркала від первинного положення.

Інтегральне мікродзеркало відхиляється від свого первинного положення (рис. 8.20).

Якщо товщина пальців рухомого і нерухомого електродів перевищує



переміщення мікродзеркала під дією напруги



Рис. 8.20. Переміщення інтегрального мікромеханічного дзеркала під дією відхиляючої напруги

величину зазору між ними, то обертовий момент може бути визначений без урахування крайових полів. В цьому випадку величина ємності між рухомих і нерухомих електродами буде пропорційна площі перекриття електродів (рис. 8.21):

$$C = 2 \frac{N \varepsilon_0}{g} S(\theta), \quad (8.29)$$

де N – кількість пальців на рухомому електроді, g – зазор між пальцями рухомого і нерухомого електродів, θ – кут повороту мікродзеркала.

Зміна площі перекриття електродів є нелінійною функцією від кута

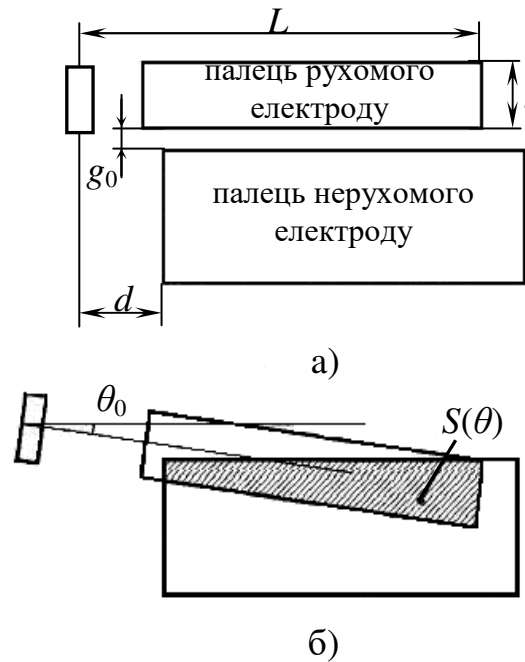


Рис. 8.21. Модель руху електростатичного гребінчастого актюатора

повороту мікродзеркала і збільшуватиметься до тих пір, поки верх пальців рухомого електроду не порівняється з верхом пальців нерухомого електроду (рис. 8.21).

В цьому випадку кут повороту досягне деякого значення ($\theta = \theta_0$) і максимальний обертовий момент визначатиметься виразом:

$$M_{\max} = \frac{U_{\max}^2 N \varepsilon_0 (L^2 - d^2)}{2g}, \quad (8.30)$$

де L – відстань від осі обертання рухомого електроду до його краю, d – відстань від осі обертання до краю нерухомого електроду.

Максимальний кут повороту визначатиметься наступним виразом:

$$\theta_0 = \sin^{-1} \left(\frac{t + g_0}{L} \right), \quad (8.31)$$

де t – товщина пальців рухомого електроду, g_0 – відстань від верхнього краю нерухомого електроду до нижнього краю рухомого електроду.

На рис. 8.22 представлена залежність зміни $\frac{\partial C}{\partial \theta}$ від довжини пальців рухомого електроду.

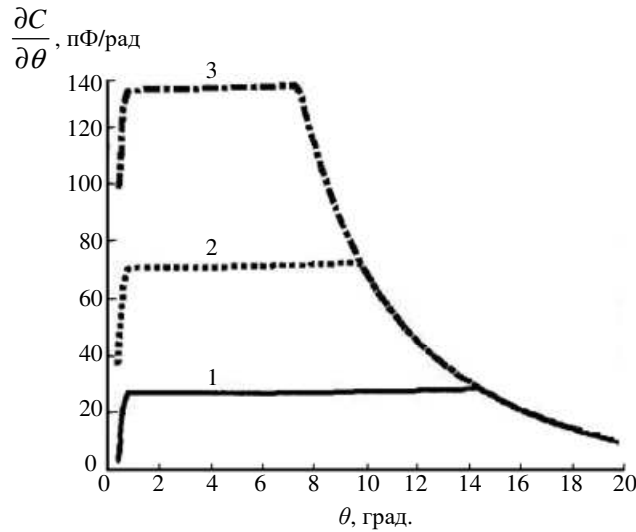


Рис. 8.22. Зміна $\frac{\partial C}{\partial \theta}$ від довжини пальців рухомого електроду:

1 – $L = 200$ мкм; 2 – $L = 300$ мкм; 3 – $L = 400$ мкм.

Зміна кута повороту від прикладеної напруги описується трансцендентним рівнянням:

$$\theta(U) = \frac{M(\theta, U)}{k_\theta} = \frac{U^2}{2k_\theta} \frac{dC(\theta)}{d\theta}, \quad (8.32)$$

де k_θ – кутова жорсткість пружного підвісу мікродзеркала, яка визначається виразом:

$$k_\theta = \frac{M_{\max}}{\theta_0} = \frac{U_{\max}^2 N \varepsilon_0 \left[\frac{(t - g_0)^2}{\sin^2 \theta_0} - d^2 \right]}{2 g \theta_0}. \quad (8.33)$$

Резонансна частота визначається наступним виразом:

$$\omega_r = \sqrt{\frac{3U_{\max}^2 N \varepsilon_0 \left[\frac{(t - g_0)^2}{\sin^2 \theta_0} - d^2 \right]}{2 g \rho t_m w_m (\lambda N_p)^3}}, \quad (8.34)$$

де ρ – густина, t_m – товщина мікродзеркала, w_m – ширина мікродзеркала, λ – довжина хвилі, N_p – оптичне розділення мікродзеркала, яке визначається виразом:

$$N_p = \frac{8\theta_0 L_m}{a \lambda}, \quad (8.35)$$

де L_m – напівдовжина мікродзеркала, a – фактор моделі, який визначається експериментально (для квадратного мікродзеркала $a = 1$).

На даний час розроблена велика кількість інтегральних мікродзеркал з гребінчастими електростатичними актюаторами.

На рис. 8.23 представлені структури інтегральних мікродзеркал з гребінчастими електростатичними актюаторами, що набули широкого поширення.

