

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ЕЛЕКТРОННІ КОМПОНЕНТИ ОСНОВИ МІКРОЕЛЕКТРОНІКИ

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Радіотехнічні комп'ютеризовані системи»
спеціальності G5 «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та
радіотехніка»

Укладачі: В. О. Піддубний, І. О. Товкач

Електронне мережеве навчальне видання

2-ге видання, перероблене і доповнене

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2026

УДК 621.396 (075.8)

Укладачі: *Піддубний Володимир Олексійович*, канд. техн. наук, доц.
Товкач Ігор Олегович, канд. техн. наук, старший викл.
Рецензент: *Булашенко Андрій Васильович*, канд. техн. наук, ст. викладач
кафедри радіоінженерії радіотехнічного факультету,
Національний технічний університет КПІ ім. Ігоря Сікорського
Відповідальний редактор: *Жук Сергій Якович*, д-р техн. наук, проф.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 7 від 08.05.2026 р.)
за поданням Вченої ради радіотехнічного факультету
(протокол № 07/2026 від 27.04.2026 р.)*

Е-50 Електронні компоненти: Основи мікроелектроніки В 4 ч. Ч. 4. [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Комп'ютеризовані радіотехнічні системи» спеціальності G5 «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В.О.Піддубний, І.О.Товкач. – 2-ге вид., перероб. і допов. – Електронні текстові дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026. – 134 с.

В навчальному посібнику наводяться теоретичні матеріали для вивчення розділу «Основи мікроелектроніки» кредитного модуля «Схемотехніка. Частина 1. Електронні компоненти», який викладається студентам радіотехнічного факультету, що навчаються за освітньою програмою «Радіотехнічні комп'ютеризовані системи» спеціальності G5 «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка». Наводиться матеріал пов'язаний з технологією мікроелектроніки, радіоелектронними елементами в інтегральному виконанні, який достатній для ознайомлення студентів з технологією виготовлення та конструкцією складових частин інтегральних мікросхем, їх сучасним станом та закладає основи для правильного вибору компонентної бази при проектуванні електронної апаратури.

УДК 621.396 (075.8)

Реєстр. № НП 25/26-343. Обсяг 5,8 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень та скорочень	5
ВСТУП	7
1. ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ МІКРОЕЛЕКТРОНІКИ.....	9
1.1. Основні означення мікроелектроніки	9
1.2. Технологія напівпровідникових ІМС.....	12
1.3. Вирощування кристалів.....	14
1.4. Виготовлення пластин	17
1.5. Епітаксія	18
1.6. Нанесення тонких плівок	21
1.7. Металізація	26
1.8. Літографія	27
1.9. Травлення.....	36
1.10. Легування.....	38
1.11. Збірка мікросхем	44
1.12. Основа напівпровідникової мікросхеми.....	45
1.13. Контрольні запитання.....	47
2. ЕЛЕМЕНТИ ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ	48
2.1. Біполярні транзистори в ІС	48
2.2. <i>n-p-n</i> транзистори в ІМС.....	50
2.3. Транзистори <i>p-n-p</i> типу	56
2.4. Діодні структури інтегральних схем.....	57
2.5. Інтегральні резистори	58
2.6. Конденсатори біполярних інтегральних схем.....	60
2.7. Індуктивні елементи інтегральних схем.....	61
2.8. Метал-діелектрик-напівпровідникові транзистори ІМС	62
2.9. Контрольні запитання.....	67

3. СХЕМОТЕХНІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ІС	69
3.1. Особливості цифрових та аналогових ІС	69
3.2. Базові елементи логіки	72
3.3. Аналогові ІС	77
3.4. Ключі	93
3.5. Контрольні запитання.....	97
4. ЕЛЕМЕНТИ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ.....	99
4.1. Функціональна електроніка	99
4.2. Прилади з зарядовим зв'язком.....	99
4.3. Запам'ятовувальні пристрої на основі циліндричних магнітних доменах.....	103
4.4. Акустoeлектроніка	105
4.5. Інші види функціональної електроніки	118
4.6. Контрольні запитання.....	120
5. НАНОЕЛЕКТРОНІКА.....	121
5.1. Основні поняття нанoeлектроніки.....	121
5.2. Біполярні транзистори нонорозмірів	124
5.3. Польові транзистори нанорозмірів.....	127
5.4. Транзистори на гарячих електронах	130
5.5. Прилади на резонансно-тунельному ефекті.....	131
5.6. Контрольні запитання.....	133
Список літератури	134

Перелік умовних позначень та скорочень

АФ	адаптивні фільтри	
АЧХ	амплітудночастотна характеристика	
БЛЗ	багатовідвідна лінія затримки	
БТ	біполярний транзистор	
ВІС	велика інтегральна схема	
ВАХ	вольтамперна характеристика	
ВЧ	високі частоти	
ГІС	гібридна інтегральна мікросхема	
ЕЗЛ	емітернозв'язана логіка	
ЕБ	емітер-база	
ЕП	емітерний перехід	
ЕРЕ	електрорадіоелементи	
ЗШП	зустрічноштиревий перетворювач	
ІС	інтегрована схема	
ІМС	інтегральна мікросхема	
ІС	інтегрована схема	
ЛЗ	лінія затримки	
МОНП	метал-окисел-напівпровідникова логіка	
МПЕ	молекулярно-променева епітаксія	
ККД	коефіцієнт корисної дії	
КНС	кремній на сапфірі	
КМОНП	компліментарна метал-окисна логіка	
КП	колекторний перехід	
МДНП	метал-діелектрик-напівпровідник	
МДНПТ	метал-діелектрик-напівпровідниковий транзистор	польовий
МЕ	мікроелектроніка	

Me-НП	метал-напівпровідник
МОН	метал-окис-напівпровідник
НВЧ	надвисокі частоти
НП	напівпровідники
НЧ	низькі частоти
ОАХ	об'ємні акустичні хвилі
ОП	операційний підсилювач
ПАХ	поверхневі акустичні хвилі
ПГБТ	подвійний гетероперехідний біполярний транзистор
ПГГСЛ	польовий гетероперехідний транзистор з селективним легуванням
ПЗЗ	прилади з зарядовим зв'язком
ПМХ	поверхнева магнітна хвиля
ПФ	перетворення Фур'є
ПТ	польовий транзистор
РЕА	радіоелектронна апаратура
РЛ	рентгенівська літографія
ТТЛ	транзисторно-транзисторна логіка
ТУ	технічні умови
ТТЛШ	транзисторно-транзисторна логіка з діодом Шотткі
УФ	ультрафіолет
ФЛ	фотолітографія
ФР	фоторезист
ФЧХ	фазовочастотна характеристика
ФШ	фотошаблон
ЦМД	циліндричний магнітний домен

ВСТУП

Даний навчальний посібник призначений для підготовки бакалаврів за напрямком освітньої програми «Радіотехнічні комп'ютеризовані системи» спеціальності G5 «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка» та може бути використаний для інших освітніх програм. Він є переробленою та доповненою версією посібника: Елементна база радіоелектронної апаратури: Основи мікроелектроніки. В 4 ч. Ч. 4. [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В.О.Піддубний, І.О.Товкач. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,22 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. Посібник може бути використаний для інших освітніх програм.

Тематика навчального посібника охоплює матеріал, який дозволяє студентам орієнтуватися в сучасному стані ЕРЕ, розуміти їх будову та принципи роботи, основні напрямки їх розвитку, технології виготовлення та застосування, особливості конструктивної та схемотехнічної реалізації елементної бази інтегральних мікросхем. Матеріал, який викладений вчетвертій частині посібника, знайомить з технологією виготовлення інтегральних мікросхем (ІМС), особливостях активних та пасивних ЕРЕ, що використовуються в ІМС, функціональною та наноелектронікою, дає уявлення про особливості цифрових та аналогових ІМС, їх характеристики та дозволяє об'єктивно оцінювати їх функціональні можливості. Посібник доповнено матеріалами про особливості сучасної технології створення нанорозмірних елементів інтегральних мікросхем, фотоперетворювачі та принципи роботи активних елементів нанорозмірів.

Навчальний посібник підготовлено відповідно до робочої навчальної програми (силабусу) дисципліни «Схемотехніка. Частина 1. Електронні компоненти». Він містить необхідний теоретичний матеріал, який дозволяє

застосовувати набуті знання для правильного вибору компонентної бази в відповідності до заданих схемотехнічних, експлуатаційних та інших вимог.

1. ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ МІКРОЕЛЕКТРОНІКИ

1.1. Основні означення мікроелектроніки

Мікроелектроніка (МЕ) – це розділ електроніки, який виник на основі сучасних досягнень фізики тонких плівок, твердого тіла та спеціальних матеріалів і включає в себе дослідження, розробку й виробництво ІМС та принципи їх застосування.

МЕ – це комплексна інтеграція, що в себе включає поєднання:

- елементів на кристалі та основі;
- схемних функцій у межах структурної одиниці;
- фізичних елементів при створенні функціональних мікросхем;
- методів проектування та етапів циклу створення РЕЗ.

Основні поняття МЕ:

Інтегрована (інтегральна) схема (ІС) – це мікроелектронний виріб, який виконує певну функцію обробки сигналу, перетворення та накопичення інформації і має високу щільність розміщення неподільно виконаних й електрично з'єднаних між собою елементів та компонентів на кристалі.

Ступінь інтеграції (конструктивна складність) – це кількість ЕРЕ, що входять до складу ІМС. Визначається як коефіцієнт $K = \lg N$, значення якого округляють до найближчого цілого числа. ІМС діляться на:

- Малі $K=2$ кількість елементів та компонентів 10^2 ;
- Середні $K=3$ кількість елементів та компонентів 10^3 ;
- Великі $K=4$ кількість елементів та компонентів 10^4 ;
- Надвеликі $K>5$ кількість елементів та компонентів 10^5 .

За **конструктивно-технологічними ознаками** діляться на:

- напівпровідникові ІМС
- гібридні ІМС

Напівпровідникові ІМС – це ІМС, усі елементи та міжелементні з'єднання якої, виконано в приповерхневому шарі та на поверхні НП матеріалу

в вигляді з'єднань або сполучень областей з різним типом електричної провідності і плівок з різними електрофізичними властивостями.

Основними елементами НІС є транзистори, що розміщені на кристалі.

Кристал – це конструктивно виділена частина напівпровідникової пластини, по периметру якої розміщені контактні площини.

За типом транзисторів НІС поділяють на:

- ІМС на БТ (біполярних транзисторах, переважно структури n^+-p-n);
- ІМС на МДНПТ (метал-діелектрик НП польових транзисторах, переважно з каналом n -типу або комплементарні структури з p - та n -каналом).

Інші елементи (діоди, резистори, конденсатори) формуються на основі транзисторних структур.

Найперспективніші типи ВІС – це КМДН ВІС. При виготовленні таких ІМС використовують елементи субмікрометрових розмірів з високою надійністю (0,25х0,25мкм).

Основним матеріалами для НІС є кремній, який характеризується малими зворотними струмами, кращими частотними властивостями але потребує взаємної ізоляції частин ЕРЕ із-за малого питомого опору, та арсенід галію. Він дорожчий за кремній, технологія його виготовлення складніша але має кращі частотні властивості. Цікавим є і кремній на сапфірі (КНС). В ньому активні елементи формуються в тонкому шарі кремнію (Si), вирощеному на діелектричній основі (сапфірі). Він має гарні частотні властивості, тому використовується для мікросхем НВЧ, дозволяє створювати в Si активні елементи без допоміжних зворотно-зміщених p - n переходів або їх сполучень, які використовуються як допоміжні ізоляційні шари, але КНС дорожчий, тому, що сапфір напівдорогоцінний матеріал.

Гібридні ІС (ГІС) – це ІМС, які містять плівкові пасивні елементи та дискретні НП компоненти (безкорпусні ІМС). Пасивні елементи ГІС (резистори, конденсатори, провідники, контактні площини) формують на

поверхні діелектричної основи (комутаційної плати), а компоненти (безкорпусні дискретні транзистори та ІМС) встановлюють на основу за допомогою складально-монтажних робіт.

ГІС в залежності від технології виготовлення та товщини плівок ГІС поділяються на тонкоплівкові (плівка до 1 мкм), які виготовляються методом напилення через маску або напиленням з наступною фотолітографією, та товстоплівкові (плівка товща за 1 мкм) шовкографією та впалюванням паст в керамічну основу.

За функціональною ознакою на:

- **цифрові** – які призначені для обробки й перетворення сигналів, котрі міняються по закону дискретних функцій (оброблюють інформацію в вигляді двоїчних чисел)
- **аналогові** – призначені для обробки сигналів, які злічуються по закону неперервної функції, причому вихідна інформація подібна по формі з вхідною.

Технологія виробництва ІМС – це сукупність технологічних операцій або процесів перетворення властивостей та форм матеріалу, контрольно-вимірювальних операцій, а також випробувань, здійснюваних із вхідними матеріалами, напівфабрикатами, що мають задані параметри при прийнятих показниках.

У виробництві ІМС можна виділити два цикли:

- виготовлення кристалів, плат поділ основ на кристали. Цей цикл спрямований на формування на кристалах потрібної кількості ЕРЕ та створення сполучень між ними;
- складання та монтаж ІМС – цей цикл направлений на створення закінченої конструкції ІМС.

Операції першого циклу виконуються **інтегрально-груповим методом** виробництва. При ньому одночасно оброблюються мільйони елементів.

Цим досягається близькість параметрів елементів, підвищується вихід придатних ІМС, знижується вартість.

В мікроелектроніці використовуються **типові технологічні процеси** – сукупність технологічних процесів, що виконуються у певній послідовності на конкретному технологічному обладнанні і призначені для створення груповим методом ІМС визначеної структури та конструкції.

Особливістю технологічного процесу виготовлення мікросхем є наявність значного числа повторюваних типових операцій (епітаксії, дифузії, легування, окислювання, напилення, фотолітографії та інших).

Для різних ІМС кількість перелічених операцій різна. Але можна виділити такі етапи виготовлення ІМС:

- підготовка напівпровідникових пластин
- групові методи (епітаксія, літографія, напилення та інші)
- перший контроль функціонування
- поділ пластин на окремі кристали
- сортування (розбраковка)
- другий контроль функціонування
- корпусування (розміщення кристалу в корпусі ІМС), яке складається з закріплення кристалу в корпусі, проведення з'єднань між выводами кристалу та выводами корпусу і вихідний контроль.

1.2. Технологія напівпровідникових ІМС

Напівпровідникові ІМС можуть виготовлятися на основах з вихідного монокристалу або на епітаксійних плівках (плівках НП вирощених на іншій основі).

Технологія виготовлення ІМС поділяється за способом формування транзисторних структур та методом ізоляції елементів на з ізоляцією зворотнорозміщеним *p-n* переходом, діелектричною та комбінованою ізоляцією.

Технологія виготовлення на епітаксialьних плівках ділиться на епітаксію на НП та епітаксію на діелектрику.

Технологія виробництва ІМС – це сукупність технологічних операцій або процесів перетворення властивостей та форм, контрольно-вимірювальних операцій, а також випробувань, здійснюваних із вхідними матеріалами, напівфабрикатами, що мають задані параметри при прийнятих показниках.

У виробництві ІМС можна виділити два цикли:

- виготовлення кристалів, плат поділ основ на кристали. Цей цикл спрямований на формування на кристалах потрібної кількості ЕРЕ та створення сполучень між ними;
- складання та монтаж ІМС. Цей цикл направлений на створення закінченої конструкції ІМС.

Операції першого циклу виконуються інтегрально-груповим методом виробництва. При ньому одночасно оброблюються мільйони елементів, що дозволяє досягти близькості параметрів елементів, підвищити процент виходу придатних ІМС та знизити вартість виробництва.

Застосування типових ТП дає змогу створювати множину різних ІМС на одній конструкторсько-технологічній основі, характерним для яких є однаковий рівень якості та надійності.

В технології ІМС чітке місце займає кремній.

Це зумовлене тим, що:

- прилади на кремнії працюють при підвищених температурах (115 °С), а при виготовленні Si дозволяє працювати при температурах до 1200 °С;
- на його поверхні можливо створення стабільної, добре контрольованої плівки оксиду кремнію SiO₂ (відмінного діелектрика);
- через вікна в SiO₂ можна легувати локальні області;
- структура Si - SiO₂ допускає:
- селективне травлення;
- має екранні властивості при легуванні.

Особливістю технологічного процесу виготовлення мікросхем є наявність значного числа повторюваних типових операцій, на стадії обробки кремнієвих пластин (епітаксії, дифузії, легування, окислювання, напилення, фотолітографії та інших). Для різних ІМС кількість перелічених операцій різна.

Розглянемо класифікацію технологічних варіантів інтегрально-групових процесів виготовлення ІС.

І залежності від типу ІС існують два варіанти технології:

- технологія ГІС, в основу якої покладено різні способи формування пасивних плівкових елементів та без корпусних ІМС.
- технологію напівпровідникових ІМС, в якій елементи формуються в кристалі на основі однотипної транзисторної структури – біполярної чи МДН.

Розглянемо основні технологічні операції напівпровідникової технології:

1.3. Вирощування кристалів

В основу одержання монокристалів НІ покладено процеси кристалізації з рідкої, газової або парової фази. В сучасній технології одержання монокристалів особливо чистих матеріалів, до яких відноситься Si (1 атом домішок на мільйон атомів кремнію), тісно пов'язана з їх очисткою та легуванням. Найбільш придатні для цієї мети є методи на основі кристалізації рідкої фази (розплаву). Це:

- **неконсервативна направлена кристалізація**, це схема кристалізації з одною фазовою межею (тверда фаза – рідка), що називається фронтом кристалізації. (Метод Чохральського)
- **консервативна направлена кристалізація**, яка характеризується двома фазовими межами: фронтом кристалізації та фронтом плавлення. (Зонна плавки та зонна кристалізація).

В методі Чохральського (рис.1.1) полікристалічний кремній розплавляється в тиглі з плавленого кварцу в атмосфері аргону. Температура розплавленого Si – 1415 °C.

В розплав опускають монокристалічну затравку потрібної орієнтації.

Вмикається підйомний механізм, який піднімає затравочний кристал вгору. Тигель та кристал обертають в протилежних напрямках (для одержання однорідної температури). Затравка витягується вгору. На межі затравка-рідка фаза полікремнію виникає фронт кристалізації і розплав наростає на затравці в вигляді кристалу. Діаметр вирощеного кристалічного зливка циліндричної форми (буля) регулюється швидкістю витягування та температурою. Розмір обмежується технологічними труднощами контролю дефектів та теплових процесів.

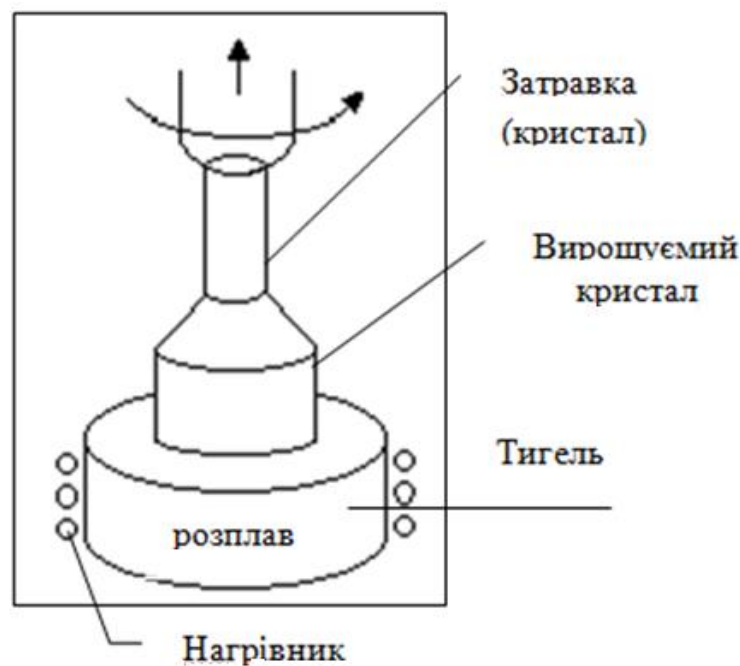


Рис.1.1. Вирощування кристалу методом Чохральського

Для одержання легованого кремнію в розплав вводять невелику кількість легуючого елементу. Крім того в монокристал попадає велика кількість кисню із-за розчинення матеріалу тигля SiO_2 в розплаві кремнію.

Метод використовують також для вирощування кристалів германію, арсеніду галія, антимоніду індію.

Для високоомного кремнію (20...100 Ом·см), який використовується для потужних електричних приладів, присутність кисню не бажана, тому розроблено інший спосіб одержання чистих кристалів кремнію (Si) – **метод зонної плавки** (рис.1.2).

Завдяки відсутності тигля при вирощуванні кристалу одночасно з ростом проходить і очистка його від домішок. Домішки переміщуються вгору, де і залишаються в сконцентрованому вигляді.

Зонна плавка характеризується наявністю як фронту плавлення, так і фронту кристалізації. Такий метод дозволяє в 100 раз зменшити концентрацію кисню.

Багатократне проходження розплавленої зони дозволяє створювати кристали з питомим опором до 10^4 Ом·см;

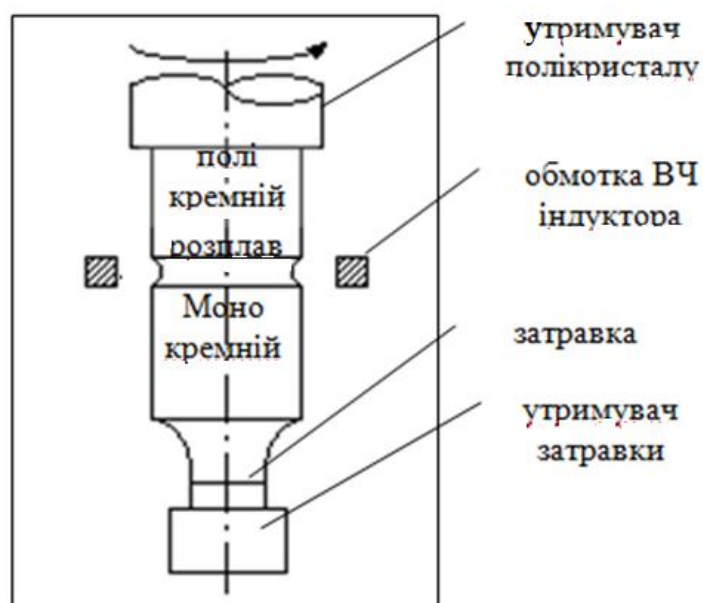


Рис.1.2. Вирощування кристалу методом зонної плавки

Швидкість вирощування кристалу методом зонної плавки в двічі більша ніж методу Чохральського. Порівняння основних характеристик кремнію вирощеного різними методами показана в табл.1.1.

Методи вирощування кристалів

Параметри	Метод вирощування	
	Чохральського	Зонної плавки
Мах діаметр кристалу, мм	150...300 (для Si, Ge, GaAs)	300 (для Si), 200 (GaAs)
Максимальна довжина булю, м	до 2	до 2
Діапазон питомого опору, Ом см		
<i>p</i> – тип	0,005...50	0,1...3000
<i>n</i> – тип	0,005...50	0,1...800
Час життя неосновних носіїв заряду, мкс.	10...50	100...3000
Вміст домішок, атом/см ³		
кисню	$10^{16} \dots 10^{18}$	$<10^{16}$
вуглецю	10^{17}	$<10^{17}$

1.4. Виготовлення пластин

В процесі росту монокристала виникає невідповідність осі злитка та кристалографічної осі росту. Для отримання пластин орієнтованих в заданій площині перед порізкою кристалів проводять орієнтацію злитків, використовують рентгенівський чи оптичні методи.

Рентгенівський метод (рис.1.3) оснований на відбиванні рентгенівських променів від поверхні напівпровідникового матеріалу. На поверхню торця злитку направляють пучок рентгенівських променів під кутом α , що дорівнює куту відбивання від відповідної до орієнтації кристалографічній площині. Під кутом 2α від площини падіння рентгенівського проміння, ставлять приймач. Обертаючи стіл з злитком знаходять таке положення, при якому інтенсивність відбитих променів була максимальна. Кут між торцем злитка та його вихідним положенням і є одним з кутів орієнтації.

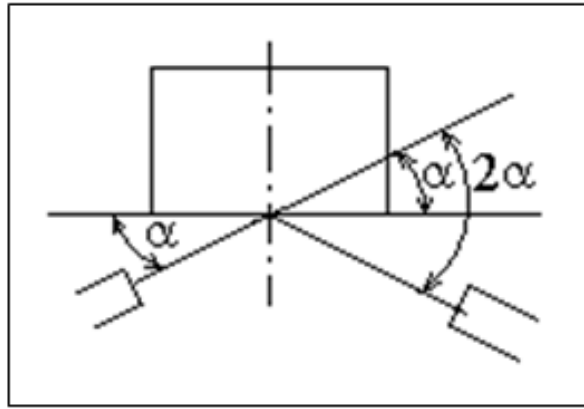


Рис.1.3. Рентгенівський метод орієнтації кристалів

При оптичному методі торець полірують та оброблюють в селективному травникові. Різна швидкість травлення по різних осях формує поверхню кристалу. Освітлюючи протравлений торець променем світла, по характеру відбитого світла, визначають орієнтацію.

Потім кристал розрізається алмазним диском на пластини товщиною 0,4–0,5 мм. Пластини шліфують для видалення механічних дефектів (при цьому товщина зменшується до 200...300 мкм). Після шліфовки малі механічні порушення поверхневого шару (1...2 мкм) вилучаються механічною поліровкою та хімічним травленням. Далі йде обезжирювання (толуол, ацетон, етиловий спирт – при підвищеній температурі в пару) та відмивка в деіонізованій воді (електричний опір води складає 10...20 МОм·см) або в бідистиляті (1...2 МОм·см).

1.5. Епітаксія

Епітаксія – це процес нарощування на пластину (основу) монокристалічного шару (епітаксійної плівки), який повторює структуру пластини та її кристалографічну орієнтацію (рис.1.4).

Якщо основа та нарощуваний шар складаються з одної речовини, то процес називається автоепітаксіальним, якщо кристалічна структура основи та

шару мають деякі відмінності в складі, то процес – називається гетероепітаксialним.

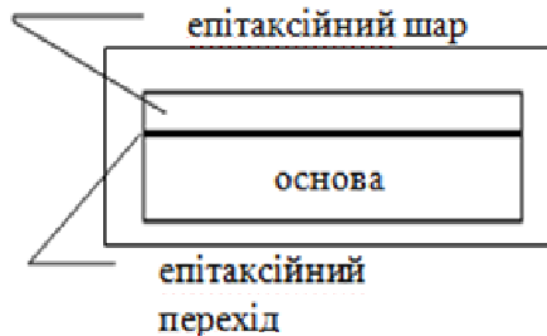


Рис.1.4. Структура епітаксiального шару

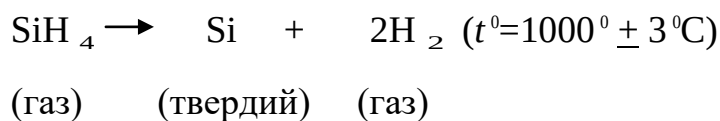
Здебільшого матеріали плівки і пластини однакові, але можуть застосовуватись різні матеріали з близькою кристалічною структурою (плівка кремнію на монокристалічному сапфірі).

Епітаксія проводиться хімічним осадженням з газової фази. Розрізняють такі варіанти хімічного осадження: **проліз** та **хімічні транспортні реакції**.

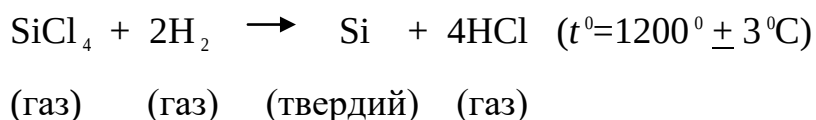
При **піролізі** основу нагрівають до температури, при якій пароподібне робоче з'єднання розкладається на нелетючі компоненти, що осаджуються на основі.

Як робоче з'єднання використовують гідриди металів, та галоген іди (для кремнію це силан SiH_4 та тетрахлорид кремнію SiCl_4).

Силан розкладається за рахунок нагрівання до високих температур



Для хлоридного процесу епітаксії потрібен водень:



Швидкість осадження для кремнію становить 0,10...2,5 мкм/хв.

В плівку, що вирощується, можуть бути внесені легуючі домішки:

арсин AsH_3 ; фосфін PH_3 (n – донор).

диборан B_2H_6 (p – акцептор).

При **хімічно-транспортних реакціях** (рис.1.5) використовують зміщення рівноваги в реакціях створенням градієнта температури.

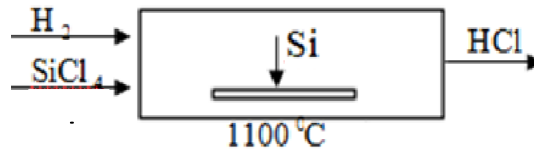


Рис.1.5. Епітаксія шляхом хімічно-транспортної реакції

Швидкість нарощування залежить від температури плівки, концентрації $SiCl_4$ та кристалографічної орієнтації поверхні. Швидкість нарощування може бути до 10 мкм/хв.

Для одержання на одній основі багатошарових структур з різних матеріалів використовується рідинна епітаксія (рис.1.6). Таким методом отримують гетеропереходи Ge-Si; GaAs-GaP товщиною < 1мкм.



Рис.1.6. Одержання на багатошарових структур

Як розчинник використовують легкоплавкий компонент шару, що нарощуємо.

Для створення дуже тонких (до кількох нанометрів) плівок та різних p - n переходів, потрібних для виготовлення арсенід-галієвих ІМС, використовують **молекулярно-променеву епітаксію (МПЕ)** основу на взаємодії декількох молекулярних променів з нагрітою монокристалічною основою з осадженням на ній елементарних компонентів.

Схема МПЕ зображена на рис.1.7.

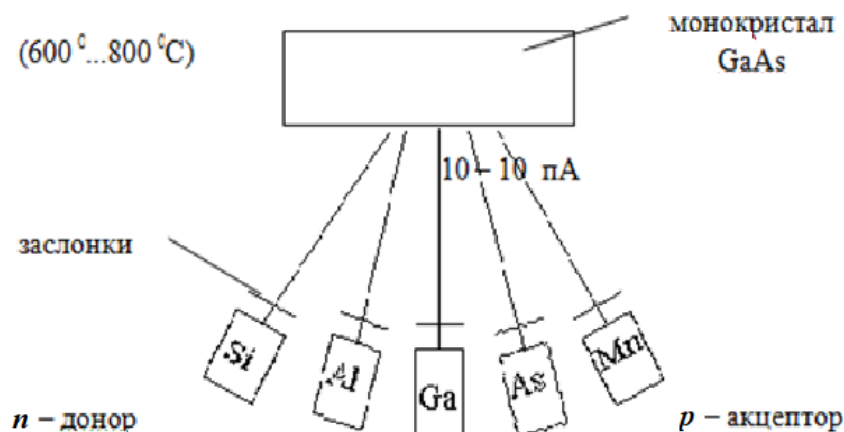


Рис.1.7. Молекулярнопроменева епітаксія

Епітаксіальне нарощування відбувається при надвисокому вакуумі при одночасній реакції молекулярних пучків різної густини з монокристалом. Характеризується можливістю контрольованої швидкості проходження епітаксії. Низька температура основи зменшує число дефектів в епітаксіальному шарі, які на порядок менші чим в інших методах.

МПЕ — дозволяє проводити контроль хімічного складу кристалічної структури безпосередньо під час нарощування епітаксіального шару.

Швидкість вирощування плівок складає 1мкм/год.

1.6. Нанесення тонких плівок

Нанесення тонких плівок — це технологічна операція осадження монолітних чи композиційних плівок із зовнішнього джерела осаджуваного матеріалу. Матеріал основи не бере безпосередньої участі у створенні плівки, але може здійснювати орієнтувальну дію на її структуру. Такі плівки використовують як провідники, резистивні шари, елементи конденсаторів, ізоляційні шари.

Крім електрофізичних параметрів плівки повинні мати добру адгезію до основи (добре прилипати).

Всі методи нанесення плівок можна розділити на вакуумні та не вакуумні.

До вакуумних відносяться:

Вакуум термічне випаровування, що полягає в нагріванні речовини, що випаровується в умовах високого вакууму до температури при якій енергія атомів, що зросла від нагрівання, достатня для їх відриву від поверхні і поширенню в навколишній простір(!).

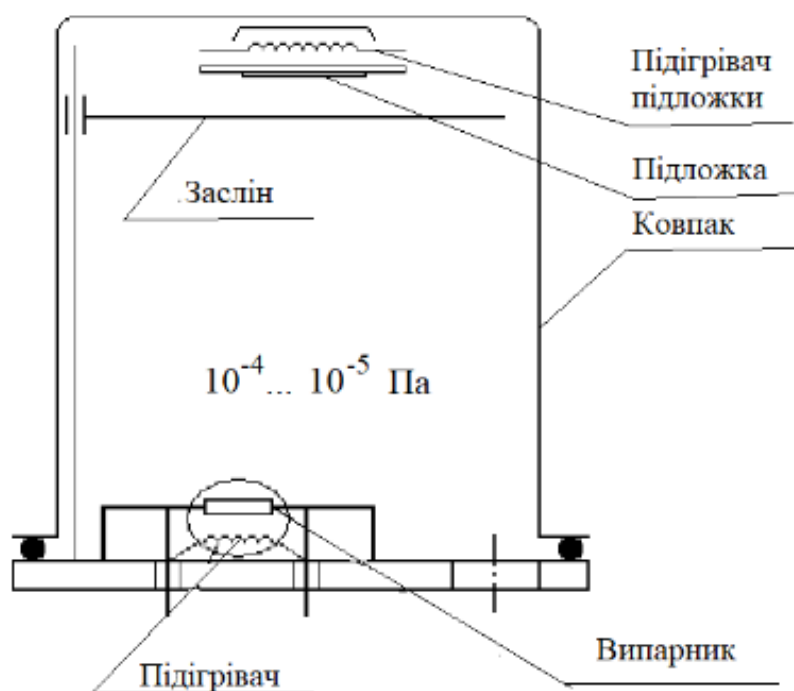


Рис.1.8. Вакуумтермічне випаровування

Тиск насичених парів речовини має на кілька порядків перевищувати тиск залишків газів ($10^{-4} \dots 10^{-5} \text{ Па}$). Нагрівання здійснюється за допомогою підігрівача та випарника (тигель, стрічка, спіраль човник).

