



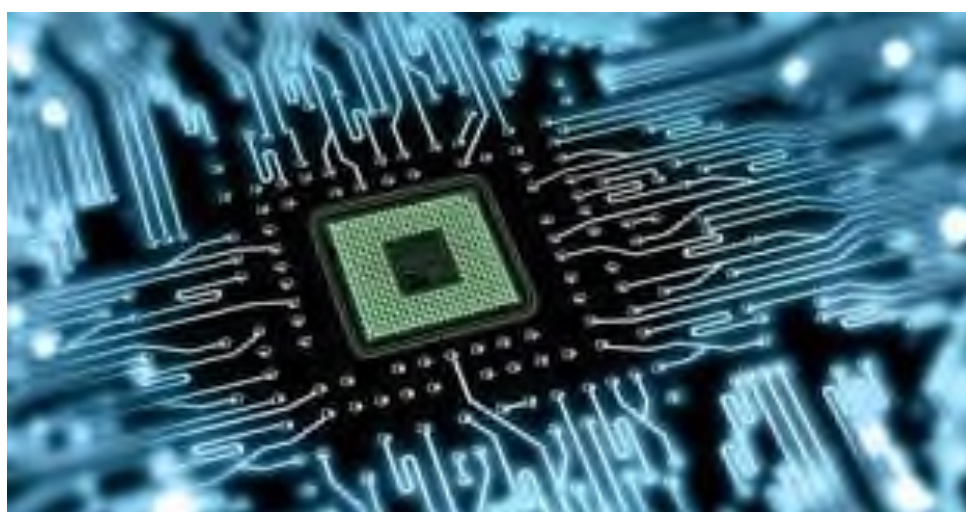
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ

Кафедра приладів і контрольно-вимірювальних системи

К О Н С П Е К Т Л Е К Ц І Й

Компоненти мікро- та нанотехніки

для студентів спеціальності
176 – «Мікро- та наносистемна техніка»



Конспект лекцій розроблений у відповідності з навчальним планом за спеціальністю 176 – Мікро-та наносистемна техніка.

Укладачі: д.т.н., Паламар М.І., к.т.н., Стрембіцький М.О.

Відповідальний за випуск: завідувач кафедри приладів і контрольно-вимірювальних систем Паламар М.І.

Розглянуто та затверджено на засіданні приладів і контрольно-вимірювальних систем Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, протокол № 7 від «1» травня 2023 р.

Схвалено та рекомендовано до друку науково-методичною комісією факультету прикладних інформаційних технологій та електроінженерії ТНТУ, протокол № 10 від «5» травня 2023 р.

Конспект лекцій складений з врахуванням методичних розробок інших вищих закладів освіти, а також матеріалів літературних джерел, перелічених в списку.

ЗМІСТ

ЛЕКЦІЯ 1 ОСНОВИ МІКРОЕЛЕКТРОНІКИ	5
1.1 Основні поняття, положення та етапи розвитку мікроелектроніки	5
1.1.1 Основні поняття та терміни.....	5
1.1.2 Класифікація, характеристика і система умовних позначень основних типів інтегральних мікросхем (ІМС).....	6
ЛЕКЦІЯ 2 ОСНОВИ МІКРОЕЛЕКТРОНІКИ	12
2.1 Загальна характеристика та класифікація напівпровідників	12
2.2 Власна електронна та діркова електропровідність. Рухливість носіїв заряду	15
2.3 Контактні явища у мікроелектронних структурах	16
2.4 Характеристика випрямного контакту метал-напівпровідник	19
2.5 Діод Шотткі	22
2.6 Ефект Ганна.....	23
ЛЕКЦІЯ 3 НАПІВПРОВІДНИКОВІ ІМС.....	25
3.1 Типи конструкцій та структура НІМС.....	25
3.2 Ізоляція елементів у НІМС	27
ТЕМА 4 ТРАНЗИСТОРИ У НІМС	29
4.1 Біполярні транзистори (БТ)	29
4.2 Діоди у напівпровідникових ІМС	30
4.3 Напівпровідникові резистори	31
4.3 Напівпровідникові конденсатори.....	32
4.5 Індуктивність у НІМС.....	32
ЛЕКЦІЯ 5 ПЛІВКОВІ ТА ГІБРИДНІ ІНТЕГРАЛЬНІ МІКРОСХЕМИ	34
5.1 Конструкція плівкових та гібридних ІМС	34
5.2 Підкладки плівкових інтегральних мікросхем	35
ЛЕКЦІЯ 6 КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ І РОБОЧІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛІВКОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ГІМС	37
6.1 Загальна характеристика.....	37
6.2 Плівкові резистори	38
6.3 Плівкові конденсатори.....	38
6.4 Індуктивні елементи.....	39
6.5 R - C структури.....	40
ЛЕКЦІЯ 7 ВЕЛИКІ ІНТЕГРАЛЬНІ СХЕМИ (ВІС)	42
7.1 Класифікація, основні параметри і галузі застосування ВІС.....	42
ЛЕКЦІЯ 8 СУЧАСНІ НАПРЯМИ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОНІКИ	44
8.1 Функціональна мікроелектроніка.....	44
8.2 Хемотроніка.....	44
ЛЕКЦІЯ 9 МАГНІТОЕЛЕКТРОНІКА	48
9.1 Загальна характеристика.....	48
9.2 Циліндричні магнітні домени	48
9.3 Магніторезистори.....	49
9.4 Магнітодіоди	50
9.5 Магнітотранзистори	50
9.6 Магнітотиристоры	51
ЛЕКЦІЯ 10 АКУСТОЕЛЕКТРОНІКА.....	53

ЛЕКЦІЯ 11 ОПТОЕЛЕКТРОНІКА	55
ЛЕКЦІЯ 11 Криогенна електроніка	59
ЛЕКЦІЯ 12 ДІЕЛЕКТРИЧНА ЕЛЕКТРОНІКА, БІОЕЛЕКТРОНІКА	62
12.1 Діелектрична електроніка	62
12.2 Біоелектроніка	62
ЛЕКЦІЯ 13 НАПІВРОВІДНИКОВІ ПРИЛАДИ СПЕЦІАЛЬНОГО ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ	64
13.1 Стабілітрон	64
13.2 Тиристор	66
ЛЕКЦІЯ 14 СТРУКТУРА І ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТВЕРДИХ ТІЛ	70
14.1 Кристалізація і склування	70
14.2 Рідкі кристали	73
ЛЕКЦІЯ 15 ТЕРМОЕЛЕКТРОРУШІЙНА СИЛА	77
15.1 Контактна складова термоерс	77
15.2 Об'ємна складова термоерс	79
ЛЕКЦІЯ 16 ЕФЕКТ ПЕЛЬТЬЄ	84
ЛЕКЦІЯ 17 ЕФЕКТ ХОЛЛА	86
ЛЕКЦІЯ 18 ЕФЕКТ ЕТТІНГСГАУЗЕНА	88
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	89

ЛЕКЦІЯ 1 ОСНОВИ МІКРОЕЛЕКТРОНІКИ

1.1 Основні поняття, положення та етапи розвитку мікроелектроніки

1.1.1 Основні поняття та терміни

Сучасний науково-технічний прогрес тісно пов'язаний з розвитком електроніки. Успіхи електроніки є результатом створення різноманітних за своїми властивостями електровакуумних та напівпровідникових приладів.

Електроніка - це наука про взаємодію електронів з електромагнітними полями і методи створення електронних приладів та пристроїв, в яких ця взаємодія використовується для перетворення електромагнітної енергії, передачі, обробки і збереження інформації. Електроніка вивчає принципи будови, роботи та галузі використання електронних приладів та пристроїв.

Наведемо класифікацію основних галузей електроніки.

Фізична електроніка- галузь електроніки, що вивчає електронні та іонні процеси у вакуумі, газах та напівпровідниках, на межі поділу вакуум-газ або рідке тіло - тверде тіло.

Технічна електроніка - галузь електроніки, що вивчає будову електронних приладів та процеси їх виготовлення. Промислова електроніка - галузь електроніки, що вивчає використання електронних приладів у промисловості та апаратурі.

Головними етапами розвитку електроніки є наступні: вакуумна (електронні лампи, електровакуумні, фотоелектронні прилади, рентгенівські та газорозрядні трубки); твердотільна (напівпровідникові та оптоелектронні прилади, інтегральні мікросхеми, мікропроцесори, б мікроЕОМ); квантова (лазери, мазери, дальноміри, лінії оптичного зв'язку, радіоастрономія, голографія).

Мікроелектроніка - галузь науки, яка охоплює проблеми дослідження, конструювання, виготовлення та використання мікроелектронних виробів, причому під мікроелектронним виробом розуміють електронний пристрій з високим ступенем інтеграції.

Мікромініатюризація - це напрямок електроніки, який забезпечує реалізацію електронних схем, блоків та апаратури в цілому з мікромініатюрних радіодеталей та вузлів. Можна виділити шість періодів розвитку інтегральних мікросхем.

Перший період припадає на початок 60-х років, він характеризується низькою ступенем інтеграції, кількість елементів ІМС досягає 100, мінімальний розмір елемента - 100 мкм.

Другий період - кінець 60 - початок 70- х років, кількість елементів ІМС від 100 до 1000, мінімальний розмір елемента - 100 - 3 мкм.

Третій період розвитку ІМС - друга половина 70-х років, - характеризується швидким темпами виробництва мікросхем, кількість елементів від 1000 до 10000, мінімальний розмір елемента - 1 мкм.

Четвертий період припадає на початок 80-х років, він характеризується розробленням надвеликих ІМС, мінімальний розмір елемента - 0,1 мкм.

На *п'ятому етапі* розвитку ІМС - 80 - 90-ті роки широко використовуються мікропроцесори на базі великих та надвеликих інтегральних мікросхем.

Сучасний *шостий етап* розвитку ІМС характеризується розвитком та застосуванням приладів функціональної електроніки.

1.1.2 Класифікація, характеристика і система умовних позначень основних типів інтегральних мікросхем (ІМС)

Бурхливий розвиток мікроелектроніки, ускладнення радіоелектронної апаратури привели до необхідності удосконалення та створення нових мікроелектронних виробів з великою кількістю елементів (рис.1.1). З'явилися **інтегральні мікросхеми (ІМС)** - мікроелектронні вироби, які виконують функцію оброблення сигналу і (або) накопичення інформації і мають високу щільність розміщення неподільно виконаних і електрично з'єднаних елементів, компонентів і кристалів, які щодо вимог до випробувань, приймання, постачання і експлуатації розглядаються як неподільні. Перевагами ІМС є : малі розміри, маса та споживана потужність, високі надійність та швидкодія.

Елемент ІМС - конструктивно виділена і невіддільно від кристала сформована частина ІМС, яка реалізує функцію одного з електрорадіоелементів (наприклад, діода, транзистора, резистора, конденсатора) і щодо вимог до випробувань, приймання, постачання і експлуатації не може розглядатись як самостійний виріб, тому його не можна випробовувати, упаковувати та експлуатувати.

Компонент ІМС – частина ІМС, що реалізує функцію одного з електрорадіоелементів і щодо вимог до випробувань, приймання, постачання та експлуатації може бути виділена як самостійний виріб. Компоненти виготовляють окремо й установлюють у мікросхему при виконанні складально-монтажних операцій. До простих компонентів належать безкліпусні діоди, транзистори, конденсатори, резистори, малогабаритні індуктивності й трансформатори тощо. Складні компоненти – це безкорпусні ІМС, функціональні мікросхеми та ін.

Базовий кристал ІМС – конструктивно виділена частина напівпровідникової пластини з певним набором сформованих елементів, електрично з'єднаних і (або) не з'єднаних між собою, яка використовується для створення ІМС за допомогою виготовлення міжелементних з'єднань.

Вироби мікроелектроніки		
Інтегральні мікросхеми	Функціональні прилади та мікросхеми	Мікро-компоненти
Напів-провідникові	Теплові	Багатошарові друковані плати
Плівкові	Оптоелектронні	Гнучкі кабелі
Гібридні	П'єзоелектричні	Мікро-рознімання
Сумісні	Електромеханічні	Індикатори
ВІС	Механічні	Мікро-перем.
НВЧ-ІМС	На ефекті Ганна	Елементи кон.
Мікропроц.	Іонні	
П'єзокерамічні	Акустичні	

Рисунок 1.1 - Класифікація виробів мікроелектроніки

Для класифікації ІМС можна використовувати різні критерії: ступінь інтеграції, фізичний принцип роботи активних елементів, виконувану функцію, швидкодію, споживану потужність, застосовність в апаратурі й ін.

За ступенем інтеграції інтегральні мікросхеми поділяються на типи: прості (не більш 10 елементів); середні (від 10 до 100 елементів); великі (ВІС) (від 100 до 1000 елементів); надвеликі (НВІС) - більш 1000 елементів.

За характером функцій, які вони виконують: цифрові (тригери, шифратори, компаратори); аналогові (підсилювачі, генератори сигналів).

Але найбільш поширеною є класифікація за конструктивно-технологічними ознаками, оскільки при цьому в назві мікросхеми міститься загальна інформація про її конструкцію і технологію виготовлення.

Напівпровідниковою інтегральною мікросхемою (НІМС) називається ІМС, усі елементи і міжелементні з'єднання якої виконані в об'ємі або на поверхні напівпровідника. Напівпровідникова інтегральна мікросхема найчастіше являє собою кристал кремнію, в поверхневому шарі якого за допомогою методів напівпровідникової технології сформовані області, які еквівалентні елементам електричної схеми, та з'єднання між ними.

Плівковою інтегральною мікросхемою (ПІМС) називається ІМС, усі елементи і міжелементні з'єднання якої виконані у вигляді плівок. Плівкові ІМС мають підкладку (плату) з діелектрика (скло, кераміка й ін.). Підкладки являють собою діелектричні пластинки товщиною 0,5-1,0 мм, ретельно відшліфовані і відполіровані.

Гібридною інтегральною мікросхемою (ГІМС) називається ІМС, у якій пасивні елементи плівкові, а активні начіпні. Начіпні елементи - це мініатюрні, найчастіше безкорпусні діоди і транзистори, що являють собою самостійні елементи, які приклеюються (навішуються) у відповідних місцях до підкладки і з'єднуються тонкими провідниками з плівковими елементами схеми. Гібридні ІМС застосовуються як частини підсилювальних каскадів.

Велика ІМС (ВІС) – це мікросхема, яка містить понад 1000 елементів і (або) компонентів для цифрових та понад 500 – для аналогових ІМС. У ВІС застосовуються багат шарові структури з декількома підкладками, які розміщені паралельно одна одній у кілька поверхів. Така система з'єднання елементів називається багаторівневим або багат шаровим розведенням. Надвелика ІМС (НВІС) – містить понад 100 тис. Елементів і (або) компонентів для цифрових ІМС із нерегулярною структурою побудови і понад 10 тис. – для аналогових ІМС. До цифрових ІМС із регулярною структурою побудови належать схеми запам'ятовувальних пристроїв. Великі та надвеликі ІМС є складними мікросхемами, в яких реалізуються блоки і навіть цілі системи. З цих причин вони не мають широкої універсальності й призначені переважно для конкретних типів апаратури.

Гібридна ВІС (ГВІС) – це мікроелектронний пристрій високого ступеня інтегрованості, при виготовленні якого компонується плівкову багат шарову комутаційну плату на діелектричній підкладці і безкорпусні дискретні компоненти та ІМС, виготовлені окремо. Гібридний спосіб створення ВІС є універсальним, оскільки він поєднує переваги плівкової на напівпровідниковій технології, забезпечує можливість використання ІМС, що розрізняються як за функціональним призначенням, так і за конструктивним виконанням.

Усі інтегральні мікросхеми піддають герметизації для їх захисту від зовнішніх впливів. За конструктивно-технологічними ознаками герметизації розрізняють корпусні (вакуумна герметизація) та безкорпусні (покриття епоксидним чи іншими лаками) ІМС. За ознакою використання в апаратурі - виробу широкого й спеціального застосування (на замовлення споживача).

Важливою конструктивною ознакою інтегральної мікросхеми є тип підкладки. За цією ознакою усі відомі ІМС можна розділити на два класи: мікросхеми з активною підкладкою, мікросхеми з пасивною підкладкою. До першого класу відносять мікросхеми, в яких усі елементи або їх частина виконана усередині самої підкладки - пластини з напівпровідникового матеріалу, а до другого - мікросхеми, елементи яких розміщені на поверхні підкладки, виконаної з діелектричного матеріалу.

На рисунку 1.2 наведена класифікація інтегральних мікросхем за конструктивно-технологічними ознаками. Для ІМС будь-якого типу основними і найбільш складними елементами є транзистори, що за фізичним принципом поділяються на біполярні й уніполярні. У напівпровідникових інтегральних мікросхемах застосовують біполярні і МДП-транзистори, виготовлені за планарною технологією. У гібридних ІМС - безкорпусні дискретні біполярні і МДП-транзистори, виготовлені на основі кремнію за планарно-епітаксальною технологією, діоди, безкорпусні мікросхеми (чіпи). Інтегральні мікросхеми стали основою елементної бази для усіх видів електронної апаратури. Для конструювання різної апаратури (цифрової, аналогової і аналогово-цифрової) необхідні не окремі мікросхеми, а функціонально повні системи (серії) мікросхем.