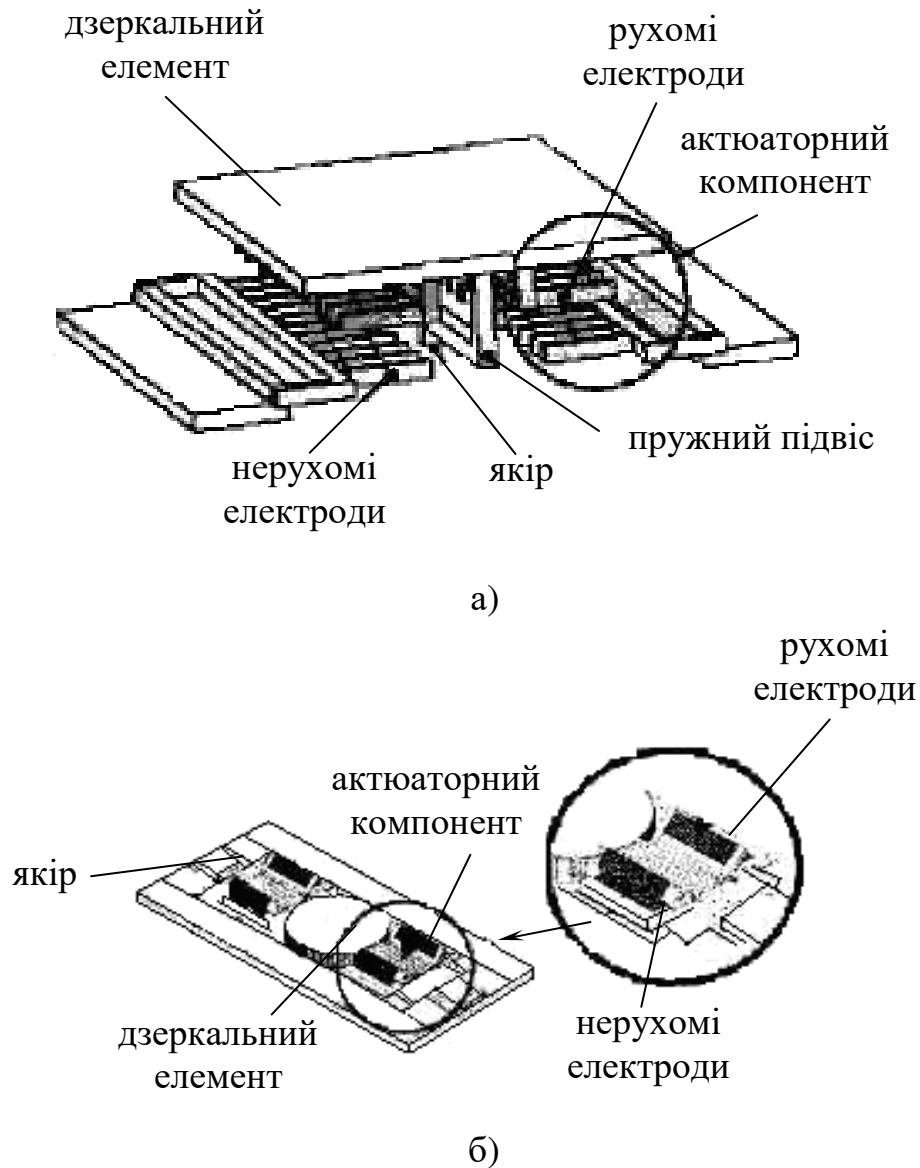


Рис. 8.23. Інтегральні мікродзеркала з гребінчастими електростатичними актюаторами:

а) одновісне мікродзеркало, яке виготовляється в рамках технології поверхневої мікрообробки; б) одновісне мікродзеркало, яке виготовляється в рамках технології об'ємної мікрообробки.

8.3. Інтегральні мікромеханічні ключі

Інтегральні мікромеханічні ключі знаходять широке застосування в мініатюрних робототехнічних системах як логічні елементи.

В даний час розроблена чимала кількість мікромеханічних ключів, що виготовляються з алюмінію і золота, що звужує області їх застосування, оскільки металеві ключі чутливіші до прискорення, ніж мікромеханічні, виконані з напівпровідникових матеріалів. Крім того, при виготовленні інтегральних мікромеханічних ключів з металу необхідно використовувати один жертвний шар, що утрудняє їх виготовлення в одному технологічному процесі спільно з іншими елементами МСТ і ІС.

Мікромеханічні ключі, в яких як структурний матеріал використовується полікремній, виготовляються за допомогою технології поверхневої мікрообробки, що у свою чергу дозволить інтегрально виготовляти їх в одному технологічному процесі спільно з іншими елементами МСТ і ІС.

Принцип дії мікромеханічних ключів може бути електростатичним, магнітним або електромагнітним. Кожний з перерахованих принципів має свої переваги і недоліки. Електромагнітна активація мікромеханічних ключів дозволяє зменшити напругу спрацьовування, але при високому споживанні струму. Перевага мікромеханічних ключів з електростатичною активацією полягає у відсутності споживання струму, а недолік – у високій напрузі спрацьовування (5 - 100 В). Ключі з таким видом активації застосовуються в мікросистемах, для яких важливим чинником є низька споживана потужність.

Більшість мікромеханічних ключів з електростатичною активацією як рухомий елемент містять консольну балку. Область, до якої безпосередньо приєднана консольна балка, прийнято називати витоком. Область, розташована під консольною балкою і яка використовується для створення електростатичної сили, називається затвором. Область, з якою відбувається механічний контакт консольної балки при її відхиленні від первинного положення за рахунок дії електростатичної сили, називається областю стоку.

На рис. 8.24 приведена структура інтегрального мікромеханічного ключа.

Мікромеханічний ключ може працювати в інверсному і нормальному режимах (рис. 8.25).

При інверсному режимі роботи область витоку підключена до шини живлення, а область стоку – до шини нульового потенціалу. За відсутності відхиляючої напруги між областю затвора і консольною балкою, сполученою з областю витоку, виникає електростатична сила, яка притягає консольну балку до затвора. Це приводить до виникнення електричного контакту між витоком і стоком. Інтегральний мікромеханічний ключ замкнутий. При подачі відхиляючої напруги між затвором і консольною балкою, остання повертається в початкове положення. Мікромеханічний ключ знаходиться в розімкненому стані.

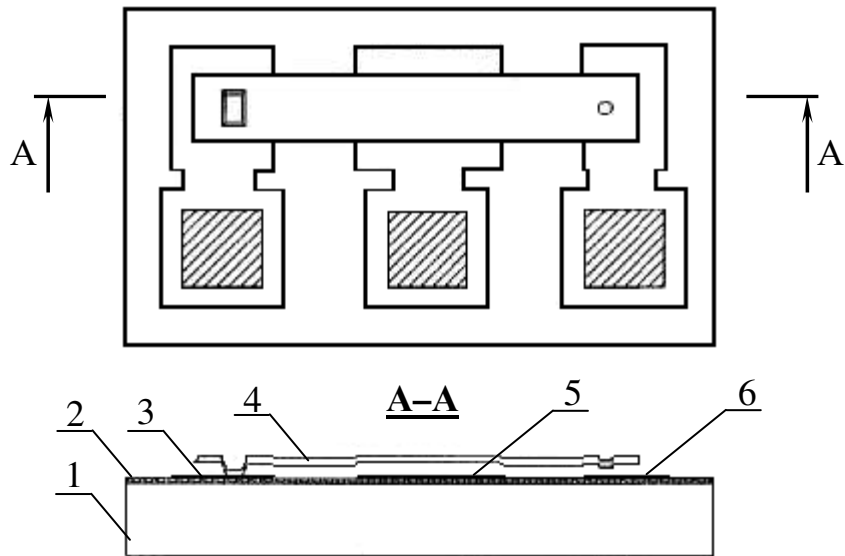


Рис. 8.24. Структура інтегрального мікромеханічного ключа:
 1 – підкладка, 2 – діелектрик, 3 – область стоку, 4 – консольна балка, 5 – область затвора, 6 – область стоку.