Напилення проводиться на підложку, яка нагріта до $200 \dots 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Швидкість напилення $0,5 \dots 10 \text{ нм/с}$.

Для підвищення адгезії наносять підшарок. Це ванадій, нікель, хром. Створюють структуру типу Ar-Ni-Si , де товщина підслою складає кілька атомарних шарів.

Недоліки термічного випаровування:

- висока температура матеріалу, що напильється;
- неможливість отримання композиційних плівок;
- неможливість напильнення тугоплавких матеріалів (Ta, Nb, W).

Для одержання плівок чистих матеріалів використовується іонне бомбардування, яке підрозділяється на:

- катодне розпилення;
- іонно-плазмове напильнення;
- високочастотне (магнетронне) розпилення.

Катодне розпилення (рис.1.9) ґрунтується на переносі матеріалу мішені на основу за рахунок енергії позитивних іонів, які утворюються при тліючому розряді і вибивають з катоду частинки матеріалу, що розпильється, які переносяться на основу.

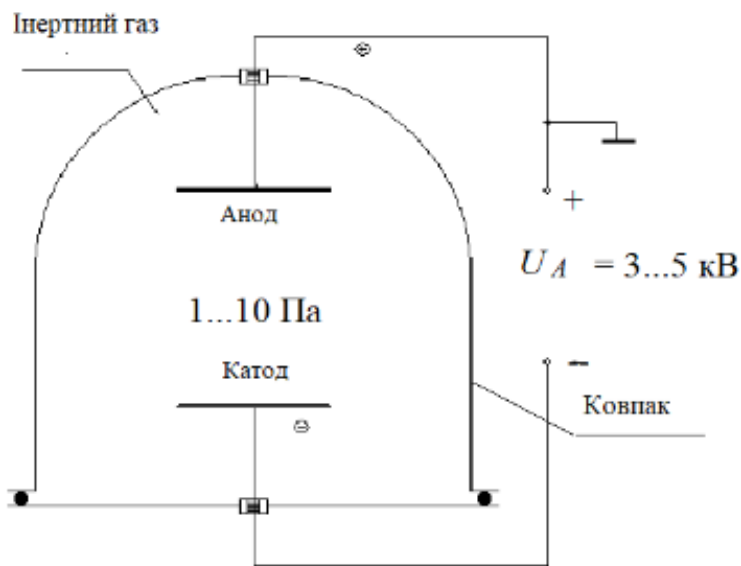


Рис.1.9. Катодне розпилення

Катод – розпилюваний матеріал. Анод – основа з утримувачем. Анод заземлюють. Між анодом та катодом виникає тліючий розряд. Позитивні іони газу бомбардують анод вибиваючи з нього атоми або молекули, які, розсіюючись на атомах інертного газу, досягають поверхні основи.

Переваги катодного розпилення:

- висока рівномірність осадження плівки;
- можливість регулювання з високою точністю швидкості напилення зміною напруги на електродах;
- можливість створення плівки тугоплавких металів і сплавів, точно витримуючи їх склад;
- напилення не зв'язане з високою температурою.

Недоліки:

- катод повинен мати високу електропровідність, тобто неможливо напишити діелектричну плівку;
- забруднення плівок внаслідок низького вакууму;
- менша швидкість напилення (0,1...0,5 нм/с).

Іонно-плазмове (магнетронне) напилення (рис.1.10) виконують в камері з тиском газу 10^{-2} Па, що зменшує забруднення плівок. Суть протікання процесу така ж як і при катодному розпиленні, але катод – підігрівний і відокремлений від мішені.

Бомбардування мішені відбувається іонами плазми газового розряду низького тиску дуговий розряд запалюється при напругах 100...150 В між підігрітим катодом та анодом. Розрядний струм – кілька ампер. Електрони, що виходять з катоду іонізують молекули інертного газу (аргону, ксенону). При подачі на мішень негативного потенціалу (200...1000 В), іони бомбардують її поверхню і йде розпилення. Матеріал, що розпилюють, осаджується на основі, що знаходиться напроти мішені. Швидкість розпилення складає 0,2...1 нм/с.

При напиленні діелектричних плівок на мішені виникає накопичений позитивний заряд, який заважає процесу напилення (припиняє його).

Для усунення його дії, на мішень подають ВЧ напругу (13,65 МГц) з амплітудою, більшою за негативну постійну напругу.

Ефективність розпилення може бути підвищена використанням магнетронного розпилення. Досягають цього за допомогою магнітного поля, вектор магнітної індукції якого – перпендикулярний до осі анод-катод.

Електрони, що вилітають з катоду, під дією поперечного магнітного поля рухаються складними траєкторіями, іонізуючи на своєму шляху газ і збільшуючи концентрацію іонів, а отже, і швидкість розпилення.

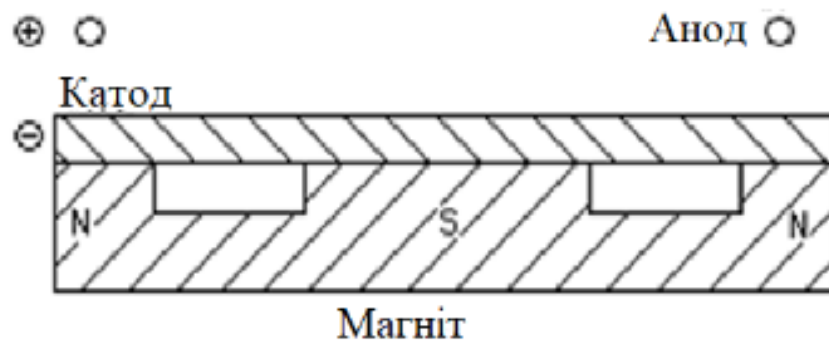


Рис.1.10 Магнетронне розпилення

Розпилення на постійному струмі використовується для напилення металічних плівок. Для нанесення діелектричних плівок на мішень подають змінну напругу ВЧ. Швидкість розпилення для таких установок в 10...100 разів більша ніж катодного розпилення і сягає величин 100нм/с.

Не вакуумні методи нанесення плівок діляться на хімічні, електрохімічні та трафаретний друк.

Хімічне осадження з газового середовища використовується для одержання плівок оксиду кремнію та нітриду кремнію.

Його перевагами є сумісність з процесами епітаксії та невисока (до 600 °С) робоча температура.



Хімічне осадження з водних розчинів використовується для виробництва ГІС. Це – відновлення металів з розчинів солей (створення провідникових та резистивних шарів) для товсто плівкових ГІС.

1.7. Металізація

Металізація в ІС необхідна для забезпечення омичних контактів з шаром напівпровідників, а також для одержання міжелементних з'єднань та контактних площин.

Після виготовлення на кремнієвій основі схемних елементів (транзистори, резистори і т.д.) їх порібно з'єднати між собою.

Матеріалом для з'єднань служить алюміній, тому що він має малий питомий опір ($2,6 \cdot 10^{-6}$ Ом·см), добру адгезію до SiO_2 , можливість отримання зварних з'єднань з алюмінієвим та золотим дротом, малу корозію та дешевизну.

Недолік алюмінію – неможливість високотемпературної обробки після його нанесення (при $t^{\circ} > 500^{\circ}\text{C}$ відбувається взаємна дифузія Si та Al, та температурна міграція атомів алюмінію). Алюміній має $R_s = 0,05$ Ом/□ (спеціальний параметр, що характеризує провідникові властивості тонких плівок). Це опір квадратної ділянки тонкої плівки, розділений на її товщину.

На всю поверхню ІС напилюють алюмінієву плівку товщиною 1 мкм, а потім методом фотолітографії формують малюнок. Контактні площини мають розміри 100×100 мкм. До них приєднуються зовнішні виводи.

Для усунення недоліків Al іноді використовують тугоплавкі метали (вольфрам, молібден і тантал), які мають $R_s = 0,1 \dots 0,2$ Ом/□. Це дозволяє позбавитися від електроміграції та дифузії в кремнії та дає високу однорідність плівок. Недоліком є технологічні складнощі при нанесенні плівок.

Для міжшарової ізоляції використовують тонкі плівки SiO_2 , що одержуються з газової фази. Кількість шарів може бути від 2 до 4.

При напиленні Al на Si можна створити два типи контакту:

- напилення Al на p -Si (Al акцептор, при розчиненні в p -Si, утворює шар p^+ , що поліпшує омичний контакт);
- напилення Al на n -Si (при цьому утворюється випрямляючий перехід Шотккі). Для того, щоб цього не виникло для омичного контакту n -Si сильно легують до 10^{20} 1/см^3 . Впалюючи Al при 600°C в цей шар розчиняють Al до 10^{18} 1/см^3 , при цьому p - n перехід не утворюється.

1.8. Літографія

Літографія – це процес формування рельєфного зображення топологічного шару ІМС в масках, сформованих на поверхні основи і призначених для локального легування, травлення, окислення, напилення та інших технологічних операцій.

Відрізняють декілька видів літографії:

- фотолітографія;
- електронно-променева літографія;
- рентгенівська літографія;
- іонно-променева.

Найбільш розповсюджена в МЕ фотолітографія.

Фотолітографія (ФЛ) – це сукупність фотохімічних процесів, в яких можна виділити 3 етапи:

- формування на поверхні шару фоторезисту, який являє собою фотоемульсію, чутливу до ультрафіолетового випромінювання;
- передачу зображення з шаблону на шар ФР;
- формування конфігурації елементів за допомогою утвореної маски із ФР.

ФЛ поділяється на контактну (шаблон в процесі перенесення зображення утворює тісний контакт з ФР) та безконтактну (шаблон з мікроззором, або в проектується).

Фоторезист (ФР) – це світлочутлива композиція, що складається з полімерної основи (визначає хімічні властивості) та чутливого до ультрафіолетового випромінювання матеріалу (визначає світлочутливість). Для отримання необхідної густини добавляють в ФР розчинник.

ФР діляться на негативні (ФН), у яких розчинність експонованої ділянки зменшується та позитивні (ФП), у яких розчинність експонованої ділянки збільшується. ФН виготовляються на основі полі вінілового спирту а ФП – на основі нафтохінондіазидів.

Характеристики ФР

- *світлочутливість* – величина, зворотня до експозиції, необхідної для переведення ФР в розчинний чи нерозчинний склад;
- *дозволяючи здатність* – максимальна кількість ліній однакової ширини, розділених між собою проміжками такої ж ширини, які можна отримати в ФР на один мм довжини;
- *стійкість до дії агресивного середовища* – характеризується густиною дефектів (мм), що виникають при травленні на основі.

Промисловість випускає позитивні ФП 383 з роздільною здатністю 400 лін/мм та негативні ФНБТК, ФН –11 та інші з роздільною здатністю 100...300 лін/мм. Час експонування складає від 10 с. до 1 год.

Основні типи та марки закордонних фоторезистів наведені нижче:

1. Позитивні фоторезисти (найбільш поширені)

- SPR серія (фірми AGC Inc. та DuPont): популярні марки, такі як SPR 3 та SPR 700, використовуються для точного визначення малюнка топології та підвищення якості виробництва.
- AZ серія (фірми Merck Group/EMD Performance Materials): широко розповсюджені марки для стандартних процесів літографії.
- Марки фірма Tokyo Ohka Kogyo (ТОК): високоточні резисти для нанорозмірних напівпровідників, в тому числі для EUV-літографії (екстремальний ультрафіолет, довжина хвилі близько 13,5 нанометра).

Негативні фоторезисти

- SU-8 (фірми Kayaku Advanced Materials / MicroChem). Це один із найвідоміших негативних епоксидних резистів для створення товстих шарів та високих структур.
- Riston (фірма DuPont): Сухий плівковий фоторезист для багатошарових друкованих плат.

Марки фірми JSR Corporation мають високі екологічні характеристики та використовуються для виготовлення OLED-дисплея.

Шаблони – це оптично непрозоре зображення одного топологічного шару в масштабі 1:1. Це тонка скляна пластина з непрозорою плівкою, на якій виконані прозорі отвори. Діляться на фотошаблони (непрозорий шар формується фотоемульсією) та металізовані (непрозорий шар з Cr, CrO, FeO)

Основні етапи фотолітографії це:

- Підготовка основи (очистка гідромеханічна, хімічна та обробка парами гексаметилдіоксину).
- Нанесення ФР на підкладку може відбуватися центрифугуванням ($h=0.5-1$ мкм), розпиленням ($h=1-10$ мкм), чи окунанням або поливом (більш товщина плівки ФР).
- Сушка (видалення залишків розчинника) здійснюється конвективно або з допомогою інфрачервоного опромінення.
- Суміщення – це процес суміщення при багатократній літографії (для транзисторів потрібно до 5...7 раз) шаблонів між собою по спеціальних мітках (реперних точках).
- Експонування здійснюється в променях кварцової ультрафіолетової (УФ) лампи.
- Проявлення ФР (формування захисного рельєфу).
- Термообробка (задублювання) для надання кислотостійких властивостей плівці).
- Травлення шарів (формування необхідного рельєфу металевої плівки).

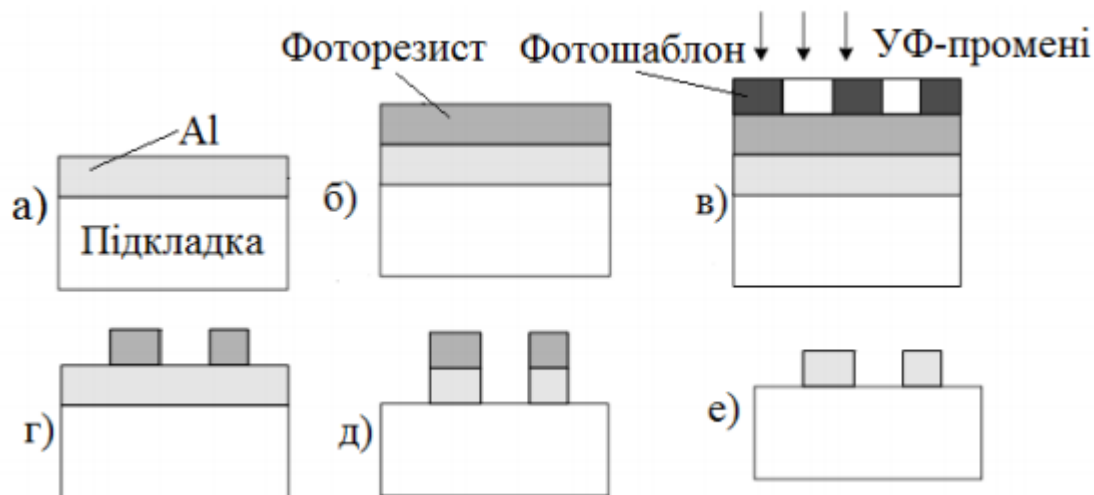


Рис.1.11. До пояснення процесу фотолітографії

а – підкладка з металевою плівкою; б – нанесення фоторезисту; в – експонування через фотошаблон; г– проявлення фоторезисту; д – травлення металевої плівки; е – зняття фоторезисту

Виготовлення ФШ

1. Викреслювання оригіналу – оптично контрастного зображення топологічного шару ІМС в збільшеному масштабі (за звичай 500:1). Кристал має розмір 1,5х1,5 мкм а фотооригінал – 50х50 см.

Креслять на координатографі на тонкій термостійкій стабільній плівці (майлар), покритій шаром нітроемалі.

2. Проміжний оригінал – фотографують на скляну пластину в масштабі 20:1 або 50:1 на редуційній камері.

Зараз виготовляють проміжні фотооригінали без першого етапу на фотонабірній установці поелементним друкуванням простих геометричних фігур.

3. Виготовлення ФШ з мультиплікацією. Зменшення до натурального розміру (масштаб 1:1) за допомогою фото штампів.

Обмеження фотолітографії – це мала дозволяюча здатність (до 500 лін./мм) (розміри до 0,5...1 мкм).

Електронно-променева літографія

Основа на експонуванні електронорезисту потоком електронів (рис.1.12). Використовується для виготовлення шаблонів, або для формування топологічного малюнка, в тому випадку, коли необхідно лише одна літографія. В цьому випадку проводять сканування вузького електронного променя (діаметр 0,1 мкм) по пластині покритій резистом. Як резист використовують сполуки поліметилметакрилату.

Дозволяє отримувати елементи розміром 0,2...0,5 мкм.

Час експонування від десятків хвилин до декількох годин.

Рентгенівська літографія (РЛ) дозволяє зменшити розміри до 0,04...0,05 мкм. В РЛ для експонування використовують низькоенергетичне рентгенівське випромінювання (1...10 КэВ). При рентгенівській літографії використовують *ФР* з поліметилметакрилат а *ФШ* – кремнієві мембрани (1, 3 та 5 мкм) з золотим покриттям.

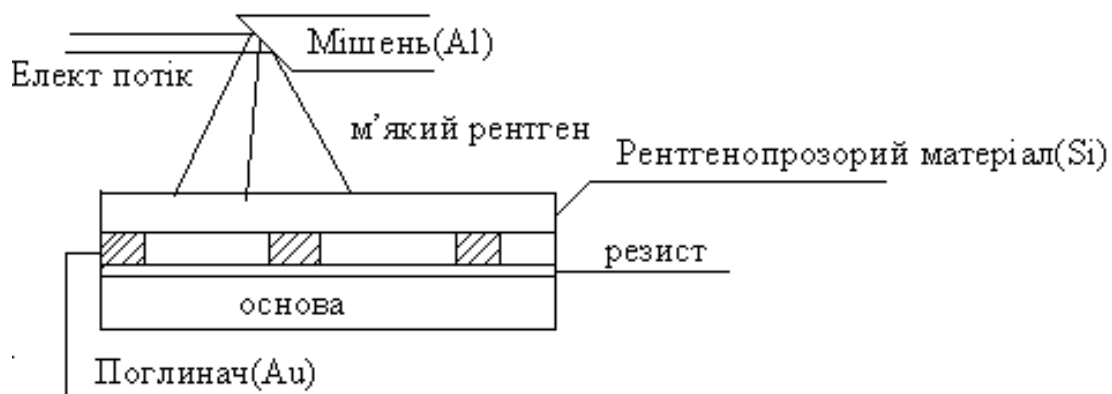


Рис.1.12. Принцип рентгенівської літографії

Експозиція складає години.

Перевага – довжина хвиль 1 мкм, тому дифракція мала і маску можна розміщувати з зазором (10...20 мкм) або використовувати проекційні методи експонування.

Іонно-променева літографія

Іонно-променева літографія – метод отримання структур з субмікронними розмірами елементів (менше 0,05 мкм).

Характеризується високою дозволяючою здатністю, відсутністю дифракції, більш висока чутливість до іонів (менший час експонування).

Джерела іонів (методи одержання) дуоплазмотронний (одержання плазми з газового розряду), рідкометалічний (основані на явищі відриву іонів рідкого металу) або газозфазний (основані на виходу з плазми газового розряду з гострого аноду під дією сильного електричного поля).

Резисти – поліметилметакрилати. Час експонування від десятих частини до одиниць секунди (висока продуктивність).

Шаблон-маска – аналогічний шаблонам для електронно-проекційної літографії.

Наномікронні розміри елементів

Зараз бурхливо розвивається напрям мікроелектроніки, у рамках якого характерні розміри елементів (1...10 нм) сумірні з розмірами атомів, молекул, а тунелювання електронів з ефекту другого порядку стає ефектом першого. Це так звана **наноелектроніка**. Гранична частота виготовлених наноелектронікою елементів досягає 1...4 ТГц, що визначає їх високу швидкодію. Зараз уже одержані активні елементи з $f_{\text{гр}}=70\ldots100$ ГГц.

При розмірах елементів 1...10 нм утворюється нова фаза речовини, відмінна від твердої, рідкої та газоподібної – мікрокластер, група, яку складають від двох до сотні зв'язаних між собою атомів. Головна особливість таких елементів – це використання тунелювання електронів замість дрейфового руху в різноманітних НП приладах, що значно поліпшує їх електричні параметри, зменшує втрати та шуми.

Літографія для сучасних чіпів

Літографія працює за звичним принципом експонування через маску, основними етапами якої є:

1. Нанесення на кремнієву пластину світлочутливого полімеру (ФР).
2. Експонування ФР актинічним випромінюванням.
3. Освітлені ділянки фоторезисту змінюють свої властивості.

4. Проявлення частини фоторезисту для утворення необхідного топологічного шару.

5. Травлення, іонна імплантація або осадження матеріалів.

Для створення елементів нанорозміру використовують дві технології:

- EUV для найкритичніших шарів (заслін, критичні з'єднання);
- DUV для менш критичних шарів (верхні металічні шари, допоміжні структури).

Найчастіше вони використовуються одночасно (гібридна модель).

Екстремальний ультрафіолет (EUV)

Обмеженням є використання необхідного випромінювання. Щоб створити елементи нанорозміром, потрібне випромінювання з довжиною хвилі близько 13,5 нм – це екстремальний ультрафіолет (EUV). Екстремальний ультрафіолет не проходить крізь повітря, не відбивається звичайними дзеркалами і не може бути отриманий жодним класичним джерелом світла.

Його отримують вакуумній камері, в якій з частотою близько 50 кГц летять краплі олова розміром біля 20...30 мікронів. У кожну краплю влучає підготовчий лазер і розплющує її в тонкий «млинець». Потім по цьому «млиню» б'є CO₂-лазер високої потужності (до 30...40 кіловат). У результаті олово перетворюється на плазму. Отримана розжарена плазма працює як джерело світла і випромінює світло з довжиною хвилі 13,5 нм. Це світло не можна фокусувати оптичними лінзами, тому що EUV поглинається склом. Його збирають у промінь за допомогою спеціальних багат шарових дзеркал (колектора з молібдену та кремнію). Освітлювальна оптика формує рівномірне випромінювання на масці.

EUV-світло відбивається від маски з топологією схеми (фотошаблону) і зображення після зменшення проєкційними дзеркалами (6...8 асферичних дзеркал) в 4 чи 8 разів потрапляє на кремнієву пластину з фоторезистом, де відбувається експонування шару (рис.1.13). Потім – травлення і напилення.

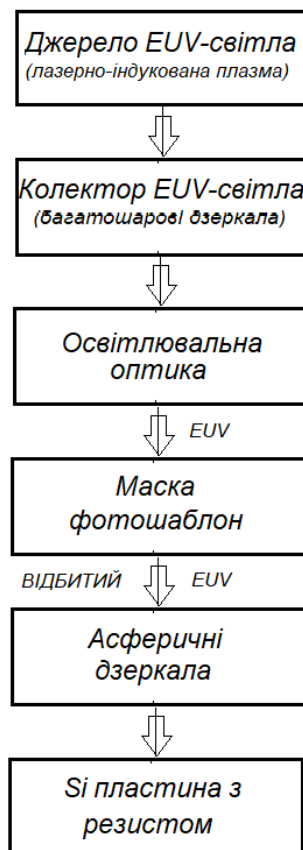


Рис.1.13. Використання EUV-світла для літографії

Отже особливостями EUV є:

- Використання як джерела світла плазми з крапель олова, яку обстрілюють потужні лазери.
- Відсутність лінз (багатошарове дзеркало для формування променя).
- Робота в високому вакуумі.
- Точність позиціонування складових з похибкою менше нанометра.

Технологія DUV (Deep Ultraviolet)

DUV (Deep Ultraviolet) – це діапазон ультрафіолетового випромінювання з дуже короткими довжинами хвиль (100...300 нм). Зазвичай – 193 нм. Використовується в менш сучасних технологіях та для створення допоміжних шарів в EUV технологіях. Аналогічна стандартній фотолітографії.

Порівняльна характеристика технологій наведена в табл.1.2.

Методи нанорозмірної літографії

Характеристика	DUV (Deep Ultraviolet)	EUV (Extreme Ultraviolet)
Довжина хвилі	248 нм (KrF)/193 нм (ArF)	13,5 нм
Оптика	Лінзи зі спеціального скла	Дзеркала (лінз немає)
Середовище	Повітря або азот	Надвисокий вакуум
Мінімальний розмір	Біля 40...50 нм	Біля 13...16 нм
Multi-patterning	Обов'язковий для розмірів менше 10 нм	Здебільшого не потрібен
Фоторезисти	Полімерний, підсилений солями (сульфонієвими чи йодонієвими)	Metal Oxide Resists. Оксиди: HfO_2 , ZrO_2 , SnO_x
Маски	Склянні Cr	Багатошарові Mo/Si
Кількість масок	Дуже багато	Значно менше
Точність overlay	Складна через багато проходів	Вища (менше шарів)
Продуктивність	Висока і стабільна	Нижча, але зростає
Вартість обладнання	Десятки млн. доларів	150...250 млн. доларів
Складність інфраструктури	Висока	Надзвичайно висока
Споживання енергії	0,13 МВт (для NTX:2050Di)	1,31 МВт (для NXE:3400C)
Продуктивність	296 пластин за годину	136 пластин за годину
Енергозатрати на одну пластину	0,45 кВт·год	9,64 кВт·год
Multi-patterning (мультипаттернінг) – це технологія, яка дозволяє друкувати нанoelementи мікросхем, розділяючи один топологічний шар на кілька окремих масок та експозицій.		
EUV-фотон не просто збуджує молекулу, а іонізує матеріал, генерує вторинні електрони, запускає каскад випадкових подій. Тому головна проблема EUV– стохастичні дефекти, а не оптична роздільна здатність.		

Виробники обладнання: Нідерландська компанія ASML В одній EUV-машині ASML понад 700 000 деталей і компонентів від десятків постачальників – від Zeiss (оптика) до Trumpf (лазери). Ціна однієї такої технологічної установки може досягати 250 мільйонів доларів.

Технологіями виробництва фоторезисту для виготовлення елементів розміром 3...5 нм володіє лише Японія. Компанії: Tokyo Electron (TEL), SCREEN Semiconductor, TOK (Tokyo Ohka Kogyo).

Нанoeлектронні прилади можна також виготовляти методами молекулярно променевої епітаксії та скануючого мікроскопа.

Найвищу якість осаджених плівок забезпечує поатомне осадження (рис.1.14). Така технологія реалізується з допомогою наступної установки: металічна голка з радіусом кривизни порядку 0,3 нм стабілізується системою керування над електропровідною поверхнею і може переміщатися п'єзоприводом за заданим законом у трьох взаємно ортогональних напрямках. При різниці потенціалів між голкою та поверхнею 10 В при зазорі 0,1 нм напруженість поля складає 10 МВ/м. В таких умовах відбувається масо перенос атомів з голки на підкладку.

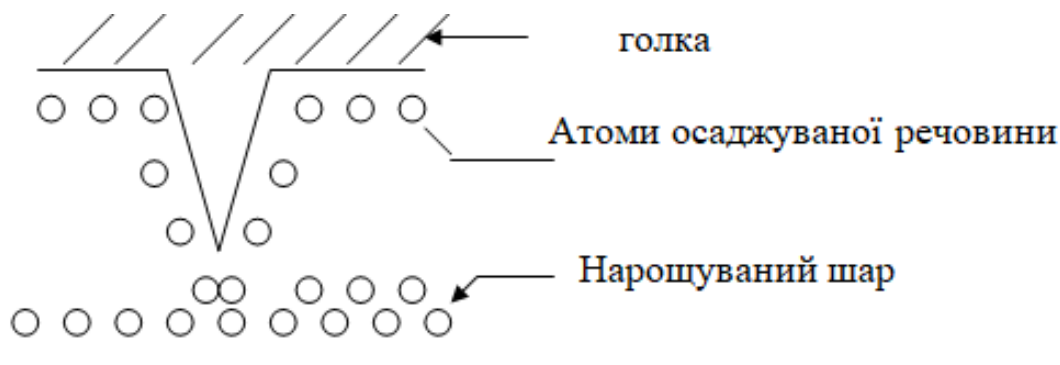


Рис.1.14. Поатомне осадження наноплівки

Такий спосіб може створювати елементи з товщиною до 0,005 нм по вертикалі та 0,1...0,2 нм по горизонталі.

1.9. Травлення

Травлення – це видалення поверхневого шару кристалу немеханічним способом. Види травлення є такі: хімічне, іонне, плазмохімічне та реактивно-іонне.

Хімічне травлення – хімічна реакція рідкого травника з утворенням розчинних з'єднань, які видаляються з зони травлення травником.

Хімічне травлення в залежності від виду дії травника на кристал діляться на ізотропне (травлення в усіх напрямках з однаковою швидкістю) та анізотропне (травлення, в якому швидкість хімічної реакції залежить від кристалографічних осей кристалу).

Хімічне травлення забезпечує високу точність, значно більшу ніж при механічному видаленні, тому що травиться один мономолекулярний шар за іншим. Товщина шару, що видаляється, точно регулюється концентрацією, часом та температурою травника (вибирають оптимальну швидкість травлення близьку до 0,1 мкм/хв).

Для збільшення швидкості травлення можна використовувати потік травника, який омиває поверхню травлення свіжим травником, барботаж (подача повітряних бульбашок в розчин травника, теж для швидкого видалення відходів реакції) та ультразвукову ванну.

Для зміни рельєфу поверхні кристалу використовують локальне травлення, через маску з захисного резисту.

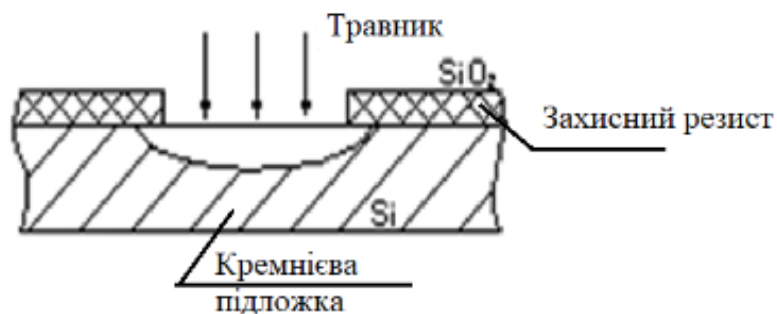


Рис.1.15. Локальне травлення

Головний недолік хімічного травлення – підтравлення, яке сягає в сторону стільки ж як і вглибину.

Різновидом хімічного травлення є **електрохімічне травлення**, яке проходить з протіканням струму через рідину. Тому не всі речовини можуть

травитися цим методом. Швидкість травлення регулюється струмом. Без струму немає травлення.

Для очистки поверхні кристалу а також травлення є сухі види травлення.

Іонне травлення полягає в бомбардуванні основи іонами інертних газів, що викликає розпилення поверхневих шарів разом з залишковим забрудненням. Воно в основному використовується для очистки поверхні кристалів.

Пластина кремнію розміщується в вакуумі. Недалеко від неї створюється тліючий розряд. На пластину подають (відносно квазінейтральної електронно-іонної плазми) негативний потенціал ($2...3$ кВ). Вакуум $80 \cdot 10^{-7} \dots 1,3 \cdot 10^{-9}$ Па;

Робочі температури для Si $1003...1373$ К ($700...1000$ °С), для Ge $733...1023$ К ($500...800$ °С), для GaAs $733...823$ К ($500...600$ °С). Іонне травлення не має підтравлення, воно універсальне, але із-за необхідності в високому вакуумі потребує дорогого обладнання.

Плазмохімічне травлення відбувається завдяки хімічній взаємодії матеріалу основи з радикалами активних газів. Продукти травлення летючі і видаляються вакуумним насосом, що підтримує необхідний тиск в установці травлення.

Коефіцієнт анізотропії при плазмохімічному травленні $k_a = V_{\text{верт}} / V_{\text{гориз}} \approx 5$, де $V_{\text{верт}}$ – швидкість травлення по вертикалі, $V_{\text{гориз}}$ – швидкість травлення по горизонталі.

Іонно-плазмове травлення може проводитись і в високочастотній плазмі. Це – **реактивно-іонне травлення**. Воно характеризується високим значенням $k_a \approx 100$. Швидкість сухих видів травлення залежить від матеріалу, що травиться та режимів утворення плазми і лежить в межах $0,2...5$ нм/с.

1.10. Легування

Легування – це процес введення в пластину напівпровідних домішок, які змінюють його електро-фізичні властивості при високій температурі (для Si –

1000...1200°С). Одним із основних способів поверхневого легування монокристалічних матеріалів у твердій фазі є дифузія.

Дифузія – це перенесення нейтральних атомів речовини, спричинений тепловим хаотичним рухом, що виникає при наявності градієнта концентрації даної речовини в середовищі.

Суть методу дифузії полягає в тому, що нейтральну домішку приводять в зіткнення з поверхнею монокристалічної пластини, нагрітої до 500...1200°С. При цьому атоми домішки проникають в середину пластини і заміщують атоми монокристалу, які залишили свої місця.

Закони дифузії підпорядковані законам Фіка:

1-ий закон Фіка – характеризує швидкість проникнення атомів домішок в речовину при постійному в часі потоці цих атомів та незмінному градієнті їх концентрації. Якщо глибина дифузії значно менша поперечних розмірів площі кристалу, то вважають, що дифузія іде в одному напрямку.

Одномірне рівняння Фіка:

$$j = -D \frac{dN}{dx},$$

де j – густина потоку, число атомів речовини, що переносяться в одиницю часу через одиничну площу; D – коефіцієнт дифузії; $\frac{dN}{dx}$ – градієнт концентрації дифундуючої домішки в напрямку дифузії.

2-ий закон Фіка – визначає швидкість розчинення домішків в будь-якій площині, перпендикулярній напрямку дифузії.

$$\frac{dN}{dx} = D \frac{d^2 N}{dx^2}$$

В реальних умовах товщина пластини d в багато разів більша ніж глибина проникнення дифузанта, тобто $N(\infty, t) = 0$.

Може бути два випадки джерела дифузії:

1. Необмежене джерело домішок:

$$N(0, t) = N_s = \text{const};$$

2. Обмежене джерело домішок:

$$\int_0^{\infty} N(x) dx = Q = \text{const},$$

коли в тонкий поверхневий шар вводять Q домішок, а потім приток дифузанта відсутній і він перерозподіляється по глибині пластини.

В першому випадку розподіл концентрації домішок $N(x, t)$ по глибині дифузійного шару x для довільного часу t описується виразом:

$$N(x, t) = N_s \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right),$$

де N_s – поверхнева концентрація домішок; erfc – функція доповнення інтегралу помилок до одиниці, дуже близька до експоненціальної функції виду e^{-z} .

Розподіл домішок для необмеженого джерела наведено на рис.1.16, на якому L_N – глибина дифузії, при якій $N=N_0$; N_0 – концентрація вихідної домішки.