ІНТЕГРАЛЬНІ МІКРОСХЕМИ				
НІМС	ПІМС	ГІМС	ВІС	НВЧ
- на основі арсениду галію	- тонкоплівкові	- тонкоплівкові з активними і пасивними дискретними елементами		
- на основі кремнію	- товстоплівкові	- тонкоплівкові з активними і пасивними дискретними елементами	НВІС	
- на основі карбіду кремнію			ГВІС	
- багато-кристалльні				

Рисунок 1.2 - Класифікація ІМС за конструктивно-технологічними ознаками

Тому елементну базу мікроелектронної апаратури складають серії ІМС - сукупність мікросхем, що виконують різноманітні функції, мають єдину конструктивно-технологічну основу і призначені для застосування в різноманітній апаратурі (рис. 1.3).

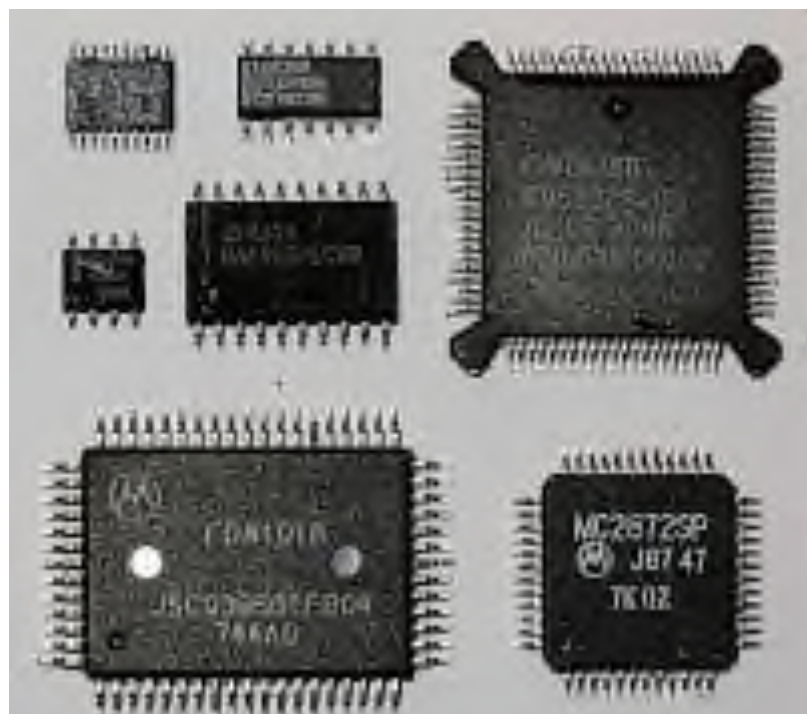


Рисунок 1.3 - Загальний вигляд різних типів ІМС

Під типономіналом інтегральної мікросхеми розуміють ІМС, яка має конкретне функціональне призначення і своє умовне позначення.

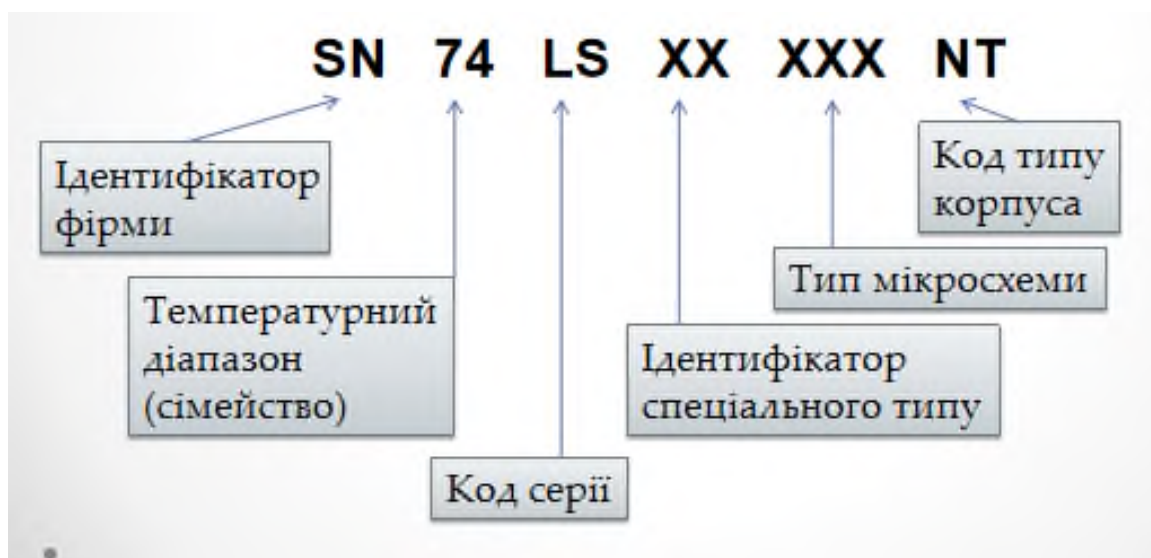
Склад серії визначається в основному функціональною повнотою окремих мікросхем, зручністю побудови складних пристроїв і систем та типом стандартного корпусу. Усі інтегральні мікросхеми, що випускаються відповідно до прийнятої системи умовних позначень, за конструктивно-технологічним виконанням поділяються на три групи: напівпровідникові, гібридні та інші. До останньої групи (інші) відносять плівкові ІМС, вакуумні, керамічні й ін. Цим групам у системі умовних позначень відповідають наступні цифри: 1, 5, 7 - НІМС (7- безкорпусні НІМС); 2, 4, 6, 8 - ГІМС; 3 - інші ІМС. За характером виконуваних функцій у радіоелектронній апаратурі ІМС підрозділяються (таблиця 1.1) на підгрупи (генератори, підсилювачі, модулятори, тригери та ін.) і види (перетворювачі частоти, фази, напруги). За прийнятою системою позначення ІМС складається з чотирьох елементів.

Перший елемент - цифра, що відповідає конструктивно-технологічній групі.

Другий - дві-три цифри, привласнені даній серії ІМС як порядковий номер розробки.

Третій елемент - дві букви, що відповідають підгрупі та виду ІМС.

Четвертий елемент - порядковий номер розробки ІМС у даній серії, який складається з однієї або декількох цифр.



Рисуно 4 - Система позначень фірми Texas Instruments

Повне позначення складається із шести елементів:

1. Ідентифікатор фірми SN (для серій AC і АСТ відсутній).

2. Температурний діапазон (тип сімейства):

74 – комерційні мікросхеми (температура навколишнього середовища для біполярних мікросхем – 0...70°C, для КМОП мікросхем – – 40...+85°C),

54 – мікросхеми військового призначення (температура – –55 ... +125°C).

3. Код серії (до трьох символів):

1. Відсутній – стандартна ТТЛ-серія.

2. LS (Low Power Schottky) – малопотужна серія ТТЛШ.
3. S (Schottky) – серія ТТЛШ.
4. ALS (Advanced Schottky) – покращена серія ТТЛШ.
5. F (FAST) – швидка серія.
6. HC (High Speed CMOS) – високошвидкісна КМОП-серія.
7. HCT (High Speed CMOS with TTL inputs) – серія HC, сумісна по входу із ТТЛ.
8. AC (Advanced CMOS) – поліпшена серія КМОП.
9. ACT (Advanced CMOS with TTL inputs) – серія AC, сумісна по входу із ТТЛ.
10. BCT (BiCMOS Technology) – серія з БіКМОП-технологією.
11. ABT (Advanced BiCMOS Technology) – поліпшена серія з БіКМОПтехнологією.
12. LVT (Low Voltage Technology) – серія з низькою напругою живлення.
4. Ідентифікатор спеціального типу (2 символи) – може бути відсутній.
5. Тип мікросхеми (від двох до шести цифр).
6. Код типу корпусу (від одного до двох символів) – може бути відсутній. Наприклад, N – пластмасовий корпус DIL (DIP), J – керамічний DIL (DIC), T – плоский металевий.

ЛЕКЦІЯ 2 ОСНОВИ МІКРОЕЛЕКТРОНІКИ

2.1 Загальна характеристика та класифікація напівпровідників

Напівпровідники - широкий клас речовин, які характеризуються значеннями питомої електропровідності σ , проміжними між питомою електропровідністю металів $\sigma \sim 10^6$ - $10^4 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ та діелектриків $\sigma \sim 10^{-10}$ - $10^{-12} \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ (σ наведена при кімнатній температурі).

Характерна особливість напівпровідників - зростання електропровідності при зростанні температури, причому в широкому інтервалі температур це зростання відбувається експоненціально:

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_A}{kT}\right), \quad (2.1)$$

де σ_0 - провідність при температурі $T \rightarrow \infty$;

E_A - енергія активації електропровідності;

k - постійна Больцмана.

Формула (2.1) означає, що електрони в напівпровідниках зв'язані з атомами енергією зв'язку порядку E_A . З підвищенням температури тепловий рух починає розривати зв'язки електронів, і їх частина стає вільними носіями заряду. Для домішкових напівпровідників температурна залежність електропровідності має більш складний вигляд. Зв'язок електронів може бути розірваним не лише тепловим рухом, а й зовнішніми факторами: світлом, радіоактивним випромінюванням, потоком швидких частинок, сильним електричним полем та ін.

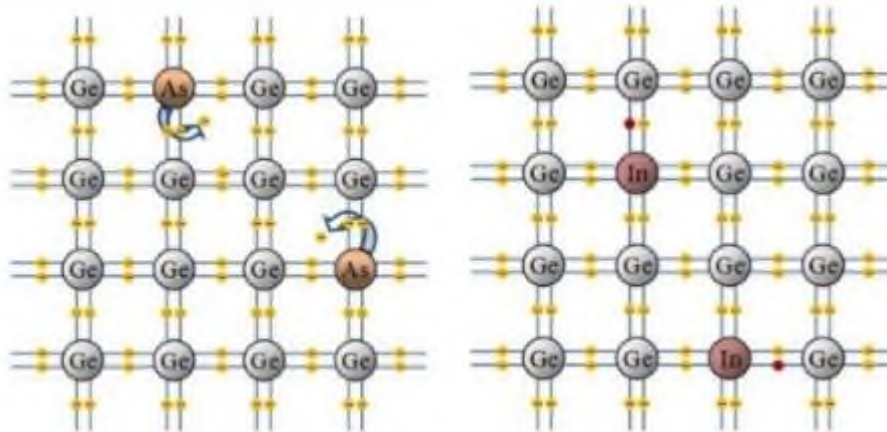


Рисунок 2.1 – Структурні градики напівпровідникових зв'язків

Можливість у широких межах керувати електропровідністю напівпровідників шляхом зміни температури, введенням домішок є основою їх широкого застосування в мікроелектроніці.

Термін «напівпровідники» найчастіше розуміють як сукупність декількох найбільш типових груп речовин, напівпровідникові властивості яких чітко виражені вже при кімнатній температурі ($T = 300\text{K}$). Наведемо приклади таких груп:

I група - елементи IV групи періодичної системи елементів - Si та Ge. Атоми цих елементів мають чотири валентних електрони, утворюють кристалічні решітки типу алмазу з ковалентним зв'язком атомів. Сам алмаз має властивості напівпровідника, однак величина ЕА для нього значно більша, ніж у Si та Ge, і тому при температурі 300 К його власна провідність мала.

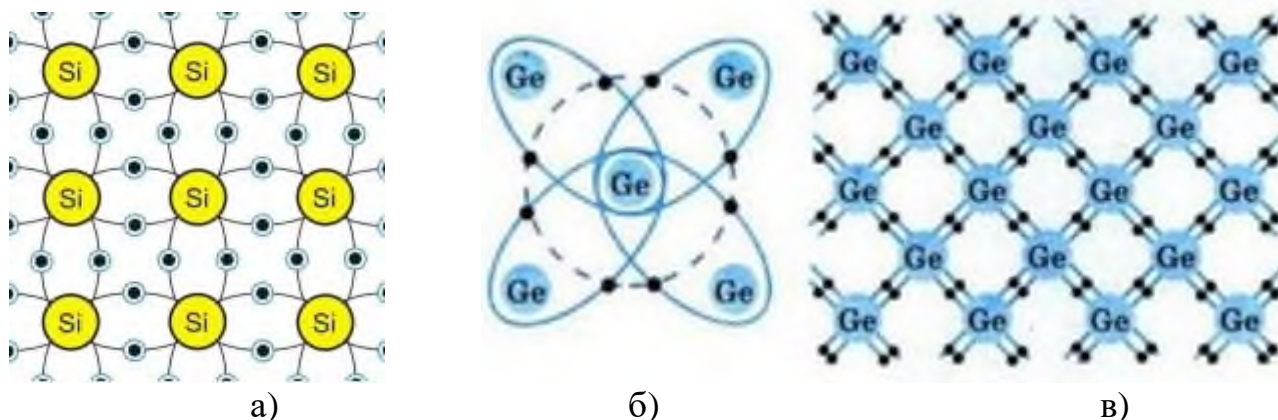


Рисунок 2.2. - Структурна градка Si (а), з'єднання атомів Ge (б), структурна градка Si (в)

II група - алмазоподібні напівпровідники (з'єднання елементів III групи (Al, Ga, In) з елементами V групи (P, As, Sb) такі, наприклад, як GaAs, InSb, GaP, InP. Атоми в таких структурах є різнойменно зарядженими. Тому зв'язки в цих кристалах не повністю ковалентні, а й частково іонні. Однак ковалентний зв'язок в них переважає і визначає структуру, в результаті чого ці кристали за багатьма властивостями є найближчими аналогами Si та Ge.

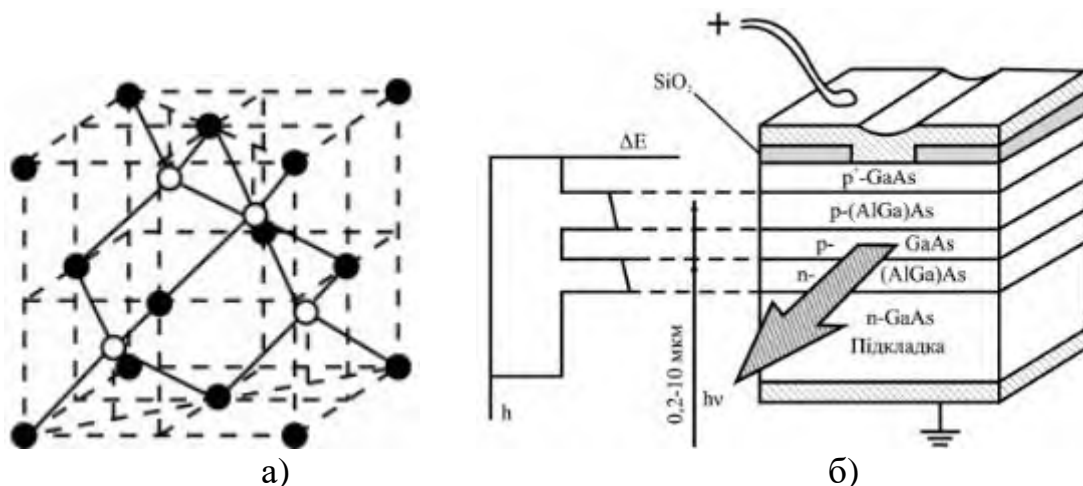


Рисунок 2.3 - Сфалеритна структура сполук (а), схема лазера з подвійною гетероструктурою і полосковою геометрією контакту (б)

III група - елементи VI та V груп періодичної системи елементів. Елементи VI групи (Te, Se) були відомі раніше, ніж Si та Ge, причому Se широко використовувався для виготовлення випрямлячів електричного струму та фотоелементів. Елементи V групи (As, Sb, Bi) - напівметали, близькі до напівпровідників, - застосовують як приймачі інфрачервоного випромінювання. Серед сполук

елементів VI групи (O, S, Se, Te) з елементами I - V груп досить багато напівпровідників, але більшість з них маловивчена. Найбільш вивченими такими напівпровідниками, які застосовуються, є Cu_2O (купроксні випрямлячі) та Bi_2Te_3 (термоелементи).

IV група- з'єднання елементів VI групи з перехідними металами (Ti, V, Mn, Fe, Ni). У таких напівпровідниках переважає іонний зв'язок. Більшість з них має магнітне упорядкування (магнітні напівпровідники). У деяких з них (V_2O_3 , Fe_3O_4 , NiS) при зміні температури та тиску спостерігається фазовий перехід напівпровідник - метал.

Закони руху носіїв заряду в напівпровідниках описує зонна теорія твердого тіла. У твердому тілі внаслідок взаємодії сусідніх атомів енергетичні рівні розщеплюються. У результаті цього виникають області (зони) дозволених значень енергії, між якими знаходяться заборонені зони.

Якщо кристал є ідеальним, то електрон не може мати в ньому енергію, яка відповідає енергії забороненої зони. Для глибоких рівнів розщеплення є невеликим, оскільки електрони, які знаходяться на них екрануються зовнішніми оболонками і їх взаємодія з сусідніми атомами не є суттєвим. Зона, яка утворюється цими рівнями, називається валентною. Поряд з глибокими заповненими рівнями, на яких перебувають електрони, в атомі є і більш високі рівні (пусті). Вони можуть бути заповнені, якщо атом захопить зайвий електрон та перетвориться у від'ємно заряджений іон. У твердому тілі відбувається розщеплення незайнятих рівней та утворення незаповненої зони - зони провідності. При температурі абсолютного нуля вона є повністю вільною, на її ринях немає жодного електрона. Між валентною зоною та зоною провідності знаходиться заборонена зона. У відповідності до принципу Паулі максимальна кількість електронів, які можуть знаходитись на одному рівні, обмежена. Це означає, що в багатозарядних атомах усі електрони не можуть накопичуватися на нижньому енергетичному рівні, а заповнюють також верхні рівні. Тепловий рух закидає частину електронів з валентної зони в зону провідності, в валентній зоні при цьому з'являються дірки. Електрони та дірки найчастіше накопичуються поблизу нижнього краю (дна) зони провідності E_c або верхнього краю (потолка) валентної зони E_v на енергетичних відстанях від них $\sim kT$, що набагато менше ширини дозволених зон (рис. 2.4).