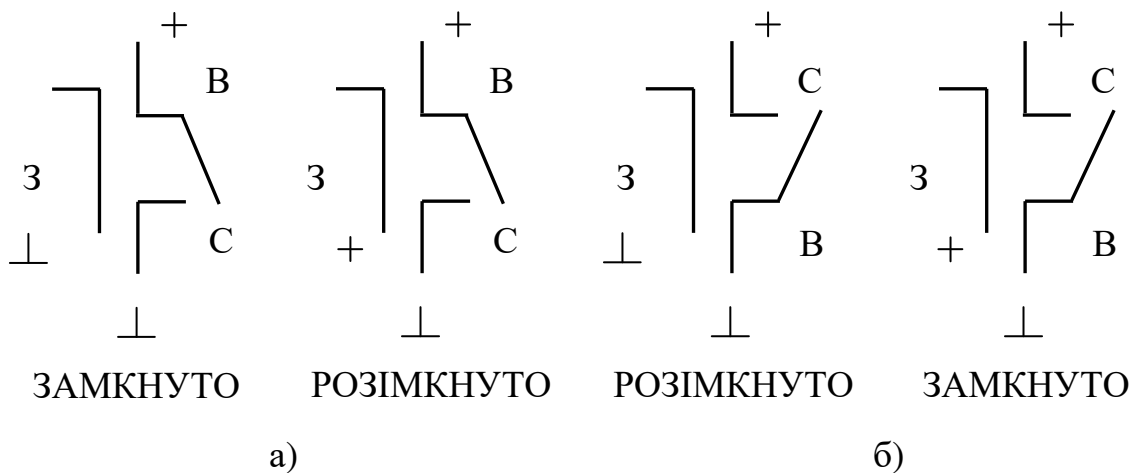


Рис. 8.25. Умовні позначення мікромеханічного ключа:
 а) інверсний режим роботи; б) нормальний режим роботи.

При нормальному режимі роботи область стоку підключена до шини живлення, а область витоку – до шини нульового потенціалу. За відсутності відхиляючої напруги між областю затвора і консольною балкою, остання знаходиться в початковому положенні і електричний контакт витік-стік відсутній. Інтегральний мікромеханічний ключ знаходиться в розімкненому стані. При подачі відхиляючої напруги на область затвора щодо консольної балки між ними виникає електростатична сила.

На рис. 8.26 показані залежності електростатичної сили від величини зазору між консольною балкою і областю затвора при різних значеннях відхиляючої напруги (суцільна лінія) і сили пружності від величини зазору (пунктирна лінія).

Коли прикладена напруга досягає порогового значення включення, консольна балка притягується до нижніх електродів. Це приводить до

виникнення електричного контакту між вишком і стоком. Мікромеханічний ключ знаходиться в замкнутому стані. При зменшенні відхиляючої напруги до деякого порогового значення виключення консольна балка повертається в початкове положення. Мікромеханічний ключ знаходиться в розімкненому стані.

Мікромеханічні ключі з електростатичною активацією володіють гістерезисом. Це пов'язано з втратою стабільності механічних структур, викликану неконтрольованим електростатичним притяганням. Якщо конструкція мікромеханічного ключа дозволяє балці переходити точку втрати стабільності, то ключ замикається і не розмикається до тих пір, поки відхиляюча напруга не стане нижча за порогову напругу виключення, тобто з'являється гістерезис.

На рис. 8.27 показаний графік зміни зазору залежно від відхиляючої напруги.

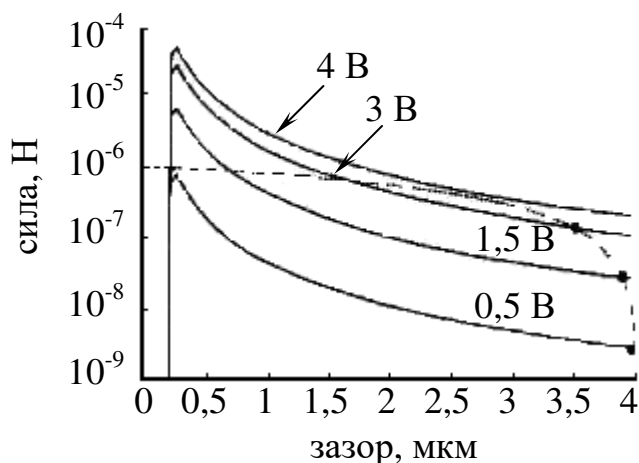


Рис. 8.26. Залежність електростатичної сили і сили пружності від величини зазору (при товщині балки 0,5 мкм і площі області затвору $4 \cdot 10^4$ мкм²)

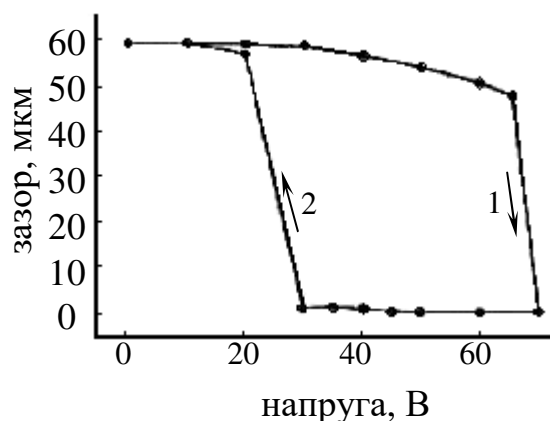


Рис. 8.27. Залежність зміни зазору від прикладеної напруги (при товщині балки 0,5 мкм і площі області затвору $4 \cdot 10^4$ мкм²):
1 – перехід від розімкнутого стану в замкнутий;
2 – перехід від замкнутого стану в розімкнутий.

Позбавитися від гістерезису можна тільки, якщо мікромеханічний ключ замикатиметься до того, як консольна балка досягне точки втрати стабільності. При цьому порогова напруга включення і виключення буде однаковою.

При відсутності відхиляючої напруги мікромеханічний ключ володіє високим імпедансом із-за повітряного зазору. Оскільки мікромеханічні ключі мають ємнісну природу, то для роботи їм не потрібна безперервна подача постійного струму. Для перемикання ключа в замкнутий або розімкнений стан необхідна електростатична енергія, рівна $\frac{CU^2}{2}$. Таким чином,

перемикання мікромеханічного ключа визначається ємністю і прикладеною напругою.

При проектуванні мікромеханічних ключів необхідно враховувати такий ефект як прилипання консольної балки до поверхні кристала. В основі даного ефекту лежить дія мікроскопічних сил на поверхні контактів і, отже, цей ефект в сильній степені залежить від морфології поверхні контактів. Проблема залипання рухомих частин особливо гостро стосується ключів з металевими контактами.

Параметри мікромеханічних ключів. Основними елементами будь-якого електричного ланцюга є: джерело електричної енергії, навантаження або підключені пристрої і замкнутий контур для забезпечення протікання струму. Якщо будь-який з цих елементів відсутній, струму в ланцюзі не буде, і, отже, електрична енергія від джерела не дійде до підключених пристроїв. При розробці мікромеханічних ключів істотними є наступні параметри:

- тривалість перехідних процесів;
- час перемикання;
- перехідні процеси при комутації;
- комотована потужність сигналу;
- узгодження вхідних / вихідних ланцюгів;
- ширина смуги пропускання;
- втрати, що вносяться мікромеханічними ключами;
- розв'язка входу від виходу;
- послідовний опір;
- напруга спрацьовування;
- термін роботи;
- резонансна частота;
- узгодження за амплітудою і фазою.

Тривалість перехідних процесів залежить від швидкості зміни стану ключа. Для операції включення вона визначається як час наростання вихідного сигналу з 10 % до 90 % від його значення, а для операції виключення – як час спаду вихідного сигналу з рівня 90 % до рівня 10 %. Іншими словами, тривалість перехідних процесів – це час, необхідний для зміни вихідної напруги на 1 дБ від стану спрацьовування. Для простого механічного ключа цей час визначається від моменту відриву рухомого контакту від одного стаціонарного контакту до моменту його зіткнення з іншим стаціонарним контактом.