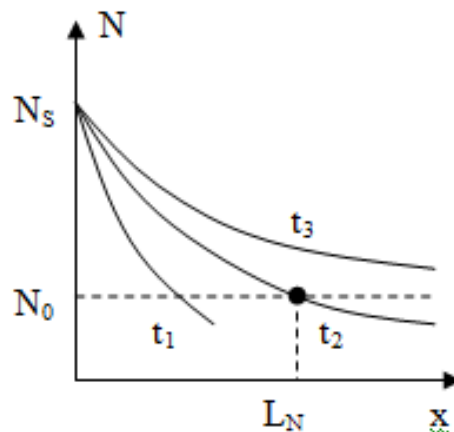


Рис.1.16. Розподіл домішок для необмеженого джерела (етап загонки)

Для необмеженого джерела домішки

$$L_N = 2\sqrt{Dt} \ln \frac{N_s}{N_0}.$$

Цей етап при дифузії називається етапом загонки домішок (в поверхні є надлишок дифузанта).

Наступним етапом дифузії є етап загонки (рис.1.17). Для нього

$$N(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi} \sqrt{Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}} - \text{функція Гауса}, \quad L_N = 2\sqrt{Dt} \ln \frac{Q}{N_0 \sqrt{\pi Dt}} - \text{глибина дифузії.}$$

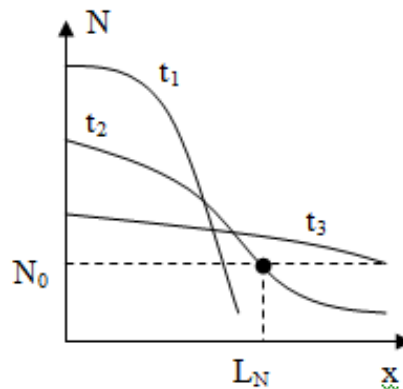


Рис.1.17. Розподіл домішок для обмеженого джерела (етап розгонки)

Дифузія може бути або загальною (рис.1.18) або локальною через маску (рис.1.19).

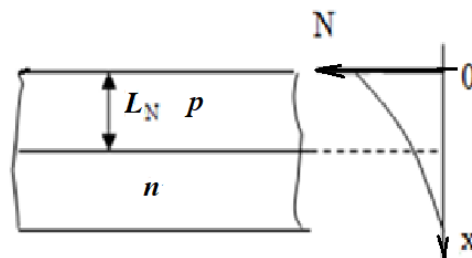


Рис.1.18. Загальна дифузія

Загальна дифузія – по всій поверхні утворюється тонкий шар з необхідним розподілом домішок по глибині.

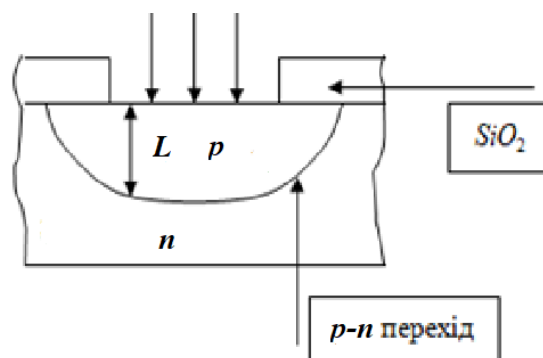


Рис.1.19. Локальна дифузія

Локальна дифузія – дифузія через вікно в глибину пластини та під маску (бокова дифузія). Бокова дифузія складає 0,7L.

Дифузія в залежності скільки разів її проводять може бути однократною чи багатократною. Концентрація кожної нової домішки повинна перевищувати концентрацію попередньої. Інакше не створиться *p-n* перехід.

Таблиця 1.3

Типи дифузантив

Дифузанти	<i>p</i> -провідність	<i>n</i> -провідність
Рідкі	BBr_3	$POCl_3$
Тверді	B_2O_3	P_2O_5
Газоподібні	B_2H_6	PH_3

Дифузію виконують в дифузійних печах, які забезпечують високу точність підтримання температури, контроль складу атмосфери в ході процесу, необхідне дозування домішок.

Є два способи проведення дифузії:

1. Метод закритої труби (рис.1.20), при якому пластини напівпровідника та джерело домішок загрузають в контейнер, з якого откачують повітря, герметизують та розміщують в печі.

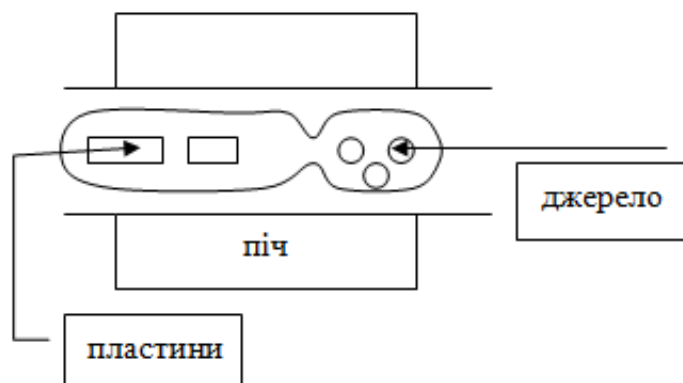


Рис.1.20. Метод закритої труби

Його переваги це висока повторюваність параметрів та придатність для летючих домішків. Недолік – складність використання, підготовки та відкачки скляних ампул.

2. Метод відкритої труби показаний на рис.1.21.

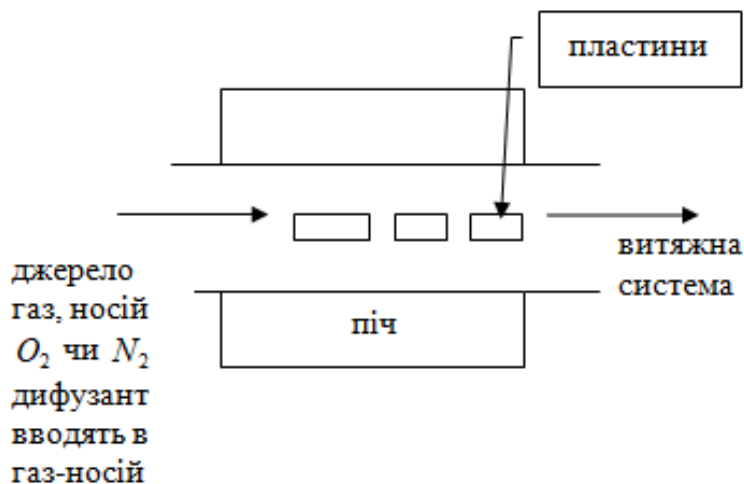


Рис.1.21. Метод відкритої труби

Глибина дифузійних шарів складає 1...4 мкм.

Можливе введення домішок іонно-променевою дифузією, яка дозволяє здійснювати безпосереднє введення домішок речовини в кристалічну решітку.

Іонне легування – це процес легування матеріалів, що ґрунтується на введенні високоенергетичних іонів в приповерхневий шар матеріалу з метою зміни типу та рівня електричної провідності, створення необхідного профілю розподілу домішки. Іонне легування проводять в вакуумі при відносно низькій (до 600°C) температурі у пристроях іонного введення (за допомогою дугового розряду чи високочастотного розпилення).

Параметри плівок залежать від маси іонів домішок (P^+ , As^+ , B^+ та інші) та прискорюючої напруги (енергії 10...300 кеВ).

Іони фокусують у промінь з густиною струму до $0,1\text{ мА/мм}^2$ і спрямовують на поверхню пластини. Система керування забезпечує сканування променя. Це дає змогу опромінювати всю поверхню пластини. Локальне легування виконують через маску SiO_2 або Si_3N_4 завтовшки 0,5 мкм.

Іонний промінь, спрямований перпендикулярно до поверхні, має мале бічне розсіювання, що дає змогу створювати області з субмікронними горизонтальними розмірами завглибшки менш ніж 0,1 мкм з високою повторюваністю.

Після легування проводять відпалювання при температурах 500...800 °С для упорядкування кристалічної решітки кремнію і для зняття активізації – переміщення легованих іонів в вузли кристалічної решітки.

Таким чином перевагами іонного легування є:

- можливість локального сканування;
- можливість отримання зверхтонких шарів (до 0,1 мкм);
- відсутність бокової дифузії;
- добре контролювання параметрів.

1.11. Збірка мікросхем

Складається з слідуєчи етапів:

- розріз пластини на кристали – скрайбування;
- монтаж кристалів в корпус;
- паяння сплавами Au-Ge або Au-Si ($t_{\text{плав}}=356..370^{\circ}\text{C}$);
- вклеювання допускає демонтаж кристалів і компонентів;
- мікро контактування (під'єднання контактних пластин кристалу до виводів корпусу).

Паяння – використовується під час монтажу без корпусних ІМС, та інших приладів під час збірки ПС та збірок.

Термокомпресійне зварювання – з'єднання у твердій фазі металів, або металу та н/п під дією тиску та температури (200...300 °С). Золотий мікродріт (діаметром 30 та 50 мкм) між Al площинами кристалу та корпусу.

Ультразвукове мікрозварювання – з'єднання металів у твердій фазі збудженням у з'єднуваних деталях пружних ультразвукових коливань при одночасному створенні тиску .

Для виводів використовують дроти з алюмінію чи золота. Товщина дроту 30 мкм.

Корпусування – це закривання мікросхеми кришкою шляхом гарячої чи холодної зварки в вакуумі або середовищі інертного газу. Зараз використовують опресування в пластик.

1.12. Основа напівпровідникової мікросхеми

ІМС використовують провідні та непровідні основи.

Провідні – монокристалічний кремній в вигляді пластин (діаметром 60...150 мм, та товщиною $h = 250...400$ мкм)

Вони можуть бути наступних видів:

- одношарова – основний матеріал кремній (легований чи нелегований);
- двошарова кремнієва епітаксіальна пластина (питомий опір 0,15...5 Ом·см) (рис.1.22) чи структура з трьох шарів (рис.1.23).

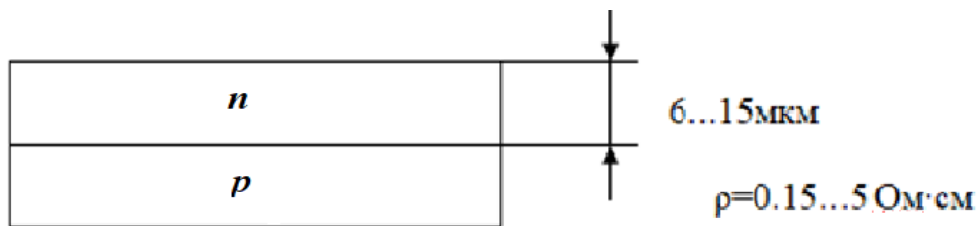


Рис.1.22.Двошарова пластина

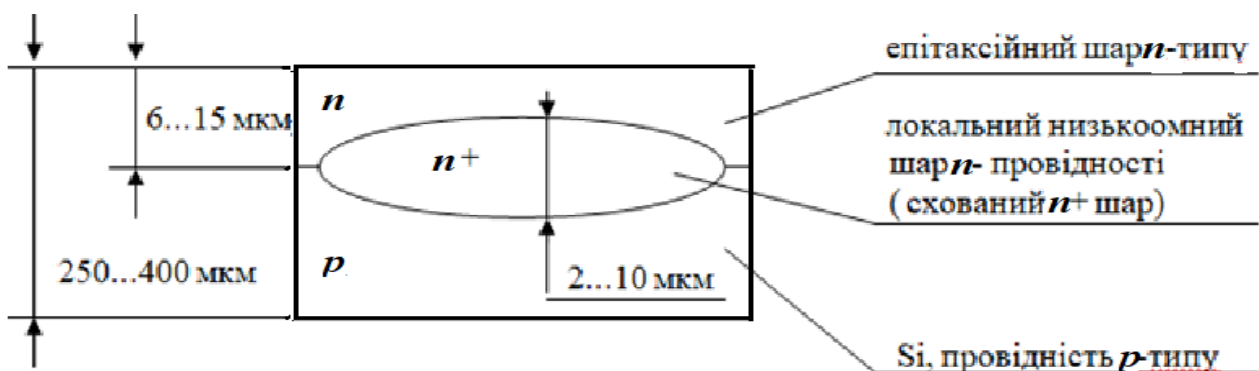


Рис.1.23.Тришарова епітаксійна структура

Поверхневий опір схованого шару для n^+ - шару складає $R_s = 15...50$ Ом/□.

Крім кремнієвих пластин використовують пластини з арсеніду галію, який дозволяє працювати при більш високих температурах, та завдяки підвищеній рухливості електронів дозволяє виготовляти інтегральні схеми з високою швидкістю.

Непровідні основи зменшують паразитний зв'язок між елементами мікросхеми. Непровідні основи діляться на основи наступної структури:

– кремній на діелектриці (області монокристалічного кремнію розміщені на всій поверхні діелектрику);

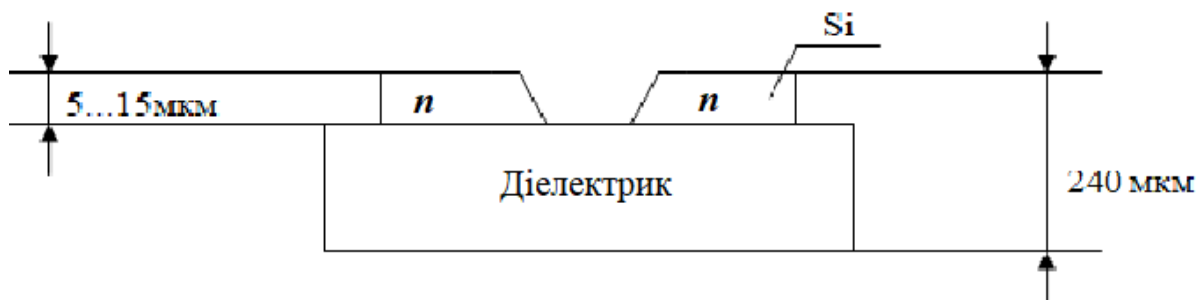


Рис.1.24. Структура кремній на діелектриці

– кремній в діелектрику (області кремнію знаходяться в кишнях):

- а) з схованим шаром;
- б) без схованого шару.

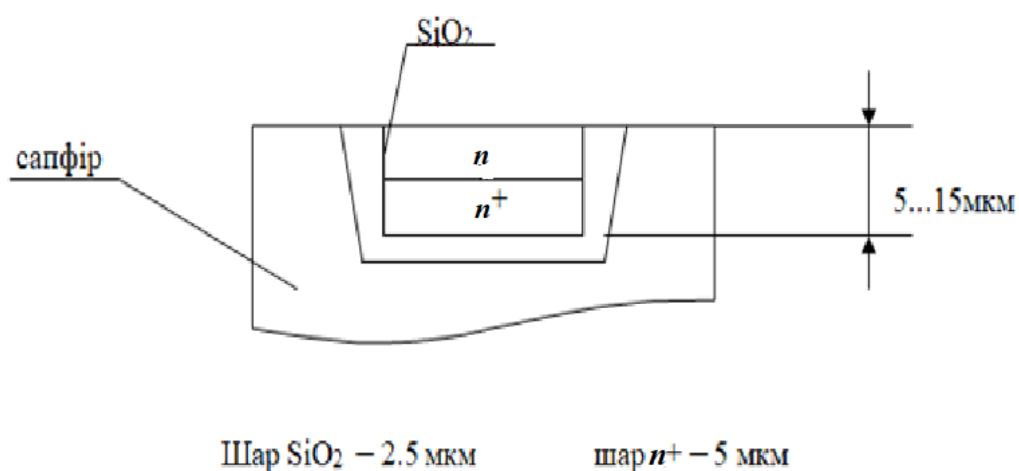


Рис.1.25. Структура кремній в діелектрику

Області НП з різною провідністю створюються легуванням процесом введення в пластину напівпровідних домішок, які змінюють його електрофізичні властивості при високій температурі (для кремнію 1000...1200 °C).

1.13. Контрольні запитання

1. В чому полягають переваги мікроелектроніки?
2. Дайте визначення інтегральної мікросхеми.
3. Що таке типові технологічні процеси?
4. Які типові технологічні процеси Ви знаєте?
5. Як формуються основи для ІС?
6. Якими способами можна нанести діелектричні плівки?
7. Назвіть операції процесу фотолітографії.
8. Які методи отримання субмікронних розмірів Ви знаєте?
9. Чому виникає підтравлення при виготовленні металічних плівок?
10. В чому полягає сутність процесу дифузії?
11. Які типи основ (підложок) Ви знаєте?

2. ЕЛЕМЕНТИ ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ

2.1. Біполярні транзистори в ІС

Біполярний транзистор є основним елементом інтегральних схем.

Особливостями виготовлення біполярних транзисторів є планарність конструкції (основний метод виготовлення – епітаксійно-планарна технологія) та наявність додаткових областей (кишень), які ізолюють біполярні транзистори від спільної напівпровідникової основи.

Кишені створюються за допомогою:

- а) зворотно-зміщеного p - n переходу;
- б) діелектричної ізоляції;
- в) комбінованої ізоляції.

1. Кишеня зі зворотно-зміщеним переходом (рис.2.1).

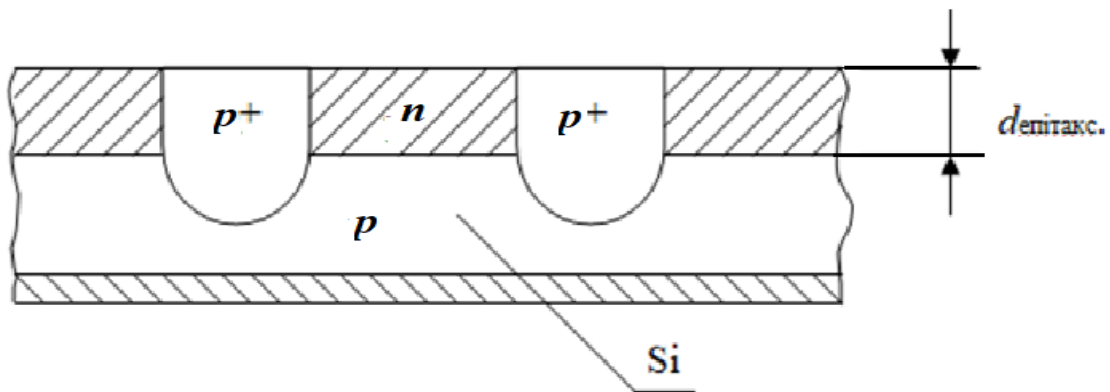


Рис.2.1. Ізоляція кишені створена за допомогою зворотно-зміщеного переходу

Основа p -типу провідності, зверху вирощено епітаксійний шар n -типу провідності. Дифузією бору на глибину, що перевищує товщину епітаксійного шару, формують області p^+ типу, які охоплюють область n , в якій буде формуватися транзистор. Ця область називається **кишенею**. Для того, щоб ізоляційний перехід був зворотно-зміщеним, на основу сформовано електрод, на який подається зворотна напруга джерела живлення.

Переваги: технологічна простота та спільні технологічні процеси.

Недоліки: наявність струмів витоку в зворотно-зміщеному переході, залежність цього струму від температури, велика площа ізолюючих областей.

2. Кишеня з діелектричної ізоляції (рис.2.2).

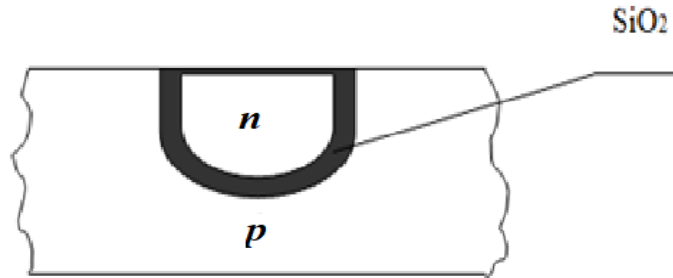


Рис.2.2. Ізоляція кишені за допомогою діелектричної ізоляції

Перевагами є менші струми витоку та паразитна ємність, висока радіаційна стійкість.

Недоліками – складність технології.

3. Кишеня з комбінованою ізоляцією (рис.2.3).

Горизонтальний напрям ізоляції забезпечується за допомогою діелектрика, а вертикальний за допомогою p-n-переходу.

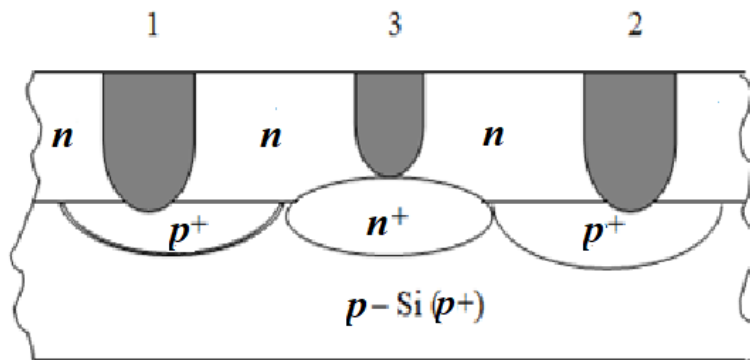


Рис.2.3. Кишеня створена за допомогою комбінованої ізоляції

Області 1 та 2 – ізоляція між елементами, 3 – ізоляція між колектором та базою, 4 – прихований n^+ шар, який утворюється локальною дифузією миш'яку чи сурми, та призначений для підвищення якості ізоляції.

2.2. *n-p-n* транзистори в ІМС

Розглянемо епітаксійно-планарний транзистор з ізолюваним *n-p*-переходом. Це структура вертикального транзистора (рис.2.4).

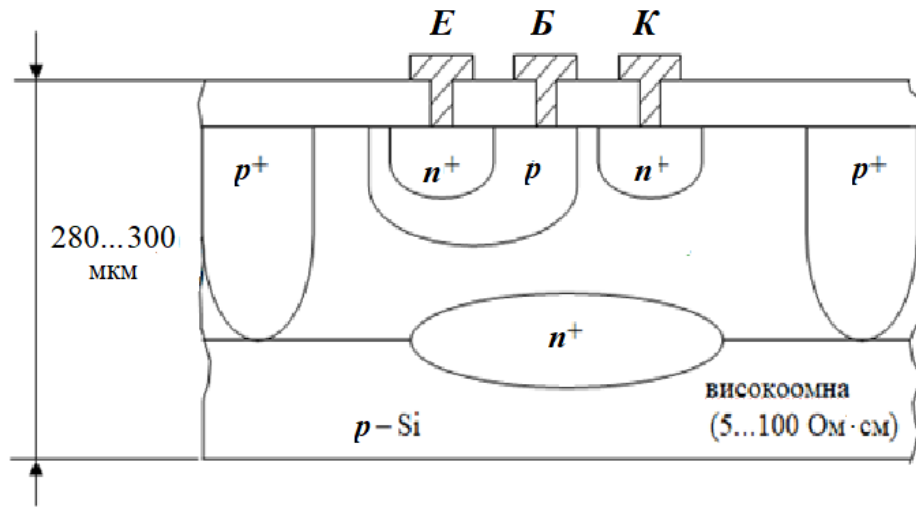


Рис.2.4. Епітаксійно-планарний транзистор з ізолюваним *n-p*-переходом

1. *n* - епітаксійний шар $h=10$ мкм, $\rho=0.5...1.0$ Ом·см;
2. *n+* - прихований шар – миш'як, локальна дифузія перед нарощуванням епітаксійного шару;
3. *p+* - ізолюючі області. Бор В, через маску SiO_2 , дифузія;
4. *p* – база, бор на глибину 2...3 мкм;
5. *n+* - емітер, *n+* - колектор – фосфор Р. Глибина переходу 1.5...2 мкм;
6. металізація – Al (напилення).

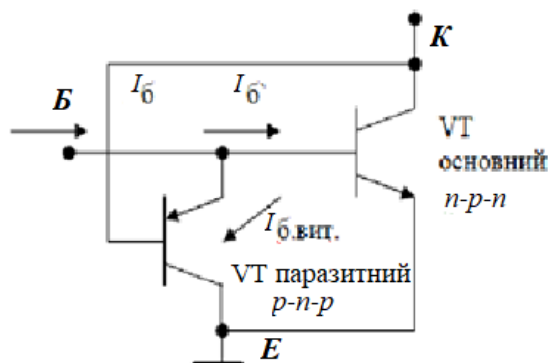


Рис.2.5. Утворення паразитного транзистора

Ізолюючий перехід (межі кишені) завжди зміщений в зворотному напрямі. Для цього на вивід основи p -НП подається мінус. Утворюється паразитний транзистор (рис.2.5).

Його колекторний перехід завжди зміщений в зворотному напрямі. Активний режим основного транзистора $VT_{осн.}$ відповідає режиму відсічки паразитного $VT_{пар.}$. Режим насичення $VT_{осн.}$ відповідає активному режиму $VT_{пар.}$

$$I_{\beta} = I_{\beta} - I_{\beta.вит}$$

Транзистори виготовлені за епітаксійно-планарною технологією мають наступні характеристики:

$$U_{к.е.доп} = 40...50 \text{ В}$$

$$\beta = 100$$

$$U_{е.б.доп} = 7...8 \text{ В}$$

$$f_{гр} = 200...500 \text{ МГц}$$

Біполярні транзистори з діелектричною ізоляцією

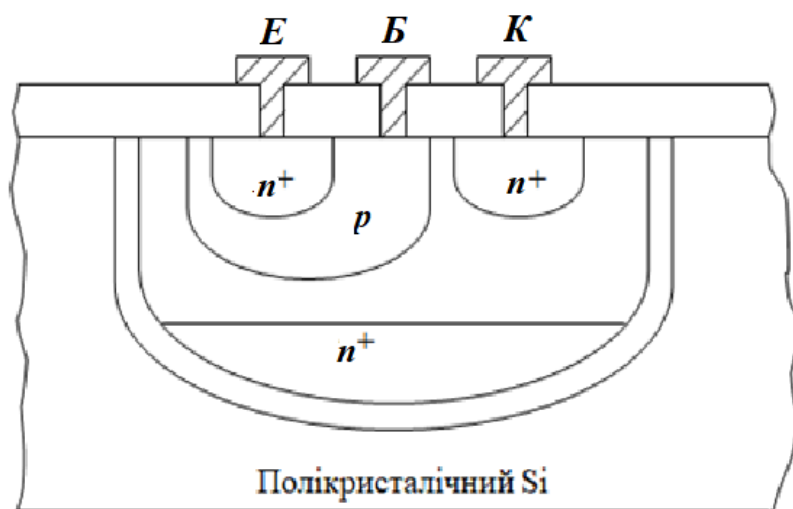


Рис.2.6. Структура БТ з діелектричною ізоляцією кишені

Основа – полікристалічний Si, кишеню утворено тонким шаром SiO_2 . Якість ізоляції повинна бути дуже високою.

Недоліки: складність технології та малий ступінь інтеграції.

Переваги: підвищена радіаційна стійкість.

Біполярні транзистори з комбінованою ізоляцією (ізопланарні)

Технологія виготовлення ізопланарних транзисторів полягає в наступному:

1. На високоомному p - Si формується прихований n^+ - шар.
2. Нарощується епітаксійний шар 1...3 мкм.
3. Через маску з нітриду кремнію травлення епітаксійного шару.
4. Проводиться іонне легування шару p^+ .
5. Окислення кремнію в витравлених лунках.
6. Видалення Si_3N_4 .
7. Вирощування шарів SiO_2 .
8. Дифузія p -бази (дифузанти – бор).
9. Дифузія фосфору в областях n^+ емітера та бази.
10. Нарощування шару SiO_2 .
11. Виготовлення вікон для виводів.
12. Напилення шару алюмінію.

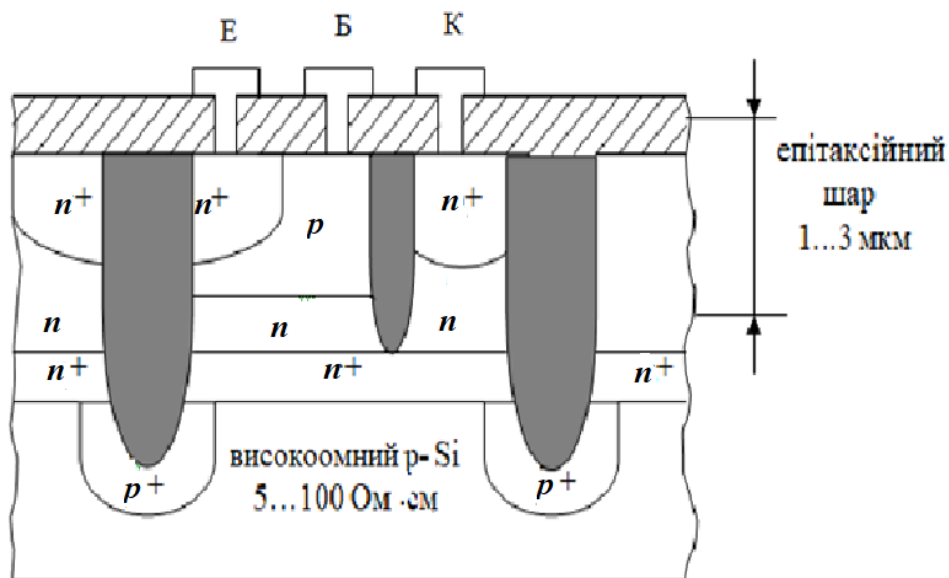


Рис.2.7. Структура ізопланарного БТ

Переваги:

- площа транзистора на порядок менша, ніж в планарноепітаксійній структурі.
- має кращі частотні та імпульсні характеристики.

Використовується для виготовлення елементів БІС та НБІС.

Роль протиканальних областей p^+ . На межі Si-SiO₂ існує нерухомий позитивний поверхневий заряд, під дією якого в основі p - формується канал n - типу між шарами n^+ та n^+ . Для його знищення формують шар p^+ .

Основні параметри:

Площа транзистора – 200...500 мкм².

Товщини шарів структури транзистора: епітаксійний шар – 1...2 мкм, база – 0.1...0.2 мкм, емітер – 0.2...0.4 мкм.

$U_{к.е.доп} = 15...30$ В, $\beta = 50...150$, $U_{е.б.доп} = 4...7$ В, $f_{гр} = 2...4$ ГГц.

Багатоемітерні транзистори (БЕТ)

Багатоемітерні транзистори широко використовуються в логічних мікросхемах. БЕТ являє собою сукупність декількох n - p - n транзисторів. Така структура має спільну базу та колектор. Кількість емітерів 5...8. Активні базові області, які знаходяться під емітерними переходами, об'єднуються між собою за допомогою пасивної області бази.

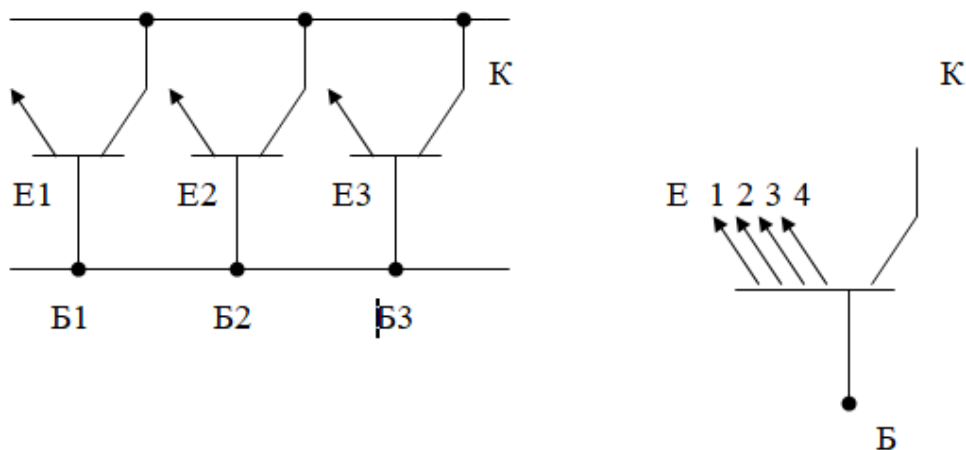


Рис.2.8. Структура ізопланарного БТ

Використовуються в мікросхемах транзисторно-транзисторної (ТТЛ) логіки.

Багатоколекторні транзистори

В цих транзисторах колекторну область розділяють на декілька частин, для кожної з яких робиться окремий вивід.

Це практично багатоемітерні транзистори, що використовуються в інверсному режимі: спільний емітер – епітаксійний шар; колектори n^+ - області.

Використовуються в елементах емітерно-інжекційної логіки.

Торцові транзистори (вертикальні)

В цих конструкціях використовується структура кремній в сапфірі (рис.2.9). Характеризуються малими ємностями p - n переходів.

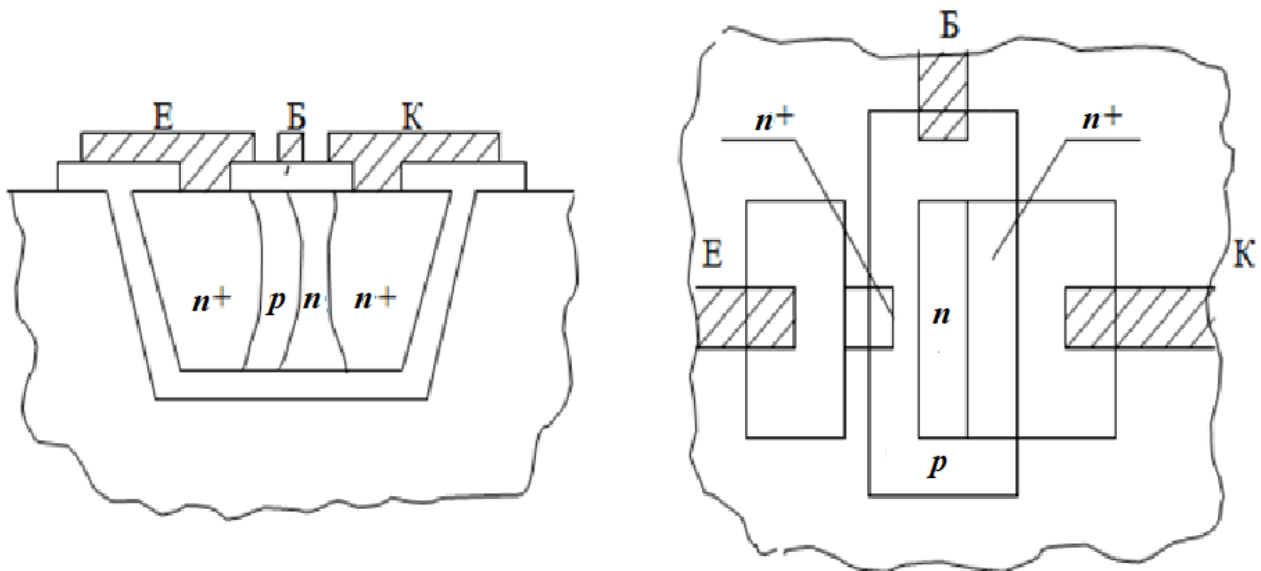


Рис.2.9. Структура торцового БТ

Мають вертикальне розміщення p - n переходів, в кишнях монокристалічного кремнію. $C_{\text{пер}} = 0,001 \dots 0,01$ пФ.