Ефективні маси електронів та дірок не збігаються з масою вільного електрона m_0 і, як правило, анізотропні, тобто різні для різних i . Їх значення для різних напівпровідників змінюються від сотих часток m_0 до сотень m_0 .

Ширина забороненої зони також змінюється в широких межах. Наприклад, при $T \rightarrow 0K$ ширина забороненої зони в PbSe $E_g = 0,165 \text{ eV}$, в алмазі $E_g = 5,6 \text{ eV}$, а сіре олово - безщелиновий напівпровідник має $E_g = 0$.

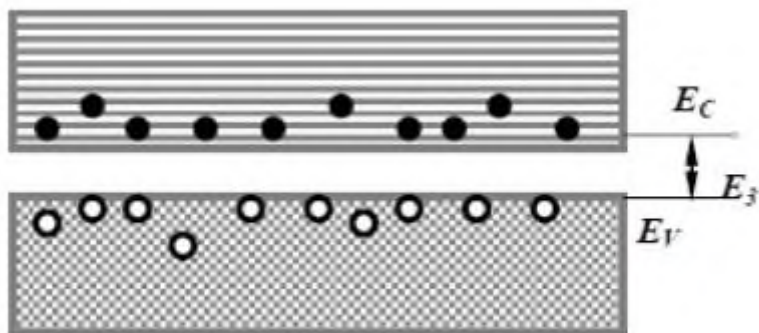


Рисунок 2.4 - Валентна зона (білі кружечки - дірки) та зона провідності (чорні кружечки- електрони провідності): E_Z –ширина забороненої зони; E_C -дно зони провідності; E_V - вершина валентної зони

2.2 Власна електронна та діркова електропровідність. Рухливість носіїв заряду

У роботі усіх мікроелектронних пристроїв визначальну роль відіграють явища переносу рухливих носіїв заряду або так звані кінетичні явища. Причиною цих явищ є те, що в процесі свого переміщення рухливі носії заряду переносять масу, заряд, енергію та ін. Якщо утворюються умови, за яких потоки носіїв заряду стають спрямованими, то виникає ряд електричних ефектів, які покладені в основі практичного використання напівпровідників (електропровідність, ефект Холла, зміна опору в магнітному полі, термо-ЕРС.). Електрони та дірки, які можуть переміщуватися, тобто створювати електропровідність, називають рухливими носіями заряду або носіями заряду. Генерація пар носіїв заряду - це виникнення пари електрон провідності - дірка провідності. Завдяки тому, що електрони та дірки провідності рухаються хаотично, обов'язково відбувається і процес, зворотний генерації пар носіїв - рекомбінація (електрони провідності займають вільні місця у валентній зоні, об'єднуються з дірками).

Напівпровідник без домішок називають власним напівпровідником. Він має власну електропровідність, яка складається із електропровідності електронної та діркової. Незважаючи на те, що кількість електронів та дірок у власному напівпровіднику однакова, електронна електропровідність переважає, що пояснюється більшою рухливістю електронів порівняно з рухливістю дірок. Якщо до напівпровідника не прикладати напругу, то електрони та дірки провідності здійснюють хаотичний тепловий рух і ніякого струму немає. Під дією різниці потенціалів в напівпровіднику виникає електричне поле, яке прискорює електрони і дірки та утворює їх поступальний рух - струм провідності. Рух носіїв заряду під дією електричного поля називають дрейфом носіїв, а струм провідності - струмом дрейфу (i_{dp}). Повний струм провідності складається з електронного та діркового струму:

$$i_{dp} = i_{ndp} + i_{pdp} \quad (2.2)$$

Щоб установити, від яких величин залежить струм дрейфу, розглянемо густину струму j :

$$j_{dp} = j_{ndp} + j_{pdp} \quad (2.3)$$

Густина струму - це фізична величина, яка чисельно дорівнює заряду, що проходить через одиницю площі за 1 с, тобто

$$J_{ndp} = n \cdot e \cdot V_n, \quad (2.4)$$

де n - концентрація електронів, e - заряд електрона, V_n - середня швидкість поступального руху електронів під дією поля.

Середня швидкість враховує хаотичний тепловий рух з численними зіткненнями електронів та атомів кристалічної решітки. Від одного зіткнення до іншого електрони прискорюються полем, і тому швидкість V_n , пропорційна напруженості поля E :

$$V_n = \mu_n \cdot E \quad (2.5)$$

де μ_n - коефіцієнт пропорційності, який називається рухливістю носіїв заряду (в даному випадку електронів).

Рухливість носіїв заряду - це відношення швидкості їх спрямованого руху носіїв заряду в твердому тілі V_{dp} до напруженості електричного поля E , тобто іншими словами це фізична величина, яка чисельно дорівнює середній швидкості поступального руху носіїв заряду під дією поля з одиничною напруженістю.

Таблиця 2.1 – Рухливість носіїв заряду

Напівпровідник	Рухливість електронів при $T=290$ К, $m^2/V \cdot c$	Рухливість дірок при $T=290$ К, $m^2/V \cdot c$
Ge	0.45	0.35
Si	0.16	0.05
GaSb	0.40	0.14
InAs	3.30	0.04
InSb	7.70	0.08

Таким чином, питома провідність залежить від концентрації носіїв та їх рухливості. У напівпровідниках при підвищенні температури завдяки інтенсивній генерації пар носіїв концентрація носіїв, які рухаються, збільшується швидше, ніж зменшується їх рухливість, тому з підвищенням температури провідність зростає. Для порівняння можна відмітити, що в металах концентрація електронів провідності практично не залежить від температури і при підвищенні температури провідність зменшується через зменшення рухливості електронів. Рухливість дірок менша за рухливість електронів (табл. 2.1), а величина діркової провідності менша за величину електронної провідності.

2.3 Контактні явища у мікроелектронних структурах

На основі фізичних властивостей контактів метал - напівпровідник (Me - НП), напівпровідник p -типу - напівпровідник n -типу ($НП(p)$ - $НП(n)$) засновані принципи дії більшості мікроелектронних елементів. Важливе значення має і пасивна роль контактів, яка полягає в забезпеченні підведення електричного струму. На межі

поділу між двома різними за типом електропровідності напівпровідниками або між напівпровідником та металом виникають потенціальні бар'єри, що є наслідком перерозподілу концентрацій рухомих носіїв заряду між контактуючими матеріалами. Електричні властивості граничного шару залежать як від величини, так і від напрямку зовнішньої напруги, яка прикладається. Якщо граничні шари мають нелінійні вольт-амперні характеристики, то їх називають випрямними переходами. Нелінійні властивості переходів використовують для випрямлення електричного струму, перетворення, підсилення генерації електричних сигналів. На основі випрямних переходів формують біполярні діоди та транзистори, тунельні діоди, діоди Шоткі та інші прилади. Широке застосування випрямляючі переходи знаходять як ізолюючі елементи в мікроелектронних пристроях. Застосовуються також контакти типу метал-метал (*Me-Me*), метал-діелектрик (*Me-D*), напівпровідник-діелектрик (*НП-D*).

Усі електричні контакти підрозділяють на три типи:

- лінійні;
- нелінійні;
- інжекційні.

Омічні - це контакти, які мають лінійну вольт-амперну характеристику (*ВАХ*), малий електричний опір, не створюють форму сигналу та шумів.

Нелінійні контакти - це контакти, які мають нелінійну *ВАХ*, використовуються для випрямлення струму, детектування та генерації сигналів, помноження частоти.

Інжекційні контакти - це контакти, які використовують як джерело надлишкових носіїв заряду для їх проникнення в напівпровідник або діелектрик під дією електричного поля.

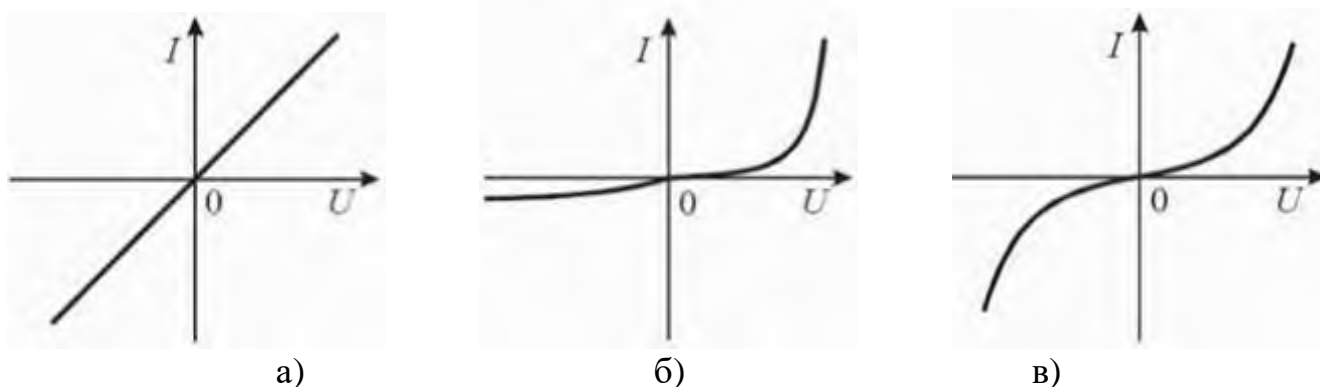


Рисунок 2.5 – Вольт-амперні характеристики: омічного (а), нелінійного (б), інжекційного (в) контактів

Контакт метал - метал (*Me-Me*)

Цей тип контактів найбільш поширений в мікроелектронних приладах, мають низький електричний опір.

Контакт напівпровідник - напівпровідник (*НП- НП*)

Область на межі двох напівпровідників з різними типами електропровідності називають електронно-дірковим або *p-n*- переходом. Електронно-дірковий перехід має несиметричну провідність, тобто нелінійний опір. Робота більшості

напівпровідникових приладів (діоди транзистори та ін.) заснована на використанні властивостей одного або декількох $p-n$ - переходів. Коли зовнішня напруга на переході відсутня, носії заряду в кожного напівпровідника здійснюють хаотичний тепловий рух. Відбувається їх дифузія з одного напівпровідника в інший. Таким чином, з напівпровідника n -типу в напівпровідник p -типу дифундують електрони, а в зворотному напрямку з напівпровідника p -типу в напівпровідник n -типу - дірки.

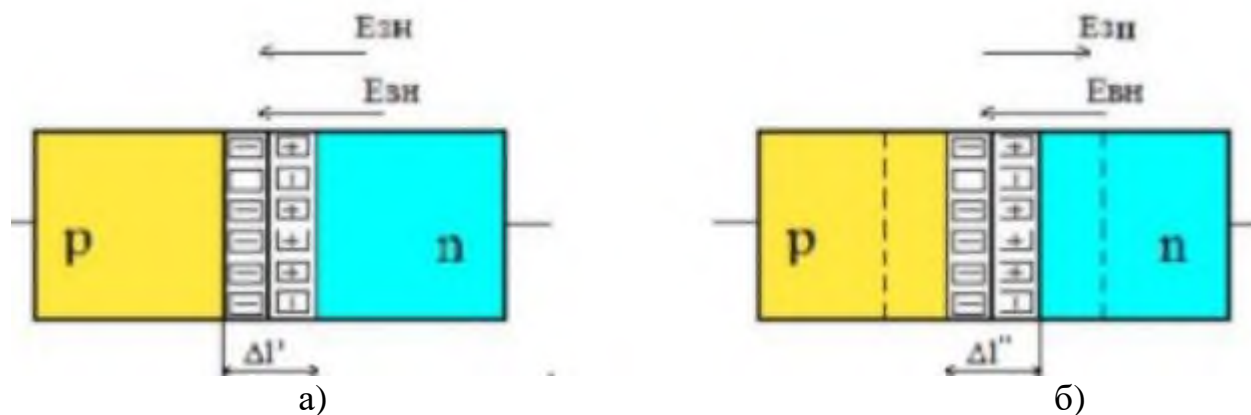


Рисунок 2.6 – Пряме зміщення $p-n$ -переходу (а), зворотне зміщення $p-n$ -переходу (б)

Контакт напівпровідник - діелектрик (НП-Д)

Найбільш поширеними є контакти Si-SiO. Шар оксиду кремнію містить іонізовані атоми донорів. Якщо вони знаходяться близько до поверхні поділу, то впливають на рух носіїв струму напівпровідника та змінюють їх концентрацію в приповерхневому шарі. Наявність збіднених або збагачених шарів впливає на роботу окремих елементів напівпровідникової інтегральної мікросхеми.

Контакт метал-напівпровідник n -типу (Me-НП(n))

Якщо в контакті металу з напівпровідником n -типу (рис. 2.7, а) робота виходу електронів з металу менша, ніж робота виходу з напівпровідника, то буде переважати вихід електронів з металу в напівпровідник. Тому в шарі напівпровідника навколо межі накопичуються основні носії (електрони), і цей шар стає збагаченим, тобто в ньому збільшується концентрація електронів. Опір такого шару буде малим при будь-якій полярності напруги, яка прикладається, і такий перехід не буде мати випрямних властивостей. Його називають невикривним (омічним) контактом.

Контакт метал-напівпровідник p -типу (Me-НП(p))

У цьому випадку (рис. 2.7, б) з напівпровідника в метал переходить більша кількість електронів, ніж в зворотному напрямку, і в приграничному шарі напівпровідника також формується область, яка збагачена основними носіями (дірками), з малим значенням опору. Цей тип контакту також невикривний. Обидва типи невикривних контактів застосовуються в напівпровідникових приладах при розробці виводів від n - та p -областей. Для цієї мети підбирають відповідні метали. напруги, яка прикладається. Такий перехід має високі випрямні властивості. Подібні переходи у свій час досліджував німецький учений В. Шоткі, і тому потенціальний бар'єр, який виникає в даному випадку, називають бар'єром Шоткі, а діоди з таким

бар'єром - діодами Шоткі. В діодах Шоткі (в металі, куди приходять електрони з напівпровідника) відсутні процеси накопичення зарядів неосновних носіїв, які характерні для електронно-діркових переходів. Тому діоди Шоткі мають значно вищу швидкодію, ніж звичайні діоди, оскільки накопичення зарядів - процес інерційний, тобто для нього потрібен час.

Аналогічними є випрямні властивості контакту металу з напівпровідником p -типу при $A_{Me} < A_n$.

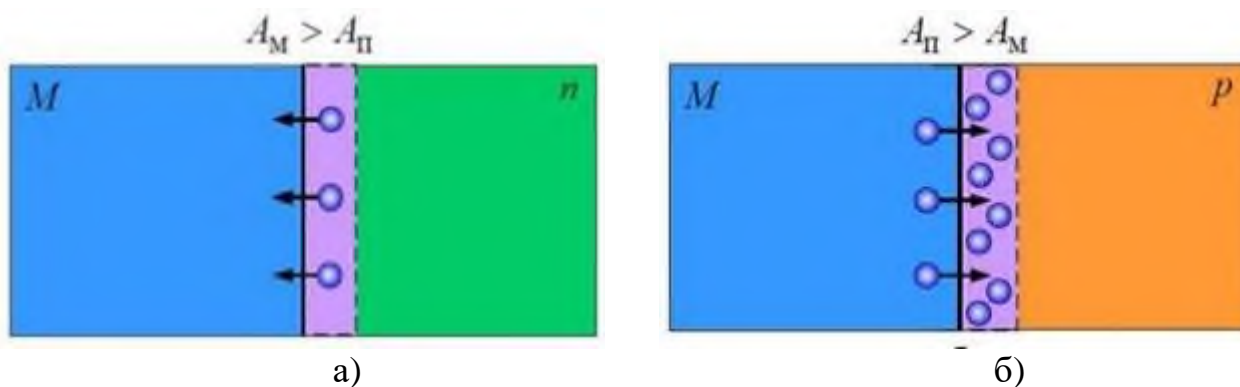


Рисунок 2.7 - Контакт метал-напівпровідник n -типу (а), p -типу

2.4 Характеристика випрямного контакту метал-напівпровідник

Випрямний контакт метал-напівпровідник (бар'єр Шоткі), широко застосовується в напівпровідникових приладах та інтегрованих мікросхемах для створення діодів Шоткі, біполярних транзисторів Шоткі і польових транзисторів із заслоном на основі бар'єра Шоткі. Історично випрямний контакт метал-напівпровідник був основою одного з перших напівпровідникових випрямних діодів, який використовувався в детекторних радіоприймачах для детектування високочастотного сигналу. Проте завдяки досягненням сучасної технології відновилась зацікавленість виробників інтегрованих мікросхем в елементах ІМС, які створені з використанням бар'єрів Шоткі. Сучасні інтегровані мікросхеми на елементах з бар'єром Шоткі за багатьма параметрами і характеристиками кращі від звичайних мікросхем.