Час перемикання також визначається швидкістю перемикання ключа з одного стану в інший. Проте тут при операції включення цей час визначається від моменту досягнення керуючою напругою рівня 50 % до моменту переходу вихідним сигналом рівня 90 %. Аналогічно, при виключенні ключа час вимірюється до моменту досягнення сигналом 10 % рівня від первинного значення. Отже, час перемикання характеризує реакцію ключа на зміну керуючої напруги. До часу, потрібного для механічного перемикання, або часу перехідних процесів можуть додаватися різні додаткові складові, наприклад, час затримки або наростання керуючого

сигналу. Механічні ключі володіють меншою швидкістю, ніж електронні, їх швидкість перемикавання лежить в діапазоні від мікросекунд до мілісекунд залежно від матеріалу і конструкції.

Перехідні процеси при комутації ключа – це експоненціально спадні сплески напруги у вхідних і/або вихідних ланцюгах ключа, викликані зміною керуючого сигналу. Перехідні процеси комутації є важливою характеристикою роботи ключів. В процесі перемикавання виникають і електромеханічні, і електромагнітні перехідні процеси. Електромеханічні перехідні процеси виникають із-за механічного переміщення елементів ключа, а електромагнітні – із-за взаємодії електричних і магнітних полів електричних компонентів системи.

Комутована потужність сигналу – характеристика, яка показує, наскільки ефективно ключ пропускає сигнал. Найчастіше передача потужності визначається точкою компресії 1 дБ, що взяте з підсилювальної техніки. Передбачається, що потужність вихідного і вхідного сигналів пов'язана лінійною залежністю. Але на практиці ця умова виконується тільки до якогось рівня потужності, який називається максимальним. Точка компресії 1 дБ визначається як максимальний рівень вхідної потужності, при якому вихідна потужність стає на 1 дБ меншою, ніж в лінійній області.

Під узгодженням вхідних / вихідних ланцюгів розуміється узгодження їх імпедансу, що часто є для ключів непростим завданням. Вхідні і вихідні ланцюги ключа повинні бути узгоджені як у включеному, так і відключеному станах. Це необхідно для зниження впливу ключів на роботу всієї системи. Неправильне узгодження іноді приводить до небажаних перевідбивань сигналів усередині ланцюга, які можуть стати причиною виходу системи з ладу. Хоча на практиці ідеального узгодження вдається досягти дуже рідко, все ж таки необхідно прагнути утримувати перевідбивання сигналів в межах допустимих рівнів.

Ширина смуги пропускання є важливою характеристикою ключів. Як правило, ключі не мають нижньої межі частоти робочого діапазону, а мають тільки верхню межу. Для електромеханічних ключів це пояснюється втратами, обумовленими опорами і паразитними зв'язками, що обмежують їх швидкість.

Втрати високочастотних пристроїв, що вносяться, показують ефективність передачі сигналів. Для ключів втрати, що вносяться, визначаються тільки для включеного стану, коли відбувається передача сигналу. Вони виражаються через коефіцієнт передачі, який вимірюється в дБ, між вхідними і вихідними виводами перемикаючого пристрою. На практиці бажано, щоб втрати мікромеханічних ключів були мінімальними.

Розв'язка входу від виходу визначається у момент відсутності передачі сигналу. Її мірою також є коефіцієнт між вхідними і вихідними виводами перемикача у вимкненому стані, тобто коли немає передачі сигналу. Велике значення цього коефіцієнта, вимірюване в дБ, відповідає дуже маленькому зв'язку між входом і виходом перемикаючого пристрою. Бажано, щоб у ключів цей коефіцієнт був максимальним. У мікросистемах значення цього

коефіцієнта може зменшитися через виникнення зв'язку між механічними частинами і лініями передач, що викликає появу струмів витоку.

Послідовний опір. На практиці ключ часто включається послідовно з лінією передачі сигналу. Будь-який опір, що вноситься ключем під час передачі сигналу (у включеному стані), викликає зниження рівня сигналу. На низьких частотах такий вплив ключа можна виразити у вигляді послідовного опору, що відіграє роль під час проходження сигналу.

Напруга спрацьовування. Для всіх ключів, що працюють в автоматичних системах, є необхідним сигнал керування, що координує їх стан (вкл / викл). Рівень напруги таких сигналів для різних ключів може сильно відрізнятись. У сучасних електромеханічних ключах цю напругу бажано понизити до рівня, на якому працює решта компонентів схеми.

Термін роботи для механічних перемикаючих пристроїв, до складу яких входять механічні частини, є достатньо важливою характеристикою. Поломки таких частин, викликані втому матеріалу або несприятливими навколишніми умовами, знижують термін роботи всієї системи.

Резонансна частота. Всі рухомі частини механічних ключів володіють своєю власною резонансною частотою, яку можна виразити через їх масу і коефіцієнт пружності. На цих частотах потенціальна і кінетична енергії входять в резонанс, що обмежує максимальну швидкість перемикавання, але ніяк не впливає на частоту передавальних сигналів.

Узгодження за фазою і амплітудою є важливою характеристикою багатоканальних ключів, оскільки вона визначається конструкцією всього пристрою і параметрами окремих каналів – їх довжиною і втратами в них. Тому, як правило, для кожного каналу визначаються свої фазові і амплітудні характеристики.

Не дивлячись на те, що багато із мікромеханічних ключів володіє відмінними характеристиками – низькими втратами, що вносяться, і високим коефіцієнтом розв'язки зазвичай аж до частоти декількох сотень МГц, вони мають дуже низьку швидкодію. Звичайний час перемикавання таких ключів складає 2-50 мс, і вони розраховані тільки на декілька мільйонів перемикань. Це обумовлено тим, що електромеханічні ключі здійснюють реальний розрив і з'єднання лінії передач усередині пристрою. Максимальна швидкодія таких ключів (їх швидкість перемикавання) визначається механічною резонансною частотою рухомих частин.

8.4. Інтегральні мікродвигуни

В даний час відомі наступні типи інтегральних мікродвигунів:

1. Електростатичні повітряні планарні мікродвигуни (ЕППД).
2. Електростатичні діелектричні планарні мікродвигуни (ЕДПД).
3. П'єзоелектричні мікродвигуни.

В електромеханіці відомі два способи передачі енергії від статора до ротора – контактний і безконтактний.

У випадку контактного способу передачі енергії від статора до ротора або використовуються спеціальні елементи (фрикційна вставка в елемент п'єзоелектричного двигуна, феромагнітна стрічка між статором і ротором в індуктивних хвильових двигунах і т.д.), або статор і ротор контактують між собою за рахунок хвильової деформації п'єзоелектричної кераміки. У таких двигунах при використанні точних датчиків положення ротора досягається виключно висока точність його позиціонування. Разом з тим в цих двигунах серйозною проблемою стає механічне зношування контактуючих елементів статора і ротора, що контактують між собою.

У ЕППД використовується безконтактний, а в ЕДПД і ПД – контактний способи передачі енергії. У першому випадку ротор не торкається поверхні статора, силове зчеплення ротора із статором здійснюється завдяки концентрації полів (електричного або магнітного) над зубцями ротора і статора. Перевага обумовлена тим, що відсутнє зношування поверхонь ротора і статора.

Основний недолік – невисока точність позиціонування (у крокових двигунах), яка визначається розмірами зубців ротора і статора. Високої точності позиціонування можна досягти тільки при надзвичайно малих розмірах цих зубців і при дуже високій точності їх виготовлення. Таке рішення значно ускладнює технологію виготовлення двигуна та істотно збільшує його вартість.