Транзистори з діодами Шоттки

Транзистори з діодами Шоттки виготовляються для підвищення швидкодії цифрових ІМС. Схема ввімкнення діода Шоттки наведена на рис.2.10.

Структура БТ з діодом Шотткі наведена на рис.2.11. Випрямляючі властивості в такій структурі має контакт метал – високоомний НП n - типу.

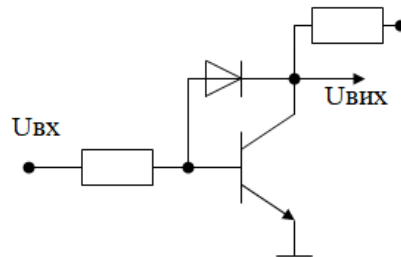


Рис.2.10. Схема БТ з діодами Шотткі

Переваги: сумісність технології їх виготовлення зі всіма відомими технологічними методами виготовлення біполярних мікросхем, малі розміри активних областей, простота управління параметрами, шляхом вибору типу металу та режиму його нанесення, можливість одержання різних сполучень схемних елементів.

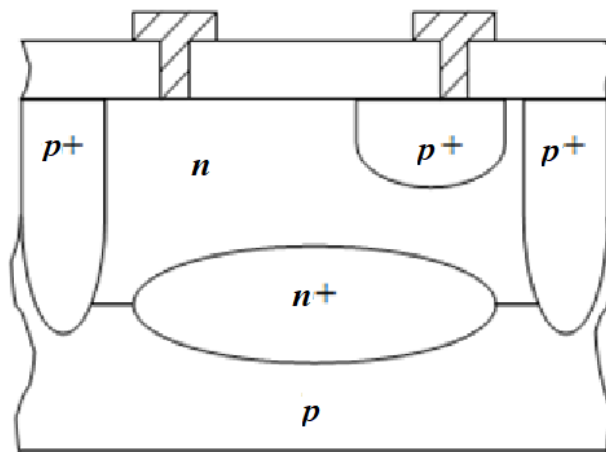


Рис.2.11. Структура БТ з діодом Шотткі

Використовують такі транзистори в цифрових елементах ТТЛШ логіки.

2.3. Транзистори *p-n-p* типу

Підложковий

В ньому як колектор використовується матеріал напівпровідникової пластини, база – епітаксійний шар *n*-типу а емітер – одержують в процесі формування базових областей *p-n-p* транзисторів. Має низьке значення $f_{гр}$, та високий опір бази.

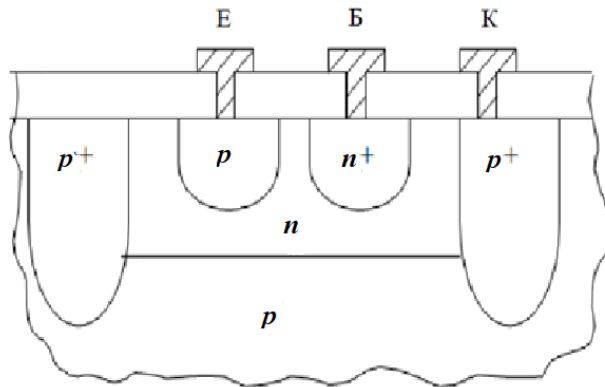


Рис.2.12. Підложковий БТ

БТ, виготовлений потрійною дифузією

Структура транзистора виготовленого за потрійною дифузією наведена на рис.2.13.

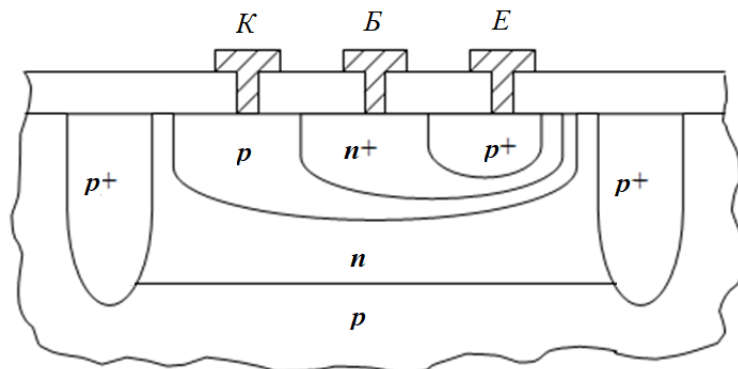


Рис.2.13. БТ виготовлений потрійною дифузією

До недоліків таких транзисторів можна віднести складність технологічного процесу. Тому вони при розробці інтегральних мікросхем широко не використовуються.

Горизонтальний (латеральний) транзистор $p-n-p$

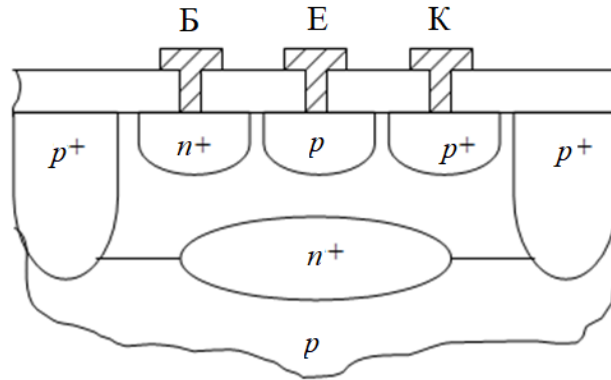


Рис.2.14. Горизонтальний БТ

Виготовляються одночасно з транзисторами $n-p-n$ типу по звичайній технології. В ньому робочі поверхні емітерного та колекторного переходів розміщені перпендикулярно до поверхні кристалу.

Параметри таких транзисторів наступні:

$$\beta = 20 \dots 30$$

$$f_{\text{гр}} = 200 \dots 500 \text{ МГц}$$

$$U_{\text{к.е.доп}} = 20 \dots 50 \text{ В}$$

2.4. Діодні структури інтегральних схем

Діоди в ІС одержують шляхом включення БТ в діодному режимі (рис.2.15).

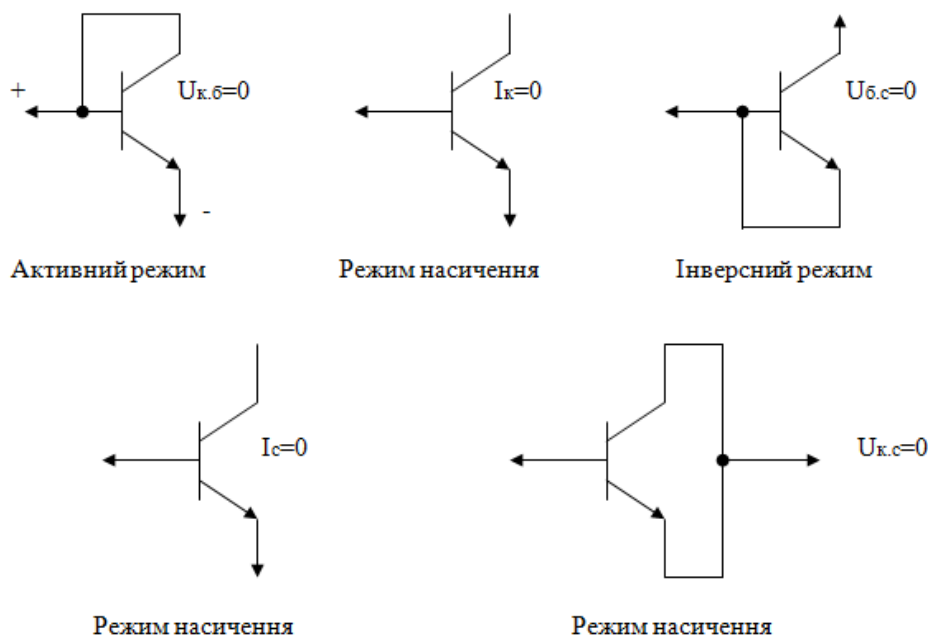


Рис.2.15. Діодні структури ІМС

2.5. Інтегральні резистори

В напівпровідникових інтегральних схемах виробництво пасивних елементів більш дорогий процес, ніж процес виробництва активних елементів.

Для пасивних елементів характерні значний температурний дрейф, велика похибка номінальних значень параметрів та обмежений діапазон значень номіналів.

Інтегральні резистори поділяються на дифузійні, ПНЧ-резистори (канальні), епітаксійні, іонно-леговані та тонкоплівкові.

1. Дифузійні резистори (рис.2.16).

Вони виготовляються одночасно з дифузією домішків, в процесі яких утворюються базові та емітерні області.

Опір резистора визначається виразом:

$$R = R_s \frac{L}{b};$$

де R_s – питомий поверхневий опір р-шару. $R_s = 100 \dots 300 \text{ Ом}/\square$, довжина L та ширина b резисторів обмежена: L – міліметри, $b = 10 \dots 20 \text{ мкм}$.

Максимальне значення опору, який можна створити для прямокутних резисторів – $R_{\max} \sim 20 \text{ кОм}$, для змійкових – $R_{\max}$ до 50 кОм .

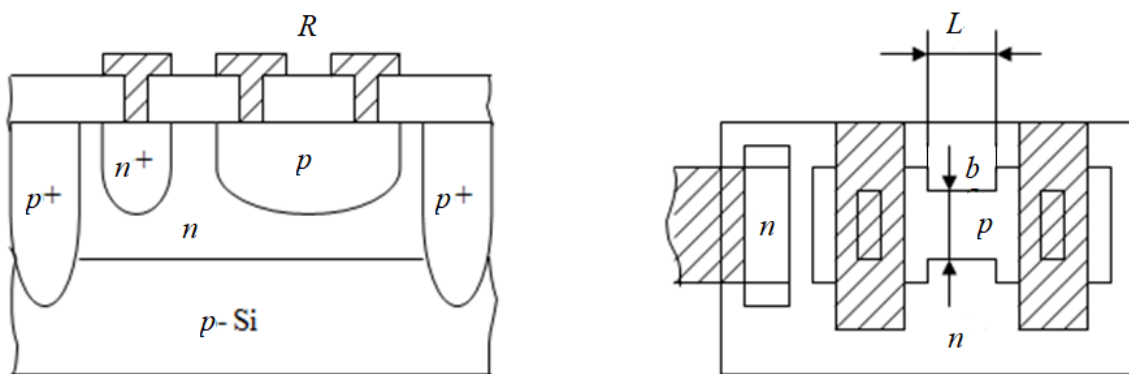


Рис.2.16.Дифузійні резистори

Параметри: Температурний коефіцієнт опору $\text{TKR} = 0.15 \dots 0.3\%$ на 1°C .

Розкид параметрів $\delta R = (15 \dots 20\%) R_{\text{номін}}$.

2.ПНЧ – резистори_(рис.2.17).

ПНЧ (канальні) – резистори використовуються для одержання резисторів з опором більше 50 кОм. Виготовляються на базі базового чи колекторного шару. Для них $R_s = 2...5 \text{ кОм}/\square$, тому що використовується слабологована область p -шару, $R_{\max}$ – від 50 до 300 кОм.

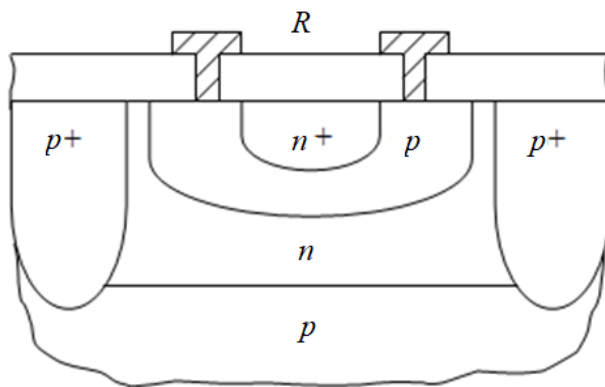
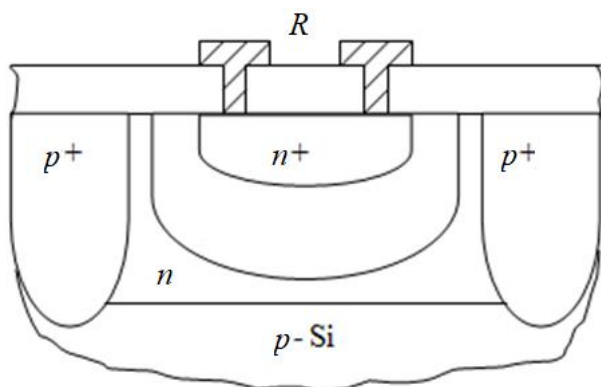


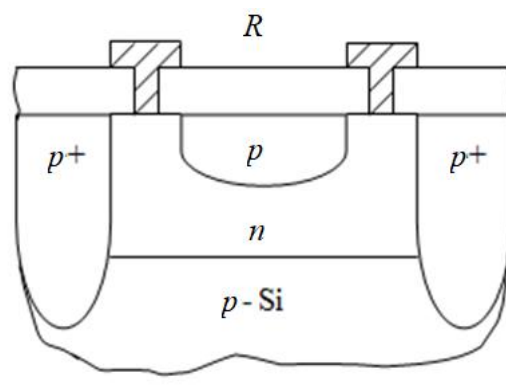
Рис.2.17. ПНЧ (канальні) резистори

До недоліків ПНЧ резисторів можна віднести великий розкид параметрів $\delta R = \text{до } 50\% R_{\text{ном}}$, поганий ТКР = $(0.3...0.5)\%/^{\circ}\text{C}$, низьку пробивну напругу в 5...7 В, як в емітерному переході.

3.Епітаксійні резистори (рис.2.18) використовують для одержання низькоомних резисторів (до 5 Ом). ТКР – 0.01...0.02%. Вони будуються в низькоомному емітерному шарі $R_s = 5...15 \text{ Ом}/\square$.



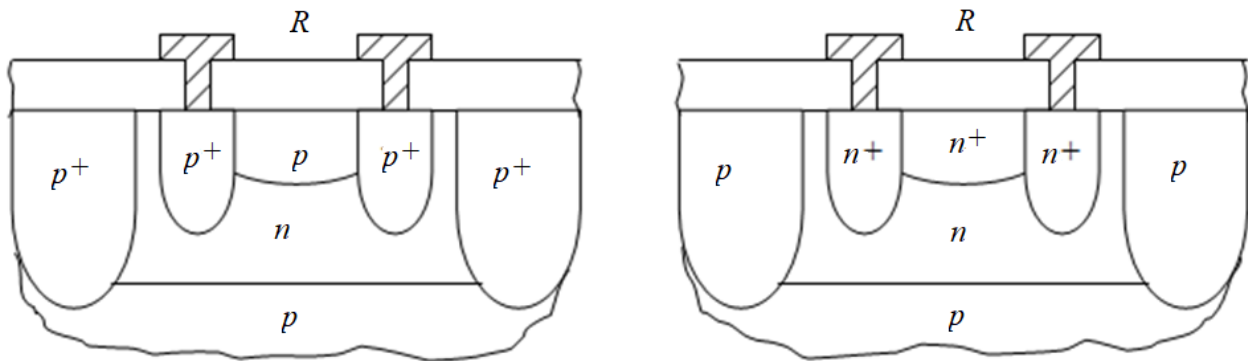
В емітерному шарі



В епітаксійно-колекторному шарі

Рис.2.18. Епітаксійні резистори

4.Іонно-леговані резистори (рис.2.19) – високоомні, займають малу площу на кристалі, їх одержують методами іонної імплантації.



З іонно-легованим p -шаром

З іонно-легованим n -шаром

Рис.2.19. Іонно-леговані резистори

Глибина імплантації $0.2...0.3$ мкм, питомий поверхневий опір $R_s = 10...20$ кОм/ $\square$, $R \approx 100$ кОм, $\delta R \sim 5...10\%$.

5.Тонкоплівкові резистори – аналогічні резисторам ГІС, але плівки наносяться на поверхню двоокису кремнію.

Виготовляються з танталу та кермету.

Потребують допоміжних технологічних операцій, але іноді при виробництві комбінованих мікросхем їх виготовлення економічно доцільне, тому що вони мають хороші електричні характеристики.

2.6. Конденсатори біполярних інтегральних схем

В ІС використовуються конденсатори виготовлені на основі зворотно зміщеного p - n переходу та тонкоплівкові, побудовані на використанні діелектричного матеріалу.

Перший тип конденсаторів формується одночасно з одержанням дифузійних областей транзисторних структур. Структура конденсатора на зворотно зміщеному переході наведена на рис.2.20.

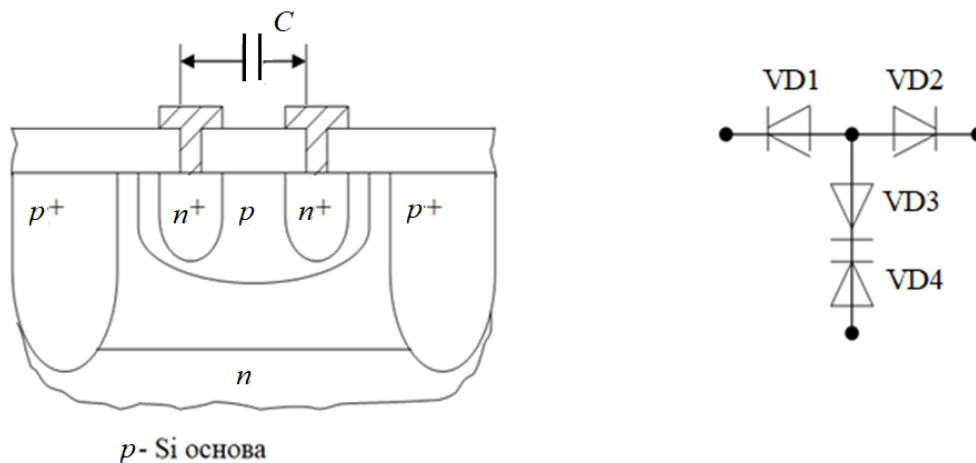


Рис.2.20. Конденсатори ІМС на основі p - n переходу

Максимальне значення C в межах 100...200 пФ, з допуском $\pm 20\%$. Ємності залежать від прикладеної напруги (табл.2.1).

Таблиця 2.1

Залежність бар'єрної ємності БТ від напруги

$U_{\text{звор}}$	$C_{01}=C_{\text{еб}}, \text{пФ/мм}^2$	$C_{02}=C_{\text{бк}}, \text{пФ/мм}^2$	$C_{03}=C_{\text{кп}}, \text{пФ/мм}^2$	$C_{04}=C_{\text{кп}}, (3\text{п-шар})$
0	1400	300	190	260
5	1000	120	60	90
10	----	90	40	55

Q

1...20

50...100

Використовуються в основному

2.7. Індуктивні елементи інтегральних схем

Індуктивні елементи інтегральних схем побудовані на схемотехнічній емітації на основі активних RC - кіл – **гіраторів** (рис.2.21), чотириполіусників що інвертують ємність в індуктивність. Транзистор включений в схему з СЕ та обхвачений зворотнім зв'язком, що дає фазовий зсув напруги на базі VT відносно колектора на -90 (град) . Колекторний струм в одній фазі з базовим струмом, тобто відстає від напруги, тобто опір $Z_{\text{вих}}$ носить індуктивний характер. $Q \approx 4$.

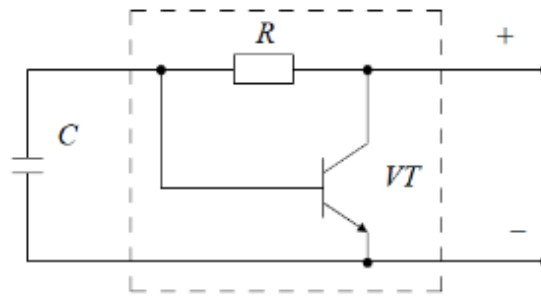


Рис.2.21. Схема гіратора

Недоліки гіраторів: мала добротність, необхідність введення додаткових елементів та допоміжних джерел живлення.

2.8. Метал-діелектрик-напівпровідникові транзистори ІМС

МДНП ІМС отримали широке розповсюдження в виробництві мікросхем з середнім та високим ступенем інтеграції (реєстри, лічильники суматори, постійні запам'ятовуючі пристрої (ПЗУ), оперативні ЗУ, мікропроцесори, АЦП, ЦАП та інші). Вони відносно прості в виготовленні, потребують менше операцій, дають високий відносно виходу справних елементів, не потребують додаткової ізоляції елементів в схемі, геометричні розміри таких транзисторів значно менші чим в біполярних транзисторах (БП). В основі їх виготовлення лежить планарна технологія.

Сучасні МДНП ІС транзистори в своєму складі мають біля 100 000 елементів.

МДНП ІС – це напівпровідникові, частіше всього кремнієві мікросхеми з заданим набором відповідно з'єднаних між собою активних та пасивних елементів зі структурами типу МДНП, Виготовлення яких простіше ніж виготовлення біполярних транзисторів. Технологія БТ приблизно на 30% складніша ніж технологія МДНП тому, що в ній набагато менше високотемпературних операцій.

В своєму складі МДНП ІС можуть мати активні біполярні транзистори.

Порівняльні характеристики БТ та МДНП ІМС наведені в табл.2.2.

Таблиця 2.2

Порівняльні характеристики БТ та МДНП ІМС

Площа (S) транзистора, мкм ²	260,0...380,0	13,0...25,0
Ступінь інтеграції	(2...5)10 ⁴	(1...5)10 ⁵
Частота, МГц	1...50	1...20
Потужність споживання, мВт	5...50	5
Затримка розповсюдження, нс	5...20	30
Кількість дифузій	3...4	1...3
Кількість фотолітографій	6...10	6...8

Малі розміри МДНП ІМС визначаються малою площею, яку займає одна МДНП структура, а також використанням МДНП структури як високоомних резисторів, замість великогабаритних дифузійних резисторів. Площа МДНП ІМС складає не більше 1/5 площі БП ІМС тієї ж складності.

Висока завадостійкість МДНП ІМС визначається високою пороговою напругою та напругою ввімкнення.

ІМС як підсилювальні елементи використовують польові транзистори (ПТ) з індуктивними каналами n-типу.

Структура n-канального ПТ із полікремнієвим заслоном та розділювальними областями створеними локальним оксидуванням показана на рис.2.22. м

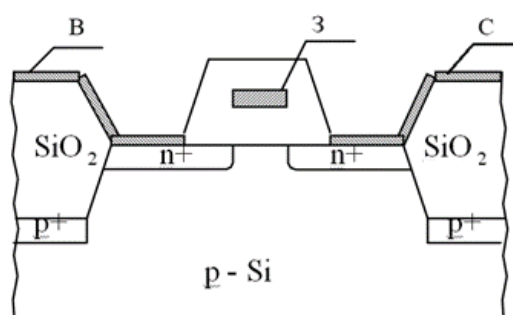


Рис.2.22. n-канальний ПТ

ПТ створюють в слабологованій основі p -типу. Іонним легуванням бором створюють протиканальні області p^+ типу. А після цього розподільчі області SiO_2 утворюють глибоким оксидування.

Ці області оточують ПТ з боків. Вони розділяють сусідні транзистори та запобігають створенню інверсних шарів n -типу під товстим оксидом, які могли б створити паразитний зв'язок між сусідніми ПТ.

Глибина областей стоку та витоку визначається необхідністю створення чітко окреслених p - n переходів та необхідністю одержання меншої глибини в порівнянні з довжиною каналу.

Довжина каналу в МДН транзисторах НВІС складає $0,2 \dots 1 \mu\text{м}$;

Найскладнішою операцією є виготовлення діелектричного шару під заслоном, який повинен мати високу електричну міцність та мінімальні значення заряду, що створюється під ним в напівпровіднику.

Товщина шару впливає на:

- пробивну напругу заслін-основа;
- крутість МДНП транзистора;
- порогову напругу.

При збільшенні товщини шару пробивна напруга росте, а крутість падає.

Товщина діелектрика складає $0,02 \dots 0,1 \mu\text{м}$, а товщина захисного шару близько $1 \mu\text{м}$.

Ізолюють заслін від каналу за допомогою діелектрика (транзистори МОН – оксид кремнію), нідрид кремнію або їх суміш (транзистори МДН).

Матеріалом заслону та між з'єднань використовують: полікремній, тугоплавкі матеріали та інші. Порогова напруга транзистора залежить від типу заслону.

Для зменшення розмірів та підвищення швидкодії розроблена технологія самосуміщення полікремнієвого заслону (рис.2.23).

В такій технології іонним легуванням миш'яку, без додаткової маски (як маску використовують розділювальні області SiO_2 та заслін, тобто діелектричний матеріал) формують витік та стік.

Принцип самосуміщення мінімізує перекриття заслону з областями стоку та витоку, що забезпечує зменшення ємностей зв'язку.

Одночасно легують заслін та полікремнієві провідники, зменшуючи їх опір. Товщина плівки при полікремнієвій технології $\leq 0,5\text{мкм}$. Їх використовують як провідні шини. Далі від них виводи роблять з алюмінію. Для цього з початку в розділювальних областях через маску Si_3N_4 здійснюють травлення кремнію, а після цього імплантації бору в область p^+ з наступним окисдуванням до створення плоскої поверхні. Решта операцій аналогічна, як і в попередньому випадку.

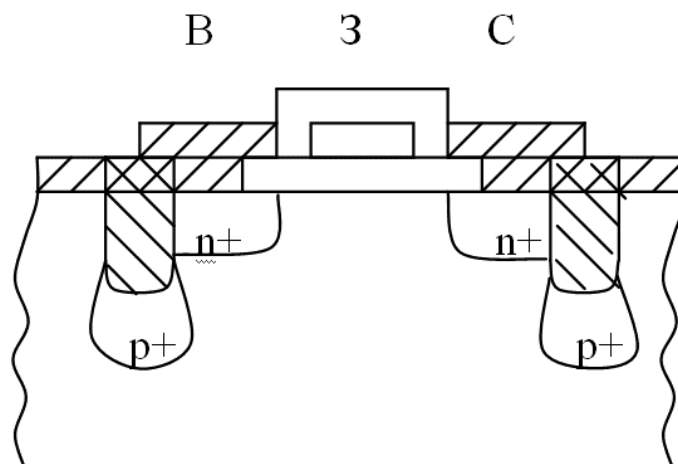


Рис.2.23. Полікремнієвий ПТ

Компліментарні КМОП-ключі, які поєднують n -канальний та p -канальний транзистори, зараз є базовим елементом сучасної цифрової мікроелектроніки.

Комплементарна ізопланарна структура n -типа (рис.2.24)

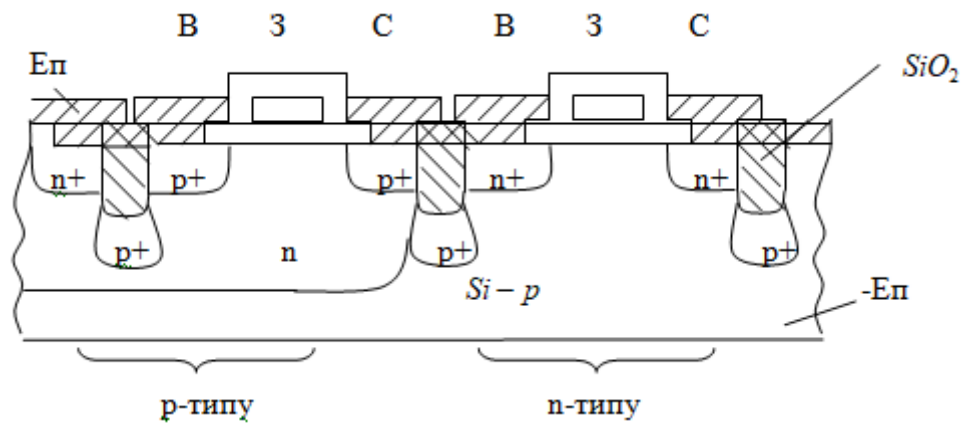


Рис.2.24. Комплементарна ізопланарна ІМС

Основа – кремній слабо легований р-типу. Транзистори розділені оксидними областями з розміщеними під ними протиканальними областями під час роботи падають плюс джерела живлення, а на основу мінус .

Модифікації МДНП транзисторів

1. ДМДНП транзистор – з коротким каналом. Для зменшення струмів витоку та збільшення швидкодії зменшують довжину каналу. Це зроблено в конструкції ДМДНП транзисторів (рис.2.25). Область p одержується за допомогою дифузії, а область n – методом іонного легування.

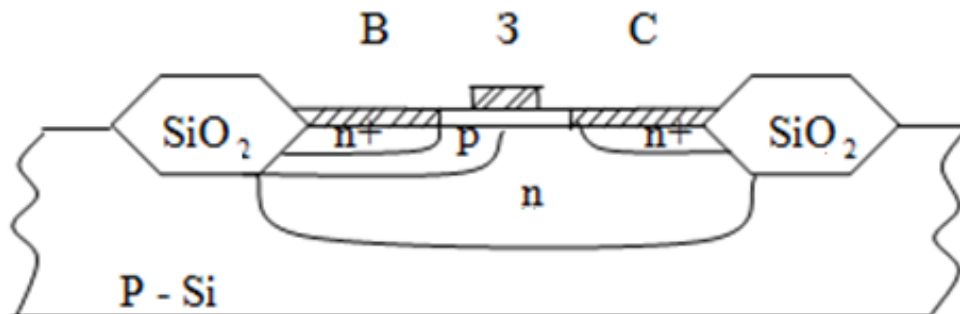


Рис.2.25. ДМДНП транзистор

3. VMДНП-транзистор – вертикальний транзистор (рис.2.26).

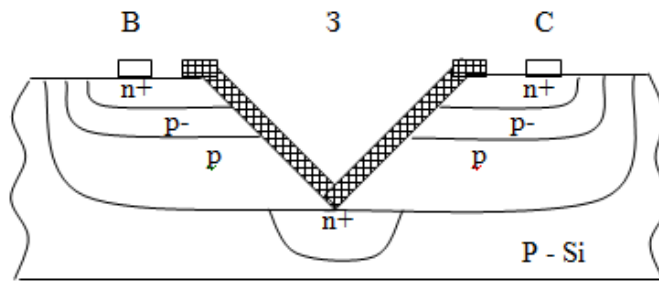


Рис.2.26. VMДНП транзистор

Переваги VMДНП це можливість створення потужних транзисторів та максимальне значення допустимої напруги між виток і стоком.

Структура кремній на сапфірі (КНС)

ПТ структури кремній на сапфірі формують на монокристалічній плівці (0,5-1мкм) p-Si, яка вирощена гетероепітаксією на сапфірі (рис.2.27). Локальним оксидуванням на всю глибину формують острівці кремнію, з яких утворюють ПТ. Зменшення ємності p-n-переходів підвищує швидкодію ІМС.

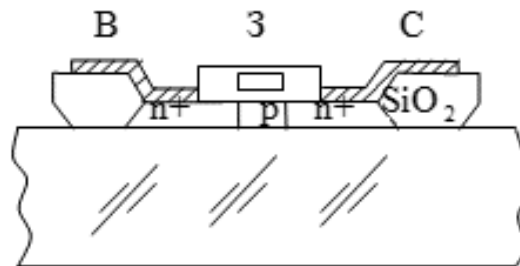


Рис.2.27. Транзистор структури кремній на сапфірі

Резистори в МДНП транзисторах виконують роль опору каналу, значення якого залежить від напруги на заслоні.

Конденсатори використовують виводи виток або стоку, над яким роблять шар діелектрику SiO_2 або $\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$. Верхню обкладинку роблять з алюмінію.

2.9. Контрольні запитання

1. Що таке кишень і для чого вона використовується?

2. Як працюють комбіновані кишень?
3. Як побудовано епітаксійно-планарний транзистор з ізольованим п-р-переходом?
4. Ізопланарні транзистори в ІМС.
5. Які конструкції транзисторів р-п-р типу в ІС Ви знаєте і чим вони відрізняються одна від одної?
6. Як створюються діодні елементи в ІС?
7. Які типи резисторів ІС Ви знаєте? Їх особливості.
8. Як створюються конденсатори в ІМС?
9. Чи виготовляють в ІМС індуктивні елементи?
10. Що таке гіратор?

3. СХЕМОТЕХНІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ІС

3.1. Особливості цифрових та аналогових ІС

Пристрій цифрового оброблення сигналів – це електронний пристрій, призначений для оброблення дискретних у часі та квантованих за рівнем сигналів.

Цифрові системи порівняно з аналоговими мають ряд переваг:

- вони економічні, стабільні,
- забезпечують високу заводостійкість та точність обробки,
- дають змогу реалізувати сьгодні алгоритми обробки інформації, реалізація яких в аналоговому вигляді зв'язані з суттєвими труднощами.

Головні недоліки наступні:

- для деяких застосувань вони більш повільні та дорогі, ніж аналогові,
- потребують досить високого рівня вхідного сигналу при попередньому перетворенні аналогового сигналу в цифровий.

Основою цифрової техніки є цифрові логічні елементи – пристрої, які виконують арифметичні та логічні операції над вхідними числами.

При всій великій кількості логічних операцій, які виконуються сучасними цифровими пристроями, в основі математичного опису їх роботи лежить алгебра логіки (Булева алгебра), в якій змінні та їх функції приймають лише два значення (0 та 1).

Над змінними можуть виконуватися три основні дії:

- логічне додавання (диз'юнкція),
- логічне заперечення (інверсія),
- логічне множення (кон'юнкція);

що відповідає логічним функціям (АБО, НЕ, та І).

Схемотехнічна реалізація логічних операцій проводиться за допомогою логічних елементів.

В залежності від технології виготовлення логічні ІМС поділяють на серії, які відрізняються одна від одної набором елементів, напругою живлення, потужністю, що споживається, та інше.

Існує багато різновидів логічних мікросхем. Найбільше розповсюдження отримали серії логічних ІМС виконані по:

- транзисторно-транзисторній логіці (ТТЛ);
- емітерно-зв'язаній логіці (ЕЗЛ);
- компліментарній МОНП логіці;

ТТЛ – як базовий елемент використовує багатоемітерний транзистор, який реалізує логічну функцію І.