Найпростішу структуру діода Шоткі в інтегрованій мікросхемі (ІМС) зображено на рис. 2.8. Бар'єр Шоткі створюється на межі поділу металевого контакту 3 і напівпровідника n -типу 5. Власне перехід від металевого контакту 3 до напівпровідника 5 і є інтегрованим ДШ. Для створення омичного контакту електрода 2 з низьколегованою областю 5 формують перехідну область 1, а для зменшення опору пасивної області діода формують заглиблений шар 4. Структуру діода створено за планарно-епітаксійною технологією із заглибленим $n+$ - шаром. Оскільки за великих концентрацій домішок в області 5 у переході метал - напівпровідник може утворитись омичний контакт, концентрація домішок у напівпровіднику має становити $N < 5 \cdot 10^{23}$ ат/м³.

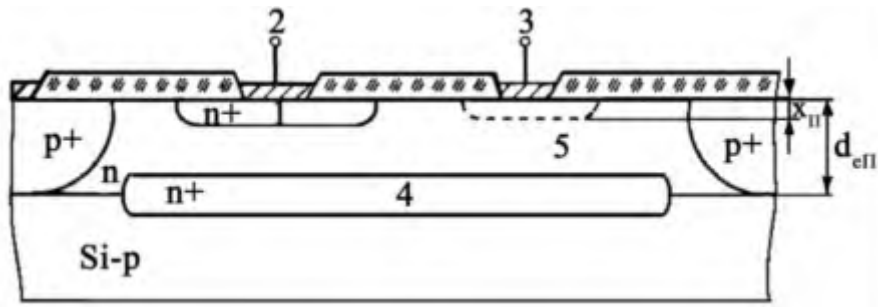


Рисунок 2.8 – Структура діода Шотткі

Діоди Шотткі можна створювати на напівпровідниках як n -, так і p -типів, але перевагу віддають напівпровідникам n -типу, оскільки рухливість електронів більша. Діод Шотткі функціонує на основних носіях. У створенні струму через діод беруть участь лише електрони. На відміну від ДШ, у діоді з p - n -переходом струм через діод створюють і електрони, і дірки. У ДШ перехід електронів із напівпровідника в метал не супроводжується дифузцією й рекомбінацією. Надлишковий заряд електронів у металі миттєво розподіляється в об'ємі і спричинює дрейфовий струм. Внаслідок цього в контактні метал-напівпровідник немає дифузійної ємності, яка стримує швидкодію ДШ. Діоди Шотткі можуть працювати на частотах до 100 ГГц.

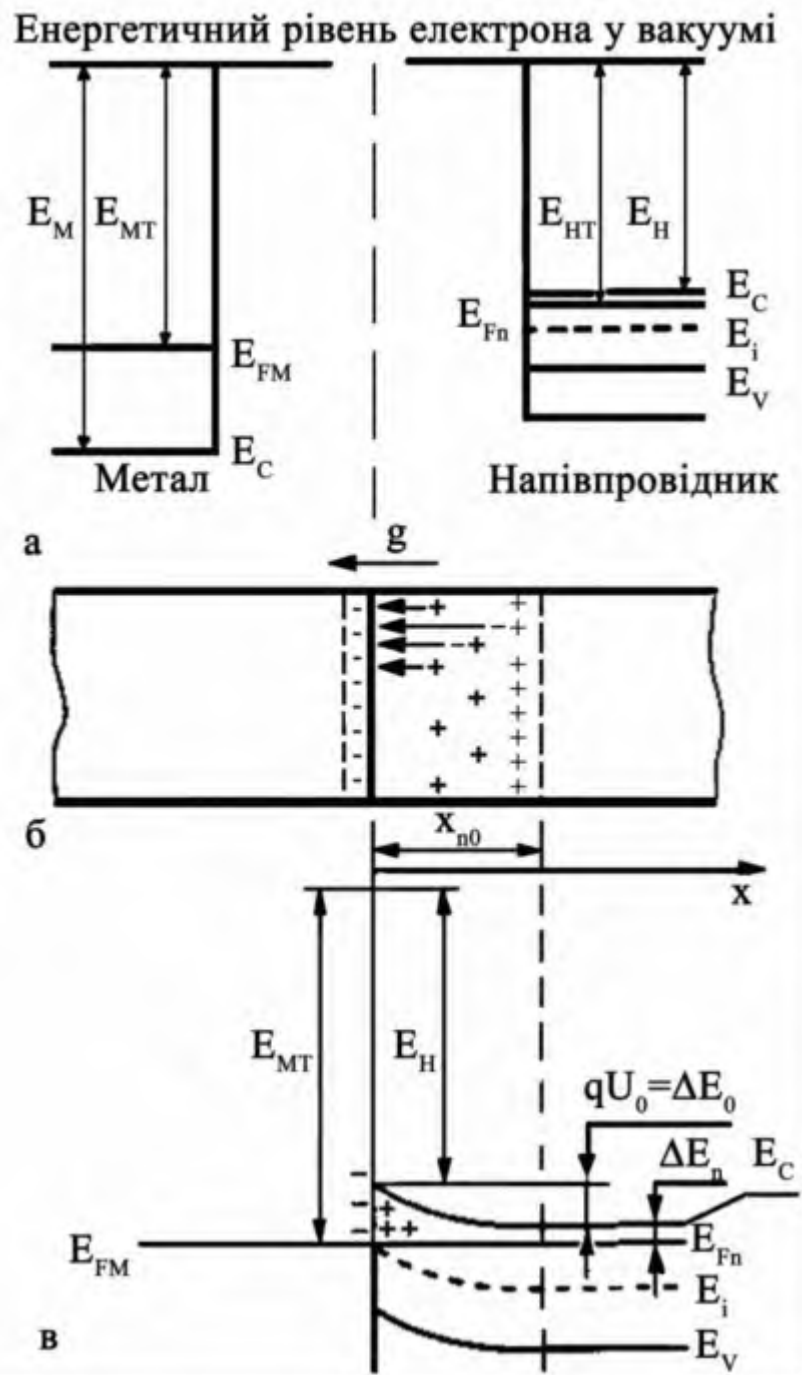


Рисунок 2.9 - Енергетичні діаграми металу та напівпровідника: метал і напівпровідник ізольовані (а); метал і напівпровідник у контакті бар'єр (б, в)

У переході метал-напівпровідник створюється електричне поле, вектор напруженості якого напрямлений від напівпровідника до металу (рис.2.9 б). Електричне поле майже не проникає в метал, а локалізується в приповерхневому шарі напівпровідника, товщину x_n якого розраховують так само, як для p - n -переходу. Шар збіднюється основними носіями заряду (електронами), а просторовий заряд у ньому створюється позитивно іонізованими донорними атомами. Електричне поле в переході накладається на поле атомів у ґратці, але воно значно менше, ніж останнє (рис. 2.9 в), і не може змінити структуру енергетичних зон, а лише викривлює їх.

2.5 Діод Шотткі

У зв'язку зі швидким розвитком технології інтегрованих мікросхем створено діоди Шотткі з практично ідеальними характеристиками. Проте раніше в інтегрованих мікросхемах застосування ДШ стримувалось. Це було пов'язано з тим, що за зворотного зміщення в діодах виникали значні струми просочування, а напруга пробою була менша, ніж напруга p - n -переходів.

Ці проблеми спричиняли крайові ефекти (рис. 2.10), які виникали по периметру металевого контакту в конструкції діода.

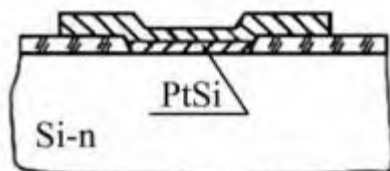


Рисунок 2.10 – Контакти в конструкції діода

Щоб уникнути крайового ефекту, були розроблені конструкції ДШ з розширеною металізацією, яка перекривала ізолювальний діелектричний шар SiO₂ на деяку відстань від контакту з напівпровідником. Подальше удосконалення конструкцій ДШ привело до створення навколо контакту метал-напівпровідник захисного кільця p -типу (рис. 2.11).

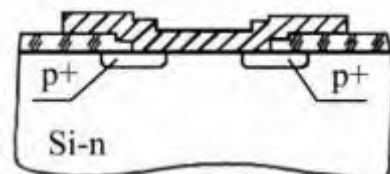


Рисунок 2.11 – Удосконалення конструкції діода Шотткі шляхом створення навколо контакту метал-напівпровідник захисного кільця p -типу

Напруга пробою збільшилась від 5 до 27 В, її збільшено за рахунок конструкції з використанням захисного кільця і додаткового електрода (рис. 2.12), на який подають негативну напругу.

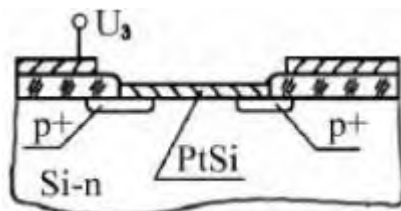


Рисунок 2.11 – Конструкція діода Шотткі з використанням захисного кільця і додаткового електрода

В таких структурах напруга пробою близька до напруги пробою p - n -переходу. Були розроблені ДШ із захисним кільцем і трьома бар'єрами, ДШ із двома захисними кільцями та ін. Основними недоліками розглянутих конструкцій слід вважати зменшення швидкості перемикання ДШ, спричинене інжекцією неосновних

носіїв заряду із р-кільця, збільшення ємності діода, ускладнення технологічних процесів.

Структура ДШ, зображена на рис. 2.12, не має перелічених недоліків.

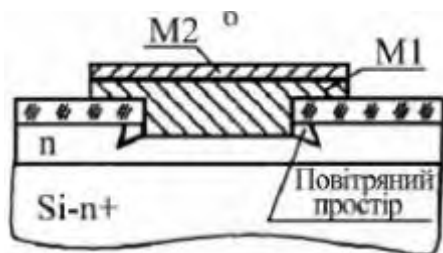


Рисунок 2. 12 – Конструкція діода Шотткі із контактом металу з напівпровідником здійснюється в спеціальному заглибленні в шарі *n*-типу

Контакт металу з напівпровідником здійснюється в спеціальному заглибленні в шарі *n*-типу. Для таких конструкцій діодів висота потенціального бар'єра U_{MNO} зменшується, зменшується бар'єрна ємність C і опір r_s . Коефіцієнт неідеальності наближається до одиниці. Два різних матеріали, які використовуються для створення контакту, забезпечують термостабільність параметрів ДШ. Головною вимогою до діодів Шотткі, що працюють у змішувачах НВЧ-діапазону, є стійкість до вигорання. Напівпровідниковим матеріалом для цих діодів є арсенід галію. Діоди Шотткі зі структурою W-n-GaAs зображено на рис. 2.13. Стійкість до вигорання таких діодів дорівнює $8 \cdot 10^{-7}$ Дж, висота потенціального бар'єра становить 0,64 В.

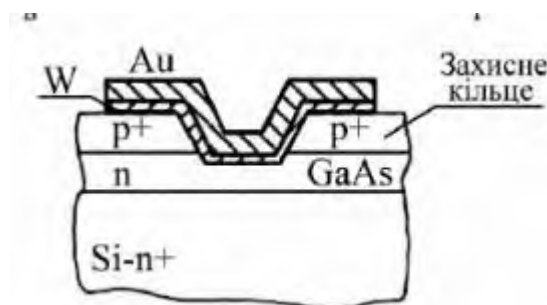


Рисунок 2.13 - Діоди Шотткі зі структурою W-n-GaAs

2.6 Ефект Ганна

Ефект Ганна - це ефект генерації високочастотних коливань електричного струму в напівпровіднику при достатньо великій напрузі, яка прикладається до нього. Ефект був відкритий американським фізиком Дж. Ганном у 1963 році в кристалі арсеніду галію (GaAs) з електронною провідністю. Цей ефект був ретельно досліджений, пояснені фізичні процеси, які відбуваються в напівпровідниках при високій напруженості електричного поля, яке на них діє, та розроблені прилади для генерації коливань НВЧ. Генерація виникає, якщо постійна напруга U , яка прикладається до напівпровідника довжиною l , така, що середнє електричне поле E у зразку дорівнює $E = U/l$, що відповідає падаючій ділянці вольт-амперної характеристики $E1 - E2$ (рис. 2.14). Коливання струму мають вигляд періодичної послідовності імпульсів з частотою їх повторення зворотно пропорційною напруженості електричного поля E . При ефекті Ганна в зразку періодично

з'являється, переміщується по ньому та зникає область сильного електричного поля - домен Ганна. Домен виникає внаслідок того, що однорідний розподіл електричного поля є нестійким. Дійсно, якщо в напівпровіднику випадково виникає неоднорідний розподіл концентрації електронів у вигляді дипольного шару, то між зарядженими областями виникає додаткове поле ΔE (рис. 2.15).

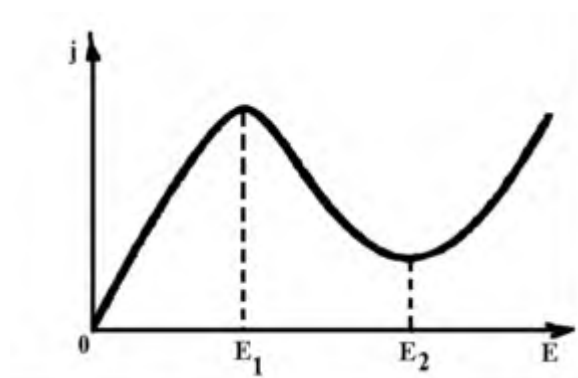


Рисунок 2.14 – Вольт-амперна характеристика: E - електричне поле, яке створюється різницею потенціалів; j - густина струму

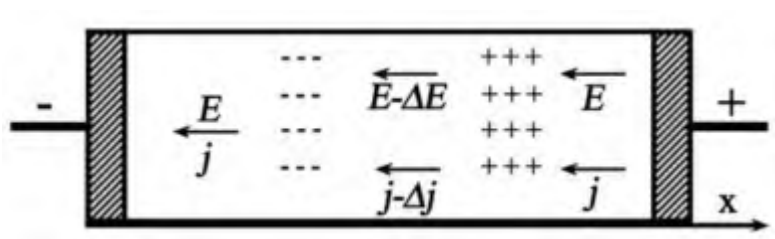


Рисунок 2.15 - Схема розвитку електричного домену

Ефект Ганна використовується для створення генераторів НВЧ із заданою формою сигналу, аналогово-цифрових перетворювачів, приладів оптоелектроніки (модуляторів, приймачів світла), підсилювачів.

ЛЕКЦІЯ 3 НАПІВПРОВІДНИКОВІ ІМС

3.1 Типи конструкцій та структура НІМС

Напівпровідникові інтегральні мікросхеми набули широкого застосування через їх масове використання в обчислювальній техніці. Усі елементи і міжелементні з'єднання виконані в середині та на поверхні напівпровідника. НІМС виготовляють на основі планарної технології напівпровідникових приладів. Усі елементи напівпровідникових ІМС (транзистори, діоди, резистори й ін.) формують у єдиному технологічному потоці в тонкому поверхневому шарі напівпровідникової пластини (підкладки) діаметром 40 - 150 мм і товщиною 0,2 - 0,4 мм. На одній підкладці одночасно виготовляють до 1000 мікросхем (рис. 3.1 а), після чого її розрізають алмазним різцем чи іншими способами на прямокутні пластини - окремі кристали мікросхеми.

Кристал – конструктивно виділена частина напівпровідникової пластини, що є функціонально закінченою НІМС, по периметру якої розміщені контактні площинки.

Корпус – частина конструкції ІМС, яка призначена для її захисту від зовнішнього впливу і з'єднання із зовнішніми колами за допомогою виводів. Кристал кріплять до основи корпусу (рис. 3.1 б) і, виконавши необхідні електричні з'єднання із зовнішніми виводами, герметизують.

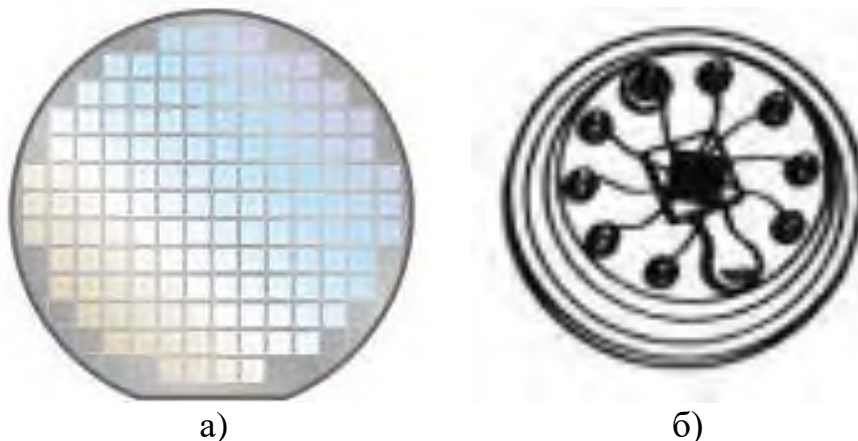


Рисунок 3.1 - НІМС: а - підкладка; б - з'єднання із зовнішніми виводами корпусу

Розрізняють чотири типи НІМС: планарно-дифузійні (однокристалльні) на біполярних (БП) структурах; сумісні (з тонкоплівковими пасивними елементами); на основі структур метал-діелектрик-напівпровідник (МДН)); багатокристалльні. У планарно-дифузійних мікросхемах на біполярних структурах елементи являють собою області з різним типом електропровідності усередині монокристалічної напівпровідникової підкладки (рис. 3.2). Ці елементи ізольовані один від одного оборотно зміщеним р-п-переходом або шаром діелектричного матеріалу, наприклад, окислу кремнію. Цифри ділянок структури (рис. 3.2) відповідають позначенням електричної схеми. Сумісні мікросхеми - це сполучення НІМС з тонкоплівковими елементами на підкладці з кремнію. Осадження тонких плівок проводять безпосередньо після виконання усіх дифузійних операцій, за допомогою

тонкоплівкової технології створюють резистори і конденсатори. Ці елементи в мікросхемі можуть бути виконані більш точними за номінальним значенням у порівнянні з дифузійним методом. Мікросхеми на МДН-структурах виконують на основі польового транзистора з ізольованим затвором. В інтегральних мікросхемах ці транзистори використовують як активні та пасивні елементи, що забезпечує максимальну повторюваність та технологічність при виготовленні мікросхем. Вони мають більш високий ступінь інтеграції порівняно з іншими типами напівпровідникових мікросхем.