8.4.1. Електростатичні повітряні планарні мікродвигуни.

Основна відмінність електростатичних повітряних планарних мікродвигунів від класичних електростатичних двигунів – малий зазор між статором і ротором, рівний 1-2 мкм (у класичних електростатичних макромашиних він рівний 1-2 мм). Малий зазор в міжелектродному просторі визначає відносно високу щільність “накачуваної” в зразок електричної енергії і, отже, ефективність двигуна. Розробляються ЕППД обертального руху і оборотно-поступального руху. Ротор в першому випадку розташований в підшипниках, в другому – ковзає по напрямних. Можна забезпечити достатньо високу надійність цих двигунів при вказаних в літературі основних параметрах (для мікродвигуна обертання з діаметром ротора 100 мкм): напруга електроживлення – 100 В, швидкість обертання ротора – 50000 об/хв, потужність – 10 ... 6 Вт. В ЕППД важко здійснити сумування потужностей. Тому малоімовірно, що вони знайдуть застосування в точній механіці широкого призначення. У технології цих мікродвигунів використовуються дорогі операції – виготовлення розмірів деталей з точністю не нижче 0,1 мкм, глибоке прецизійне хімічне травлення і т.д.

Принцип роботи планарних електростатичних мікродвигунів полягає в перетворенні електричної енергії в механічну, яка виражається в обертальному русі ротора.

На рис. 8.28 представлений планарний електростатичний мікродвигун з дванадцятьма полюсами статора ($n_1 = 12$) і вісьма – ротора ($n_2 = 8$).

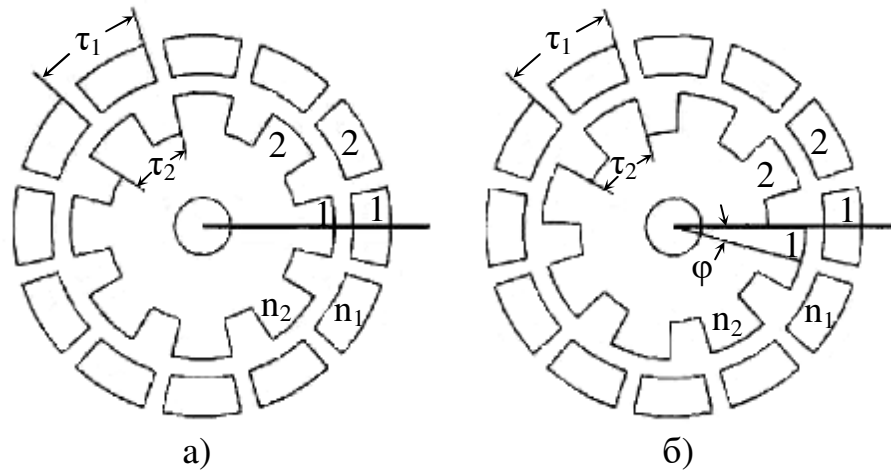


Рис. 8.28. Планарний електростатичний двигун:
 а) початкове положення ротора мікродвигуна;
 б) переміщення ротора мікродвигуна.

Перевагами даного виду електростатичних мікродвигунів є простота конструкції і не такі строгі вимоги до структурного матеріалу мікродвигуна.

В основному, як структурний матеріал планарних мікродвигунів, використовуються електропровідні матеріали.

Кутовий крок розміщення полюсів статора і ротора визначається наступним виразом (див. рис. 8.28):

$$\tau_1 = \frac{2\pi}{n_1},$$

$$\tau_2 = \frac{2\pi}{n_2}.$$

де τ_1, τ_2 – кутовий крок полюсів статора і ротора відповідно, n_1, n_2 – кількість полюсів на статорі і роторі відповідно.

Розглянемо роботу планарного електростатичного мікродвигуна. Припустимо, що напруга прикладена до полюса статора 1, тобто мікродвигун знаходиться у відносній рівновазі. Якщо напруга буде прикладена до полюса 2 статора, то положення ротора зміниться так, що він займе нове положення щодо даного полюса, тобто обертовий момент, який діє на ротор, поверне його на деякий кут φ . Далі цикл повторюється.

На рис. 8.29 приведена послідовність перемикування фаз.

Крок приросту кута повороту ротора τ_s планарного мікродвигуна може бути визначений за допомогою виразу:

$$\tau_s = \min\{|\tau_1 - i\tau_2|\} = 2\pi \min\left\{\left|\frac{1}{n_1} - \frac{i}{n_2}\right|\right\} = \frac{2\pi}{n_1 n_2} \min\{|n_2 - i n_1|\}, \quad (8.36)$$

$$i \in [0, n_2 - 1]$$

Якщо кількість полюсів статора мінятиметься в діапазоні $j \in [0, q - 1]$, де q – кількість фаз, то вираз (8.36) набуде вигляду:

$$\tau_s = \min \{ |j\tau_1 - i\tau_2| \} = 2\pi \min \left\{ \left| \frac{j}{n_1} - \frac{i}{n_2} \right| \right\} = \frac{2\pi}{n_1 n_2} \min \{ |jn_2 - in_1| \}, \quad (8.37)$$

$$i \in [0, n_2 - 1], \quad j \in [0, q - 1]$$

Кутова частота планарного електростатичного мікродвигуна може бути визначена за допомогою виразу:

$$n = \left(\frac{2\pi}{\tau_s} \right)^{-1} \cdot f, \quad (8.38)$$

де f – частота перемикання фаз.

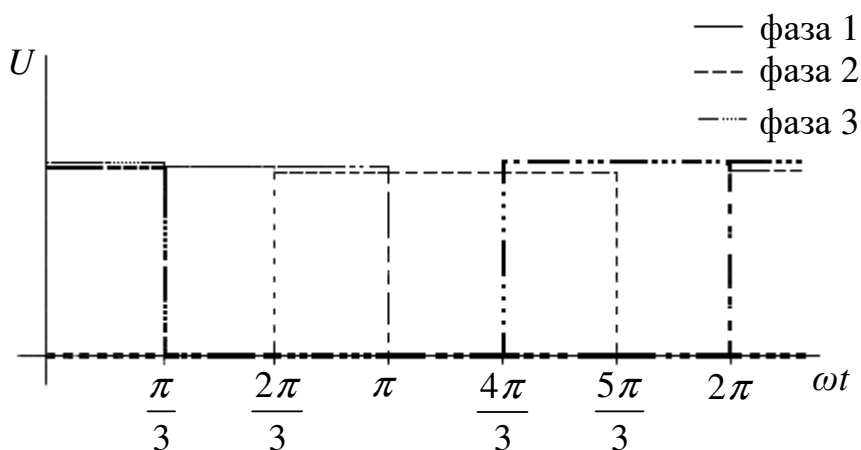


Рис. 8.29. Послідовне перемикання фаз

В табл. 8.1 приведені значення кутового кроку розміщення полюсів ротора τ_2 і крок приросту кута повороту ротора τ_s залежно від кількості полюсів ротора n_2 при $n_1 = 12$ ($\tau_1 = 30^\circ$) і $q = 3$.