Емітерно-зв'язана логіка – як базовий елемент використовує диференційний підсилювач. Число компонентів 10 ... 12 на один логічний елемент. Базовим є елемент АБО-НЕ.

Компліментарна металоокисна напівпровідникова логіка – КМОНП використовує як базовий елемент ключові схеми побудовані на компліментарних МОНП польових транзисторах (розглянемо в наступній лекції).

Цифрові логічні елементи – пристрої виконують арифметичні та логічні операції над вхідними числами.

В залежності від виду управляючих сигналів цифрові ІМС можна розділити на 3 групи: потенціальні, імпульсні та імпульсно-потенціальні.

Більшість логічних елементів відносяться до потенціальних, в них використовується лише потенціальні сигнали та не використовуються імпульсні. В імпульсних цифрових ІМС управління відбувається по перепаду потенціалу під час передачі імпульса. Можуть використовуватися як позитивні перепади так і негативні. В імпульсно-потенціальних ІМС використовують як потенціальні так і імпульсні сигнали.

Всі логічні елементи описуються набором параметрів, які обумовлені в технічних умовах. Всі параметри можна розділити на статичні та динамічні.

Розглянемо параметри, які є найбільш суттєвими для порівняльних характеристик.

Статичні параметри характеризують елементи в статичному режимі. До них належать:

- напруга джерела живлення $U_{д.ж.}$
- вхідна $U_{вх.}^0$ та вихідна $U_{вих.}^0$ напруги логічного нуля
- вхідна $U_{вх.}^1$ та вихідна $U_{вих.}^1$ напруги логічної одиниці
- вхідні ($I_{вх.}^0; I_{вх.}^1$), вихідні ($I_{вих.}^0; I_{вих.}^1$) струми логічного нуля та логічної одиниці
- $K_{об'єд.}$ – коефіцієнт об'єднання по входу, вказує кількість входів мікросхеми. Число входів лежить від 2 до 16. Якщо цієї кількості не достатньо, то для їх збільшення використовують інтегральні схеми розширювачів (позначаються ЛД).
- $K_{розг.}$ – коефіцієнт розгалудження по входу, він визначає число входів мікросхем-навантажень, які одночасно можна підключити до виходу даної мікросхеми. Характеризує навантажувальну здатність логічного елемента. В деяких випадках в ТУ указаний максимальний вихідний струм логічного елемента.
- $U_{завали}$ – допустима напруга статичної завади. Вона характеризує заводостійкість, здатність ІС протистояти дії сигналу, що заважає, тривалість якого значно більша від часу перемикання ІС, тобто дії паразитних ємностей, індуктивностей та електро-магнітних полів.
- $P_{сер.}$ – середня потужність споживання:

$$P_{сер.} = \frac{(P_{сп.}^0 + P_{сп.}^1)}{2};$$

де $P_{сп.}^0; P_{сп.}^1$ - потужності споживання в стані логічної 1 чи 0 на виході.

За потужністю ІМС можна поділити на потужні ($30 \text{ мВт} < P_{\text{сп.сер.}} < 300 \text{ мВт}$), малопотужні ($0.3 \text{ мВт} < P_{\text{сп.сер.}} < 3 \text{ мВт}$), мікропотужні ($1 \text{ мкВт} < P_{\text{сп.сер.}} < 300 \text{ мкВт}$) та нановатні ($P_{\text{сп.сер.}} < 1 \text{ мкВт}$).

Динамічні параметри характеризують ІС в режимі перемикання.

До них відносяться час переходу із стану логічного нуля в стан логічної одиниці. $t_{\text{затр.}}^{0,1}$ (затримка переднього фронту), час переходу зі стану логічної одиниці в стан логічного нуля. $t_{\text{затр.}}^{1,0}$ (затримка заднього фронту), час затримки розповсюдження сигналу $t_{\text{затр.}}$.

3.2. Базові елементи логіки

Транзисторно-транзисторна логіка (ТТЛ), як базовий елемент використовує багатоемітерний транзистор, який реалізує логічну функцію І.

Спрощена схема логічного елементу І–НЕ ТТЛ приведена на рис.3.1.

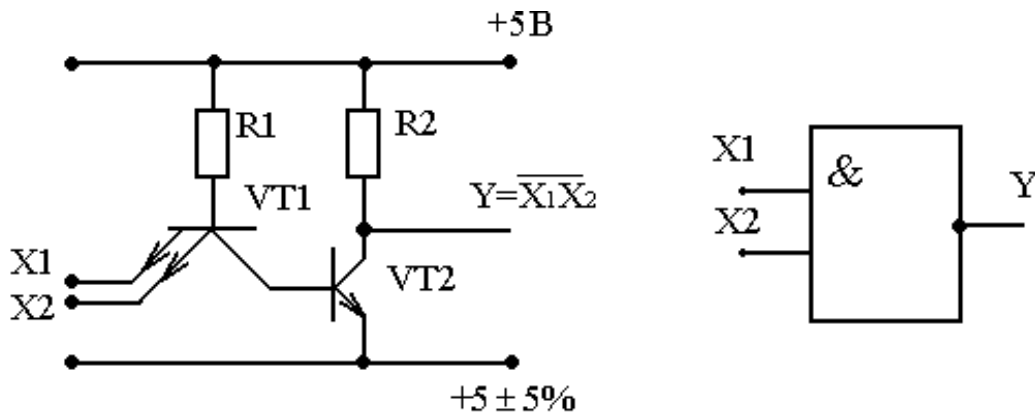


Рис.3.1. Схема логічного елементу І–НЕ

Напруга живлення складає +5 В. Рівень логічного нуля менше 0,4 В а логічної одиниці більше 2,4 В. Час затримки розповсюдження на 1 елемент – $t_{\text{зтр}} \approx 10 \text{ нс}$. Коефіцієнт розгалудження по входу – $K_p \approx 10$.

На рис.3.1 показана перша версія ТТЛ – логіки. В наступних використовується складний інвертор з двополярним ключем. І для виключення

насичення БЕТ використовуються діоди Шоткі з малим падінням напруги в прямому ввімкненні.

Число компонентів в логічному елементі на два входи лежить в межах 1...12.

Схема споживає потужність на один елемент близько $P_{\text{спожив}} \approx 10$ мВт.

Таблиця 3.1.

Основні параметри ІМС ТТЛ

Серія	Аналог	$P_{\text{спожив.}}$ мВт	Затримка розповсюдження, нс	Максимальна частота, МГц	Коефіцієнт розгалуження
74	155	10	10	35	10
74L	158	1	33	3	10
74H	131	22	6	50	10
74LS	555	2	9,5	45	20
74S	531	19	3,0	125	10
74ALS	KP1533	1	4,0	50	40
74F	KP1531	4	2,0	130	33

Промисловість використовує ряд мікросхем, які відрізняються одна від одної:

- споживною потужністю: від 22 мВт – 131 до 1 мВт – KP1533;
- часом затримки сигналу: від 2 нс – KP1531 до 33 нс – 158;
- максимальною частотою: від 3 МГц – K158 до 125 МГц – 531;
- коефіцієнтом розгалуження: від 10 – 155 до 40 – KP1533.

Емітерно-зв’язана логіка (ЕЗЛ) – як базовий елемент використовує диференційний підсилювач. Число компонентів 10 ... 12 на один логічний елемент. Початковий елемент АБО – НЕ. Спрощена схема показана на рис.3.2.

Це швидкодіючі мікросхеми з малим часом розповсюдження.

Висока бистродія обумовлена роботою транзисторів в лінійному режимі і має низькі значення логічних рівней. Рівень логічного нуля – -1,63 В а логічної одиниці – - 0,98 В.

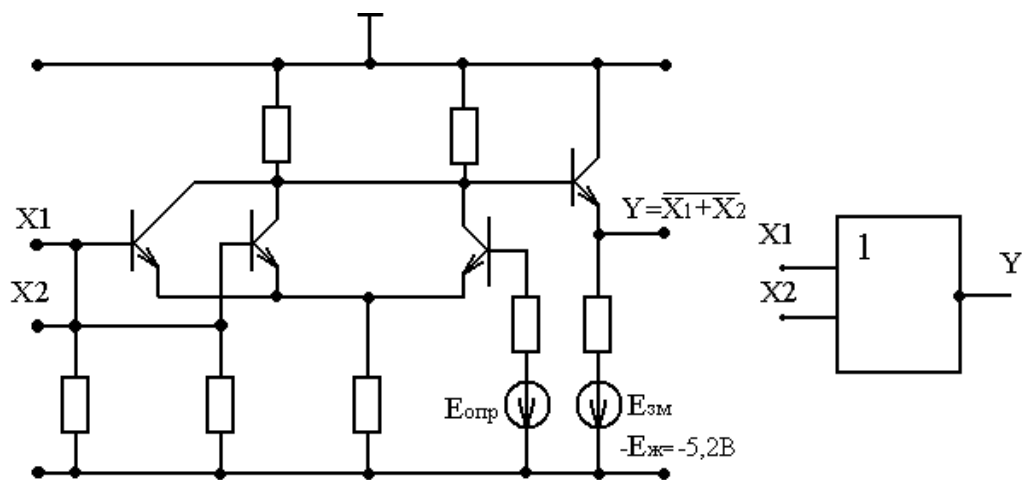


Рис.3.2. Базовий елемент ЕЗЛ

Першим розробником цих мікросхем була фірма Motorola, яка випускає серії ІМС, що наведені в табл.3.2.

Таблица 3.2

Характеристики мікросхем ЕЗЛ

Серія	Аналог	$P_{\text{спожив}}, \text{ мВт}$	$t_{\text{затриман}}, \text{ нс}$	$K_{\text{розгалудж}}$	$U_{\text{живлення}}, \text{ В}$
МС10000, МС10к	100,500	35	2,9	15	-5,2
МС100000 МС100к	1500	40	0,75	20	-4,5

Основними перевагами ЕЗЛ є простота схемної реалізації, висока технологічність, мала вартість, висока бистродія, висока стабільність параметрів, висока навантажувальна здатність, широкий функціональний набір. Недоліками є підвищена потужність споживання та середня заводоздатність.

Компліментарна металоокисна напівпровідникова логіка – КМОНП використовує як базовий елемент ключові схеми побудовані на компліментарних МОНП транзисторах. Схема логічного елементу І – НЕ (рис.3.3), що виконана по технології КМОНП.

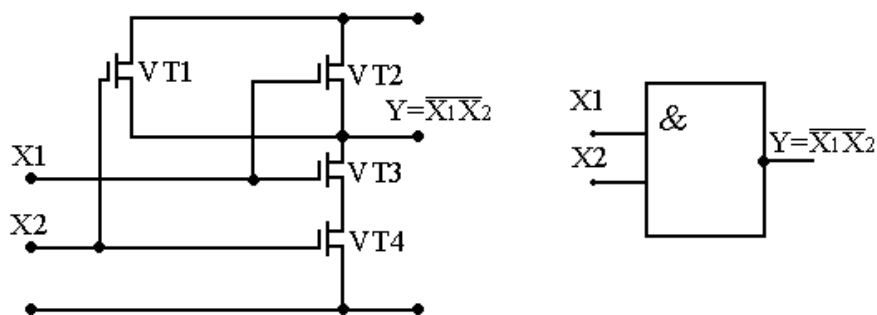


Рис.3.3. Базовий елемент КМОНП логіки

Основні параметри КМОНП логіки наведені в табл.3.3 та табл.3.4.

Таблица 3.3

Параметри КМОНП логіки

Серія	Аналог	Уживл.,В	Фірма
CD4000	164,176	9	RCA
CD4000A	561,564	3 ... 15	RCA
MCI4000A	—	—	Motorola
CD4000B	KP1561	3 ... 18	PCA
54HC	1564	2 ... 6	Texas Instruments

Використання польових транзисторів з ізольованим затвором забезпечує високий вхідний опір. Крім того вони мають малу вхідну ємність. Це визиває високу чутливість до статистичної електрики. При напрузі на затворі $U_z > 30\text{В}$ VT пробивається. Тому такі мікросхеми потрібно захищати від статичної електрики.

Напруга живлення таких мікросхем лежать в межах від 3 до 18В. Рівень логічної одиниці складає 0,8 від напруги живлення. Рівень логічного нуля лежить в межах 0,3...2,5 В.

Перевагами ІМС КМОНП в порівнянні з ТТЛ є мала споживча потужність в діапазоні частот до 2МГц ($< 1\text{мкВт}$), широкий діапазон напруг живлення, високий вхідний опір ($> 1\text{МОм}$) та велика навантажувальна здатність ($K_{розг} > 50$).

Недоліками є велика затримка сигналу при розповсюдженні до 100нс, підвищений вихідний опір (до 1 кОм) та значний розкид параметрів.

Логічні елементи – є базовими елементами цифрової техніки. На їх основі розроблені мікросхеми середнього та високого рівня інтеграції.

Це – тригери, лічильники імпульсів, шифратори та дешифратори, мультиплексори та демультимплексори, цифрові запам'ятовувальні пристрої, аналого-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі.

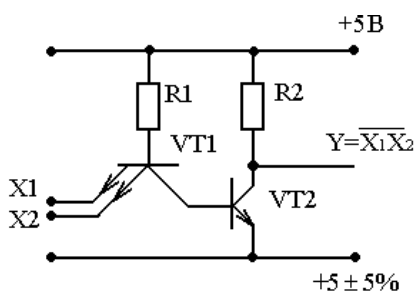
Принцип побудови цифрових пристроїв та їх схемотехнічна реалізація вивчається в дисципліні «Цифрова обробка сигналів».

Таблиця.3.4

Основні параметри ІМС КМОП

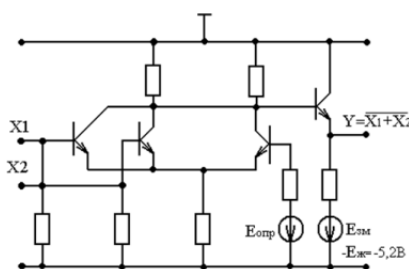
Серія	Рспож., мкВт	Затримка розповсюдження, нс	Максимальна частота, МГц	Коефіцієнт розгалуження
CD4000	30	200	5	50
CD4000A	50	100	5	50
CD4000B	100	30	10	100
54НС	100	10	50	50

Базові схемотехнічні рішення приведені нижче.



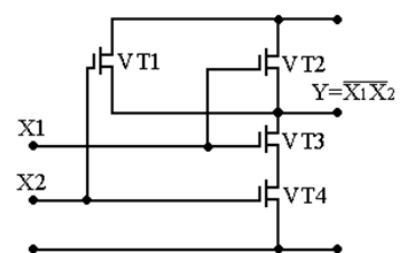
Базовий елемент І-НЕ

Напруга живлення $E_{ж} = +5$ В.
Рівень логічного нуля менше 0,4 В а логічної одиниці більше 2,4 В.



Базовий елемент АБО-НЕ

Напруга $E_{ж} = -5$ В
Рівень логічного нуля – -1,63 В а логічної одиниці – - 0,98 В.



Базовий елемент І-НЕ

Напруга $E_{ж} = 3 \dots 18$ В
Рівень логічної одиниці – 0,8 від напруги живлення.
Рівень логічного нуля лежить в межах 0,3...2,5 В.

Хоча цифрові системи і мають ряд переваг без аналогових схем поки що обійтися не можливо, тому що цифрові схеми для деяких застосувань більш повільні та дорогі та потребують досить високого рівня вхідного сигналу при перетворенні аналогового сигналу в цифровий.

3.3. Аналогові ІС

Аналогові мікросхеми призначені для обробки сигналів, що змінюються по закону неперервної функції, причому вихідна інформація аналогічна з вхідним сигналом.

Інтегральні мікросхеми розділені на підгрупи по виконанню різних функцій (підсилювачі, генератори та ін.). В кожній з них ІМС поділяється за характером виконуваної функції (підсилювачі проміжної частоти, фільтри низької частоти).

Розробка та виготовлення мікросхем проводиться серіями. Серія складається із ІМС, що виконують різні функції, але мають єдине конструктивно-технологічне виконання та призначення для спільного використання. ІС, яка має конкретне функціональне призначення та умовне позначення, що називається типоміналом. Типомінальне позначення ІМС можна подивитися в [6].

Операційні підсилювачі

Основою аналогових ІС є операційні підсилювачі. **Операційним підсилювачем (ОП)** називається підсилювач напруги, який призначений для виконання різних операцій з аналоговими сигналами (підсилення чи ослаблення, складання чи віднімання, інтегрування чи диференціювання, перетворення форми та інше). Всі ці операції ОП виконуються за допомогою позитивного та негативного зворотного зв'язку.

Оскільки операції прецизійні, то ОП повинен мати нормовану похибку, а це вимагає деяких конкретних технічних характеристик.

Ідеальний ОП характеризується наступними параметрами:

- вихідний опір ОП повинен бути безмежним, тобто вхідний струм дорівнює нулю;
- вихідний опір – рівний нулю, тобто навантаження не повинно впливати на вихідну напругу;
- частотний діапазон – від постійної напруги до НВЧ;
- коефіцієнт підсилення повинен бути безмежним.

Умовне схемотехнічне позначення диференційного операційного підсилювача зображене на рис.3.4. Воно аналогічне позначенням стандартних інтегральних схем: прямокутник без додаткових полів або з додатковими полями (рис.3.4 а). ОП також зображують у формі трикутника (рис.3.4 б). На рис.3.4 в, рис.3.4 г та рис.3.4 д показані умовні зображення одноканальних, дво і чотирьохканальних ОП, що зустрічаються в іноземній літературі.

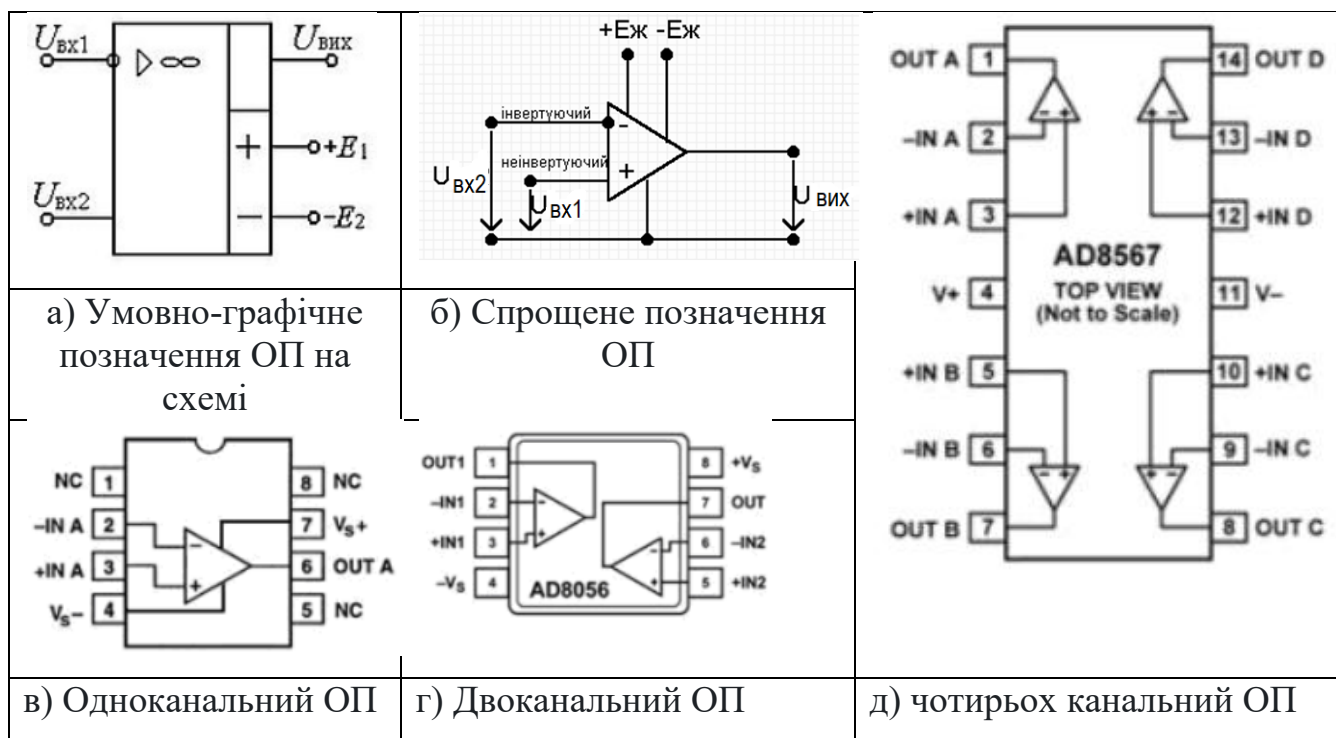


Рис.3.4.Умовне позначення ОП

Такий підсилювач має два входи інвертуючий (вхід при поданні напруги на який змінюється полярність вихідної напруги) та неінвертуючий (не змінює полярності вихідної напруги).

Для живлення на ОП подають частіше всього двополярну напругу $+E_{ж}$ та $-E_{ж}$. За звичай $|+E_{ж}| = |-E_{ж}|$. Вихідна напруга для диференційного підсилювача визначається як:

$$U_{ВИХ} = (U_{ВХ1} - U_{ВХ2})K_U.$$

Якщо один з двох входів ОП з'єднати з спільним, то отримуємо (рис.3.5):

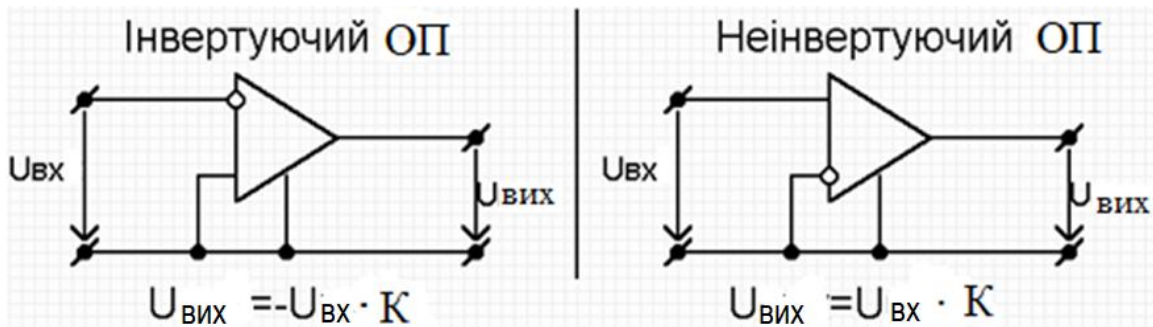


Рис.3.5.Інвертуючий та неінвертуючий операційні підсилювачі

Якщо обидва входи з'єднані разом (рис.3.6), то джерело схеми мають лише один вхід, а прикладений до неї сигнал називається синфазним.

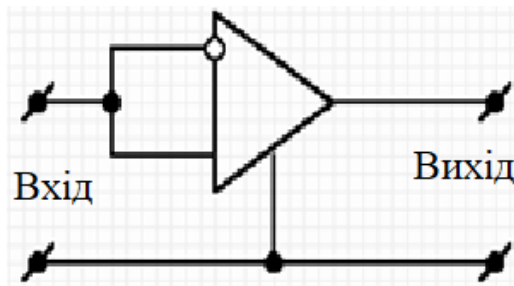


Рис.3.6.Синфазне ввімкнення ОП

Для такого підсилювача $U_{ef} = U_{вх1} = U_{вх2}$ теоретично $U_{ВИХ} = 0$, але насправді є деяке значення $U_{ВИХ}$, але воно мале.

Схеми заміщення ідеального та реального операційних підсилювачів показана на рис.3.7 та рис.3.8.

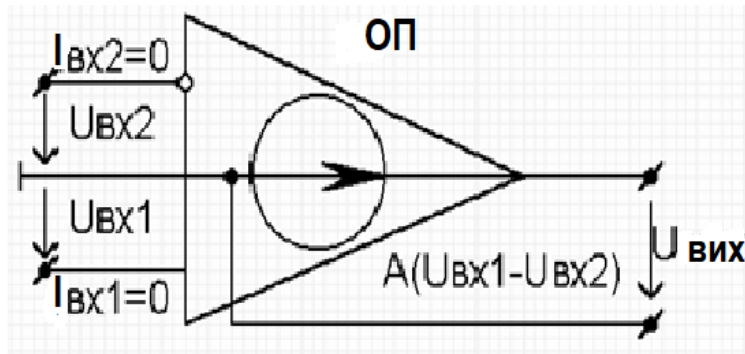


Рис.3.7.Схема заміщення ідеального операційного підсилювача

Для такої схеми $R_{BX1} = \infty$, $R_{BX2} = \infty$, $R_{ВИХ} = 0$.

Якщо врахувати реальні властивості підсилювача, то схема буде трохи іншою (рис.3.8).

Така схема включає в себе джерела входних струмів i_{BX-} ; i_{BX+} , вхідний та вихідний опіри.

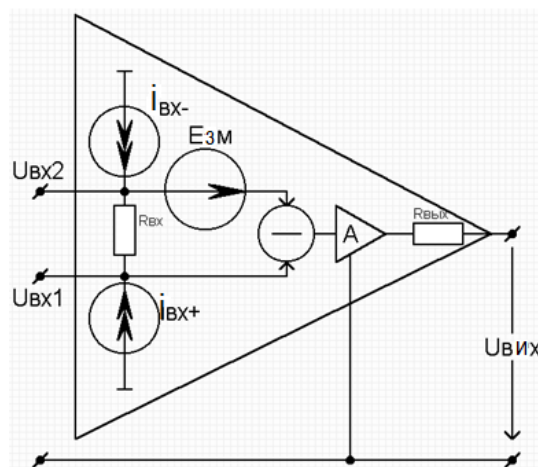


Рис.3.8. Схема заміщення реального операційного підсилювача

В цій схемі враховується також зміщення нульового рівня, що зумовлює присутність джерела входних струмів та напруги зміщення. Для забезпечення стійкості ОП в широкому діапазоні частот використовують частотну корекцію,

яка забезпечує зниження підсилення з ростом частоти. Тому сучасні підсилювачі мають структурну схему зображену на рис.3.9.

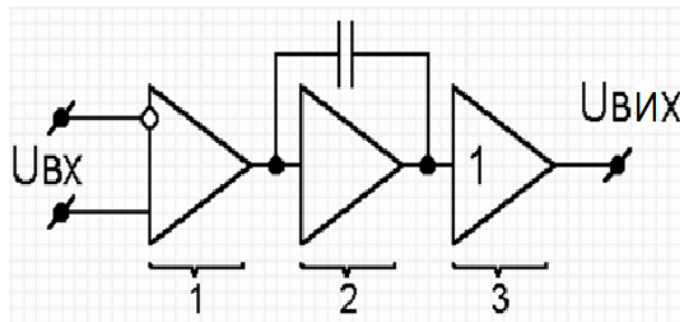


Рис.3.9. Структурна схема реальної мікросхеми ОП

В своєму складі підсилювач має:

- 1 – диференційний підсилювач – забезпечує основне підсилення по напрузі;
- 2 – інтегратор – забезпечує вбудовану частотну корекцію;
- 3 – повторювач – забезпечує високу навантажувальну здатність, це підсилювач потужності з $K=1$.

Спрощена схема ІМС ОП

Спрощена схема ОП наведена на рис.3.10.

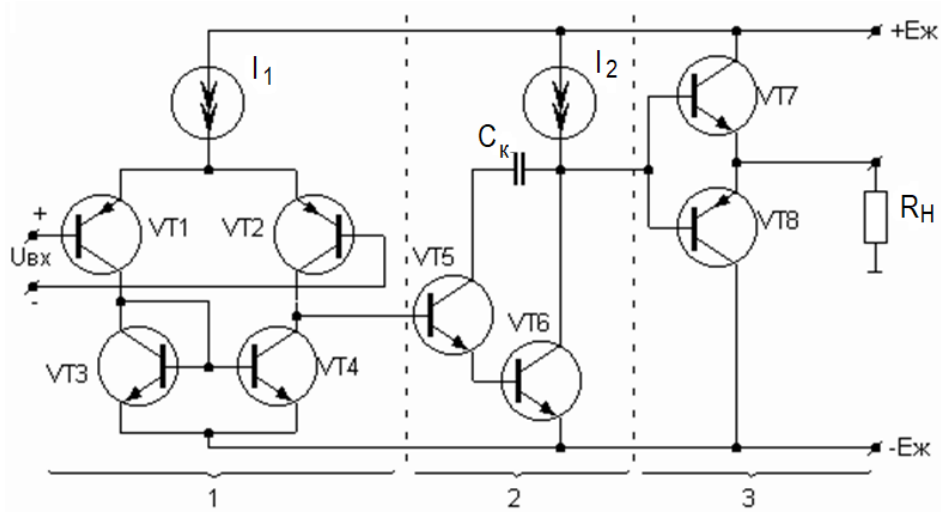


Рис.3.10. Спрощена схема ІМС операційного підсилювача, де 1– диференційний підсилювач, 2– інтегратор струму, 3– повторювач напруги.

Транзистори диференційного підсилювача 1 VT1, VT2 здійснюють основне підсилення вхідного сигналу, транзистори VT3, VT4 – динамічне навантаження каскаду підсилення. Їх можна замінити на резистори (R) навантаження.

Вхідним сигналом інтегратора 2 є струм, який подається на вхід інвертуючого кола, виконаного на VT5, VT6 та конденсаторі корегування C_k (частотно-корегуючий конденсатор).

Вихідним сигналом інтегратора є напруга U , що подається на вхід повторювача 3. Повторювач напруги виконаний на VT7, VT8 за схемою з емітерним навантаженням. Він слугує для узгодження ОП з вхідним опором наступних каскадів.

Коефіцієнт передачі підсилювача визначається добутком коефіцієнтів передачі кожного каскаду:

$$K = K_1 K_2 K_3 = \frac{S_1}{\omega C_K},$$

де S_1 – крутість диференційного каскаду, ω – частота, C_K – ємність корегуючого конденсатора.

Частотна характеристика операційного підсилювача показана на рис.3.11.

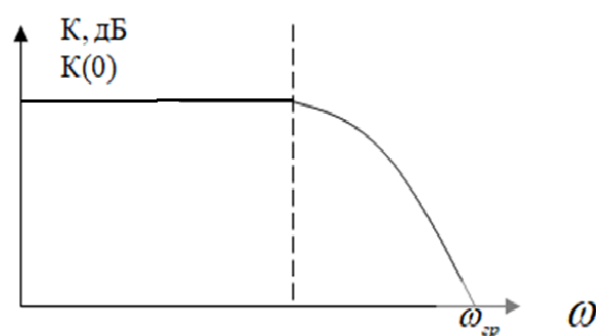


Рис.3.11. Частотна характеристика операційного підсилювача

$$\omega_{sp} = \frac{S_1}{\omega C_K}, \quad \omega_{sp} - \text{гранична частота, частота на якій } K(\omega_{sp}) = 0 \text{ дБ.}$$

Основним каскадом ОП, який визначає коефіцієнт підсилення, є **диференційний підсилювач** – електронний підсилювач з двома входами, вихідний сигнал якого пропорційний різниці входних напруг. Застосовується у випадках, коли необхідно підсилити різницю напруг на тлі значної синфазної складової (за звичай це паразитний сигнал, що одночасно наводиться на інвертуючий та неінвертуючий входи).

Вихідний сигнал диференційного підсилювача, в залежності від того як він знімається, може бути як однофазним (з одного колектора транзистора підсилення), так і диференційним (з двох, різниця між напругами на колекторах підсилювальних транзисторів). Це визначається схемотехнікою каскаду.

Використовуються як входні каскади операційних підсилювачів.

Подивитися матеріали про нього, відеолекцію з теоретичного матеріалу та практичне виконання лабораторної роботи «Дослідження диференційного підсилювача на інтегральній мікросхемі» можна на <https://www.youtube.com/watch?v=UPMSP3MSNyU>
https://www.youtube.com/watch?v=FmlpvqyG_0k

Основні характеристики ОП

Статичними параметрами ОП є:

- коефіцієнт підсилення на постійному струмові $K(0) = \Delta U_{ВНХ} / \Delta U_{ВХ}$;
- напруга зміщення нульового рівня $e_{зм}$ - це напруга, яку потрібно;
прикласти до входу ОП, щоб $U_{ВНХ} = 0$;
- входні струми $i_{ВХ-}$, $i_{ВХ+}$ – це струми, що протікають через входні кола ОП;
- різниця входних струмів $\Delta i_{ВХ} = i_{ВХ+} - i_{ВХ-}$;
- температурний коефіцієнт напруги зміщення нульового рівня $\frac{\Delta e_{зм}}{\Delta T}$;
- напруга живлення та діапазон її зміни;
- струм споживання (при заданому R_H);
- максимальна вихідна напруга при заданому навантаженні;

- максимальна диференційна та синфазна вхідна напруги

$$U_{ВХ\phi\chi\phi} \leq 10B; U_{ВХсинф} \leq 10B;$$

- коефіцієнт послаблення синфазної напруги (60...100 дБ).

Динамічні характеристики операційних підсилювачів описуються двома параметрами:

- граничною частотою (частотною одиницею підсилення);
- максимальна швидкість наростання вихідної напруги (для якісних ОП 50...500В/мкс).

Параметри динамічного розгону залежать від кіл корекції, яка здійснюється за допомогою RC кіл. Її основне призначення – це запобігання виникнення автоколивань (самозбудження) в ОП при використанні зворотного зв'язку.

Класифікація ОП

Здійснюється за сукупністю параметрів на:

- універсальні (загального призначення)

$$K(0)=10^3...10^5; f_{cp}=1...10\text{МГц}; e_{3M} > 0,5\text{мВ} \quad \text{K140УД7}$$

- прецензійні (інструментальні)

$$K(0) > 0.5 \cdot 10^6; e_{3M} < 0.5\text{мВ}; f_{cp} \approx 2\text{МГц} \quad \text{K140УД14}$$

- швидкодіючі

$$K(0)=10 \cdot 10^3; V_{U_{ввх}} > 20\text{В/мкс}; f_{cp} > 15\text{МГц} \quad \text{K140УД2}$$

- мікропотужні (мають високу економічність, працюють при $U_{ж}=1,1\text{ В}$)

$$K(0)=10^4; f_{cp} \approx 0,1\text{МГц}; I_{спож} < 1\text{мА} \quad \text{K1423УД1}$$

Типовим зарубіжним операційним підсилювачем є МА741 (аналог 140УД7). Він складається з трьох частин: підсилювача вхідного сигналу, проміжного підсилювача з високим коефіцієнтом посилення, та буферного підсилювача. Його реальна схема більш наведена на рис.3.12 і крім диференційного підсилювача (обведений синьою лінією) включає в себе каскади, що стабілізують режими роботи за постійним струмом (обведені

червоною лінією), коло зміщення буферного каскаду (обведене зеленою лінією) та каскад підсилення, що забезпечує необхідну частотну характеристику (інтегратор, що забезпечує стабільність в широкому діапазоні частот (обведений пурпуровою лінією).