Рисунок 3.2 - Структура та електрична схема планарно- дифузійної НІМС

Багатокристалні мікросхеми складаються з окремих компонентів, які розміщені на загальній підкладці та з'єднані між собою тонкоплівковими провідниками та дрововими виводами (рис.3.3). Для герметизації загальну підкладку розміщують у корпусі. Виготовлення багатокристалних мікросхем потребує меншої кількості технологічних операцій, оскільки усі компоненти виконуються окремо. Однак ці мікросхеми в умовах масового виробництва коштують дорожче, оскільки в них важко автоматизувати операції збирання. Багатокристалні мікросхеми мають кращі робочі характеристики, оскільки вплив паразитних зв'язків у них менший за однокристалні ІМС.

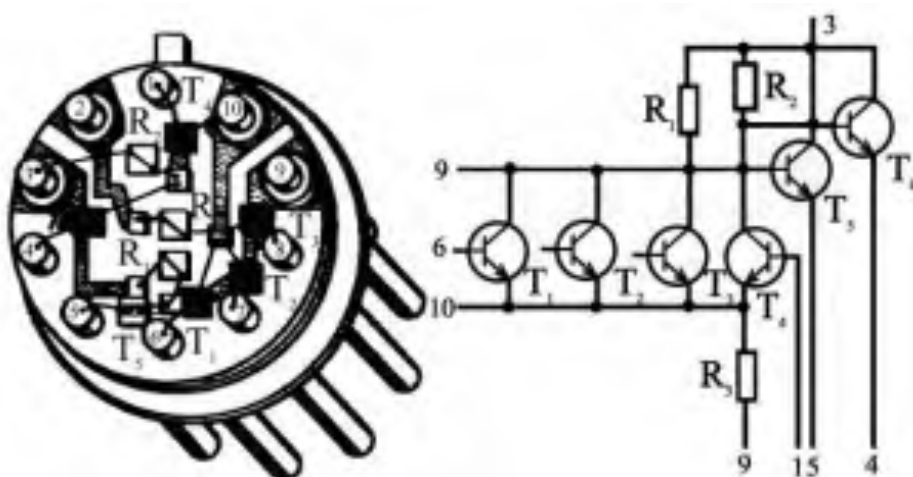


Рисунок 3.3 - Структура та електрична схема багатокристалної НІМС

3.2 Ізоляція елементів у НІМС

Як було зазначено вище, у напівпровідникових інтегральних мікросхемах елементи виконані усередині (у приповерхньому шарі) і на поверхні напівпровідникової підкладки - кремнієвої пластини товщиною 200 - 300 мкм. Площа підкладки 1,5 до 6 мм². У порівнянні з плівковими і гібридними НІМС мають найбільш високе число елементів в одиниці об'єму і найбільшу надійність (найменшу інтенсивність відмов). Недолік НІМС - трохи гірша якість пасивних елементів (резисторів, конденсаторів) і неможливість створення в напівпровіднику котушок індуктивності. Проте НІМС займають провідне місце в мікроелектроніці, тому що саме на їхній основі виготовляються великі і надвеликі інтегральні схеми.

Оскільки усі елементи формуються в єдиному напівпровідниковому кристалі, то важливо забезпечити ізоляцію елементів від кристала і один одного. Застосовується декілька способів ізоляції. Найбільш простою і дешевою є ізоляція n - p - переходом. У цьому випадку в кристалі, наприклад із кремнію типу p, методом дифузії робляться області типу n, названі «кишенями» (рис.3.4). У «кишенях» потім формуються необхідні пасивні та активні елементи, а n - p - перехід між «кишенею» і кристалом у працюючій ІМС перебуває під зворотною напругою.

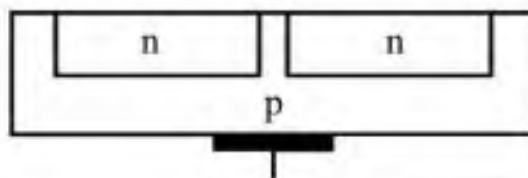


Рисунок 3.4 - Ізоляція n-p-переходом

Для цього на кристал постійно подається від'ємний потенціал у декілька вольтів. Кремнієвий n - p - перехід при зворотній напрузі має дуже високий опір (декілька МОм), який і виконує роль ізоляції. Очевидно, що між будь-якими двома елементами опір ізоляції буде дорівнювати подвійному зворотному опору ізолюючого n - p - переходу. Потрібно враховувати, що кожен такий перехід має бар'єрну ємність, і тому між елементами виникає паразитний ємнісний зв'язок через ємності переходів.

У разі ізоляції діелектричним шаром (рис. 3.5) методом дифузії формуються «кишені» для подальшого утворення в них потрібних елементів, але між «кишенею» та кристалом Si має місце тонкий діелектричний шар SiO₂, створення якого значно ускладнює виготовлення мікросхеми. Але ізоляція одержується набагато краща, ніж за допомогою n - p - n переходу. Паразитна ємність між «кишенею» та кристалом у цьому випадку набагато менша, оскільки діелектричний шар у декілька разів товщий, ніж ізолюючий шар n - p - переходу.

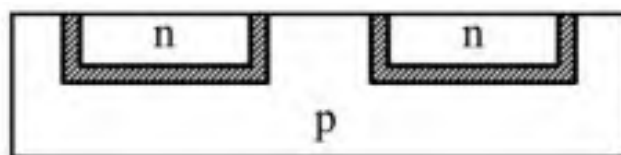


Рисунок 3.5 - Ізоляція діелектричним шаром

Третій тип ізоляції - комбінований. У цьому випадку бокові сторони «кишень» ізолювані діелектричним шаром SiO₂, а нижня сторона ізолювана від підкладки n - p - переходом під зворотною напругою (рис. 3.6). При такому методі паразитна ємність між елементами зменшується в порівнянні з ізоляцією n - p - переходом та досягається більша густина розміщення елементів, оскільки відстані між елементами значно зменшуються.

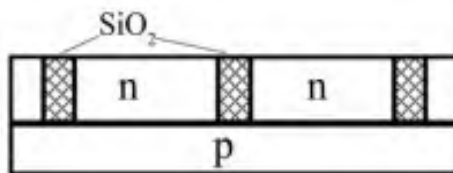


Рисунок 3.6 - Комбінована ізоляції

Одержала поширення ізоляція типу кремній на сапфірі. На сапфіровій підкладці, яка є гарним діелектриком, нарощують епітаксціальний шар кремнію (~ 1 мкм). Це стає можливим тому, що сапфір і кремній мають однакову кристалічну решітку. Шар кремнію протравлюють так, що утворюються кремнієві «острівки» (рис.3.7). В цих «острівках» методом дифузії формуються необхідні елементи, які ізолюються один від одного сапфіром, а з боків - повітряним шаром. Недолік цього методу - такі мікросхеми мають рельєфну поверхню, а це заважає виготовленню надійної системи мікроз'єднань елементів.



Рисунок 3.7 - Ізоляція типу «кремній на сапфірі»

ТЕМА 4 ТРАНЗИСТОРИ У НІМС

4.1 Біполярні транзистори (БТ)

Найважливішою властивістю БТ є властивість підсилювати електричні сигнали постійного, змінного та імпульсного струмів. У біполярного транзистора вихідний опір відрізняється від вхідного. У зв'язку з цим і виникла назва такого приладу - транзистор, що є скороченням слів transfer resistor (передавальний резистор). Підсилення в транзисторі відбувається завдяки тому, що відносно невеликі зміни струму бази або напруги між базою та емітером можуть спричинити значні зміни струму між емітером і колектором. При цьому струм, яким керують, проходить емітерну область, чутливу область бази і виходить з колектора.

Сучасні біполярні інтегровані транзистори є напівпровідниковими приладами, що широко використовуються в ІМС як керовані джерела або перемикачі струму. Біполярні транзистори є, як мінімум, триполюсниками, що містять три напівпровідникові шари з різним типом електропровідності - п-р-п або р-п-р (рис.4.1).

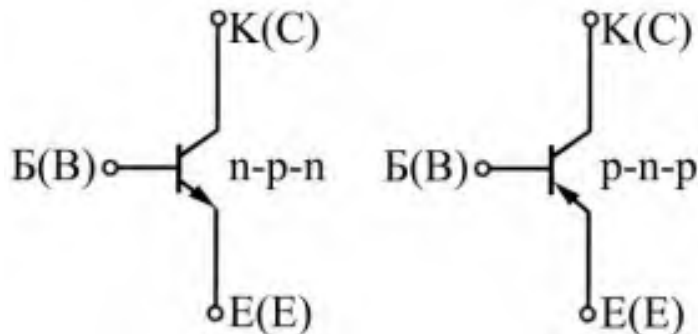


Рисунок 4.1 – Графічне позначення БТ

Середній шар транзистора називають базою (Б), а зовнішні шари - емітером (Е) та колектором (К). Міжнародне позначення областей: бази - В, емітера - Е, колектора - С. Позначення електричних параметрів, які належать до відповідних областей транзистора, включають індексні міжнародні позначення областей. Шари з'єднуються із зовнішніми електродами через омичні контакти. Залежно від вибраної послідовності шарів з різним типом електропровідності розрізняють п-р-п- та р-п-р-транзистори. Перша літера в позначенні транзистора означає тип електропровідності емітера, друга - бази, а третя - колектора; стрілка на емітері вказує умовний напрям струму. Области, що контактують, утворюють два р-п-переходи, які називають так само, як і області, між якими вони розташовані (рис. 4.2): р-п-перехід база-емітер (ВЕ) (керувальний перехід); р-п-перехід база колектор (ВС).

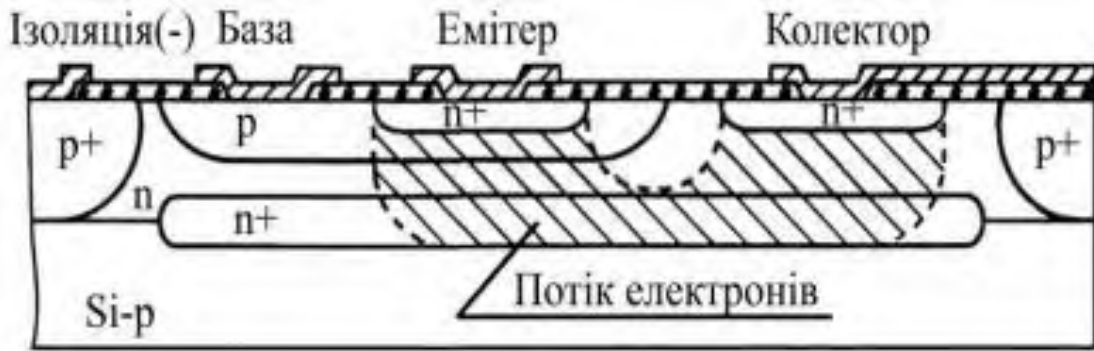


Рисунок 4.2 – Структура біполярного транзистора, виконаного за планарно-епітаксійною технологією із заглибленим n^+ -шаром та ізоляцією обернено зміщеним p - n -переходом

Біполярний транзистор - це напівпровідниковий електронний прилад, що має емітер і колектор одного типу провідності, між якими крізь тонкий шар бази іншого типу провідності проходить струм неосновних носіїв заряду, інжекттованих із сильнолегованого емітера. Струмом керує напруга між базою та емітером або струм бази.

Слово «біполярний» означає, що у фізичних процесах, які відбуваються в транзисторі, беруть участь як електрони, так і дірки. В ІМС використовують переважно силіцієві n^+ - p - n -транзистори, оскільки в них неосновними носіями заряду в області бази є електрони, які більш рухливі, ніж дірки, тому такі транзистори мають кращі електричні параметри - вищі граничні частоти і швидкодію. Транзистори p^+ - p - n технологічніші, ніж транзистори p - n - p . Підвищену концентрацію домішки в області емітера позначають n^+ . Щоб забезпечити максимальне значення коефіцієнта інжекції емітера, як легуючу речовину для нього використовують фосфор, що має максимальну розчинність у силіції і є донорною домішкою.

Сучасні біполярні p - n - p -транзистори є дуже корисними елементами ІМС. Використовуючи в одній схемі p - n - p і p - n - p -транзистори, створено, наприклад, логічні схеми з інжекційним живленням і двотактні підсилювачі з доповнювальною симетрією. Сучасні p - n - p -транзистори з тонкою базою за параметрами не відрізняються від p - n - p -транзисторів. Усі виводи від областей транзистора розміщують в одній площині на поверхні кристала. Така структура біполярного транзистора (див. рис. 4.2) називається планарною і дає можливість з'єднувати транзистори між собою та з іншими елементами напівпровідникової інтегрованої мікросхеми плівковими металевими провідниками або високолегованими областями, які виконують функції провідників. Конструкції та технологія виготовлення БТ дають можливість одночасно створювати діоди, резистори, конденсатори та інші елементи, які формують на основі емітерної, базової та колекторної областей або їх з'єднань. Біполярні транзистори використовують у надзвичайно великому діапазоні частот і рівнів потужностей, в цифрових та аналогових мікросхемах.

4.2 Діоди у напівпровідникових ІМС

Як діоди у напівпровідникових інтегральних мікросхемах використовуються біполярні транзистори в діодному ввімкненні. Це виявляється зручним для

виробництва. Можливі п'ять варіантів діодного ввімкнення транзисторів (рис. 4.3). У випадку БК-Е (база-колектор-емітер) база і колектор замкнуті накоротко, час переключення з відкритого стану в закритий мінімальний - одиниці наносекунд. У випадку Б-Е (база-емітер) використовується тільки емітерний перехід. Час переходу в декілька разів більший. Обидва ці випадки мають мінімальну ємність ($\sim 0,1-0,5$ пкФ) і мінімальний зворотній струм (0,5-1,0 нА), однак й мінімальну пробивну напругу. У випадку БЕ-К (база-емітер-колектор), коли база і емітер замкнуті накоротко, та випадку Б-К (база-колектор) з використанням одного колекторного переходу, час переходу з відчиненого стану в зачинений порядку десятків наносекунд, пробивна напруга - 40-50 В, зворотній струм - 15 - 30 нА. Випадок Б-ЕК (база-емітер-колектор) з паралельним з'єднанням обох переходів має найбільший час переходу (100нс), максимальний зворотній струм (до 40 нА), трохи більшу ємність і таку ж малу пробивну напругу як і в перших двох випадках. Найчастіше використовуються випадки БК-Е та Б-Е.



Рисунок 4.3 - Варіанти використання транзисторів у діодному ввімкненні

4.3 Напівпровідникові резистори

У НІМС використовуються дифузійні резистори - області усередині кристалу з тим або іншим типом провідності (рис. 4.4). Опір дифузійного резистора залежить від довжини, ширини та товщини області, яка виконує роль резистора, питомого опору (концентрації домішок). Резистор типу р (рис. 4.4 а) виготовляється одночасно з базами транзисторів. У цьому випадку питомий опір складає сотні Ом на квадрат і можуть бути одержані номінали до десятків кОм. Для збільшення опору іноді резистор роблять зигзагообразної конфігурації. Якщо необхідні відносно малі опори (одиниці або десятки Ом), то резистори виготовляють одночасно з емітерними областями типу n (рис. 4.4 б) транзисторів.

Температурний коефіцієнт опору (ТКО) дифузійних напівпровідникових резисторів $\beta \sim 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Останнім часом для виготовлення резисторів використовується також метод іонної імплантації, при якому відповідне місце кристалу піддається бомбардуванню іонами домішки, які проникають в нього на глибину 0,2 - 0,3 мкм. Питомий опір таких резисторів складає величину до 20 кОм/□. У резистора типу р (рис. 4.4 а) разом із кристалом формується паразитний n-p-n-транзистор. При проектуванні ІМС завжди вибираються такі режими роботи резистора, коли паразитний транзистор є запертим і практично не має шкідливої дії. Паразитна ємність обмежує робочі частоти, на яких опір резистора можна вважати активним. На частотах вищих деякої граничної опір резистора стає комплексним.