Таблиця 8.1. Значення τ_1 і τ_2 в залежності від n_2

n_2	4	6	8	11	13	16	18	20
τ_2	90°	60°	45°	$32,7^\circ$	$27,7^\circ$	$22,5^\circ$	20°	18°
τ_s	30°	$\pm 30^\circ$	-15°	$-2,7^\circ$	$2,3^\circ$	$7,5^\circ$	$\pm 10^\circ$	-6°

Обертний момент, який діє на ротор, задається виразом:

$$M = \frac{\Delta W}{\Delta \varphi} = \frac{1}{2} \frac{\Delta C}{\tau_s} U^2, \quad (8.39)$$

де ΔC – зміна ємності між статором і ротором, U – напруга між статором і ротором.

На рис. 8.30 представлений планарний електростатичний мікродвигун, виготовлений з використанням MUMPs-технології.

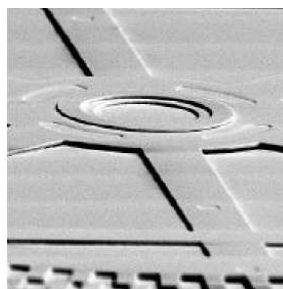


Рис. 8.30. Планарний електростатичний мікродвигун

8.4.2. Електростатичні діелектричні планарні мікродвигуни.

У електростатичних діелектричних планарних двигунах мікrorух створюється при електростатичному накаті металізованої органічної плівки на поверхню металу або діелектрика (шари SiO_2 , Al_2O_3) залежно від того, куди обернений шар металізації. Основним елементом ЕДПД є плівкова петля (діаметр складає декілька міліметрів) з металізованої плівки поліетилентерефталату. Характерна особливість ЕДПД – накопичення об'ємного заряду в діелектрику при кожному акті електростатичного накату. Цей заряд формується на глибоких енергетичних центрах (пастках), характерних для широкозонних некристалічних діелектриків і перешкоджає повторному накату металевої плівки. Зменшення впливу об'ємного заряду можливе за рахунок використання імпульсів напруги із складнішою формою – наповнення їх коротшими імпульсами з різною полярністю. Проте в цьому випадку значно знижується енергетична ефективність мікродвигуна.

Схематично принцип роботи такого мікродвигуна ілюструє рис. 8.31.

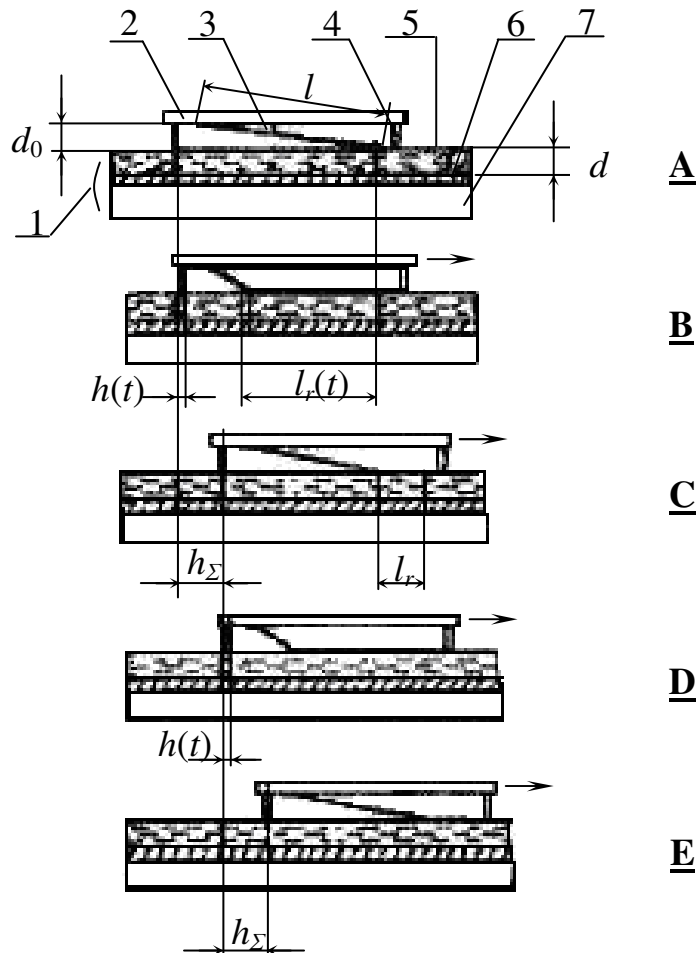


Рис. 8.31. Принцип роботи планарного мікродвигуна на основі сегнетоелектричних плівок: 1 – статор, 2 – ротор, 3 – пелюстка, напрямні, 5 – діелектрична плівка, 6 – електрод, 7 – підкладка.

Нерухома пластина (статор) 1 являє собою кремнієву підкладку 7, на поверхню якої послідовно нанесений електрод 6, а потім сегнетоелектрична плівка 5. Рухома пластина (ротор) 2, розділена від статора зазором d із синтезованими на її поверхні металевими пелюстками 3 завдовжки l , переміщається щодо статора по напрямних (по опорах) 4. При подачі імпульсу напруги між пелюсткою 3, що знаходиться в початковому стані (А), і електродом 6 відбувається електростатичний накат частини поверхні пелюстки на поверхню сегнетоелектрика (стан В). Металева плівка, що переміщається в просторі, згинається, відбувається її натяг і вона передає рух пластині 2, здійснюючи таким чином електромеханічне перетворення енергії. Довжина накату $l_r(t)$ зростає під час дії імпульсу напруги t_p , відповідно змінюється в часі і крок $h(t)$ переміщення ротора.

Після припинення дії імпульсу напруги пелюстка під дією пружних сил, що виникають при її вигині, повертається в початкове положення А (при одиночному імпульсі напруги) або переходить в нове положення С, характерне для безперервного руху ротора (при подачі на зразок серії імпульсів); при цьому ротор просувається за інерцією на відстань h_c . Від тривалості цього процесу (процесу відлипання пелюстки від поверхні сегнетоелектрика) залежить мінімальний інтервал часу між сусідніми імпульсами напруги, тобто максимальна частота слідування f цих імпульсів і відповідно потужність, що розвивається мікродвигуном. При подачі на зразок другого імпульсу напруги рухома пластина з пелюстками робить ще один крок і переходить в стан Е. Після закінчення імпульсу відбувається проліт ротора за інерцією в стан D (і зміна конфігурації пелюсток, аналогічна позиції С). При подачі третього імпульсу рух відбувається аналогічно – від позиції В до позиції С з відповідним переміщенням пластини 2.

Розпластування пелюстки під дією електростатичних сил починається з моменту торкання поверхні пелюстки і сегнетоелектрика – процесу “захоплення” пелюстки, яка визначає подальший характер “електронного приклеювання” пелюстки до поверхні сегнетоелектрика.

Процес відлипання пелюстки визначають сили, які утримують кінці пелюсток біля поверхні сегнетоелектрика – адгезійні, гідродинамічні, електростатичні сили, пов’язані із залишковими електричними зарядами в діелектрику, точніше, з поверхневою неоднорідністю розподілу зарядів під площею пелюстки.

Після припинення дії імпульсу напруги в розпластаній частині пелюсток поблизу мікронерівностей виникає протидія пружних сил локально деформованих ділянок пелюсток і трьох вказаних сил.

Як показують дослідження, роль адгезійних сил значно менша ролі сил, пов’язаних із залишковими електричними зарядами. Площа фізичного торкання пелюсток з діелектриком набагато менша видимої площі їх торкання, а адгезійні сили проявляють себе тільки при прямому контакті двох тіл. Крім того, не відбувається абсолютно щільного торкання двох поверхонь, повітряний зазор між ними складає від 30 до 200 Å залежно від шорсткості поверхні діелектрика.