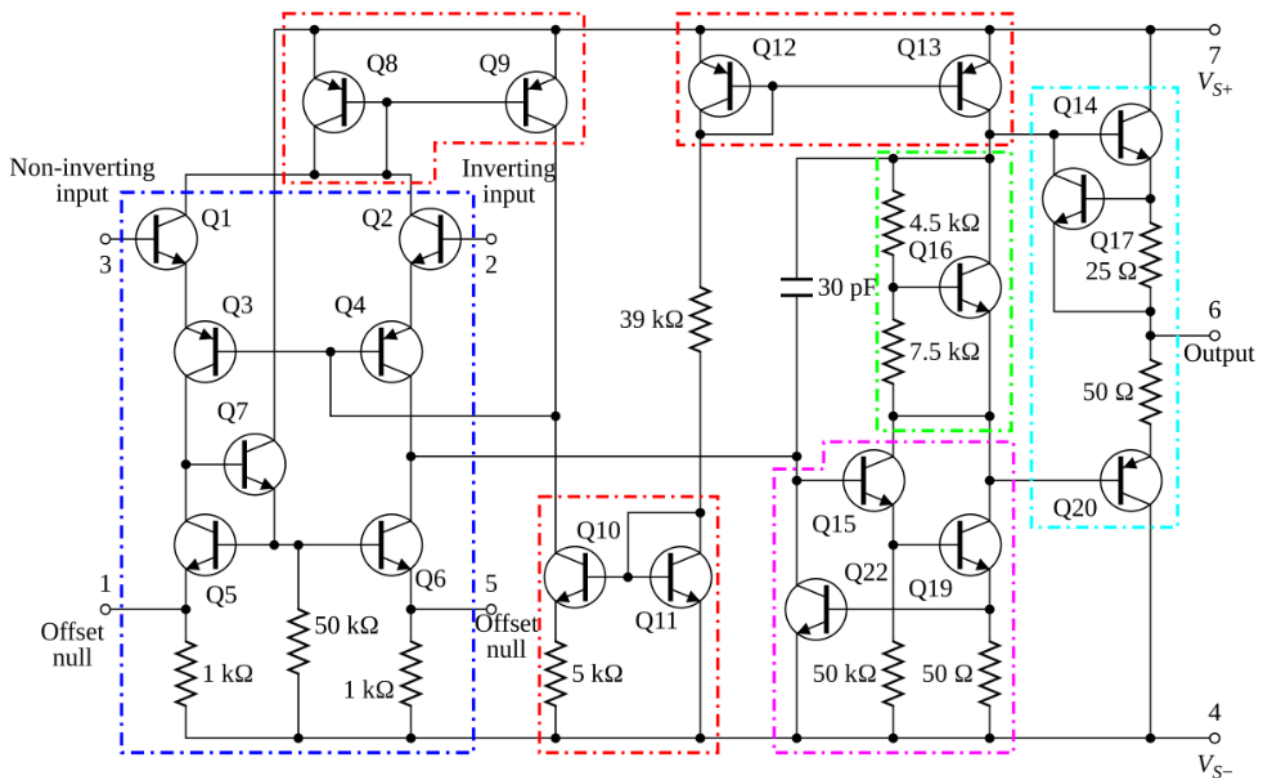


Рис.3.12. Схема ОП МА741

Необхідні параметри схем, які виконані на операційних підсилювачах визначаються колом зворотного зв'язку. Основні ввімкнення ОП необхідні для виконання основних функцій обробки аналогового сигналу наведені на рис.3.13. Це – інвертуючий (1) та неінвертуючий (2) підсилювачі, інтегратор струму (3), інтегратор напруги (4), логарифматор (5).

Більш детально вони будуть вивчатися в другій частині дисципліни «Схемотехніка. Частина 2. Аналогова схемотехніка».

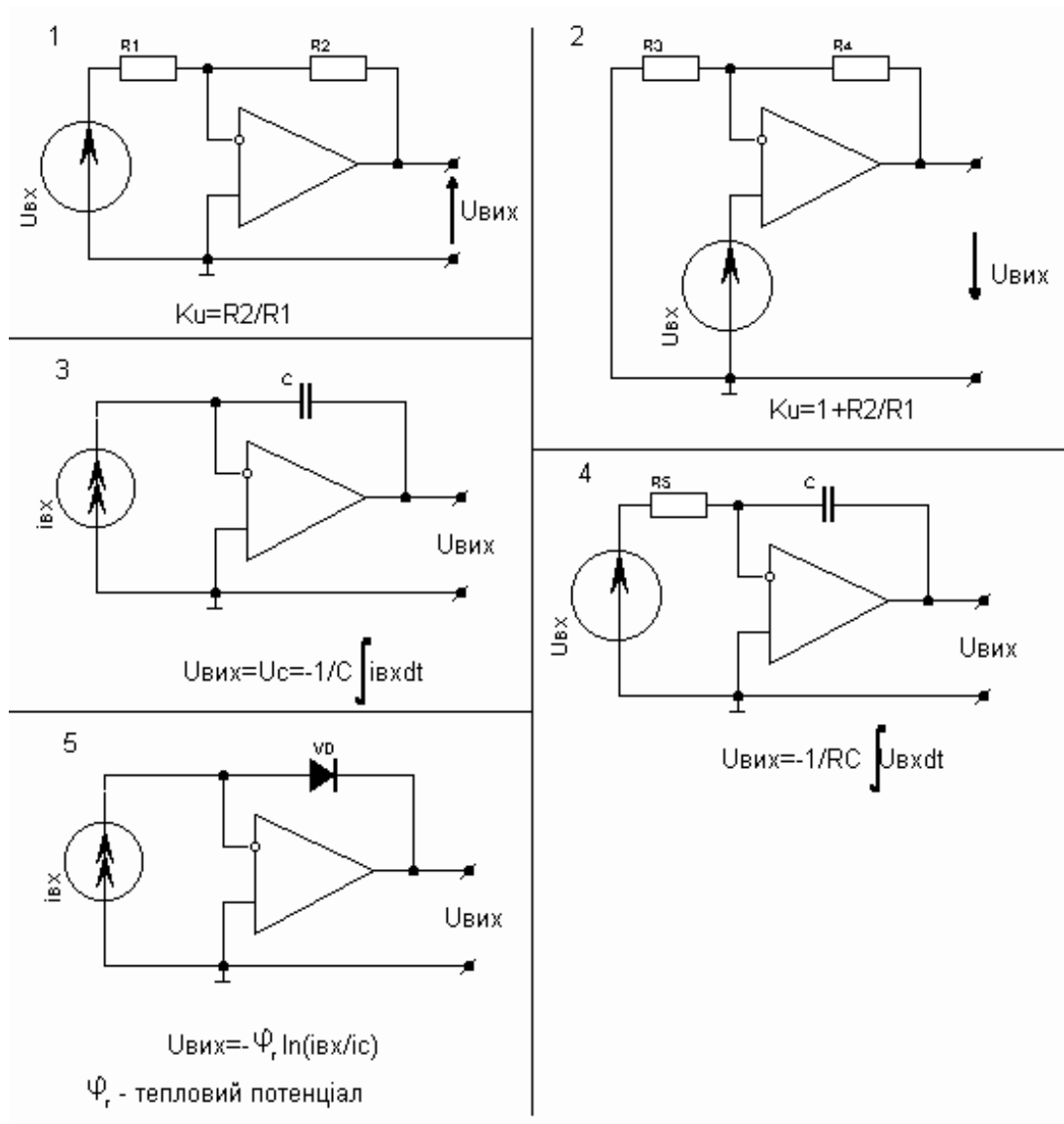


Рис.3.13. Схеми ввімкнення операційних підсилювачів

Аналогові компаратори напруги

Компараторами називається інтегральні мікросхеми, призначені для порівняння двох напруг та видачі результату порівняння в логічній формі: більше або менше (рис.3.14).

$$U_{ВНХ} = \begin{cases} U_{ВНХ}^1 \text{ при } U_{ВХ+} > U_{ВХ-} \text{ або } \Delta U_{ВХ} > 0; \\ U_{ВНХ}^0 \text{ при } U_{ВХ+} < U_{ВХ-} \text{ або } \Delta U_{ВХ} < 0; \end{cases}$$

Вихідна напруга може бути або логічним нулем або логічною одиницею.

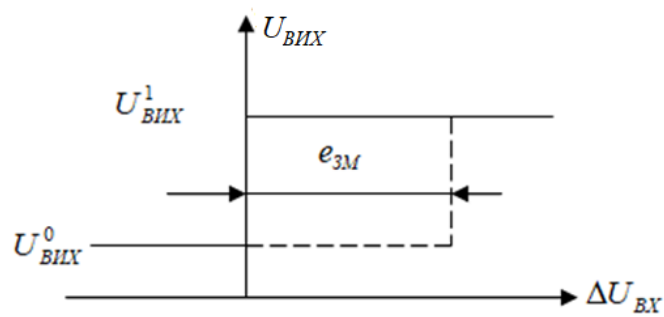


Рис.3.14. Передаточна характеристика компаратора.

Спрощена схема компаратора наведена на рис.3.15.

Він складається з диференційного каскаду, пристрою зміщення рівнів, вихідної логіки. Диференційний каскад забезпечує основне підсилення та балансування виходу за допомогою зовнішнього підстроювального резистора. Також дозволяє скоректувати напругу зміщення нульового рівня в межах до 1...2 мВ, що виникає в диференційному каскаді. Вхід стробування ($U_{др}$) призначений для фіксації моментів часу, коли проводиться порівняння вхідних сигналів та видачі результату порівняння на вихід.

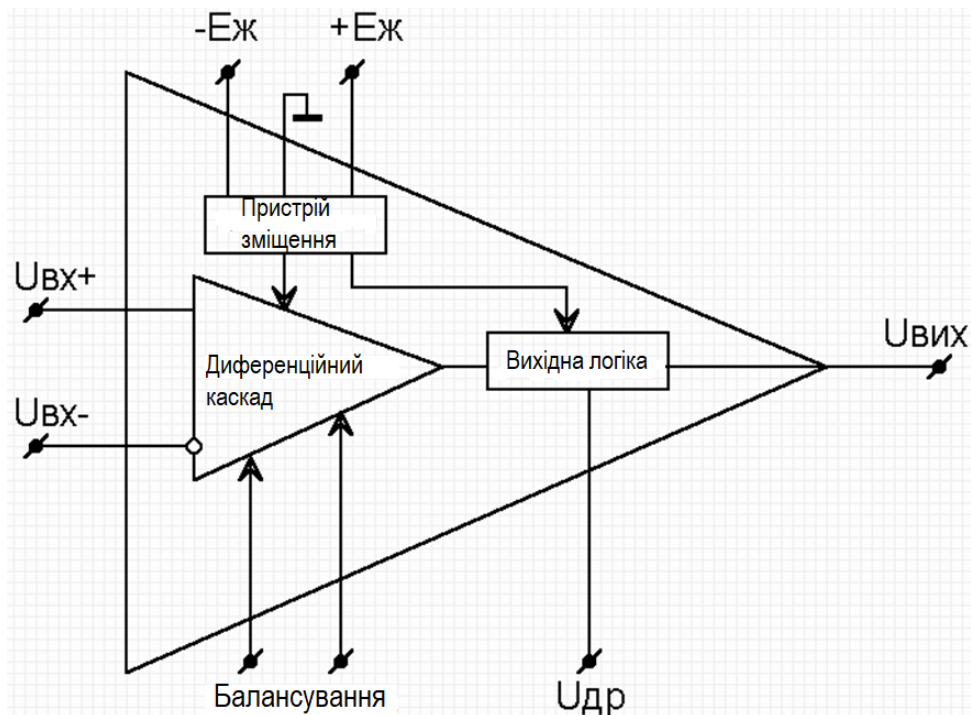


Рис.3.15. Спрощена схема компаратора

Компаратори діляться на компаратори без пам'яті (результати з'являються лише при подачі стробуючого імпульса) та з пам'яттю (результати фіксуються в елементах пам'яті компаратора до прибуття чергового стробуючого імпульса).

Стробування може здійснюватися за рівнем імпульсу, за фронтом, від низького до високого рівня та від високого до низького. Тривалість стробу повинна бути така, щоб вхідний сигнал встиг пройти через диференційний каскад раніше і записався в відповідний чарунок пам'яті.

Пристрій зміщення забезпечує отримання оптимальних рівнів струмів в елементах диференційного каскаду, запобігає насиченню диференційного каскаду при великих рівнях вхідних сигналів, встановлює рівні напруг та струмів на вході логічного каскаду.

Основні параметри компараторів:

- порогова чутливість – це мінімальний разностний сигнал, який можна визначити компаратором та зафіксувати на виході як логічний сигнал;
- напруга зміщення – визначає зміщення передаточної характеристики відносно її ідеального положення (для корекції використовують балансування);
- вхідні струми $i_{\text{вх}+}$, $i_{\text{вх}-}$;
- різниця вхідних струмів $\Delta i_{\text{вх}} = (i_{\text{вх}+}) - (i_{\text{вх}-})$ – це струм, що протікає через заморочені входи;
- напруга гістерезиса U_{Γ} – це різниця $U_{\text{вх}}$, яка визиває спрацювання при зменшенні та при збільшенні вхідної напруги U .
- вхідні логічні рівні – це значення $U_{\text{вих}}^1$, $U_{\text{вих}}^0$;
- вихідний струм $i_{\text{вих}}$ – струм який може віддати компаратор в навантаження;
- час перемикання компаратора – час затримки розповсюдження скачко подібного вхідного сигналу $t_{\text{затр}}$.

- Компаратори поділяються на компаратори загального призначення ($t_{затр} < 300$ нс; $K_y < 100$ дБ), швидкодіючі ($t_{затр} < 30$ нс), прецизійні ($K_y > 100$ дБ; $e_{зм} < 3$ мВ; $\Delta i_{вх} < 10$ мА), на стробуючі, не стробуючі, з пам'яттю та без.

Таблиця. 3.5

Рівні логічних сигналів деяких компараторів

Вихідний сигнал	ТТЛ	ЕЗЛ	
$U_{ВІХ}^0$	$< 0,4В$	-1,63В	КМ597СА2
$U_{ВІХ}^1$	$> 2,4В$	-0,98В	КМ597СА1

Компаратори середньої швидкодії та невеликого струму споживання поділяються на:

- загального призначення К1401СА1, К1401СА2
- швидкодіючі К597СА1, К597СА2
- прецизійні К554СА3 (для нього $K_{підс} = 150000$; $e_{зм} = 3$ мВ; $i_{вх} = 10$ мА; $t_{перемик} = 200$ нс).

Типовим компаратором загального призначення є компаратор LM311 (час перемикання 200 нс, коефіцієнт підсилення 200000, сумісний з ТТЛ логікою), а LM360 – це високошвидкісний (час перемикання 12 нс, коефіцієнт підсилення 200000, сумісний з ТТЛ та компліментарною МОН логікою) пристрій з диференціальними виходами. Компаратори низької потужності – це подвійний компаратор LM393 з широким діапазоном напруги живлення від 2 до 36 В. Він має низьке споживання струму біля 2,5 мА, час затримки поширення 300 нс. Вихідний сигнал сумісний із TTL, CMOS, MOS логікою. Чотирьохканальний компаратор LM339 також працює з TTL, CMOS, MOS логікою має затримку поширення 1,3 мкс, максимальний вихідний струм – 20 мА. Виконуються компаратори в корпусному та SMD варіанті.

В основному компаратори використовуються в пристроях перетворення аналогових сигналів в цифрові.

Аналогові перемножувачі напруги

Аналогові перемножувачі – мікросхеми, призначені для виконання операцій перемноження двох сигналів та видачі результату в формі напруги. В аналогових інтегральних мікросхемах часто використовується схема перемножувача зі змінною крутістю (рис.3.16) на основі диференційного підсилювача.

Вихідна напруга диференційного каскаду пропорційна добутку $U_{ВИХ} = SR_n U_x$, де R_n – опір навантаження. Для регулювання крутості в схему введено VT3. при достатньо великому значенні R_e , струм емітера рівний $i_e = U_y / R_e$. Напруга $U_{бе}$ на еміторному переході пов'язана з струмом колектора рівнянням Еберса-Мола $i_K = I_{КБО} (e^{U_{бе} / \varphi_T} - 1)$, де $I_{КБО}$ – зворотній струм колекторного переходу при його зворотньому зміщенні, φ_T – тепловий потенціал.

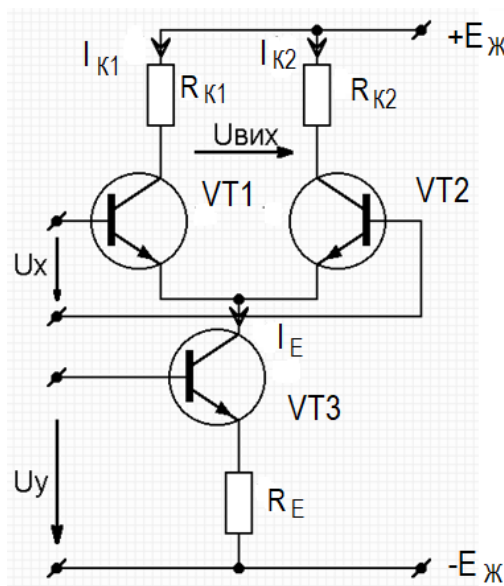


Рис.3.16. Аналоговий перемножувач напруги

При виконанні вимоги: $U_{BE} > \varphi_T$ струм колектора $i_K = I_{KBO} e^{U_{BE} / \varphi_T}$ звідси

крутість транзистора $S = \frac{\partial i_e}{\partial U_{BE}} = I_{KBO} e^{U_{BE} / \varphi_T} \frac{1}{\varphi_T} = \frac{i_e}{\varphi_T}$. Підставляючи значення

крутості та струму емітера маємо

$$U_{ВИХ} = \frac{i_e}{\varphi_T} R_H U_X = \frac{R_H}{R_E \varphi_T} U_X U_Y = K_0 U_X U_Y, \text{ де } K_0 = R_H / (R_E \cdot \varphi_T).$$

Основні характеристики перемножувачів

- похибка перемноження ($\sim 1 \dots 5\%$);
- не лінійність перемноження – максимальна різниця між фактичним та теоретичним значеннями вихідного сигналу;
- напруга зміщення нульового рівня – це напруга на виході перемножувача, при нульовому значенні напруг на входах $U_X = U_Y = 0$, ($10 \dots 100$ мВ);
- вихідні напруги ($25 \dots 100$ мВ);
- полоси пропускання (до 500 МГц);
- максимальне значення вихідної напруги;
- максимальний вихідний струм;

Класифікація перемножувачів

За похибкою перемноження перемножувачі можна поділити на:

- малої точності – похибка не нормується
- середньої $> 1\%$
- високої $< 1\%$

До перемножувачів малої потужності відносяться модулятори, які використовуються для перетворення частоти. Їх основні параметри наведені в табл.3.6.

Таблиця. 3.6

Параметри перемножувачів частоти

Найменування	Δf , МГц	U_{BX} , мВ	S , мА/В	K , (дБ)
K174ПС1	200	100	4,5	-
K174ПС4	1000	25	4,5	-
K526ПС1	80	100	-	14
K140МА1	2	100	-	10

Щоб краще зрозуміти призначення перемножувачі розшифруємо умовне позначення функції, що виконує перемножувач. В позначеннях мікросхем МА означає амплітудний модулятор, а ПС – перемножувач та перетворювач частоти.

Такі перемножувачі використовуються в селекторах каналів приймачів різноманітного призначення, накопичувачах та подільовачах частоти, частотних та фазових детекторах.

Параметри перемножувачів середньої та високої частоти наведені в табл.3.7.

Таблиця. 3.7

Технічні параметри деяких перемножувачів

Параметр	Середньої точності		Високої точності	
	K252ПС1	K252ПС2	K525ПС3	MC1494
Похибка перемноження, %	$\pm 2,0$	$\pm 1,0$	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$
Напруга зміщення, мВ	50	80	30	200
Вхідний струм, мкА	8	2	2	1
$U_{BX \max}$, В	± 12	± 10	± 10	± 10
Δf при малому сигналі, МГц	1,5	1,0	1,0	1,0

Зарубіжні аналоги компараторів – це мікросхеми MC1496, MLT04, AD532, AD834 то що.

3.4. Ключі

Комутація сигналів – це метод, за допомогою якого сигнали, що поступають від декількох джерел об'єднуються в одній лінії та після відповідної обробки можуть бути направлені в різні виконуючі пристрої.

Комутація здійснюється за допомогою електронних ключів, виконаних на діодах чи транзисторах.

Наведемо спрощені еквівалентні схеми ключів.

а) **замкнений ключ** (рис.3.17) має деякий внутрішній опір R_0 , який не є постійним, а залежить від струму, який тече через ключ. Послідовно з джерелом діє джерело залишкової напруги E_0 , яке теж залежить від струму.

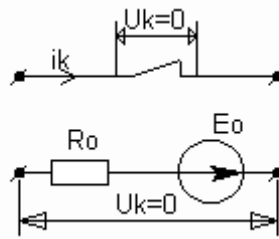


Рис.3.176. Замкнений ключ

б) **розімкнений ключ** (рис.3.18) має деякий внутрішній опір R_0 , який не є постійним, а залежить від струму який тече через ключ. Послідовно з джерелом діє джерело залишкової напруги E_0 , яке теж залежить від струму.

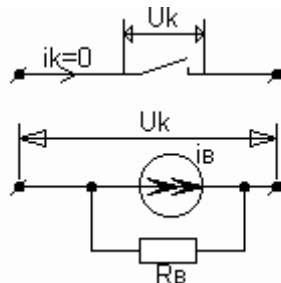


Рис.3.18. Розімкнений ключ

В динамічних моделях в схему включаються різні паразитні ємності та індуктивності. Ємності ключа – це ємності паразитних переходів, а індуктивності – індуктивності виводів (необхідно враховувати лише на дуже високих частотах).

Схеми комутаторів

– **діодний ключ** (рис.3.19)

–

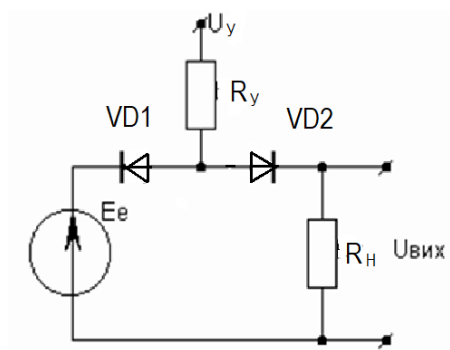


Рис.3.19. Діодний ключ

При подачі на аноди діодів позитивного імпульсу управління діоди відкриваються і ключ замикається. Використовуються діоди Шоткі. Диференційний опір відкритого ключа лежить в межах 1...50 Ом. Недолік – пряме проходження струму управляючого сигналу через джерело E_e та навантаження R_n . Час перемикання 50 нс.

– **мостовий діодний ключ** (рис.3.20)

Його головна перевага це розв’язка кола управління з колом передачі сигналу. Якщо $U_{упр} \leq 0$, то ключ розімкнеться, при $U_{упр} \geq 0$ замикається. Струм управління протікає лише через діоди та опір управління R_y .

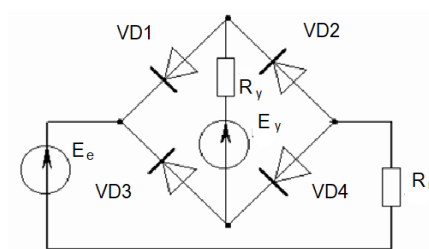


Рис.3.20. Мостовий ключ

– **схема ключа на шести діодах** (рис.3.21).

Використовує два симетричних джерела управління сигналом, які підводяться через роздільні діоди VD5, VD6. Для підтримки моста в замкненому стані при відсутності сигналів управління на нього через резистори R_{y1} , та R_{y2} подаються напруги запирання від джерела постійного струму $\pm E$.

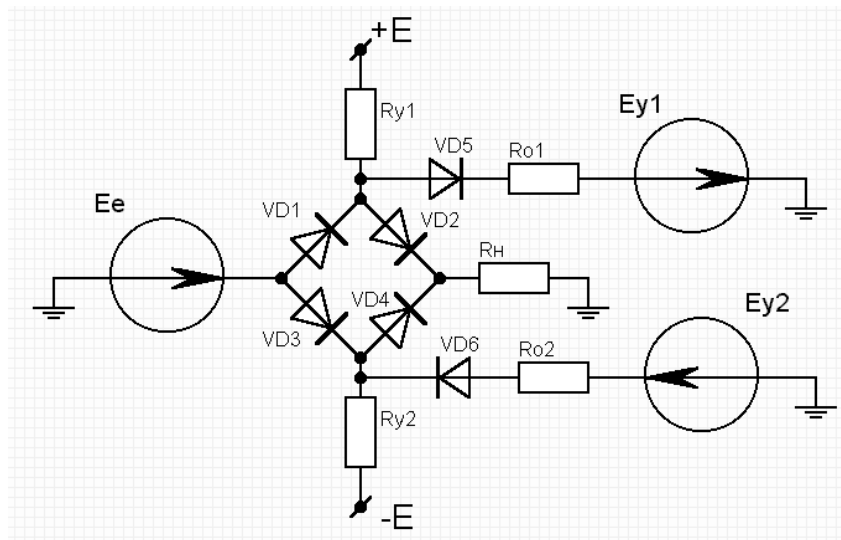


Рис.3.21.Ключ на шести діодах

Використання схем:

- діодні ключі використовуються в мікросхемах серій 265ПП1 та 261ПП2 (відрізняються полярністю напруги управління $U_{упр}$);
- мостові ключі – К252КТ1; 265КН1.

Технічні характеристики ключів:

Перехідний опір – $R \approx 100$ Ом;

Час перемикання – $t_{перемик} = 40$ нс.

Ключі на біполярних транзисторах

Найпростіша схема ключа на біполярних транзисторах наведена на рис.3.22.

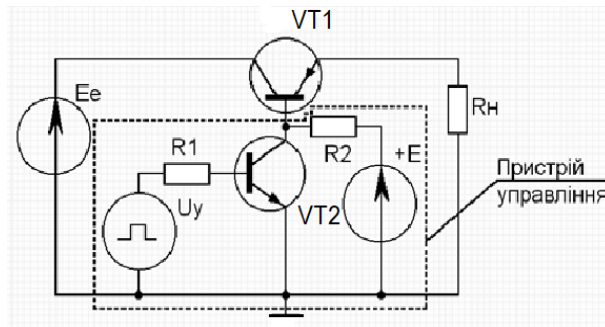


Рис.3.22.Ключ на біполярних транзисторах

Опір замкнутого ключа $R=10\ldots100\text{ Ом}$; $t_{\text{перемик}}=0,1\text{ мкс.}$

По структурі схожий на діодний ключ, при $i_b=0$; VT1 – закритий; ключ розімкнено при $i_b \neq 0$; $i_b > i_{b_{\text{насих}}}$ – ключ розімкнено. Використовуються в мікросхемах серій КР162, К124, К129.

Ключі на польових транзисторах (рис.3.23)

Використовуються дуже широко тому, що в них малі струми витоку та споживання струму по каналу управління, технологічні в виготовленні.

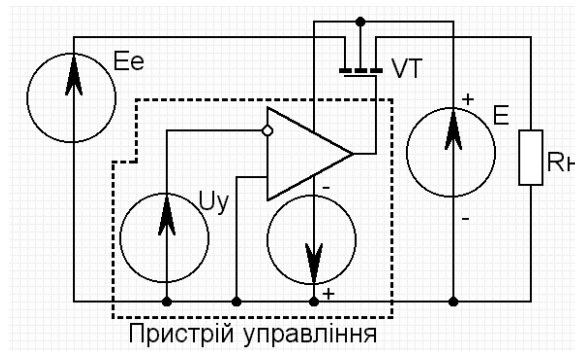


Рис.3.23. Ключ на польовому транзисторі

Крім такого ввімкнення часто використовуються ключі на компліментарних парах польових транзисторів (рис.3.24). Вони входять до складу мікросхем серій К590; К591; К176; К561; 1564.

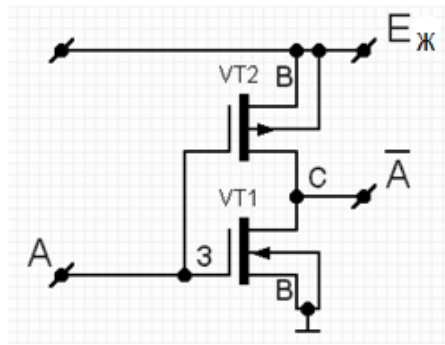


Рис.3.24. Ключ на компліментарній парі

Параметри польових ключів на компліментарних парах:

- опір у відкритому стані 20...100 Ом;
- $t_{\text{ПЕРЕМИК}}$ від 10 до 100 нс;
- вихідний струм до 10 мА;
- потужність споживання менша 1 мВт.

На польових транзисторах з керуючим p - n переходом:

$R=250$ Ом, струм витоку 10 мА, $f=1$ МГц. Мікросхеми серії 284; КР504.

На польових транзисторах з ізольованим заслоном:

$R \leq 100$ Ом; $t_{\text{ПЕРЕМИК}} = 0,3...0,5$ мкс; це мікросхеми серії 168КТ2; К547КП1.

(мікросхема 168КТ2 – не має в своєму складі кіл управління).

3.5. Контрольні запитання

1. В чому полягають особливості цифрових мікросхем?
2. Чому аналогові ІМС не втратили свого значення?
3. Назвіть основні характеристики цифрових ІМС?
4. Які базові елементи логіки Ви знаєте?
5. Назвіть особливості ТТЛ-логіки.
6. Емітерно-зв'язана логіка. В чому її особливість?
7. Чому в сучасній електроніці переважно використовують КМОНП?
8. Що є базовим елементом аналогових ІМС?
9. Назвіть особливості операційних підсилювачів.

10. Які операції можуть виконувати ОП?
11. Для чого використовуються компаратори?
12. Як побудований аналоговий перемножувач?
13. Які типи ключів Ви знаєте?
14. В чому полягають переваги ключів на КМОНП логіці?

4. ЕЛЕМЕНТИ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

4.1. Функціональна електроніка

Функціональна електроніка – це область електроніки, в якій використовується сукупність різних фізичних явищ у твердих тілах, рідинах і газах для формування, збереження та обробки сигналів. В цьому випадку локальному об'єму тіла даються такі властивості, які необхідні для виконання даної функції. В основі фізичної інтеграції лежать різні, а не тільки електричні процеси, що відбуваються в об'ємі. Це потребує менш жорстких технологічних операцій, веде до підвищення надійності завдяки зменшенню кількості елементів системи, її габаритних розмірів і розширенню функціональних можливостей.

До функціональної електроніки відносяться:

- прилади з зарядовим зв'язком;
- магніто електроніка;
- акустoeлектроніка;
- кріoeлектроніка;
- хемотроніка;
- діелектрична електроніка;
- біoeлектроніка та інші.

4.2. Прилади з зарядовим зв'язком

До пристроїв динамічної пам'яті відносять і прилади з зарядовим зв'язком ПЗЗ (рис.4.1).

ПЗЗ або CCD (Charge-Coupled Device) – це МДНП з великою кількістю керівних елементів (заслонів). Він зберігає інформацію в вигляді зарядових пакетів, які складаються з рухомих носіїв заряду (електронів або дірок), які локалізуються під заслонами, переміщуються вздовж структури за рахунок зміни керувальних напруг U_1 , U_2 , U_3 та передаються від комірки до комірки

через ємнісний (зарядовий) зв'язок. У більшості сучасних ПЗЗ носіями є електрони, а не дірки тому що рухливість електронів більша, а втрати при переносі менші.

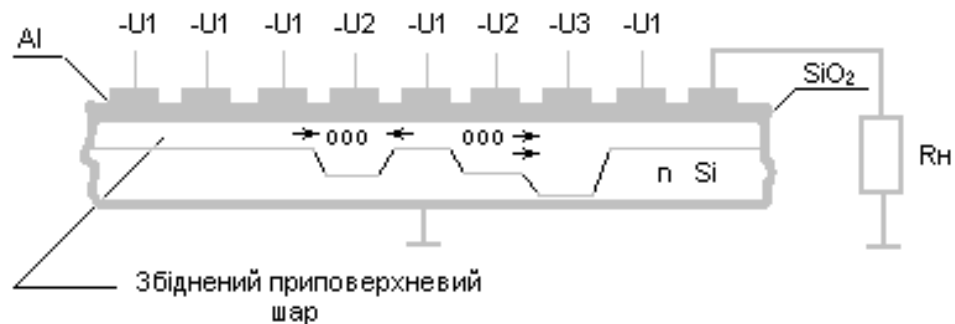


Рис.4.1.Конструкція пристрою з зарядовим зв'язком

Якщо $|U_2| > |U_1|$, то під цим заслоном глибина збідненого шару стає більшою. Якщо ввести під заслін інформаційний пакет дірок, то він буде зберігатися під ним. І структура буде працювати в режимі збереження інформації.

Якщо на заслін подати напругу U_3 – більшу ніж $|-U_3| > |-U_2|$, то на межі заслонів виникає прискорююче поле і інформаційний пакет переміщується в напрямку до джерела U_3 . Заслін працює в режимі зчитування. Управляючими напругами є U_2 (напруга зберігання) та U_3 (напруга зчитування).

Останній заслін підключений до резистор навантаження, з якого знімається сигнал. Якщо по черговому подавати на заслони напруги U_1, U_2, U_3 , то можна рухати збіднені шари з записаною інформацією до навантажувального резистора і зчитувати з нього інформацію. Зарядовий пакет переноситься без фізичного переміщення матеріалу – лише за рахунок перерозподілу електричного поля. Це і є зарядовий зв'язок – передача інформації через переміщення заряду між сусідніми потенціальними ямами.

Потім можна записати інформацію знову, і зчитати її.

В залежності від технології виготовлення та частоти переносу інформації в збідненій області інформація може зберігати від 10^{-2} секунд до десятків годин (максимальний період зчитування).