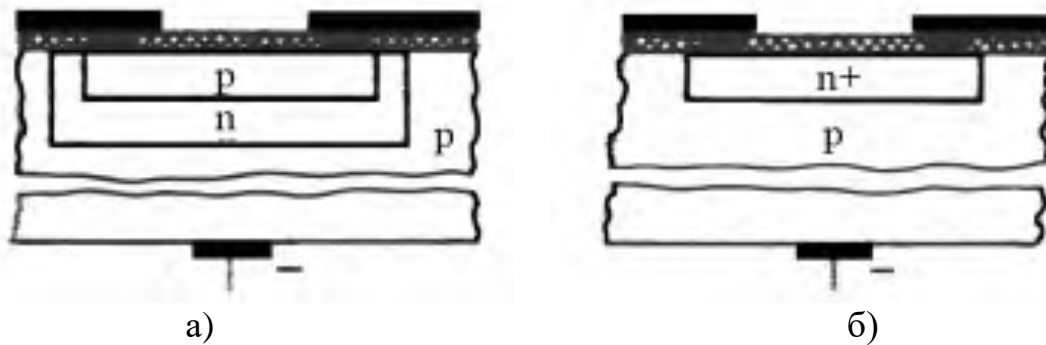


Рисунок 4.4 – Дифузійні резистори НІМС: р-типу (а), n-типу (б)

4.3 Напівпровідникові конденсатори

У дифузійних конденсаторах НІМС використовується бар'єрна ємність p-p-переходу. Ємність такого конденсатора (рис. 4.5) залежить від площини та товщини переходу, діелектричної проникливості напівпровідника і концентрації домішок. Оскільки область емітера має електропровідність n^+ -типу, перехід в конденсаторі буде більш тонким. Ємність таких конденсаторів не перевищує величину $c = 1500$ пФ з допуском $\pm 20\%$. Температурний коефіцієнт ємності (ТКЄ) складає величину $\sim 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, напруга пробою $U_{\text{п}} \leq 10 \text{ В}$. Працюють дифузійні конденсатори тільки при зворотній напрузі, яка для одержання постійної ємності повинна бути постійною. Другий тип конденсаторів - МОН-конденсатори, які застосовують в схемах на МОН-транзисторах. Одна обкладинка - дифузійний шар кремнію типу n^+ , на якій нанесено тонкий шар діелектрика SiO_2 . Друга - металева (алюмінієва) плівка, нанесена поверх вищевказаного шару. Номінали таких конденсаторів бувають до 500 пФ з допуском $\pm 25\%$; $U_{\text{п}} = 20 \text{ В}$. Переваги МОН-конденсаторів - низький ТКЄ - $2 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ та можливість роботи при любій полярності. Нелінійність ємності, тобто залежність її від напруги значно менше ніж у дифузійних конденсаторів. Як в інших елементах, у конденсаторів ІС утворюються паразитні ємності по відношенню до кристалу та паразитні транзистори.

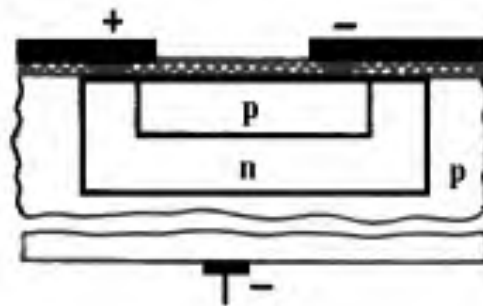


Рисунок 4.5 - Структура дифузійного конденсатора

4.5 Індуктивність у НІМС

Котушки індуктивності в напівпровідникових інтегральних схемах зробити неможливо. Тому ІС проектується так, щоб індуктивність була не потрібна. Якщо ж все ж такі необхідно мати індуктивний опір, то можна створити еквівалент індуктивності, який складається з транзистора, резистора і конденсатора. Приклад одного з таких еквівалентів показано на рисунку 4. 6. Змінна напруга U підводиться

між колектором та емітером транзистора. Для спрощення не показана подача на транзистор постійної напруги. Частина змінної напруги U через RC-ланцюг подається на базу.

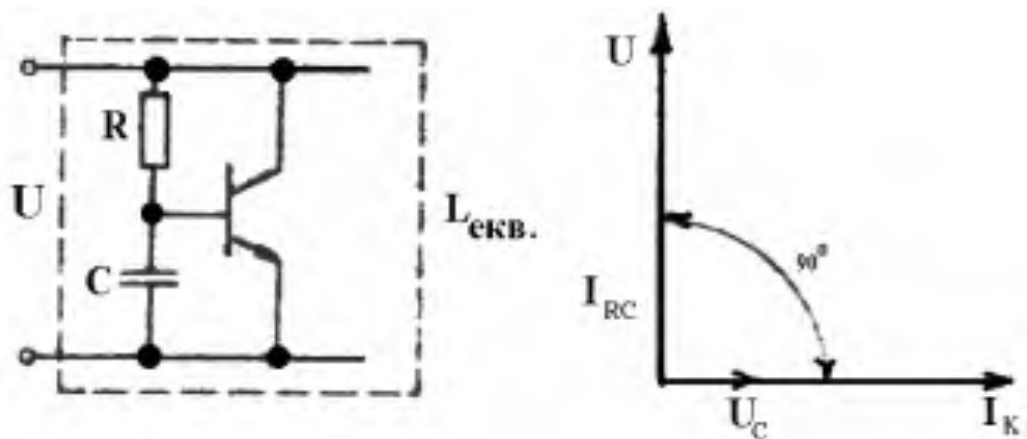


Рисунок 4.6 - Еквівалент індуктивності

ЛЕКЦІЯ 5 ПЛІВКОВІ ТА ГІБРИДНІ ІНТЕГРАЛЬНІ МІКРОСХЕМИ

5.1 Конструкція плівкових та гібридних ІМС

У плівкових інтегральних мікросхемах елементи реалізуються у вигляді плівок різної конфігурації з різних матеріалів. У залежності від товщини плівок, які використовуються, та способу їх нанесення розрізняють тонкоплівкові та товстоплівкові інтегральні мікросхеми. Усі елементи плівкової ІМС та з'єднання між ними наносять в необхідній послідовності та конфігурації через трафарети на нагріту відполіровану підкладку (найчастіше керамічну). ІМС, в яких пасивні елементи (резистори, конденсатори) виконані у вигляді плівок, а активними є напівпровідникові прилади або кристали мікросхем, називають **гібридними** (рис. 5.1 а).

У теперішній час не існує стабільних плівкових елементів (діодів, транзисторів), оскільки виникають великі труднощі при виготовленні якісних монокристалічних напівпровідникових плівок. Так, наприклад, монокристалічні напівпровідникові плівки, одержані конденсацією у вакуумі, не дивлячись на міри, які приймаються, завжди містять небажані домішки, які приводять до нестабільності і короткого терміну служби активних елементів. При виготовленні гібридних ІМС активні елементи розміщують на платі з пасивними елементами - тонкоплівкової або товстоплівкової ІМС.

Активними елементами гібридної ІМС є дискретні напівпровідникові мініатюрні елементи (діоди і транзистори), а також діодні і транзисторні матриці. Активні елементи для гібридних ІМС застосовують або безкорпусними, поверхня яких захищена за допомогою спеціальних захисних покриттів (лак, емаль, смола, компаунд та ін.), або в мініатюрних металевих корпусах. Найбільш поширеною є конструкція товстоплівкової інтегральної мікросхеми, яка являє собою керамічну підкладку з пасивними та активними елементами з необхідною кількістю виводів, закриту з боку елект-ричної схеми металевим колпачком та залиту із зворот-ного боку ізолюючим компаундом (рис. 5.1,б).

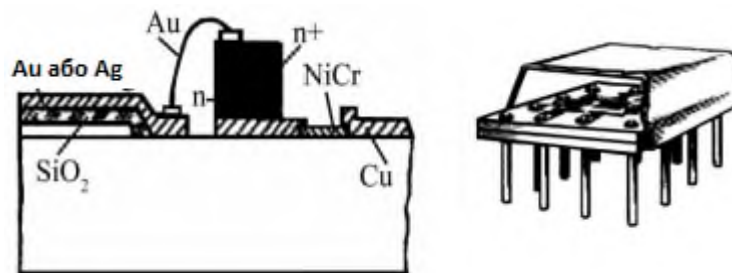


Рисунок 5.1 - Структура гібридної ІМС (а), загальний вигляд товстоплівкової ІМС (б)

Основні переваги товстоплівкових мікросхем - невеликі витрати при експлуатації обладнання та можливість виготовлення резисторів великих номіналів. Недоліком мікросхем на товстих плівках є труднощі при одержанні конденсаторів великої ємності ($0,2 \text{ мкФ/см}^2$ і більше). Перевагами гібридних ІМС є: можливість створення широкого класу цифрових та аналогових мікросхем при короткому циклі

їх розробки; універсальність метода конструювання мікросхем, яка дозволяє застосовувати безкорпусні ІМС, МДН-прилади, діодні та транзисторні матриці як активні елементи; високий процент виходу годних мікросхем.

5.2 Підкладки плівкових інтегральних мікросхем

Підкладки в технології виготовлення та конструюванні плівкових та гібридних інтегральних мікросхем в мікроборках грають дуже важливу роль. Підкладки є основою для групового формування на них ІМС, головним елементом ІМС і мікроборок, які виконують роль механічної опори, забезпечують тепловідвід та електричну ізоляцію елементів.

Підкладка - це заготовка для нанесення елементів гібридних та плівкових ІМС, міжелементних або міжкомпонентних з'єднань, а також контактних площадок.

Матеріал, геометричні розміри та стан поверхні визначають якість елементів, які формуються та надійність функціонування ІМС та мікроборок. Різноманітні способи формування плівкових елементів, монтажу та зборки, а також різноманіття функцій, які виконують гібридні ІМС, диктують різноманітні та суперечливі вимоги до підкладок.

Матеріал підкладки повинен мати:

- високий питомий електричний опір ізоляції, низьку діелектричну проникливість та малий тангенс кута діелектричних втрат, високу електричну міцність для забезпечення якості електричної ізоляції елементів та компонентів як на постійному струмі, так і в широкому діапазоні частот;

- високу механічну міцність в малих товщинах;

- високий коефіцієнт теплопровідності для ефективної передачі теплоти від тепловиділяючих елементів та компонентів до корпусу (для ІМС) або елементам конструкції блока (для мікроборок);

- високу хімічну інертність до осаджених матеріалів для зменшення нестабільності параметрів плівкових елементів, зумовленої фізико-хімічними процесами на границі плівка - підкладка;

- високу фізичну та хімічну стійкість до високої температури в процесі нанесення тонких плівок, термообробки при формуванні товстих плівок та зборки ІМС;

- стійкість до хімічних реактивів при електрохімічних та хімічних методах обробки та формування плівкових елементів;

- мінімальне газовиділення у вакуумі з метою уникнення забруднення плівок, які наносяться;

- здатність до хорошої механічної обробки (поліруванню поверхні, різки).

Крім того, матеріал підкладки повинен мати температурний коефіцієнт лінійного розширення (ТК l), близький до ТК l плівок, які конденсують для забезпечення достатньо малих механічних напружень в плівках, бути недефіцитним і недорогим.

Структура матеріалу підкладки та стан її поверхні має суттєвий вплив на структуру плівок та параметри плівкових елементів. Для забезпечення високої надійності плівкових елементів підкладки повинні мати мінімальну шорсткість поверхні, бути без пор і тріщин.

Останнім часом немає такого матеріалу для підкладок, який би в однаковій мірі задовольняв різноманітним вимогам. Багато органічних матеріалів не можуть бути використані як матеріал для підкладок, тому що виготовлення плівкових елементів мікросхем проводиться у вакуумі та при підвищених температурах. Виключення - лавсан (полімерний матеріал). Тому для виготовлення підкладок використовують в основному скло, кераміку, ситал та фотоситал.

Скло. Найкращими для підкладок є боросилікатні та алюмосилікатні сорти скла. Шляхом листового прокату цих сортів скла одержують досить гладку поверхню без полірування. Полірування зменшує мікронерівності (менше 10 нм), але воно значно дорожче, ніж листовий прокат. Крім того, при поліруванні скляних підкладок можуть погіршитися їх поверхневі властивості. Недолік підкладок із скла - мала теплопровідність, що не дозволяє застосовувати їх при підвищеному нагріві. При інтенсивному нагріві використовують скло «Пирекс», кварц та кварцеве скло.

Кераміка. Керамічними матеріалами для підкладок тонкоплівкових та товстоплівкових мікросхем є кераміка на основі окисі алюмінію, кераміка «Поликор» та берилієва кераміка. Важною перевагою керамічних підкладок у порівнянні із скляними є їх висока теплопровідність. Так, наприклад, кераміка на основі окисі берилію має в 200 - 250 разів більшу теплопровідність, ніж скло. Однак навіть незначна добавка деяких домішок (наприклад, окисі алюмінію) різко зменшує теплопровідність кераміки. До недоліків кераміки слід віднести значну шорсткість поверхні. Мікронерівності необробленої кераміки можуть складати декілька тисяч ангстрем і сильно зменшується після полірування. Однак полірування може забруднити поверхню та змінити властивості кераміки. Суттєве зниження шорсткості досягається глазуруванням поверхні кераміки тонким шаром спеціального скла або тонким шаром окисі танталу. При цьому висока теплопровідність керамічної основи поєднується з гладкою поверхнею скляної глазури.

Ситал. Ситал - склокерамічний матеріал, який одержують шляхом термообробки (кристалізації) скла. За своїми властивостями ситал перевершує скло. Він добре обробляється: його можна пресувати, витягувати, прокатувати та відливати центробіжним способом. Ситал видержує в повітряному середовищі різкі перепади температури від -60 до +700°C. Він має високий електричний опір, який зменшується з підвищенням температури. По електричній міцності ситал не уступає кращим сортам вакуумної кераміки, а по механічній міцності він в два-три рази міцніше за скло. Ситал має високу хімічну стійкість до кислот, не пористий, дає незначну усадку, газонепроникний і має малу газовіддачу при високих температурах.

Фотоситал. Фотоситал - склокристалічний матеріал, який одержують шляхом кристалізації світлочутливого скла. Він складається з окислу кремнію (75%), окислу літію (11,5%), окислу алюмінію (10%) та окислу калію (3,5%) з невеликими добавками азотнокислого срібла та двоокису церію. Фотоситал є стійким до кислот, він має високу механічну та термічну стійкість, його теплопровідність в декілька разів більша, ніж у ситалу.

ЛЕКЦІЯ 6 КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ І РОБОЧІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛІВКОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ГІМС

6.1 Загальна характеристика

У мікроелектроніці на основі тонких металевих плівок виконують наступні конструктивні елементи: плівкові резистори; електроди і струмопроводи (електроди плівкових конденсаторів, струмопроводи спіральних індуктивностей, монтажні провідники, контактні площадки, затвори МДН - транзисторів); допоміжні елементи (підшари струмопровідних плівок, масок і ін.). Найбільш важливими в мікроелектроніці є перший і другий типи металевих плівкових елементів.

До металевих плівок, які використовуються в якості електродів і струмопроводів, пред'являються наступні основні вимоги. Вони повинні мати високу питому провідність, високу адгезію з поверхнею підкладки або з плівкою яка лежить нижче, малим коефіцієнтом теплового розширення. Товщина металевих плівок змінюється в межах 2000 – 10000 Å. Мінімальна ширина провідників обмежується розрізнявальною здатністю процесів фотолітографії і складає 4 – 20 мкм.

У багатьох випадках для поліпшення адгезії металевих плівок з діелектричною підкладкою на неї наносять підшар Cr, Ti чи Mn товщиною 100 - 300 Å. В якості матеріалів для виготовлення розглянутих металевих плівкових елементів застосовують Au, Ni, Cu вакуумної плавки, Al, Mo, Pd, Ta і ін. Параметри деяких матеріалів приведені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 - Електрофізичні параметри плівкових матеріалів

Матеріал плівки	$\rho \cdot 10^8, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$\beta \cdot 10^3, \text{ K}^{-1}$
Al	2,8	4,2
Au	2,4	3,8
Ag	1,6	4,0
Cu	1,7	4,3
Ni	7,3	6,5
Cd	10,0	4,0
Ni-Cr	100,0	1,7
Pd	10,7	3,8
In	9,0	4,7

Тонкі металеві плівки одержують головним чином методами термовакуумного напилювання і іонно-плазменного розпилення. Першим з цих методів одержують плівки металів з товщиною, що змінюється в досить широких межах. Такі плівки, як правило, не містять сторонніх укралень, тому що процес проводиться у високому вакуумі. Метод іонно-плазмового розпилення придатний для одержання плівок будь-яких, у тому числі тугоплавких, металів. Отримані таким методом плівки відрізняються підвищеною адгезійною здатністю і високою стабільністю

параметрів. Електрофізичні властивості тонких металевих плівок найбільшою мірою залежать від їхньої товщини незалежно від способу одержання. Як відзначалося, питома провідність таких плівок зменшується зі зменшенням їхньої товщини. Це пояснюється тим, що довжина вільного пробігу електронів у плівці виявляється менше, ніж у масивному матеріалі, тому що електрони в плівці зазнають додаткові зіткнення з границями поверхонь. Електропровідність металів обумовлена тим, що вільні електрони усередині металів неупорядковано рухаються між атомами кристалічної ґратки.

6.2 Плівкові резистори

Плівкові резистори створюють на діелектричній основі або діелектричній плівці, нанесеній на металеву, напівпровідникову або діелектричну основу. При виготовленні плівкових резисторів на підкладку наносять резистивні плівки. Якщо опір резистора не повинний бути дуже великим, то плівка робиться зі сплаву високого опору, наприклад із ніхрому. А для резисторів високого опору застосовується суміш металу з керамікою, що одержала назву кермет. На кінцях резистивної плівки роблять виводи у вигляді металевих плівок, що разом є лініями, що з'єднують резистор з іншими елементами. Конфігурація резисторів визначається їх номінальним значенням, точністю, методом формування геометричних розмірів, матеріалом резистивної смужки та її питомим опором, площею, відведеною під резистор на основі.