8.4.3. П'єзоелектричний мікродвигун.

Принцип роботи п'єзоелектричних мікродвигунів базується на перетворенні коливань п'єзоелектричного статора в обертальний рух напівпровідникового ротора.

На рис. 8.32 представлена структура п'єзоелектричного мікродвигуна, що складається із статора і ротора.

Статор є мембраною, закріпленою на підкладці за допомогою пружного підвісу (рис. 8.33). У центрі мембрани розташований п'єзоелектричний шар SiO_2 . Діаметр статора – 2 мм.



Рис. 8.32. П'єзоелектричний мікродвигун

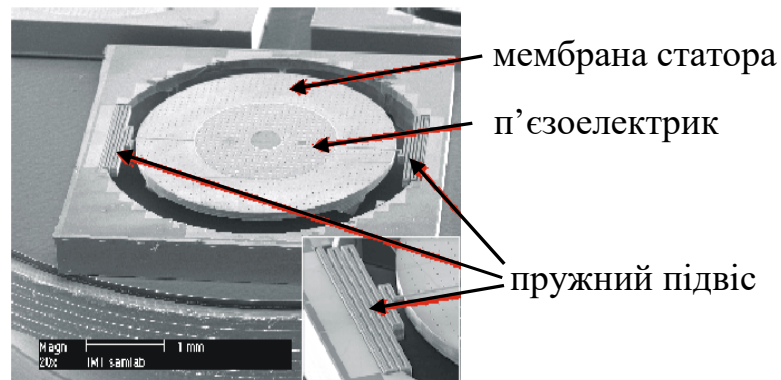
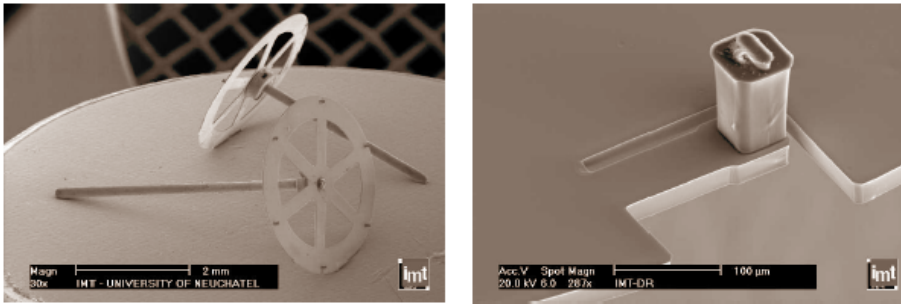


Рис. 8.33. Статор п'єзоелектричного мікродвигуна

На рис. 8.34 представлений ротор п'єзоелектричного мікродвигуна.

Як видно на рис. 8.34, розміри ротора складають: довжина – 5 мм, діаметр- 2 мм, висота зубців ротора – 100 мкм.

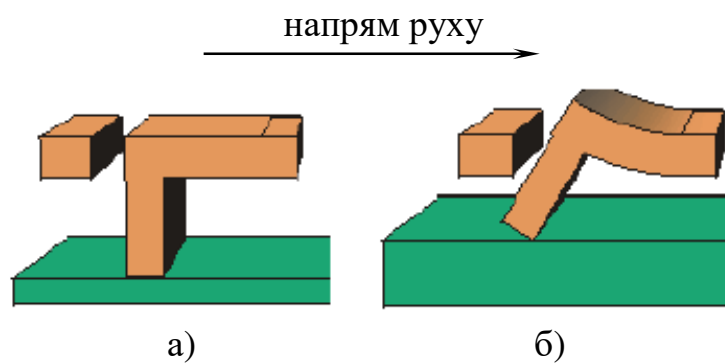
За відсутності зовнішньої напруги статор і ротор знаходяться у спокої (рис. 8.35, а). При подачі імпульсу напруги на п'єзоелектричний актюатор статора відбувається зміна його геометричних розмірів, що у свою чергу приводить до деформації зубців ротора (рис. 8.35, б). Таким чином, ротор під дією сил пружності зміщується на деяку відстань навколо своєї осі. Коли напруга забирається, статор повертається в початкове положення, а ротор



а)

б)

Рис. 8.34. Ротор п'єзоелектричного мікродвигуна:
а) зовнішній вигляд ротора; б) зуб ротора.



а)

б)

Рис. 8.35. Принцип роботи п'єзоелектричного мікродвигуна:
а) до активації п'єзоактюатора; б) після активації п'єзоактюатора.

виявляється зміщенням на деяку відстань щодо свого початкового положення. Далі цикл повторюється.

Даний вид мікродвигунів виготовляється з використанням LIGA-технології, що дозволяє створювати ротори пристрою з великим аспектним відношенням. Основним недоліком даної конструкції мікродвигуна є наявність операції мікробірки в технологічному процесі виготовлення, що не дозволяє використовувати групові методи виготовлення і знижує ступінь інтеграції даних пристроїв.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Климов Д.М., Васильев А.А., Лучинин В.В., Мальцев П.П. Перспективы развития микросистемной техники в XXI веке // Микросистемная техника. – 1999. – №1. – С. 3-6.
2. Соколов Л.В. Сенсорные твердотельные микроприборы и микросистемы на основе MEMS-технологии // Зарубежная электронная техника.. – 1999. – №1. – С. 93-116.
3. Корляков А.В., Лучинин В.В., Мальцев П.П. Микроэлектромеханические структуры на основе композиции “карбид кремния-нитрид алюминия” // Микроэлектроника. – 1999. – Т.28, №3. – С. 201-212.
4. Варадан В., Виной К., Джозе К. ВЧ МЭМС и их применение. – М.: Техносфера, 2004. – 528 с.
5. Васенко А., Елифанов В., Юдинцев В. Микроэлектромеханические системы. Настало время выходить в свет // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 1998. – №5-6. – С. 55-59.
6. Механцев Е.Б., Лысенко И.Е. Физические основы микросистемной техники. Учебное пособие. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. – 54 с.
7. Мальцев П.П., Мальцева С.В., Мельников А.А. Введение в информационное обеспечение микросистемной техники: Учебное пособие. Микросистемная техника. Кн. 1. / Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет). – М., 2004. – 64 с.
8. Лучинин В.В., Степанов Ю.И., Телец В.А. Микросистемная техника. Прикладные области применения: Учебно-методическая разработка / Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет)”. – М, 2004.-100 с.
9. Черняев В.Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1987. – 464 с.
10. Панфилов Ю.В., Рябов В.Т., Цветков Ю.Б. Оборудование производства интегральных микросхем и промышленные работы. – М.: Радио и связь, 1988. – 320 с.
11. Малышева И.М.А., Технология производства интегральных микросхем. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1991. – 344 с.
12. Бондарь Б.Г. Основы микроэлектроники. – К. Вища школа, 1987. – 309 с.
13. Готра З.Ю. Справочник по технологии микроэлектронных устройств. – Львов: Каменяр, 1987. – 287 с.
14. Пичугин И.Г., Таиров Ю.М. Технология полупроводниковых приборов: Учебник. М.: Высшая школа, 1981. – 336 с.
15. Елементи теорії мікроелектронних сенсорів / Під ред. Готри З.Ю. – Львів, Ліга-Прес, 2001. 636 с.
16. Мікроелектронні сенсори фізичних величин. Науково - навчальне

видання. В 3 томах / Під ред. Готри З.Ю. – Львів, Ліга-Прес, 2002.