Мінімальний період зчитування визначається втратами при передачі зарядового пакету. Для сучасних ПЗЗ час переносу та робоча частота складають відповідно $T = 20..50$ нс та $5...20$ МГц.

За виконуваними функціями ПЗЗ можна поділити на три класи, які призначені:

- для обробки та перетворення аналогових сигналів;
- для прийому та перетворення зображень (фото ПЗЗ);
- для запам'ятовувальних пристроїв.

Для обробки аналогових сигналів на ПЗЗ створюють:

- ЛЗ (лінії затримки) – вхідний аналоговий сигнал перетворюється в дискретні зарядові пакети і через деякий час затримок поступає на вихід ПЗЗ (час затримки від 10 мс до 100 с);
- мультиплексори – декілька вхідних сигналів паралельно вводяться в ПЗЗ, а потім послідовно виводяться на вихід;
- фільтри – проводиться цифрова обробка сигналу, по різним ваговим коефіцієнтам (змінюються форми заслонів).

Фото ПЗЗ приймають інформацію про зображення паралельно, а потім перетворюють її в відеосигнал. Вони використовуються як фоточутливі матриці в камерах.

Характерними особливостями ПЗЗ є те, що:

- інформація при виключенні живлення не зберігається;
- висока швидкість запису та зчитування (5 Мбіт/с);
- середній час вибірки складає 300 мкс;
- потребують формування синхроімпульсів;
- час зберігання обмежений, що потребує використання регенерації.

Сучасні смартфони (наприклад iPhone 15 Pro) використовують **CMOS-сенсори**, а не CCD. CMOS-сенсор (Complementary Metal–Oxide–Semiconductor image sensor) – це напівпровідниковий світлочутливий пристрій, у якому кожен піксель перетворює світло на електричний сигнал і має власні транзистори зчитування. Кожен піксель містить фоточутливий елемент, який накопичує заряд під дією світла та 3...5 МДНП транзисторів (скидання, підсилення, вибір рядка). Це фактично матриця фотодіодів із вбудованими транзисторами, де кожен піксель самостійно перетворює світло на напругу. На відміну від CCD, тут немає перТака матриця виготовляється за стандартною CMOS-технологією інтегральних схем, що дозволяє поєднати фотодіоди й обробку сигналу на одному кристалі і здешевлює виробництво.

Сьогодні CMOS матриці практично витіснили CCD у масовій електроніці. Відомі виробники сенсорів приведені в табл.4.1.

Таблиця. 4.1

Виробники CMOS матриць

Фірма	Основне застосування	Деякі моделі
Sony	для смартфонів, камер та техніки	IMX586, IMX686, IMX766
Samsung Electronics	50 МП високопродуктивні мобільні сенсори	ISOCELL GN5, GN1, GW1, HM1, HP9
OmniVision Technologies	для мобільних, відеоспостереження, авто і вбудованих систем, Raspberry-Pi	OV2640, OV5647, OV50H, OV48B
STMicroelectronics	для відеоспостереження і загального застосування	VS6520, VS6521
SmartSens	для відео та авто-систем високої чутливості	SC2335, SC850SP

4.3. Запам'ятовувальні пристрої на основі циліндричних магнітних доменах

ЦМД – це логічна область (динамічна неоднорідність) в магнітній плівці з відносною анізотропією, вектор намагнічування якої направлений протилежно вектору намагніченій плівці.

ЦМД формують в епітаксialьних ферит-гранатових плівках, вирощених на поверхні намагнічених гранатових основ.

Зародження доменів проходить під дією імпульсів струму, які пропускають по петлі з металевої плівки. Генерується ЦМД тоді коли імпульсом струму утворюється локальне розмагнічуючи поле $H_{роз}$ значно більше по модулю чим робоче поле, і яке має знак зворотній робочому полю. Утворені під дію місцевої нерівномірності магнітного поля домени переміщуються по поверхні структури пристрою під дією поля зміщення. Для цього використовуються магнітно-статичні ловушки, які формуються на поверхні плівок з використанням тонких провідникових або магнітних матеріалів (їх називають аплікаціями).

Струмові аплікації займають велику площу (рис.4.2), що не дозволяє створити пристрої з великим ступенем інтеграції.

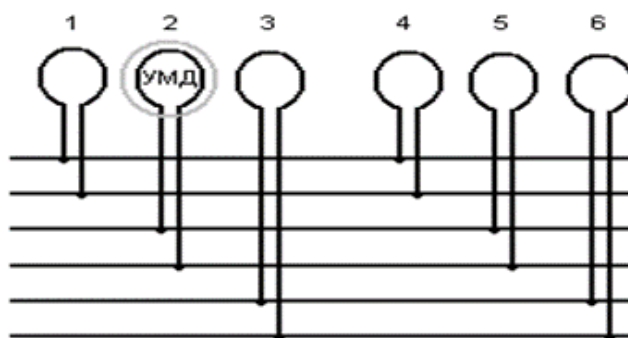


Рис.4.2.Струмові аплікації на поверхні пристрою пам'яті

Вони створюють магнітні зони зворотної намагніченості (магнітні аплікації, домени). Дивися рис.4.3.

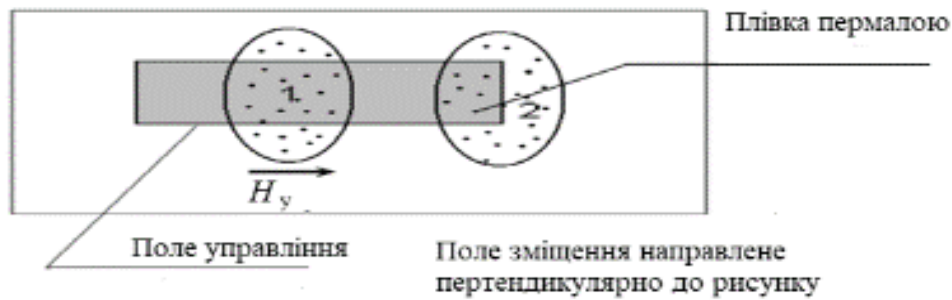


Рис.4.3. Магнітні аплікації

Під дією поля управління домен зміститься на край плівки. Для переміщення на великі віддалі роблять систему аплікацій та систему управляючих котушок, що заставляють переміщуватися домени в заданому напрямку.

Зчитуванні інформації відбувається за допомогою магніточутливого приладу, який знаходиться на кінці ПЗЗ. Найбільше розповсюдження отримали магніторезистори. Структура пристрою пам'яті на ЦМД показана на рис.4.4.

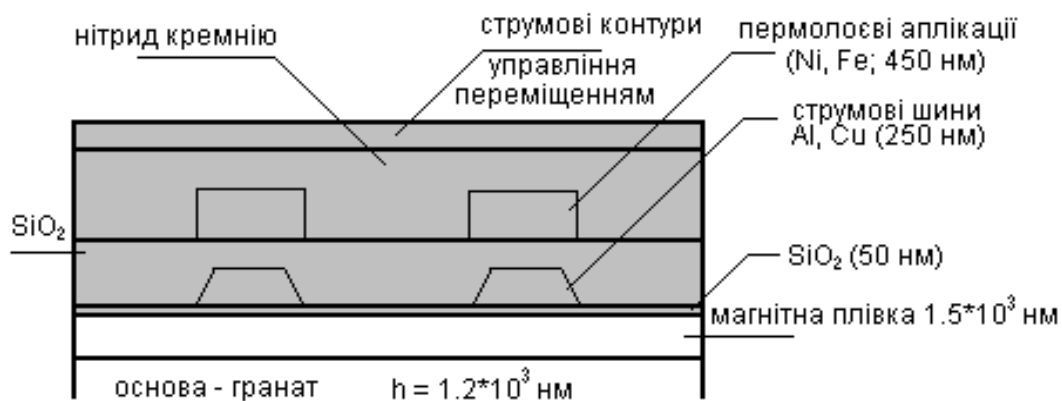


Рис.4.4.Конструкція пристрою пам'яті на струмових контурах

Основні характеристики пристроїв пам'яті ПЗЗ:

- Діаметр доменів, мкм – 6...1.
- Інформаційна ємкість плати, біт – $10^6 \dots 10^7$.
- Швидкодія, МГц – 0,1...3.

- Інформація довго зберігається при відключеному живленні.
- Швидкість зчитування, запису 500 біт/с.
- Час вибору – 2 мс.

Така конструкція потребує допоміжних електронних пристроїв (підсилювача зчитування, генератора поля управління то що).

4.4. Акустoeлектроніка

Акустoeлектроніка – область функціональної електроніки, в якій використовується акустичні та електроакустичні явища у п'єзoeлектриках (прямий та зворотній п'єзoeфекти) для створення функціональних елементів радіoeлектронних систем.

Нагадаю що це за явища:

Прямий п'єзoeлектричний ефект (п'єзoeфект) – це виникнення електричного заряду при деформації кристалу п'єзoeлектрика.

Зворотній п'єзoeфект – це випадок, в якому під дією прикладеної напруги в залежності від поляризації кристалу відбувається його механічна деформація.

За характером використання акустичних коливань розрізняють:

- пристрої на об'ємних акустичних хвилях (ОАХ);
- пристрої на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ).

Такі прилади поділяються на лінійні та нелінійні. До лінійних належать лінії затримки, резонатори, фільтри. До нелінійних – пристрої згортки сигналів (конвольвери) та корелятори.

Акустичні пристрої працюють в діапазоні частот $10^2 \dots 10^9$ Гц;

До пристроїв на об'ємних акустичних хвилях (ОАХ) відносяться:

- лінії затримки – пристрій затримки сигналу, значення якої визначається часом поширення акустичної хвилі від збуджувача до приймального перетворювача. Час затримки лежить в межах від 1 мкс до 100 мкс;
- резонатори – пристрої накопичення енергії механічних коливань, пов'язаних з електричними, завдяки використанню п'єзoeфекта їх добротність

достатньо висока (Q сягає до значення 10^7). Вони мають високу температурну та часову стабільність. Мінімальне та максимальне значення робочої частоти визначаються розмірами п'єзоелемента та типом використовуваних хвиль (лежить в межах від 1 кГц до декількох сотень МГц).

– трансформатори п'єзоелектричні – пристрої для перетворення напруги, в яких використовується перетворення механічних коливань п'єзоелектрика, збуджуваного прикладеною напругою з наступною регенерацією в напругу на виході. Працюють п'єзотрансформатори в режимах механічного резонансу, як основного, так на вищих типах механічних коливань. Їх технічні характеристики наступні:

ККД – 85...95%.

Резонансна частота 100 кГц...3 МГц. Коефіцієнт трансформації залежить від навантаження і досягає 100...1000. Межа питомої потужності 0,15...1 Вт/см³; максимальна потужність до 10 Вт.

Вони використовують як вторинні високовольтні джерела живлення. Мають кращі масогабаритні та технологічні показники ніж традиційні трансформатори, не мають моточних проводів.

– фільтри п'єзоелектричні – фільтр на основі зв'язаних між собою п'єзокерамічних резонаторів (рис.4.5), які виготовляються з якого вони виготовляються п'єзоелектричного кварцу або п'єзоелектричної кераміки.

Конструктивно п'єзрезонатори з коливаннями зсуву по товщині виконуються у вигляді тонких плоскопаралельних пластин (круглих або прямокутних) з відношенням довжини (діаметра) до товщини не менш 50 (рис.4.5,а) або у вигляді плосковипуклих або двояко-випуклих лінз із відношенням діаметра до товщини не менш 5...10 (рис.4.5,б).

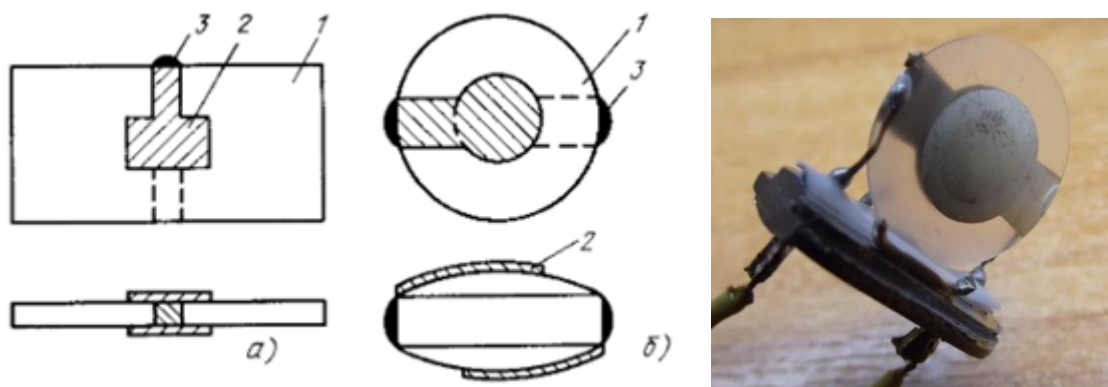


Рис.4.5.Конструкції п'єзокерамічного резонатора на ОАХ:

1 – п'єзоелемент; 2 – електрод; 3 – струмовідвід

Працюють резонатори на частотах 3...30 МГц (основна гармоніка механічних коливань) та 30...1000 МГц – (вищі гармоніки).

Функціональні пристрої на ОАХ знайшли широке застосування в системах бортового й наземного контролю, радіодатчиків висоти і дальності, у приладах визначення, запам'ятовування й відтворення частоти, систем формування й обробки сигналів радіолокаційних станцій (РЛС), а також у вимірювальній апаратурі.

Пристрої на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ) мають принципові переваги перед пристроями побудованими на інших принципах. Це такі як:

- простота збудження та прийому ;
- доступність на всьому шляху розповсюдження для відводу та обробки ;

ПАХ (хвиля Релея) – це акустична хвиля, що поширюється на поверхні акустичного середовища, в тонкому шарі (не товще довжини хвиль), формуючи на ньому шар з динамічними неоднорідностями в вигляді пружних деформацій, які мають дискретний характер.

Енергія в такому поверхневому шарі може досягти високих значень акустичної потужності, що може призводити до виникнення нелінійних акустичних явищ.

Швидкість поширення ПАХ залежить від механічних та п'єзоелектричних властивостей матеріалу, а також від орієнтації напрямку поширення хвилі відносно кристалографічних осей. Швидкість поширення лежить в межах від 1,6 до 6 км/с для різних п'єзоматеріалів. Так для ніобат літію вона складає для зрізів $YX - 3.48$ км/с, $ZX - 3.79$ км/с, $XZ - 3.48$ км/с а для кварцу зрізів $YX - 3.26$ км/с та $ST (Y+42^\circ; X) - 13.5$ км/с.

Існує багато методів збудження ПАХ. Але найбільш простим та ефективним є використання зустрічно-штиревих перетворювачів (ЗШП).

ЗШП – це планарна структура, що складається з двох провідникових гребінок, штирі яких входять один в один, створюючи решітку, на яку подається збуджувальна напруга, або вмикається навантаження. ЗШП – двонаправлений. Він випромінює хвилі в обох напрямках, на частотах близьких до частот акустичного синхронізму, на інших частотах збудження хвилі не складаються в фазі і тому подавляються, це дозволяє використовувати ЗШП в фільтрах. Це вимагає нанесення з однієї сторони (на торцях звукопроводів) акустичного поглинач (гуми), або використання спеціальних однонаправлених конструкцій ЗШП.

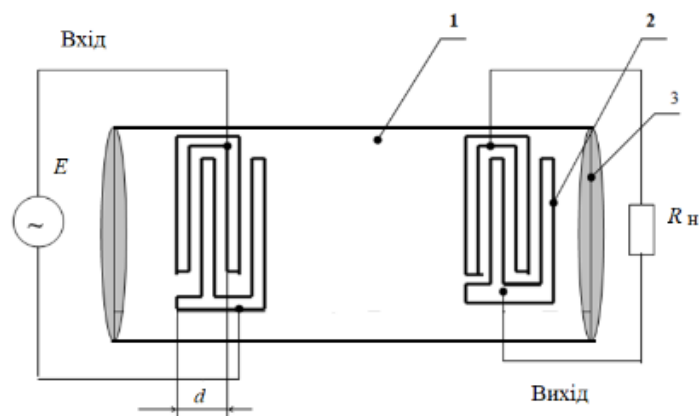


Рис.4.6.Конструкція пристрою на ПАХ

На рисунку маємо наступні позначення:

- 1 – звукопровід;
- 2 – зустрічно-штиревий перетворювач (ЗШП);

З – поглинач акустичної енергії.

Крок електродів ЗШП $d = a + h$, де a – ширина штиря, h – відстань між штирями. Він вибирається, виходячи з умови електроакустичного синхронізму – узгодження часу пробігу акустичної хвилі сусідніми штирями і півперіодом зміни напруги між ними на центральній частоті f_0 ; (частота акустичного синхронізму) $d = \frac{V_a}{2 \cdot f_0}$;

Топологія (рис.4.6) ЗШП, а особливо кількість штирів визначають його частотні властивості. Для кожного матеріалу існує оптимальна кількість штирів, при якій акустична та електрична смуги пропускання співпадають $Q_a = Q_e$. Основні характеристики ЗШП приведені в табл.4.2.

$$N_{opt} = \frac{1}{K_m},$$

де N_{opt} – оптимальна з точки зору співвідношення ефективність/смуга пропускання кількість електродів в ЗШП, K_m – коефіцієнт електромеханічного зв'язку.

Для узгодження перетворювача з навантаженням або з джерелом сигналу необхідно забезпечити заданий вхідний опір, який крім кількості електродів N визначається її апертурою (перекриттям).

Значення відносних апертур – необхідних для одержання опору 50 Ом приводиться в довідниках.

Таблиця 4.2.

Основні характеристики ЗШП

Ніобат літію	N_{opt}	$\frac{\Delta f_{onm}}{f_{onm}}; \%$	$\frac{w_0}{\lambda}$
YX	4	24	108
ZX	14	7	17
XZ	4	24	113
П'єзокварц			
YX	19	5.3	53
ST (Y+42°;X)	22	4.6	46

За рівномірністю розподілу штирів розрізняють еквідістантні (з рівномірним розподілом) та нееквідістантні ЗПП. Для здобуття необхідної частотної характеристики використовується аподизація, яка визначається оберненим перетворенням Фур'є (ПФ) від потрібної частотної характеристики.

Частотні характеристики перетворювача визначається, як ПФ просторового сигналу $S(x)$.

$$S(jw_x) = \int_{-\infty}^{\infty} S(x) \cdot \exp(jw_x x) dx,$$

де w_x - просторова частота, пов'язана з електричною частотою співвідношенням $w = \frac{w_x}{V_a}$.

Аподизація (зміна просторового розміщення електродів на поверхні пристрою на ПАВ) може здійснюватися перекриттям електронів по апертурі (еквідістантні ВШП), зміною кроку електродів ЗШП (нееквідістантні ВШП), віяльні та зовнішнім зв'язанням за допомогою ємнісних чи резистивних подільників.

Частіше всього використовується аподизація за апертурою, тому що технологічно вона може здійснюватися простіше.

Відповідним чином підбираючи розміщення та вагові коефіцієнти електродів, можна конструювати широкосмугові та вузькосмугові фільтри. Частотна вибірність таких фільтрів забезпечується великою просторовою протяжністю ЗШП. Потрібна АЧХ досягається застосуванням аподизації приймального та передавального перетворювачів.

Використовуються ЗШП, які працюють як на основній частоті так і ті, що працюють більш високих гармоніках. Основні характеристики фільтрів, що використовують зустрічно-штиреві перетворювачі різної конструкції наведені в табл.4.3.

Фільтри мають наступні характеристики:

- Частотний діапазон фільтрів, що використовують різні типи ЗШП, лежить в межах від 3 до 2000 МГц;
- Мінімальна смуга пропускання – 0,005%;
- Максимальна смуга пропускання (для віяльних та нееквідістантних ЗШП) – від 30 до 50%;
- Мінімальні втрати (затухання сигналу при розповсюдженні поверхневої хвилі) – 0,5 дБ;
- Затухання за смугою пропускання – до 80 дБ;

Таблиця 4.3

Основні характеристики фільтрів на ПАВ

Тип ЗШП	$\frac{\Delta f_0}{f_0}, \%$	Затухання, дБ
неаподізований	1...50	6...40
аподізований	0,3...1,0	6...20
ємнісний	5...20	4...15
віяльний неаподізований	3...30	10...20
віяльний аподізований	3...25	10...22
нееквідістантний	10...50	6...20
однонаправлений	0,1...5	0,5...6

Фільтри на ПАХ відзначаються простотою, технологічністю, повторюваністю характеристик при масовому виготовленні. Зараз налагоджено серійний випуск фільтрів на ПАВ, наприклад фільтри ФПЗП9-451, ФПЗП9-458-2-1, ФПЗП9-458-2-2 для телевізійної техніки. Їх характеристики наведені в табл.4.4.

Таблиця 4.4

Характеристики деяких фільтрів на ПАХ

Найменування параметрів	Тип фільтра		
	ФПЗП9-451	ФПЗП9-458-2-1	ФПЗП9-458-2-2
Центральна частота, МГц	38	38,9	45,75
Смуга пропускання, МГц	5,56	4,4	3,5
Нерівномірність АЧХ, дБ	1	1	1
Внесене затухання, дБ	25	25	25

Відстань між ЗШП визначає час затримки сигналу, від якого залежить час поширення акустичної хвилі від збуджувача до перетворювача. Це дозволяє використовувати пристрої на ПАХ як лінії затримки.

Завдяки поверхневому характеру розповсюдження ПАХ легко реалізувати багатовідвідні ЛЗ (рис.4.7), розмістивши в потрібних місцях додаткові ЗШП.

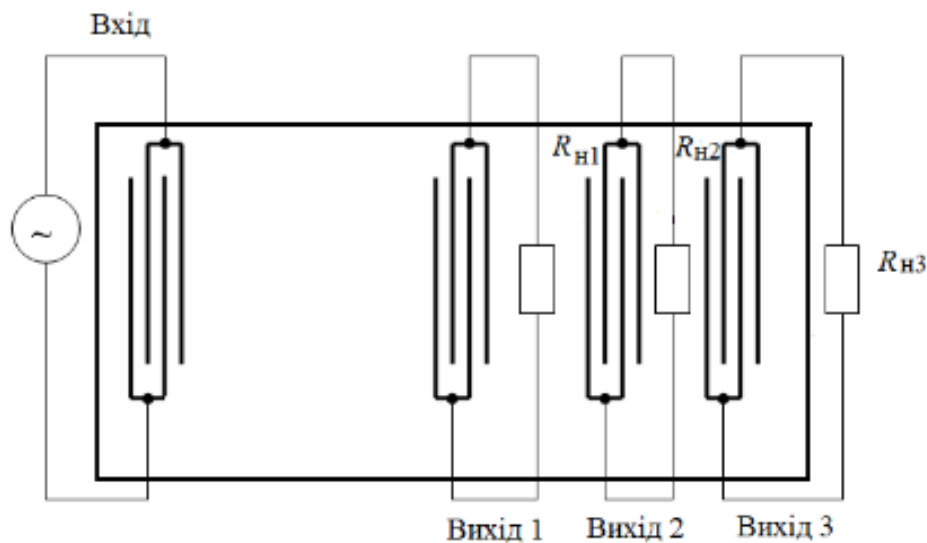


Рис.4.7. Багатовідвідна лінія затримки на ПАХ

Розмістивши один широкосмуговий ЗШП та нееквідістантний приймальний перетворювач, відстань між штирями якого зростає в напрямку поширення хвилі обернено до закону ЧМ сигналу, можна створити дисперсійну лінію затримки.

Генератори на ПАХ

Якщо в коло зворотного зв'язку ввімкнути пристрій на ПАХ (фільтр або ЛЗ), то можна отримати генератор (рис.4.8).

Генерація ВЧ сигналу в схемі виникає при виконанні двох умов:

- балансу фаз

$$\varphi_{ЛЗ} + \varphi_{ел} = 2\pi n \quad (n = 0, 1, 2, 3),$$

де $\varphi_{ЛЗ}$ – фазовий зсув в ЛЗ, $\varphi_{ел}$ – фазовий зсув в електричних колах.

– балансу амплітуд ($K_{ел} > K_{ЛЗ}$),

де $K_{ел}$ – коефіцієнт підсилення підсилювача, $K_{ЛЗ}$ – затухання в пристрої на ПАХ (лінії затримки).

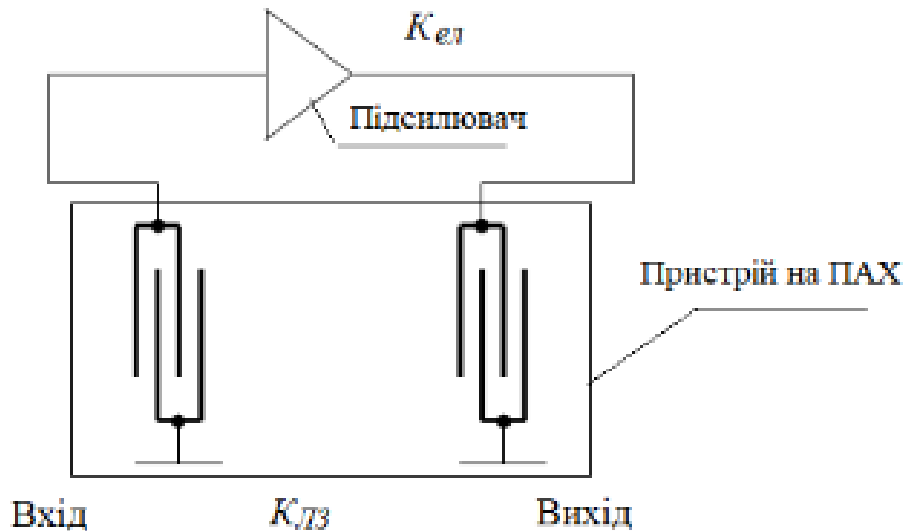


Рис.4.8. Генератор на ПАХ

Такі генератори можуть працювати в діапазоні частот від 10 МГц до 3ГГц. Добротність пристроїв на ПАХ (ЛЗ, фільтрів, резонаторів) лежить в межах 100...10000, що забезпечує високу стабільність частоти. Типові значення стабільності частоти одномодових ПАХ-генераторів лежать в межах: відносна температурна нестабільність близько 10^{-4} (в інтервалі температур від -60 до $+70^{\circ}\text{C}$), у режимі синхронізації до 10^{-8} , відносна тривала нестабільність 10^{-6} за місяць, короткочасна тривала нестабільність частоти 10^{-9} ... 10^{-10} (за 1 сек). Спектральні характеристики ПАХ-генераторів можна поліпшити при використанні ПАХ-резонаторів і структур з відбиваючими решітками, добротність яких може сягати до 10000. Характеристики ПАХ генераторів наближаються до характеристик високостабільних кварцевих генераторів з помноженням частоти. На ПАХ пристроях можна створити генератори на

частоти до 3 ГГц без застосування помножувачів. При чому вони мають малі габаритні розміри, низьку потужність, що споживається, високу механічну міцність, відсутність побічних кливань, простоту здійснення частотної модуляції, слабку чутливість до механічних впливів та акустичних шумів.

Перевагами генераторів на ПАХ є:

- відсутність частотнозадаючих індуктивностей, можливість виготовлення в єдиному технологічному циклі з виготовленням ІС,
- малі габарити і вага,
- дешевизна та мала чутливість до вібрацій.

Цікавим є використання ПАХ генераторів для одержання сигналів зі швидким перемиканням частоти. В них використовуються багаточастотні програмовані генератори з комутованими частотнозадаючими фільтрами у колі зворотного зв'язку. В таких генераторах за допомогою зовнішнього сигналу управління можна переходити від однієї частоти до іншої. Можна також використати набір ПАХ-фільтрів у колі зворотного зв'язку широкосмугової ЛЗ та здійснювати перестройку частоти програмованими стрибками фази.

Крім цього, при введенні при синхронізації ПАХ-генератора з широкосмуговою ЛЗ зовнішнім сигналом визначеної частоти може бути забезпечений багатомодовий режим генерації. Багатомодові ПАХ-генератори можуть застосовуватись для формування сітки частот в синтезаторах.

Переваги акустоелектронних пристроїв відкривають перспективи їхнього широкого використання не лише в трактах проміжної частоти, але й безпосередньо у вхідних та вихідних трактах надвисокочастотної (НВЧ) радіоелектронної апаратури. У НВЧ діапазоні сигнали можуть бути безпосередньо введені, оброблені й виведені без додаткових схем перетворення частоти.

ПАХ датчики

Якщо звукопровід ЛЗ зробити чутливим до механічних та фізичних впливів, то можна створити датчики температури, переміщення, тиску то що.

В датчиках температури теплочутливий звукопровід виготовляється з термочутливої п'єзокерамики, або ніобату літію.

Датчики переміщення побудовані ефекті залежності частоти акустичного синхронізму впливу деформації звукопроводу на частоту акустичного резонансу чутливого до механічної деформації елементу. Вони поділяються на датчики консольного типу (рис.4.9) та мембранного типу (рис.4.10).

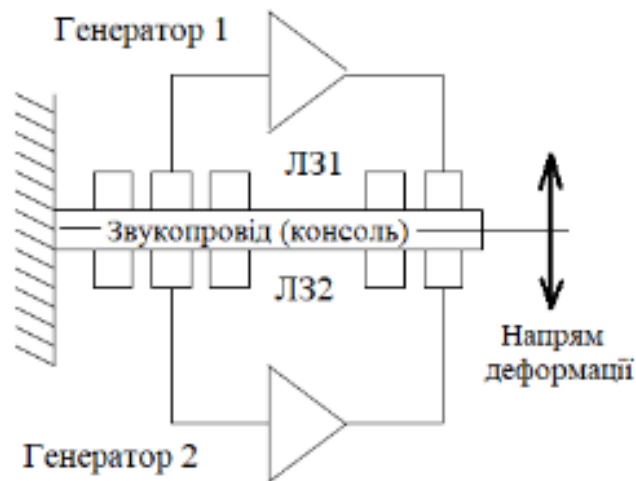


Рис.4.9. Датчик на ПАХ консольного типу

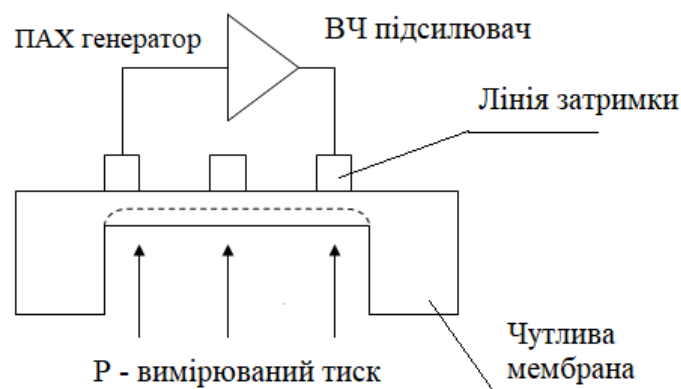


Рис.4.10. Датчик на ПАХ мембранного типу

При деформації змінюються акустична довжина звукопроводу та умови розповсюдження ПАХ, що призводить до зміни частоти генератора. Прикріпивши груз можна побудувати акселерометри, пристрої що вимірюють прискорення.

Дослідження деформаційних та температурних ефектів в автогенераторах на ПАХ дозволили створити перетворювачі на ПАХ генераторного типу для вимірювання лінійних прискорень (рис.4.11) в діапазонах $\pm(1; 5; 10; 20; 50; 100)g$ та тиску (рис.4.12) в діапазонах $(1,6...63) \cdot 10^2$ кПа з основною похибкою коефіцієнта перетворення $0,05 \div 0,25$ %.

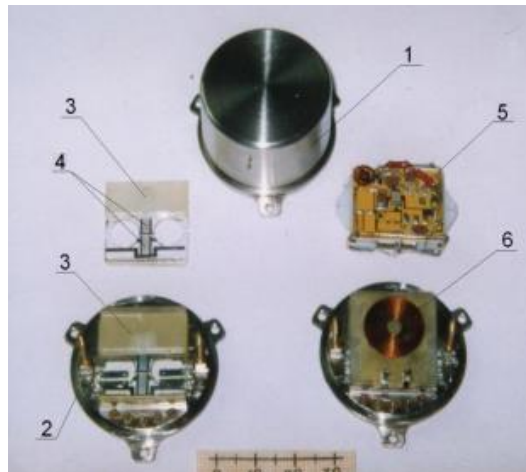


Рис. 4.11. Конструкція акселерометра 2SA: 1 – акселерометр у корпусі, 2 – основа, 3 – маятниковий кварцовий чутливий елемент, 4 – ЗШП ПАХ, 5 – електронна плата, 6 – термодатчик



Рис.4.12. Конструкція датчика тиску 2SP: 1 – перетворювач у корпусі; 2 – вузол чутливого елемента; 3 – електронні плати; 4 – кварцовий мембранний чутливий елемент (варіанти); 5 – штуцер

Зараз фірмою Hewlett Packard серійно виготовлюються датчики тиску від 10 КПа до 10^6 КПа (0,1...100 атм) класу точності 0,25...0,5%. Акселерометри на прискорення до 300 g.

Адаптивні фільтри на ПАХ

Адаптивні фільтри (АФ) на ПАХ можуть бути застосовані в пристроях прийому та періодичного випромінювання сигналів, що формують хибні відбиття сигналу від цілі для маскування реального сигналу в системах радіопротидії.

Існує декілька шляхів створення таких пристроїв на ПАХ.

Це використання багатовідвідної лінії затримки (БЛЗ), до виводів якої під'єднані каскади з регульованим коефіцієнтом підсилення. Така конструкція дозволяє формувати АЧХ та ФЧХ, які є функцією вагових коефіцієнтів електродів ЗШП і можуть змінюватися в широких межах. Межі регулювання вагового коефіцієнту складають біля 40 дБ, а швидкість перемикавання ЗШП – біля 100 нс.

В фільтрах на ПАХ зміна вагових коефіцієнтів відбувається шляхом аподизації (зміни перекриття сусідніх електродів за функцією, що пов'язана з їх АЧХ та ФЧХ) ЗШП фільтра. Оперативно змінюючи довжину електрода, що ефективно збуджує ПАХ, можна керувати характеристиками фільтра.

Конструкція такого фільтра показана на рис.4.13.