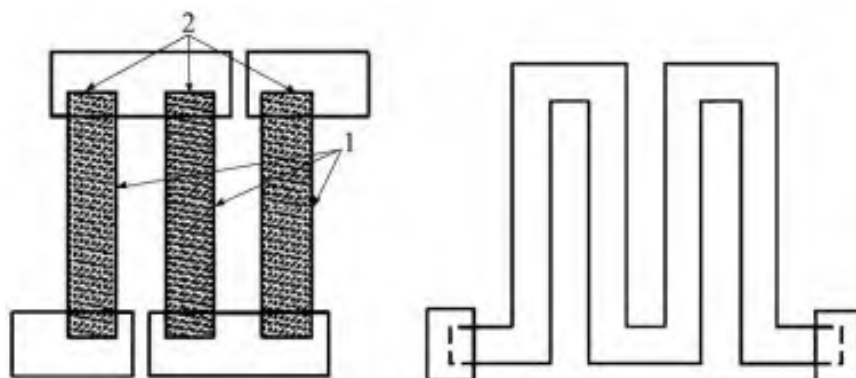


Рисунок 6.1 - Резистори інтегрованих мікросхем

Плівкові резистори (рис. 6.1) складаються з резистивної смужки 1 простої або складної форми та двох чи більше виводів 2 для приєднання до інших елементів мікросхеми. Найтехнологічнішими конструкціями є конструкція у вигляді послідовно з'єднаних резистивних смужок (рис. 6.1 а) та на зразок меандру (рис. 6.1 б). Питомий опір плівкових резисторів виражають в особливих одиницях - омах на квадрат ($\text{Ом}/\square$), тому що опір даної плівки у формі квадрата не залежить від розмірів цього квадрата. Дійсно, якщо зробити сторону 64 квадрата, наприклад, у два рази більше, то довжина шляху струму збільшиться вдвічі, але й площа поперечного переріза плівки для струму також зросте вдвічі; отже, опір залишиться без зміни

6.3 Плівкові конденсатори

Плівкові конденсатори (рис. 6.2 а) складаються з двох провідникових обкладок 1, 2 (переважно з алюмінію), розділених діелектриком 3, які перекриваються. У залежності від товщини діелектрика плівкові конденсатори

бувають тонко- та товстоплівковими. Діелектрик плівкового конденсатора повинен відповідати наступним вимогам: бути ізолюючим матеріалом, здатним утворювати непористі плівки; мати високу адгезію до матеріалу підкладки; бути стійким до змін температури; мати пробивну напругу 100 - 200 В; температуру випаровування 1000 - 1200°C; бути сумісним з матеріалом обкладинок.

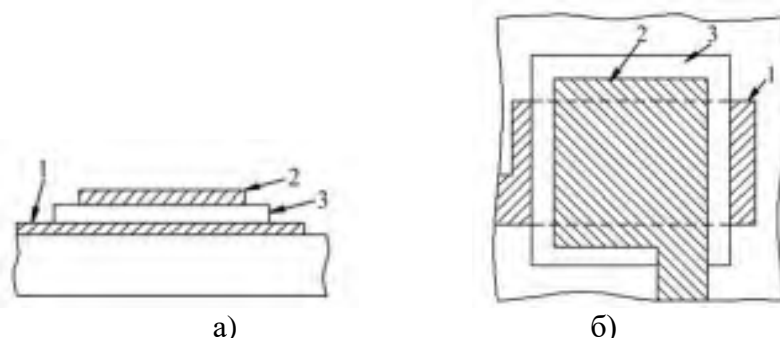


Рисунок 6.2 – Конденсатори ІМС

Конструкцію конденсатора формують на діелектричній основі або на ізоляційному шарі. Як діелектрик для плівкових конденсаторів використовують різні діелектричні матеріали з питомою ємністю 10 - 1000 пФ/мм², які наносять на поверхню вакуумними методами. Це дає змогу створювати конденсатори ємністю 20 - 1000 пФ з достатньою добротністю і робочою напругою 6 - 50 В. Ємність понад 1000 пФ можна отримати в багат шарових структурах конденсаторів за допомогою по черговому нанесення провідникових і діелектричних плівок або використання діелектричних плівок з великим значенням ϵ . Конденсатори ємністю менш як 30 пФ створюють за допомогою спеціальних конструкцій, одна з яких - гребінчата (рис.6.3).

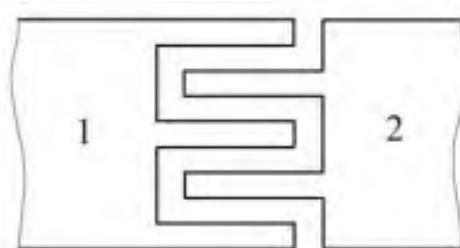


Рисунок 6.3 – Гребінчата структура конденсатора

У мікросхемах, виконаних за танталовою технологією, як діелектрик використовують пентаоксид танталу, створений електрохімічним анодуванням нижньої танталової обкладки конденсатора. Ємність таких конденсаторів може досягати 0,1 мкФ.

6.4 Індуктивні елементи

Плівкові котушки ГІМС бувають двох типів: перший тип - мікрокотушки, що монтуються на плату мікросхеми, другий тип - індуктивні елементи, виконані у вигляді круглих (рис.6.4 а), плоских квадратних (рис.6.4 б) спіралей або окремих витків (рис. 6.4 в), які наносять на діелектричну або магнітну основу чи плівку. Основними параметрами плівкових індуктивних елементів є індуктивність L ,

добротність Q , власна ω_1 резонансна частота f_0 та ін. Вони залежать від конструкції й розмірів спіралі, питомого опору провідникового матеріалу та умов навколо спіралі. Індуктивність визначається зовнішнім діаметром спіралі D_2 , який обмежують розмірами 15 - 20 мм. Якщо не застосовувати магнітних основ або плівок, то значення індуктивності не перевищує одиниць мікрогенрі.

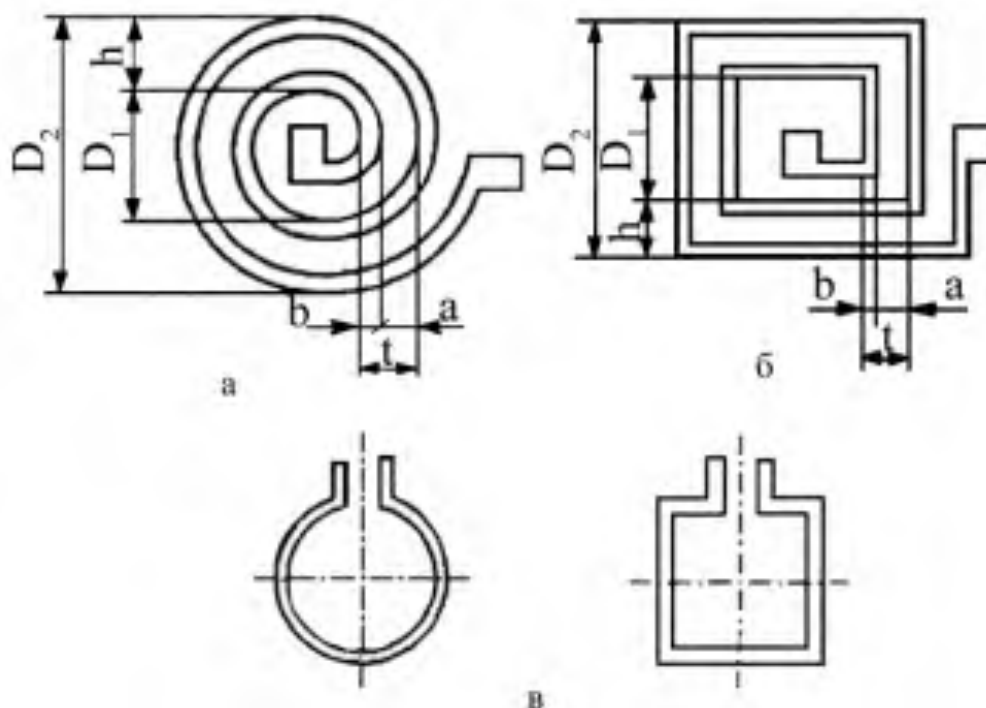


Рисунок 6.4 - Індуктивні елементи ІМС

Індуктивні елементи ІМС НВЧ повинні мати довжину провідника набагато меншу за довжину хвилі.

Серед недоліків індуктивних елементів слід назвати такі: великі габаритні розміри, значна відносна похибка індуктивності (0,2 - 0,3) і неможливість простого підстроювання.

Якщо виготовити дві плоскі котушки з протилежних боків підкладки, можна одержати плівковий трансформатор. Товщина підкладки буде визначати величину взаємної індукції. Але коефіцієнт взаємної індукції буде низьким, тому що матеріалом підкладки не є магнетик.

6.5 R - C структури

Плівкові RC-структури з розподіленими параметрами використовують як фільтри, фазозсувні елементи, а також елементи селективного зворотного зв'язку при побудові активних фільтрів. Вони забезпечують зсув фази понад 360° . Найчастіше застосовують два типи RC-структур: R-C-nR і C-R-nC. За виконанням структура R-C-nR подібна до плівкового конденсатора з високоомними обкладинками з опорами R і nR (n - сталий коефіцієнт). Структура C-R-nC складається з двох конденсаторів ємністю C і nC, які мають спільну обкладку з високоомного матеріалу з опором R. Якщо $n = 0$, то обидві структури перетворюються на просту конструкцію RC-типу. Розрізняють RC-структури з постійними і змінними уздовж конструкції питомими параметрами. RC-структури, в

яких питомі параметри уздовж конструкції не змінюються, називаються однорідними. Однорідні RC-структури виконують на ізоляційній основі у вигляді багат шарової структури, яка складається з провідникових, діелектричних і резистивних плівок.

Для побудови мікроелектронних пристроїв частотної селекції використовують RC-нульові фільтри, в яких на заданій частоті ω_0 коефіцієнт передачі дорівнює нулю (рис. 6.5).

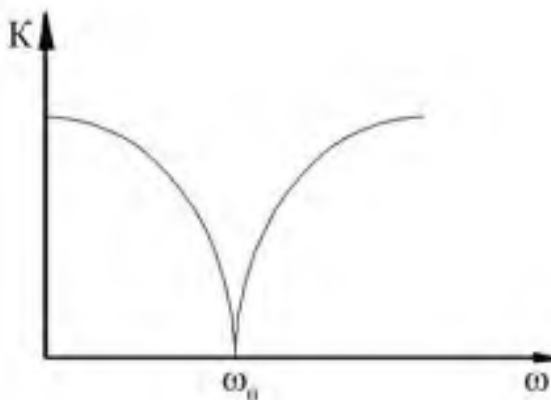


Рисунок 6.5 – Характеристика RC-нульового фільтру ІМС

Коефіцієнти $M = \omega_0 RC$ та $n = R_1/R$ визначають положення нуля коефіцієнта передачі фільтра. Розрахунки і конструювання RC-структур виконують у тій самій послідовності, що й розрахунки та конструювання резисторів і конденсаторів.

ЛЕКЦІЯ 7 ВЕЛИКІ ІНТЕГРАЛЬНІ СХЕМИ (ВІС)

7.1 Класифікація, основні параметри і галузі застосування ВІС

Основною тенденцією інтегральної мікро-електроніки є підвищення ступеня інтеграції мікросхем. Поряд з цим, зростає функціональна складність ІМС. Для сучасної мікроелектроніки характерна комплексна інтеграція: технологічних процесів, елементів на підкладці, схемних функцій у межах єдиної структурної одиниці, нових фізичних явищ, методів проектування й етапів процесу створення мікросхем. Збільшення ступеня інтеграції зв'язано зі зменшенням розмірів активних і пасивних елементів, удосконалюванням технології виготовлення й обробки підкладок великих розмірів, використанням нових активних елементів, які мають технологічні та функціональні переваги і підвищену надійність. Збільшення числа елементів і зростання функціональної густини обумовили створення мікросхем з високим ступенем інтеграції - великих інтегральних схем (ВІС).

Основними параметрами, що характеризують конструктивно-технологічні і схематичні особливості ВІС, є ступінь інтеграції, функціональний складність, інтегральна густина, функціональна густина і інформаційна складність.

Великі інтегральні схеми є складними мікросхемами. В їх об'ємі реалізуються блоки, вузли та цілі радіоелектронні пристрої. Тому ВІС не мають широкої універсальності та використовуються, в основному, для конкретних типів апаратури. Перехід до великих інтегральних схем вимагає нових якісних змін у конструюванні радіоелектронної апаратури. Виготовлення в єдиному технологічному процесі складного функціонального вузла дозволяє робити найкращу оптимізацію його параметрів, тому що ведеться розрахунок не окремих моментів, а вузла в цілому.

Об'єднання елементів у ВІС підвищує швидкодія вузлів, зменшує їхню сприйнятливості до перешкод: скорочується затримка передачі сигналу, досягається гарний захист елементів від зовнішніх перешкод. Крім підвищення ступеня інтеграції в межах конструктивно оформленої мікросхеми ВІС дає можливість одержати більш високі якісні показники і велику надійність радіоелектронних пристроїв при менших витратах. Підвищення надійності ВІС досягається шляхом зменшення числа з'єднань у межах одного реалізованого вузла і скорочення кількості технологічних операцій. Зниження вартості ВІС у порівнянні з вузлами на звичайних мікросхемах обумовлюється прогресом технології, що дозволяє збільшувати ступінь інтеграції, і зменшенням обсягу монтажних робіт. За видом інформації, яка оброблюється, ВІС можна класифікувати на цифрові й аналогові. Цифрові ВІС використовують у пристроях обробки інформації, до яких відносяться напівпровідникові запам'ятовуючі пристрої, багаторозрядні регістри, лічильники, суматори й ін. Прикладами аналогових ВІС є перетворювачі напруга - код і код - напруга, блоки апаратури зв'язку (тракти високої і проміжної частот, формувачі сигналів, багатокаскадні схеми радіопристроїв і т.д.). За ступенем застосованості в розробках апаратури розрізняють ВІС загального і спеціального призначення. Прикладами цифрових ВІС загального призначення є різні напівпровідникові запам'ятовуючі пристрої, регістри, дешифратори, підсистеми і спеціальні обчислювачі. Аналогові ВІС загального призначення - це підсистеми взаємного перетворення напруги в код, прецизійні операційні підсилювачі вищого класу,

підсилювачі для високоякісного відтворення звуку, НВЧ-субсистеми модулів для фазованих антенних решіток та інші пристрої.

До аналогових ВІС спеціального призначення відносяться підсилювальні тракти радіоприймальних і радіопередаючих пристроїв на фіксовані частоти, формувачі частот з послідовності, обумовленої частотами генераторів, що задають, чи зовнішньою тактовою частотою, і інші субсистеми. Найбільше застосування ВІС одержали в обчислювальних системах із продуктивністю порядку декількох мільйонів операцій у секунду, де використовують в основному напівпровідникові і гібридні ВІС. Розвиток ВІС відбувається в напрямку збільшення ступеня їхньої інтеграції і створення надвеликих інтегральних мікросхем (НВІС). Кількість функціональних елементів у них може складати кілька тисяч і навіть десятків тисяч. Багатокристалльні НВІС можуть поєднувати в одному корпусі кілька кристалів ВІС і дискретних безкорпусних активних елементів, що утворюють, наприклад, всю електронну частину обчислювальної машини. При розробці таких мікросхем вирішують задачі не тільки схемотехніки, але і системотехніки.

ЛЕКЦІЯ 8 СУЧАСНІ НАПРЯМИ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОНІКИ

8.1 Функціональна мікроелектроніка

Функціональна мікроелектроніка - це галузь електроніки, яка дозволяє реалізувати певну функцію апаратури без застосування стандартних базових елементів на основі фізичних явищ у твердих тілах. У цьому випадку локальному об'єму твердого тіла надаються такі властивості, які потрібні для виконання певної функції. Функціональні мікросхеми можуть виконуватися на основі не тільки напівпровідників, а й таких матеріалів, як надпровідники, сегнетоелектрики, фотоматеріали та ін. Для перероблення інформації можна використовувати явища, які не пов'язані з електропровідністю (наприклад, оптичні та магнітні явища в діелектриках, поширення ультразвуку та ін.).

8.2 Хемотроніка

Хемотроніка (іоніка) - розділ електроніки, змістом якого є теорія і практика електрохімічних перетворювачів для нових типів керуючих, інформаційних, обчислювальних і вимірювальних пристроїв. Першими електрохімічними приладами були гальванічні елементи й акумулятори, а потім електролітичні конденсатори, але усі вони звичайно не розглядаються в хемотроніці.

На початку розвитку хемотроніки були створені прилади, що є аналогами діодів і тріодів, але в них рухливими носіями заряду були іони в рідких електролітах, а не електрони. На основі цих приладів удалося здійснити випрямлення і посилення. Оскільки маса іонів у багато разів більше, а рухливість у багато разів менше, ніж 84 маса і рухливість електронів, прилади хемотроніки дуже інерційні і придатні тільки для дуже низьких частот. Ця їх властивість є істотним недоліком. Але варто мати на увазі, що в багатьох системах, наприклад, пристроях автоматики, процеси проходять порівняно повільно й у цих випадках низькочастотність приладів хемотроніки не має значення.