17. Фізичні основи електронної техніки: Підручник / З.Ю. Готра, І.Є. Лопатинський, Б.А. Лук'янець, З.М. Микитюк, І.В. Петрович – Львів: Видавництво “Бескид Біт”, 2004. – 880 с.

18. Корляков А.В., Лучинин В.В. Перспективная элементная база микросистемной техники // Микросистемная техника. – 1999. – №1. – С. 12-15.

19. Бочаров Л.Ю., Мальцев П.П. Состояние и перспективы развития микроэлектромеханических систем за рубежом // Микросистемная техника. – 1999. – №1. – С. 41-46.

20. Соколов Л.В. Твердотельные микроприборы и микросистемы с интегрированными микромеханическими структурами // Зарубежная электронная техника. – 1998. – №2. – С. 62-79.

21. Мальцев П.П., Телец В.А., Никифоров А.Ю. Технология и изделия микроэлектромеханики // Микросистемная техника. – 2001. – №10. – С. 18-24.

22. Распопов В.Я. Микромеханические приборы. Учебное пособие. – Тул. гос. университет: Тула, 2002. – 392 с.

23. Ehrfeld W., Hessel V., Lowe H., Schulz Ch., Weber L. Material of LIGA technology // Microsystem Technologies. – 1999. – №5. – P. 105-112.

24. Ruprecht R., Hanemann T., Piottter V., Haugelt J. Polymer materials for microsystem technologies // Microsystem Technologies. – 1998. – №5. – P. 44-48.

25. Колясников В.А., Рахимбабаев Т.Я. Синхротронное излучение в микротехнологии // Микросистемная техника. – 2000. – №1. – С. 9-13.

26. Menz W., Bacher W., Bier W., Hagen O.F., Mohr J., Seidel D. Combination of LIGA with other microstructure technologies // Microsystem Technologies. – 1996. – №2. – P. 162-166.

27. Колясников В.А., Рахимбабаев Т.Я. Микрожидкостные системы и их реализация с использованием LIGA-технологии // Микросистемная техника. – 1999. – №1. – С. 15-21

28. Koester D.A., Mahadevan R., Hardy B., Markus K.W. MUMPs design hand-book. Revision 5.0. URL: <http://www.memsrus.com>.

29. Sandia National Laboratories. URL: <http://www.sandia.gov>.

30. Викулин И.М., Стафеев В.И. Полупроводниковые датчики. – М.: Сов. Радио, 1975. – 104 с.

31. Каляев И.А., Котов В.Н., Кливдухов В.Г., Кухаренко А.П. Микроэлектронные сенсорные системы: опыт создания и применения // Микросистемная техника. – 1999. – №1. – С. 32-35.

32. Подлепецкий Б. Интегральные полупроводниковые сенсоры: состояние и перспективы разработок // Chip news. – 1998. – №5(26). – С. 38-45.

33. Колосов А.А., Горбунов Ю.И., Наумов Ю.Е. Полупроводниковые твердотельные схемы. – М.: Советское радио, 1965. – 500 с.

34. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник / Под ред. Л.И. Анатычука. - К.: Наук. думка, 1979. – 768 с.

35. Кулаков М.В., Макаров Б.И. Измерение температуры поверхности твердых тел. – М: Энергия, 1979. – 96 с.

36. Будкин В.Л., Паршин В.А., Прозоров СВ., Саломатин А.К.,

Соловьев В.М. Инерциальные датчики для систем навигации и ориентации // Микросистемная техника. – 2000. – №2. – С. 31-34.

37.Northrop Grumman. Navigation Systems. URL: <http://www.nsd.es.northrop-grumman.com>.

38.Мартыненко Ю.Г. Инерциальная навигация // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – №8. – С. 102-108.

39.Погалов А.И., Тимошенко В.П., Тимошенко С.П., Чаплыгин Ю.А. Разработка микрогироскопов на основе многослойных структур кремния и стекла // Микросистемная техника. – №1. – 1999. – С. 36-41.

40.Амеличев В.В., Чаплыгин Ю.А. Интегральный сенсор магнитного поля комбинированного типа // Известия вузов. Электроника. – 1998. – №2. – С. 41-44.

41.Балтес Г.П., Попович Р.С. Интегральные полупроводниковые датчики магнитного поля // ТИИЭР. – 1986. – Т.74, №8. – С. 60-90.

42.Галушков А.И., Чаплыгин Ю.А. Интегральные магниточувствительные микросистемы // Известия вузов. Электроника. – 2000. – №4-5. – С. 124-127.

43.Гуменюк СВ., Подлепецкий Б.И., Симаков А.Б. Магниточувствительные полупроводниковые преобразователи // Зарубежная электронная техника. – 1983. – №7. – С. 33-67.

44.Корляков А.В., Лучинин В.В., Никитин И.В. Применение SiC-микронагревательных систем в микросистемной технике // Микросистемная техника. – 2000. – №2. – С. 27-31.

45.Лысенко И.Е. Проектирование сенсорных и актюаторных элементов микросистемной техники. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005. - 103 с.

46.Мальцев П.П., Никифоров А.Ю., Телец В.А. Микроактюаторы. Учебно-методическая разработка / Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет)”. – М., 2004. – 56 с.

47.Коноплев Б.Г., Лысенко И.Е. Моделирование микрозеркала с электростатической активацией // Микросистемная техника. – 2002. – №12. – С. 22-25.

48.Rife J.C., Bell M.I., Horwitz J.S., Kabler M.N., Auyeung R.C.Y., Kim W.J. Miniature valveless ultrasonic pumps and mixer // Sensors and Actuators. – 2000. – №86. – P. 135-140.

49.Jung K., Lee J., Choi B. Numeral analyses of the micromirror for projection TV using FEM // Microsystem Technologies. – 2001. – №7. – P. 75-79.

50.Majumder S., McGruer N.E., Adams G.G., Zavracky P.M., Morrison R.H., Krim J. Study of contacts in an electrostatically actuated microswitch // Sensors and Actuators. – 2001. – №A93. – P. 19-26.

51.Дятлов В.Л., Косцов Э.Г. Высокоэнергоемкие микродвигатели на основе тонких сегнетоэлектрических пленок // Микросистемная техника. – 1999. – №1. – С. 22-31.

52.Алейников А.Ф., Гридчин В.А., Цапенко М.П. Датчики (перспективные направления развития): Учеб. пособие / Под ред. проф. М.П. Цапенко. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. – 176 с.

Навчальний посібник

Володимир Ігорович Мандзюк
Ігор Тимофійович Когут

ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ
МІКРОСИСТЕМНОЇ ТЕХНІКИ

Редактор *І.Т. Когут*
Комп'ютерна верстка *В.І. Мандзюк*

Видавництво “Нова зоря”
м. Івано-Франківськ, пл. Міцкевича, 5,
тел. / факс (0342) 55-22-45; тел. (03422) 2-54-49
e-mail: nz@com.if.ua

*Свідоцтво про внесення до Державного реєстру
суб'єкта видавничої справи серія ДК №402 від 04.04.2001 р.*

Підписано до друку 17.05.2008 р. Формат 60×84/18
Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman
Умов. друк. арк. 9,0. Тираж 100. Зам. №195

.....

Віддруковано у друкарні видавництва “Нова зоря”
м. Івано-Франківськ, пл. Міцкевича, 5, тел. (03422) 2-54-49