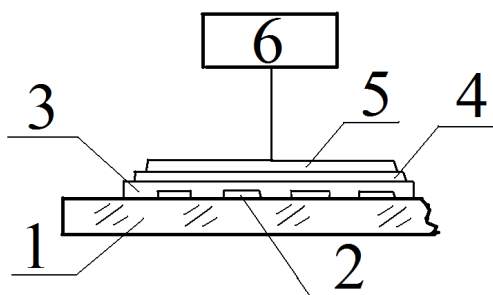


Рис.4.13. Конструкція тонкоплівкового перетворювача АФ на ПАХ:

1 – звукопровід, 2 – ЗШП, 3 – плівка оксиду цинку ZnO, 4 – плівка сульфїду кадмію CdS, 5 – світлодіодна матриця, 6 – мікроконтролер

Структура звукопровід-ЗШП-плівка ZnO-засвічена матрицею плівка сульфїду кадмію створює тонкоплівковий перетворювач ПАХ, що збуджує акустичну хвилю в виготовленому з плавленого кварцу звукопроводі 1.

Для отримання ефективного електроакустичного перетворення необхідно мати тонку плівку ZnO з відношенням $h/\lambda \approx 0,03 \dots 0,04$, де h – товщина плівки, λ – довжина поверхневої акустичної хвилі, $\lambda = V/f$, де V, λ, f – фазова швидкість, довжина та частота ПАХ. Товщина плівки для ЗШП з кроком 45 мкм (робоча близько 70 МГц) повинна складати 1...2 мкм. Кількість електродів в ЗШП N визначається із умови отримання мінімальної смуги пропускання фільтра Δf і визначається виразом $N = f/\Delta f$, а апертура W – із умови відсутності дифракційних спотворень при розповсюдженні ПАХ по поверхні звукопроводу $W = V\sqrt{\tau/f}$, де τ – час затримки сигналу в звукопроводі. Засвічена частина плівки сульфїду кадмію створює закорочуючий покриваючий електрод, під яким ефективно збуджується ПАХ. Товщина плівки CdS лежить в межах 2...3 мкм. Форма засвіченої частини плівки визначає функцію аподизації перетворювача, тобто його АЧХ та ФЧХ. Мікроконтролер 6 управляє світлодіодною матрицею 5, яка формує світловий потік в відповідності до алгоритму обробки сигналу.

4.5. Інші види функціональної електроніки

Магнітоелектроніка – область, в якій використовуються оброблення сигналів. Існують два напрямки магнітоелектроніки:

- прилади із застосуванням доменних структур (пристрої пам'яті на центральних магнітних доменах ЦМД).
- прилади на магнітних коливаннях та хвилях (використання поверхневих магнітних хвиль ПМХ).

ПМХ – це магнітостатична хвиля, що існує на поверхні намагніченого тіла і пружно загасає вглиб речовини (аналог ПАХ). Збуджується НВЧ

магнітним полем мікострічкових ліній передач з феритовою плівкою. На основі ПМХ можна побудувати ЛЗ, перестроювані фільтри, НВЧ генератори та інше.

Хемотроніка – виникла на основі електрохімії та електроніки. Вона побудована на основі процесів, що протікають під дією струму в рідких тілах з іонною провідністю. А саме зміни опору провідника в результаті катодного осадження на нього металу або його анодного розчинення. Конструкція електрохімічного регулюємого резистора (мамістора) приведена на рис.4.14.

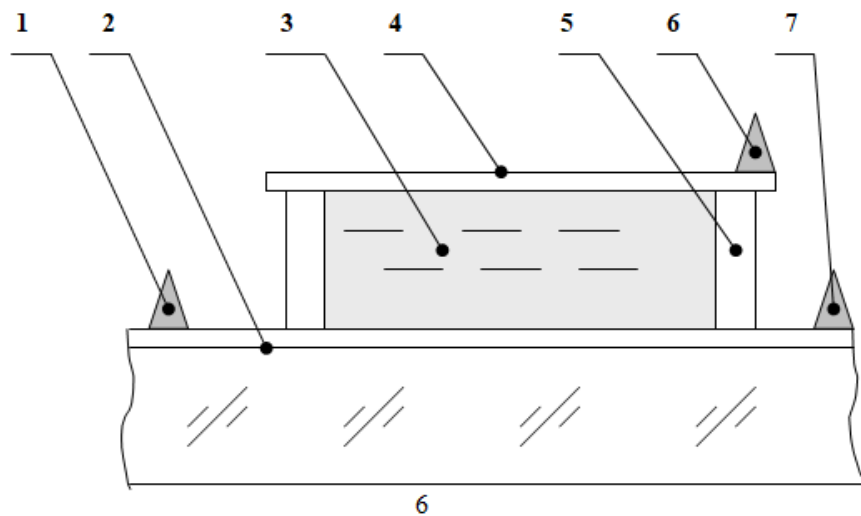


Рис.4.14. Конструкція базового елементу хемотроніки

На рисунку: 1 – вивід 1; 2 – провідникова основа; 3 – електроліт: $\text{CuSO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{етиловий спирт}$; 4 – електрод; 5 – корпус (скло); 6 – вивід управління; 7 – вивід 2.

Прилади мають:

- діапазон зміни опору $0 \dots 1000 \text{ Ом}$;
- діапазон струмів управління $0,05 \dots 1 \text{ мА}$;
- потужність управління $10^{-3} \dots 10^{-6} \text{ Вт}$;
- об'єм $0,2 \text{ см}^3$;
- можуть працювати при температурах від -15 до $+100^\circ \text{ С}$;

Можливе використання в автоматизації, обчислювальній та вимірювальній техніці. На них можна будувати реле часу, пристрій пам'яті та інше.

4.6. Контрольні запитання

1. В чому полягає суть функціональної електроніки?
2. Прилади з зарядовим зв'язком. Для чого їх можна використовувати?
3. Циліндричний магнітний домен. Що це?
4. Пристрої на ПАХ. В чому їх особливості?
5. Як побудовані фільтри на ПАХ?
6. Як створити ПАХ-генератор?
7. На якому принципі працюють ПАХ датчики?
8. Як створити на пристроях на ПАХ датчик тиску?
9. Мамістори. Що це таке?

5. НАНОЕЛЕКТРОНІКА

5.1. Основні поняття наноелектроніки

У своєму розвитку електроніка пройшла три етапи:

- лампова електроніка;
- напівпровідникова електроніка;
- мікроелектроніка – інтегральна електроніка.

Твердотільна інтегральна електроніка (мікроелектроніка) розвивалася в бік зменшення габаритів, збільшення ємності пам'яті та підвищення швидкодії і надійності електронних систем. Саме на цьому шляху були розроблені методи мініатюризації елементів інтегральної мікросхеми, що відкрили реальні можливості переходу до наноелектроніки.

Подальший прогрес у створенні матеріалів з новими властивостями підготував можливість появи електроніки субмікронних елементів (наноелектроніки). Наноелектроніка – це сучасний, четвертий етап розвитку електроніки.

Основні напрямки наноелектроніки це:

- розробка фізичних основ роботи активних ЕРЕ манометрових розмірів,
- розробка конструкцій наноелектронних пристроїв та технологічних процесів для їх виготовлення,
- розробка інтегральних схем з використанням нанoeлементів.

Дотепер ці властивості були визначені процесами, що протікають в макроскопічних об'єктах. Однак були помічені (і використовуються в техніці) розмірні ефекти, що спостерігаються в тонких плівках, на поверхні кристалів і в надмалих частинках речовини і які відмінні від процесів, що відбуваються при макророзмірах. З'явилася можливість змінювати властивості речовини – через зміну її фрагментації. З'явилася така галузь науки, як нанофізика (напрямок фізичного матеріалознавства, пов'язаного зі створенням і вивченням структури

та властивостей матеріалів, що мають дуже малі кристали або їх групи (кластери, що включають в себе від 1 до 100 атомів).

Кластер – це група з невеликої і у загальному випадку змінної кількості взаємодійних атомів, іонів або молекул. Теоретично мінімальна кількість атомів у кластері дорівнює двом. Верхній межі кластера відповідає така кількість атомів, при якій додавання ще одного атома вже не змінює властивостей кластера. З фізико-хімічного погляду ця зміна закінчується, тоді коли кількість атомів у групі досягає 1...2 тисяч. Кластери мають щільне та регулярне упакування атомів і побудовані з найпростіших стабільних атомних конфігурацій.

Виготовляються такі елементи за допомогою нанотехнології, яка є сукупністю методів виготовлення й оброблення структур, що мають довжину 1...100 нм (хоча б за одним з вимірів). Нанотехнологія – найбільш перспективний напрям сучасної технології. науково-технічний напрям зі створення матеріалів, функціональних структур і приладів нанометрових розмірів, які демонструють унікальні механічні, оптичні електричні та магнітні властивості.

Відомо, що властивості поверхні твердого тіла істотно відрізняються від його об'ємних властивостей. Це пов'язано з тим, що на поверхні кристала регулярні електронні зв'язки атомів обірвані, шз-за чого рівноважна структура поверхні має інші властивості, ніж об'ємна структура. Дослідження показали, що на поверхні кристала змінюється кількість атомів в елементарній комірці, з'являється інша симетрія, а також змінюються частоти коливання кристалічних ґраток (частоти фононів).

Електрони у нанокластерах, які співрозмірні з довжиною хвилі де Бройля, поведуться інакше. Квантоворозмірні ефекти, відповідно до яких побудовані наноелектронні прилади, реалізуються за умови, що середня довжина вільного пробігу електронів перевищує розміри використовуваного нанокластера.

В кристалі створюються надгратки. Вони можуть створюватися у провідникових, магнітних і напівпровідникових матеріалах. Однак найбільш повно досліджені саме напівпровідникові надгратки, що складаються з послідовних наночарів напівпровідників, які розрізняються за складом. У цьому випадку надгратки можуть розглядатися як одновимірні системи потенціальних ям, розділених порівняно вузькими потенціальними бар'єрами з помітною тунельною прозорістю. На основі надграток створено прилади з N -подібною вольтамперною характеристикою, яка дозволяє підсилювати і генерувати електромагнітні коливання, а також створювати ефективні світловипромінювальні прилади та прилади іншого призначення. У надгратках може виявлятися резонансний тунельний ефект, який полягає в різкому збільшенні ймовірності проходження електронів крізь дво або багатобар'єрну структуру, коли початкова енергія електрона збігається з енергетичним рівнем у суміжній потенціальній ямі (резонансний рівень). Це явище використовують для розробки надшвидкодіючих приладів.

В цілому можливості застосування напівпровідникових нанотехнологій в електроніці показані на рис.5.1.

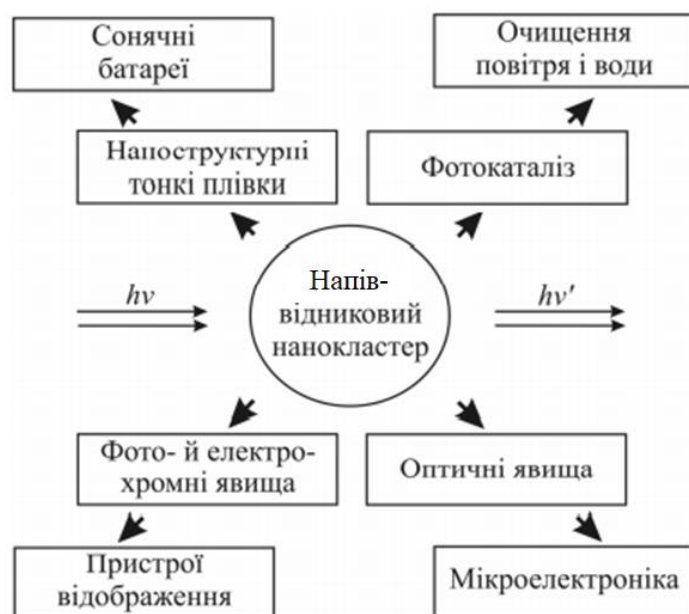


Рис.5.1. Застосування напівпровідникових нанотехнологій

Основною причиною зміни термодинамічних характеристик нанокристала порівняно з масивною речовиною є змінення виду й меж фононного спектра, тобто зміна функції розподілу частот атомних коливань.

Внаслідок порушення кореляції взаємодії спінових і орбітальних моментів електронів на поверхні кристалів істотно змінюються фундаментальні магнітні та оптичні властивості речовин.

5.2. Біполярні транзистори нонорозмірів

Відомо два типи біполярних транзисторів – транзистори з гомопереходами та транзистори з гетеропереходами. У транзисторах з гомопереходами для підвищення коефіцієнта підсилення α треба підвищувати коефіцієнт інжекції γ . В звичайному р-п переході, який використовується в БТ, для досягнення коефіцієнта інжекції близького до 1

$$\gamma = \frac{I_p}{I_p + I_n} = 1 - \frac{\rho_E}{\rho_B}$$

перехід повинен бути обов'язково сильно не симетричний, тобто база повинна бути більш високоомна ніж емітер тобто $N_E \gg N_B$.

Одже ступінь легування емітера має бути значно вищим, ніж бази. Але в такому разі необхідно враховувати, що дуже високий ступінь легування напівпровідника зменшує його ширину забороненої зони. Наприклад, за концентрації домішок 10^{20} см^{-3} ширина забороненої зони кремнію зменшується на 14 %, що зумовлює зменшення коефіцієнта інжекції γ .

В гетеропереходах цього не потрібно, тому що вони мають принципово різні потенціальні бар'єри для електронів та дірок і за рахунок різної ширини забороненої зони $\Delta\phi_{0n} \ll \Delta\phi_{0p}$ база може бути сильнолегована ($N_B \gg N_E$).

Це дозволяє робити вузьку сильнолеговану базу з малим опором $\rho_B < \rho_E$, при якій ефект Ерлі (вплив зворотної напруги КП на струм ЕП, що відбувається із-за зміни ширини збідненої зони переходу та ширини бази) зводиться до

мінімуму. Тому гетероперехідні транзистори можуть працювати на частотах до 100 ГГц.

Найбільшого поширення для утворення гетеропереходів набули напівпровідникові сполуки АІІВV. Комбінуючи елементи ІІІ і V груп таблиці Менделєєва, можна створювати сполуки, подібні до германію і кремнію, тобто з такою ж кількістю валентних електронів (чотири) на один атом.

Властивості й зонна структура таких сполук, як GaAs, ZnP, ZnAs, ZnSe, AlAs, аналогічні класичним напівпровідникам – кремнію і германію. Але вони є матеріалами з різною шириною забороненої зони, різними параметрами кристалічної ґратки, різною діелектричною проникністю та іншими властивостями, важливими для використання у тих чи інших приладах. Більше того, у деяких сполуках, наприклад, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, можна змінювати властивості неперервно, змінюючи x від 0 до 1.

Найбільш вивченою гетероструктурою є гетероперехід, який утворюється при з'єднанні $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (п-типу) із слабколегованим GaAs (р-типу) (див. рис.5.2). Таку структуру називають гетеропереходом із селективним або модульованим легуванням.

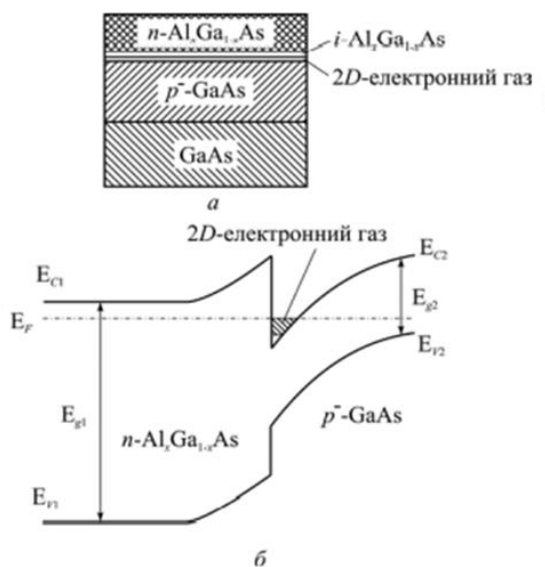


Рис.5.2. Структура (а) та зонна діаграма (б) для гетеропереходу $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ –GaAs

Енергетичну діаграму гетеротранзистора наведено на рис.5.3. Емітером транзистора є широкозонний напівпровідник $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ п-типу, а базою і колектором – вузькозонний GaAs р-типу і GaAs п-типу відповідно.

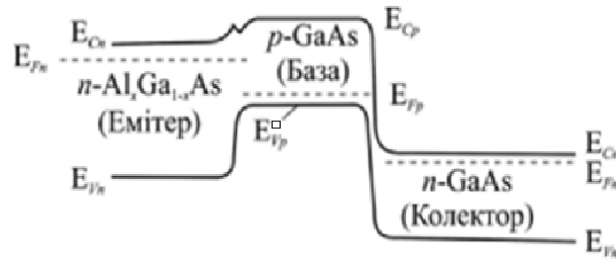


Рис.5.3. Зонна діаграма транзистора з емітерним гетеропереходом

Висота потенціального бар'єра емітерного гетеропереходу для дірок на ΔE_v більша за висоту бар'єра для електронів. Відомо, що інжекційний струм експоненціально залежить від висоти потенціального бар'єра. Тому навіть за однакової концентрації домішок в емітері й базі інжекційний струм дірок буде менший від електронного струму. Тобто коефіцієнт інжекції гетеропереходу буде значно вищим, ніж гомопереходу.

На властивості транзистора істотно впливають процеси, які відбуваються в базі. До бази біполярного транзистора ставляться суперечні вимоги: з одного боку, для мінімізації часу прольоту електронів від емітера до колектора база повинна бути якомога тоншою, а з другого – достатньо товстою, щоб мати малий опір між базовим контактом і колектором. Розв'язати цю суперечність у транзисторах з гомопереходами неможливо, оскільки зменшення товщини бази збільшує її опір. Спроба зменшити опір бази шляхом сильного легування призведе до зниження коефіцієнта інжекції а відповідно до зменшення коефіцієнта підсилення за струмом.

У гетеротранзисторах база може бути легована навіть сильніше за емітер, тому опір бази і бар'єрна ємність переходу завдяки слабкому легуванню емітера істотно знижуються. Одночасне зменшення опору бази і ємності

переходу емітер-база (ЕБ) дозволяє значно покращити частотні характеристики гетероперехідних біполярних транзисторів. Іншою важливою особливістю гетероперехідних транзисторів є можливість утворення бази, ширина забороненої зони якої поступово зменшується від емітера до колектора (рис.5.2,б). У такій базі утворюється внутрішнє електричне поле, яке прискорює рух електронів і додатково підвищує швидкість транзистора. Прискорення прольоту бази за рахунок внутрішнього поля зменшує рекомбінаційні втрати струму емітер–колектор а одже підвищує коефіцієнт підсилення транзистора за струмом.

У гетероперехідних транзисторах для утворення колектора може використовуватися широкозонний напівпровідник, який з вузькозонною базою також утворює гетероперехід. Такі структури називають подвійними гетероперехідними транзисторами (ПГБТ). Колекторний гетероперехід дозволяє зменшити значення зворотного струму колектора, зумовленого неосновними носіями заряду. Крім того, у такому переході не відбувається зворотна інжекція дірок з бази в колектор завдяки високому бар'єру для дірок.

Сучасні гетеротранзистори мають коефіцієнт підсилення за струмом у схемі зі спільним емітером до 1000 одиниць і робочу частоту до 100 ГГц. Перспективними матеріалами для створення гетероперехідних транзисторів є сплави на основі SiGe, у яких можна сформувати гетеропереходи, оскільки ширина забороненої зони кремнію становить 1,12 еВ, а германію – 0,67 еВ.

5.3. Польові транзистори нанорозмірів

У польовому транзисторі струм, що протікає через канал, змінюється під впливом електричного поля, прикладеного перпендикулярно до напрямку струму, створеному вхідним сигналом. Задача підвищення швидкодії польових МДНП транзисторів потребує високої електропровідності каналу та великої рухливості носіїв у каналі. Висока електропровідність досягається підвищенням ступеня легування напівпровідника, а це призводить до зниження рухливості

носіїв заряду із-зі їх розсіювання на іонізованих домішках. Оскільки рухливість визначає час прольоту каналу τ і крутість транзистора S , то вимоги підвищення рухливості за одночасного збільшення легування є суперечними.

Подолати цю суперечність можливо у гетероструктурних польових транзисторах із селективним легуванням (ПТГСЛ) побудованих на основі $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -GaAs. Ці транзистори є прикладом приладів, у яких висока швидкодія, досягається за рахунок квантових ефектів електронів у нанометрових потенціальних ямах, розміри яких менші ніж довжина хвилі де Бройля.

Структуру ПТГСЛ показано на рис.5.4,а. Транзистор це шар слабколегованого напівпровідника GaAs p -типу нанесеного на напівізолювальній підкладці, зверху якого знаходиться шар сильнолегованого напівпровідника AlGaAs n -типу. Між широкозонним AlGaAs і вузькозонним GaAs утворюється гетероперехід. За цих умов електрони із сильнолегованого AlGaAs переходять у напівпровідник GaAs, у результаті чого виникає внутрішнє електричне поле, напрямлене від позитивних некомпенсованих іонів донорів в AlGaAs у бік GaAs.

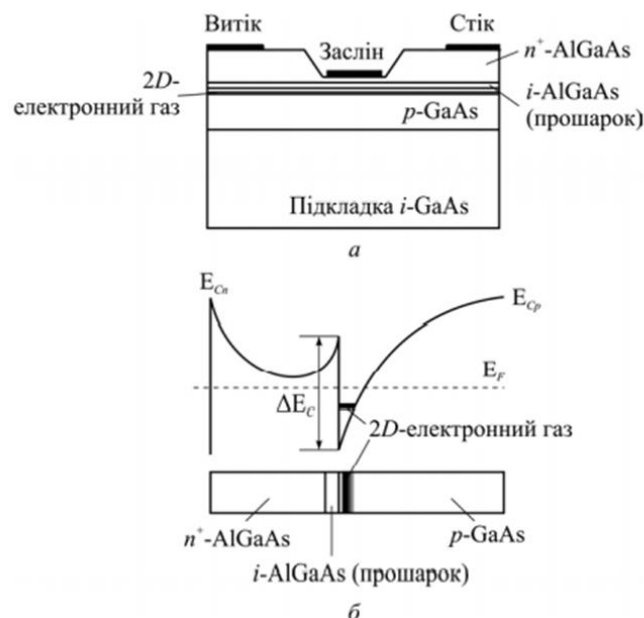


Рис.5.4. Структура польового транзистора із селективним легуванням (а)
та його зонна діаграма (б)

Це поле приводить до викривлення енергетичних рівнів і розриву дна зони провідності на значення ΔE_C (рис.5.4,б). Електрони, які перейшли в шар GaAs, опиняються в потенціальній ямі й утворюють провідний канал.

Ширина потенціальної ями становить декілька нанометрів, тому рух електронів у каналі має двовимірний характер (2D), вільний вздовж каналу й обмежений поперек каналу. Оскільки ширина потенціальної ями близька до довжини хвилі де Бройля, енергетичний спектр електронів в ямі квантується, і тому рух електронів поперек ями не можна розглядати як рух класичної частинки. Електронний газ у такому вузькому каналі називають двовимірним, або 2D-газом. Основною особливістю гетероструктури із селективним легуванням є те, що двовимірний електронний газ міститься у майже власному напівпровіднику GaAs і просторово віддалений від іонізованих донорів у шарі AlGaAs. Тому електрони, рухаючись вздовж каналу, не розсіюються на домішках, і їх рухливість значно перевищує рухливість електронів у каналі звичайного МДН-транзистора.

Для поліпшення контакту з каналом і зменшення опору між стоком і витокм ділянки напівпровідника під стоком і витокм сильнолеговані. До характеристик легованого шару AlGaAs ставляться певні вимоги. По-перше, товщина шару має бути якомога меншою, що забезпечує високе значення крутості транзистора. По-друге, цей шар надає електрони до каналу і тому повинен бути сильнолегованим і мати високий потенціальний бар'єр гетеропереходу для зменшення зворотного струму. Але при концентрації донорів більш за 10^{18} см^{-3} зростає струм витікання через бар'єр Шотткі, який створюється на контакті металу заслону та напівпровідника.

Вольт-амперні характеристики ПТГСЛ аналогічні до характеристик МДН-транзисторів. Такі транзистори можуть працювати на частотах понад 100 ГГц і мають коефіцієнт шуму менший за 2 дБ.

Польові транзистори на гетероструктурах із селективним легуванням, у яких перехід Шотткі утворюється між металом і легованим шаром AlGaAs,

називають транзисторами з нормальною, або прямою структурою. Їх недоліком є мала пробивна напруга, зумовлена сильним легуванням шару AlGaAs.

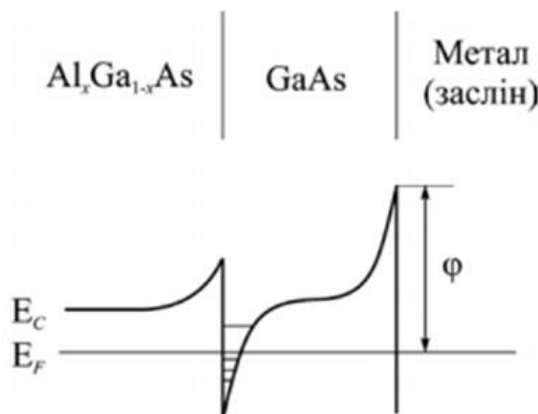


Рис.5.5. Структура та зонна діаграма для зони провідності ПТ з оберненою гетероструктурою

Більш високу напругу пробою мають ПТГСЛ з оберненою структурою (рис.5.5), у яких бар'єр Шотткі утворюється між металом і слабколегованим шаром GaAs. Напруга пробою у таких транзисторах більша 10 В.

5.4. Транзистори на гарячих електронах

У рівноважному стані вільні електрони у напівпровіднику мають однакову температуру з кристалічною ґраткою. Але в деяких випадках температура електронів може бути набагато більшою від рівноважної. Такі електрони називають гарячими. Розігріти електрони, тобто збільшити їх кінетичну енергію, можна різними способами, наприклад, зовнішнім прискорювальним електричним полем, оптичним збудженням, інжекцією через гетероперехід.

Залежно від способу розігрівання електронів транзистори на гарячих електронах можна розділити на два типи: транзистори з балістичною інжекцією електронів через гетероперехід і транзистори з перенесенням розігрітого електронного газу у просторі.

У транзисторах з балістичною інжекцією гарячих електронів інжектованим з емітера в базу електронам надається велика початкова швидкість, завдяки якій вони пролітають базу за інерцією (тобто балістично).

У транзисторах з перенесенням гарячого електронного газу у просторі використовується емісія гарячих електронів через потенціальний бар'єр подібно емісії електронів із гарячого катода у вакуумному діоді.

5.5. Прилади на резонансно-тунельному ефекті

До приладів на резонансно-тунельному ефекті належать резонансно-тунельні діоди й резонансно-тунельні транзистори, в основу роботи яких покладено структуру з подвійним потенціальним бар'єром і квантовою ямою (рис.5.6).

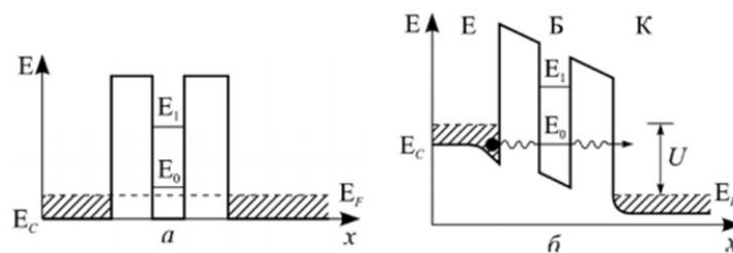


Рис.5.6. Зонна діаграма квантової структури з подвійним бар'єром: (а) – у рівноважному стані, (б) – з поданням зовнішньої напруги

Такі структури утворюються у вигляді шарів вузькозонних і широкозонних напівпровідників, що чергуються. Такі структури називаються структурами з подвійним бар'єром. Товщини потенціальних бар'єрів і потенціальної ями сумірні з довжиною хвилі де Бройля і тому через потенціальні бар'єри можливе ефективне тунелювання електронів, а рух електронів поперек ями квантується, тому в ямі з'являються дискретні енергетичні рівні для електронів. У рівноважному стані рівень Фермі структури розміщується нижче від дозволених рівнів у квантовій ямі. Проходження струму через ПБКС зумовлюється двома фізичними явищами: першим – послідовне тунелювання з подаванням напруги до структури електрони

зовнішнього виродженого напівпровідника, енергія яких збігається з дозволеним рівнем у квантовій ямі, тунелюють через бар'єр ліворуч, а потім тунелюють ще раз через бар'єр праворуч, та другим – резонансними коливаннями електронної хвилі в квантовій ямі (відбуваються так, як в оптичному резонаторі Фабрі–Перо).

Таблиця 5.1

Порівняльна характеристика нанотранзисторів

Параметр	Біполярні нанотранзистори (Nano-BJT)	Польові нанотранзистори (Nano-MOSFET)	Транзистори на гарячих електронах (HET)	Транзистори з резонансно-тунельним ефектом (RTT)
Принцип роботи	Використання інжекції і рекомбінації носіїв через <i>p-n</i> переходи	Контроль потоку носіїв через канал за допомогою електричного поля заслону	Інжекція «гарячих» електронів з високою енергією через бар'єр	Квантовий тунельний потік через енергетично резонансні рівні
Носії заряду	Електрони та дірки	Здебільшого електрони (<i>n</i> -MOSFET) або дірки (<i>p</i> -MOSFET)	Електрони з високою кінетичною енергією	Електрони, які тунелюють через бар'єр
Переваги	Висока швидкодія при малих розмірах; великий струм	Низьке споживання потужності; простота інтеграції	Дуже швидка робота, можливість роботи на високих частотах	Негативний диференціальний опір, потенціал для логічних елементів та генераторів
Недоліки	Високе тепловиділення; складність керування базовим струмом	Обмежена швидкість; проблеми з короткоканальними ефектами	Складна технологія; низька надійність	Малий струм; чутливість до температури, складне виробництво
Призначення та застосування	Високошвидкісні підсилювачі, RF-модулі (радіочастотні для передачі інформації)	Цифрова логіка, процесори, пам'ять	Високочастотні і мікрохвильові пристрої	Логічні елементи нового покоління, генератори, пам'ять з тунельним елементом
Тип струму	Струм бази управляє струмом колектора	Напруга заслону керує струмом стоку	Електрони переходять через бар'єр без повної рекомбінації	Тунельний струм залежить від напруги і резонансних рівнів

Порівняльну характеристику розглянутих типів транзисторів, біполярні нанорозмірів (BJT), польові нанотранзистори (MOSFET), транзистори на гарячих електронах (HET) та транзистори з резонансно-тунельним ефектом (RTT) приведено в табл.5.1.

Можна сказати що:

- Біполярні (Nano-BJT) швидкі, але енергоспоживання достатньо велике та вони складні в управлінні.
- Польові (Nano-MOSFET) мають низьке споживання, але обмежену швидкодію при надмалих розмірах. Найкраще підходять до сучасної цифрової техніки.
- Транзистори на гарячих електронах (HET) відрізняються високою частотою та швидкістю, але при виготовленні технологічно складні.
- Транзистори з резонансно-тунельним ефектом (RTT) – перспективні для квантових та логічних елементів з унікальними властивостями (негативний диференціальний опір), але працюють на малих струмах та складні в виготовленні.

Детально познайомитися з розглянутими вище та іншими активними нанoeлементами можна в [2, 3, 11].

5.6. Контрольні запитання

1. Що таке нанoeлектроніка?
2. В чому полягають основні напрямки нанoeлектроніки?
3. Що таке кластер і які особливості він має?
4. Які матеріали використовуються в напівпровідниковій нанoeлектроніці?
5. Біполярні гетероперехідні транзистори в нанoeлектроніці.
6. Чому гетероперехід дозволяє створити надвисокочастотні транзистори?
7. Польові гетероперехідні транзистори. В чому їх переваги?
8. Назвіть інші види нанoeлектронних елементів.

Список літератури

1. Троцишин І.В. Фізичні основи електронних приладів: Навчальний посібник / І.В.Троцишин – Хмельницький: ХДУ. – 2004. – 488 с.
2. Твердотільна електроніка : підручник / О. В. Борисов, Ю. І. Якименко ; за заг. ред. Ю. І. Якименка. – К. : НТУУ «КПІ», 2015. – 484 с.
3. Твердотільна електроніка [Електронний ресурс] : підручник для студ. спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка» / О. В. Борисов, Ю. І. Якименко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 19,2 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 484 с. URL https://me.kpi.ua/downloads/Borysov_Yakymenko_TTE_2018.pdf
4. Радіотехніка: Енциклопедичний навчальний довідник / За ред. Ю.Л.Мазора, Є.А.Мачуського, В.І.Правди. – К.: Вища шк., 1999. – 838 с.
5. Прищепа М.М., Погребняк В.П. Мікроелектроніка. В 3 ч. Ч. 1. Елементи мікроелектроніки: Навч. посіб. / За ред. М.М. Прищепи. – К.: Вища шк., 2004. – 431 с.
6. Прищепа М.М., Погребняк В.П. Мікроелектроніка: В 3 ч. Ч. 2. Елементи мікросхемотехніки: Навч. посіб. / За ред. М.М. Прищепи. – К.: Вища шк., 2006. – 503 с.
7. Мікроелектроніка і наноелектроніка. Вступ до спеціальності: навч. посіб. / Ю. М. Поплавко, О. В. Борисов, В. І. Ільченко та ін. – К.: НТУУ «КПІ», 2010. – 160 с.
8. Поплавко Ю. М. Нанофізика, наноматеріали, наноелектроніка : навч. посіб / Ю. М. Поплавко, О. В. Борисов, Ю. І. Якименко. – Київ : НТУУ «КПІ», 2012. – 300 с.
9. Комп'ютерна електроніка [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / К.К.Победаш; КПІ ім. Ігоря Сікорського. - Електронні текстові дані (1файл: 21,4 Мбайт). - Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. - 364 с.
10. Лепіх Я. І., Лопушенко В. К., Піддубний В. О., Жовнір М. Ф. Особливості створення хвиловодних структур для датчиків переміщень на ПАХ / Sensor Electronics and Microsystem Technologies, 2008. № 3. С. 24–27.
11. Фізичні основи наноелектроніки [Електронний ресурс]: практикум: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Електронні мікро- і наносистемні технології» спец. 176 Мікро- та наносистемна техніка / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: О. В. Семеновська, О. М. Фалєєва. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 36 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/2a504e51-28ed-44c3-b0e8-c0a0b9aa29d0/content>
12. Н. Muhammad, Power Electronics Handbook – Elsevier Inc., 2024. – 1472 p. URL: <https://www.iqytechnicalcollege.com/Power%20Electronics%20Handbook.pdf>