Є багато різних приладів хемотроніки. Теорія таких приладів складна, тому що в них проходять дуже складні фізико-хімічні процеси. Далі будуть розглянуті найбільш типові прилади хемотроніки. Як правило, вони мають герметичний корпус, у якому є електроліт і електроди. Матеріали деяких електродів і корпуси не повинні вступати в хімічну взаємодію з електролітом. Значна частина приладів хемотроніки - це концентраційні електрохімічні перетворювачі або перетворювачі дифузійного типу. Робота цих приладів ґрунтується на зміні концентрації активних компонентів електроліту. Ці компоненти містяться в електроліті в двох видах: окисленому і відновленому. Крім того, в електроліті є ще і пасивний (індиферентний) компонент, що не бере участі в хімічних реакціях, а лише збільшує провідність електроліту. Розподіл активних компонентів залежить від декількох процесів, що проходять в електроліті: дифузії, конвекції та міграції.

Дифузія - це поширення іонів унаслідок різниці концентрацій. **Конвекція** - переміщення самого розчину за рахунок різниці густини. **Міграція** (аналог дрейфу носіїв заряду) - переміщення іонів під дією електричного поля або поля, створеного різницею потенціалів на електродах. Головну роль звичайно відіграє дифузія. Найпростіший електрохімічний прилад - симетрична плоска електрохімічна комірка (рис. 8.1), має електроди 85 однакової площі з того самого матеріалу.

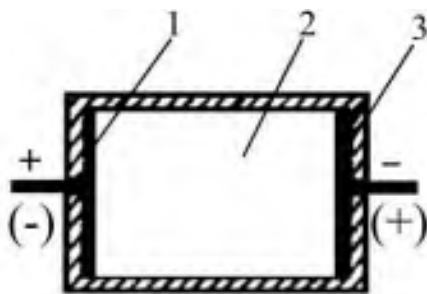


Рисунок 8.1 - Найпростіша електрохімічна комірка

Вольт-амперна характеристика такої комірки також симетрична (рис.8.2 а). У несиметричній комірці площі електродів різні і вольт-амперна характеристика несиметрична (рис.8.2 б), а отже, така комірка має випрямні властивості. Можна одержати випрямний ефект і при однаковій площі електродів, якщо поділити весь обсяг електроліту на дві нерівні частини за допомогою дифузійного бар'єра. Таким бар'єром може бути пориста або суцільна перегородка з тонкою щілиною або капіляром, що з'єднує відсіки.

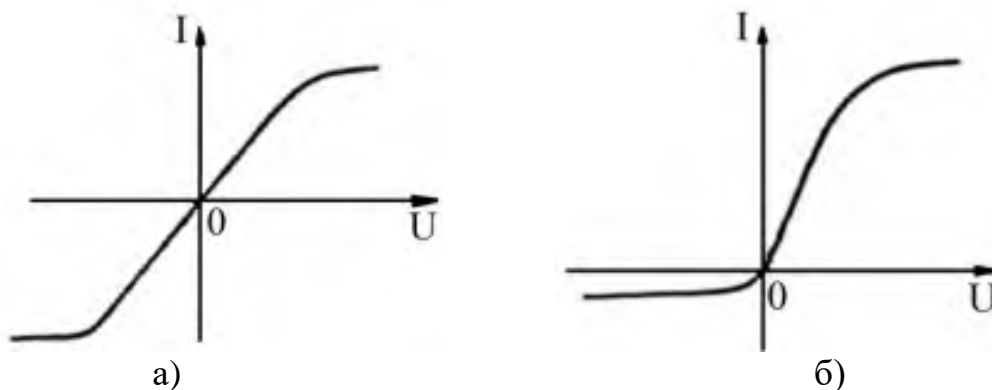


Рисунок 8.2 - Вольт-амперні характеристики симетричної(а) та несиметричної (б) електрохімічних комірок

Електрохімічні діоди мають відношення площ електродів до декількох сотень і такого ж порядку коефіцієнт випрямлення. На відміну від напівпровідникових електрохімічні діоди працюють уже при дуже низьких напругах від 0,005 до 0,050 В, можуть бути дуже малих розмірів, мають низький рівень власних шумів, прості у виготовленні, дешеві і мають високу надійність. Звичайно, вони придатні тільки для низьких та інфранизьких частот.

Хемотронні діоди з дифузійним бар'єром можуть застосовуватися як інтегратори струму, тобто лічильників кількості електрики. При протіканні струму змінюються концентрація компонентів електроліту і його колір. Тому можливе візуальне визначення кількості електрики, але погрішність складе не менше 10%. Якщо в діод увести додатковий електрод, то можна кількість електрики визначити за струмом в ланцюзі додаткового електрода. В електрохімічних датчиках тиску є три чи чотири електроди і частину корпусу роблять у вигляді гнучкої мембрани. Зовнішній тиск передається через мембрану на електроліт, що починає рухатися, і тоді на один з електродів потрапляє більше іонів. Струм цього електрода зростає, і

за ним можна робити висновок про тиск. Такі датчики застосовуються тільки для вимірювання змінного тиску. Подібно такому датчику працюють електрохімічні мікрофони, зокрема застосовувані для підвідного акустичного зв'язку - гідрофони.

Велику групу приладів хемотроники складають електрокінетичні перетворювачі. Вони базуються на використанні **електрокінетичного руху**. Це рух позитивних або негативних частинок рідкої речовини під дією електричного поля. Як уже зазначалося, рух іонів під дією поля називається міграцією. Рух в електричному полі більших частинок, ніж іони, має назву електрофорез. Рух рідини через пористу перегородку чи капіляр під дією поля - електроосмос. Робота електрохімічного приладу на основі електрофорезу або електроосмосу називається насосним режимом. Але можливий і інший - генераторний режим. Він полягає в тому, що під дією тиску рідина проходить через пористу перегородку і тоді між протилежними сторонами перегородки виникає різниця потенціалів. Принцип роботи електрокінетичного приладу в генераторному режимі пояснений на рисунку 8.3.

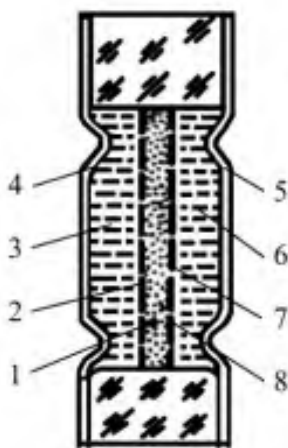


Рисунок 8.3 - Схема будови електрокінетичної комірки

Пориста перегородка, на якій із двох боків є електроди 1 і 7 у вигляді металевих сіток, поділяє прилад на дві камери 3 і 6, заповнені електролітом. Зовнішній тиск може бути переданий на електроліт через гнучкі мембрани 4 і 5. Тиск на одну з мембран викликає проштовхування рідини через пористу перегородку, і тоді на електродах з'являється різниця потенціалів. Подібний прилад служить для вимірювання змінного тиску, і на його основі можуть бути побудовані електрокінетичні мікрофони, гідрофони, віброметри, тобто прилади для вимірювання змінних переміщень (вібрацій) та акселерометри - прилади для вимірювання прискорень. Діапазон робочих частот у подібних приладах складає величину від 0,1 до 105 Гц.

Особлива група електрохімічних приладів - **візуальні електрохімічні індикатори**. У найпростішому випадку - це два електроди в електроліті в невеликому скляному балончику. Електроліт застосовують такий, щоб він змінював свій колір при подачі напруги на електроди. Напруга, яка подається, може бути постійною, змінною або імпульсною, але обов'язково низькою. На їх основі створюють матричні індикаторні панелі. В них розміщуються дві взаємно

перпендикулярні системи електродів - кожна у вигляді паралельних металевих смуг. Подача напруги та ту чи іншу пару електродів (смуг) викликає зміну кольору електроліту. Основні переваги електро-хімічних індикаторів: низький рівень керуючих сигналів, мала потужність (100 мВт - 100 мкВт), великий динамічний діапазон (до 80 дБ), великий ресурс роботи (до 90000 годин), можливість роботи на низьких та інфранизьких частотах. Існують різні типи електро-хімічних індикаторів, робота яких ґрунтується на тих чи інших фізико-хімічних процесах в електролітах.

ЛЕКЦІЯ 9 МАГНІТОЕЛЕКТРОНІКА

9.1 Загальна характеристика

Магнітоелектроніка - галузь електроніки, яка присвячена теорії і практиці створення пристроїв, що ґрунтуються на явищах електромагнетизму та магнітної індукції, таких, як намагнічування, перемагнічування, розмагнічування осердь імпульсним або безперервним струмом, виникнення ЕРС в провіднику, який рухається, під дією магнітного поля. Магнітоелектроніка пов'язана з появою нових магнітних матеріалів, які мають малу намагніченість насичення, та з розробленням технологічних методів одержання тонких магнітних плівок. На перемагнічування тонкоплівкового елемента, товщина якого не перевищує товщини одного домену, потрібна енергія, яка в 10-20 разів менша, та час, в 10-30 разів менший, ніж на перемагнічування феритового осердя. Найбільш цікавими є тонкоплівкові металеві магнітні матеріали в мікроелектронних запам'ятовувальних пристроях (ЗП), де як елементи пам'яті застосовують магнітні плівки. На тонких плівках можуть бути виконані не тільки елементи пам'яті ЕОМ, а й логічні мікросхеми та магнітні підсилювачі. Досить широкі перспективи побудови функціональних приладів відкривають нові матеріали - магнітні напівпровідники. До них відносять магнетики, які не мають металевої природи електропровідності та являють собою з'єднання магнітних та немагнітних елементів (халькогеніди європія, халькогенідні шпінелі хрому, сильнолеговані ферити). Розрізнять декілька груп сучасних магнітних елементів: циліндричні магнітні домени; перетворювачі Холла; магніторезистори; магнітодіоди; магнітотранзистори та магнітотиристри.

9.2 Циліндричні магнітні домени

Для створення магнітних елементів у мікроелектроніці застосовують магнітні плівки товщиною від 0,1 мкм до 10 мкм, які наносяться на підкладку. Важлива властивість магнітних елементів полягає в тому, що в них процеси намагнічування, перемагнічування та розмагнічування проходять набагато швидше, ніж в елементах із звичайними осердями.

Магнітні плівки мають доменну структуру, тобто складаються із окремих мікроскопічних областей - доменів із спонтанним намагнічуванням. У межах окремого домену атоми намагнічені в одному напрямку, тому кожен домен можна розглядати як окремий елементарний невеликий магніт. По товщині магнітної плівки розміщений один шар доменів. Тому зміна доменної структури може відбуватися лише повздовж поверхні плівки. Вектор поля доменів перпендикулярний до цієї поверхні. Домени мають різні розміри, різну форму та різний напрямок вектора магнітної індукції. Якщо на магнітну плівку діє зовнішнє магнітне поле, вектор якого спрямований перпендикулярно до поверхні плівки, то домени з вектором поля того самого напрямку збільшуються у розмірах, а домени з протилежним напрямком вектора поля зменшуються і при деякому значенні напруженості зовнішнього поля перетворюються в циліндричні магнітні домени (ЦМД). Діаметр ЦМД складає 1 - 5 мкм. При більш сильному магнітному полі домени зникають. Циліндричні магнітні домени можна створювати за допомогою генератора доменів у вигляді дрової петлі із струмом. Така петля з тонкої металевої плівки наноситься на поверхню основної магнітної плівки. Якщо основна

плівка пронизана зовнішнім магнітним полем, а через петлю генератора доменів пропускається імпульс струму, який створює магнітне поле з протилежно направленим вектором індукції, то в магнітній плівці створюється ЦМД.

У запам'ятовувальних пристроях наявність ЦМД відповідає цифрі 1, а відсутність - цифрі 0. Домени - це стійкі утворення, і для запису двійкової інформації їх можна переміщувати в будь-якому напрямку, віддаляючи від генератора доменів, щоб останній при появі на ньому нових імпульсів струму, які відповідають цифрі 1, міг створювати нові домени. Таким чином, на відміну від системи запису інформації на магнітній плівці, яка рухається в даній системі, ЦМД, які несуть інформацію, самі рухаються по нерухомій плівці.

Зчитування інформації проводиться різними методами. Наприклад, на основну плівку наноситься петля з напівпровідника, який має магніторезистивний ефект (ефект Гаусса) - зміну магнітного опору під дією змінного магнітного поля. Через петлю пропускають постійний струм. Якщо під петлею проходить ЦМД, то магнітне поле в петлі змінюється. Тоді змінюється опір петлі і струм в ній, що відповідає цифрі 1. Постійний струм в петлі струму в петлі означає цифру 0. Циліндричні магнітні домени можуть успішно застосовуватися не тільки в запам'ятовувальних пристроях, але також у різних логічних і інших елементах ЕОМ.

9.3 Магніторезистори

Магніторезистори - це напівпровідникові резистори, в яких електричний опір залежить від діючого на резистор магнітного поля. Зміна електричного опору під дією поперечного магнітного поля називають магніторезистивним ефектом (рис. 9.1).

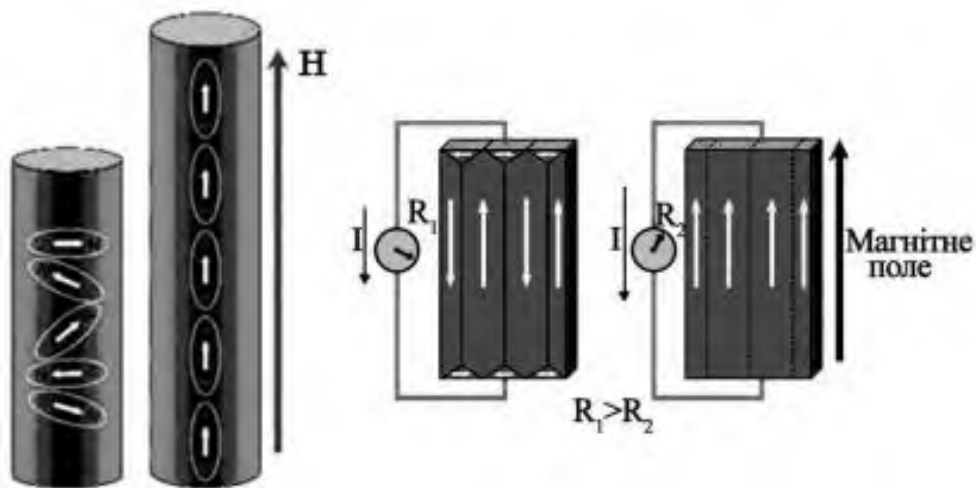


Рисунок 9.1 – Схематичне пояснення магніторезистивного ефекту

Цей ефект можна пояснити наступним чином. Якби усі електрони мали однакову середню швидкість, то при рівності сили поля і сили Лоренца вони рухалися б так, начебто магнітного поля взагалі немає. Але в дійсності швидкості у електронів різні. Тому для електронів, швидкість яких відрізняється від середньої, немає рівності сили полюси і сили Лоренца. Одна з цих сил більше інший і викликає відхилення електронів. Траєкторії таких електронів викривляються і шлях електронів стає довше, а це означає, що збільшується опір напівпровідника. При

збільшенні магнітної індукції від 0 до 1 Тл опір магніторезисторів може збільшитися у кілька разів.

Основними параметрами магніторезисторів є: номінальний опір за відсутності магнітного поля, температурний коефіцієнт опору, максимально припустима потужність розсіювання.

Магніторезистори застосовуються у вимірювальній техніці (для вимірювання величини магнітної індукції) як безконтактні датчики переміщень, у безконтактних вимикачах і перемикачах, а також пристроях електроніки й електротехніки.

9.4 Магніодіоди

Магніодіоди - це напівпровідникові діоди з р-п – переходом, в яких вольт-амперна характеристика змінюється під дією магнітного поля. Конструктивно магніодіод являє собою р-п-перехід з невикривленим омичним контактом, між якими знаходиться область високоомного напівпровідника. Відмінність від традиційних напівпровідникових діодів полягає тільки в тому, що магніодіод виготовляється з базою, довжина якої d у декілька разів більше довжини дифузійного зміщення носіїв L (кілька мм), тоді як в звичайних діодах $d < L$.

Падіння напруги відбувається не на р-п-переході, як в звичайному напівпровідниковому діоді, а на високоомній базі. При збільшенні індукції поперечного магнітного поля і за рахунок відхилення траєкторії носіїв заряду до поверхні напівпровідника, опір бази значно зростає. Зростає загальний опір діода, прямий струм зменшується, спостерігається магніодіодний ефект. Вольт-амперні характеристики магніодіодів показують, що з підвищенням магнітної індукції прямий струм зменшується. Великий опір бази призводить до того, що магніодіоди мають значно більшу пряму напругу, ніж звичайну діоди.

Магніодіоди широко застосовуються: у безконтактних кнопках і клавішах для введення інформації; як датчики визначення положення предметів, які рухаються, для зчитування магнітного запису інформації; для вимірювання і контролю неелектричних величин. На основі магніодіодів конструюють безконтактні реле струму та маніодіодні підсилювачі з коефіцієнтом підсилення в кілька сотен для струмів до 10 А. Схема на магніодіодах може також замінювати колектор в електродвигуні постійного струму.

9.5 Магніотранзистори

Магніотранзистори - це транзистори, в яких вихідний струм визначається магнітним потоком, що проходить через нього., а інші характеристики та параметри змінюються під впливом магнітного поля. Цікавою особливістю таких транзисторів є те, що їх вихідний струм чутливий і до світлового потоку. Таким чином створюється можливість подвійного безконтактного керування вихідним сигналом – магнітним потоком та світлом, що значно розширює функціональні можливості магніотранзистора.

Магніотранзистори класифікують на чотири типи: одноперехідні (ОПТ), одноколектронні (ОКТ), двоколектронні (ДМТ) та польові (ПМТ). Розглянемо кожний тип магніотранзисторів більш детально.

1. *Одноперехідні* – магніотранзистори, що діють на основі модуляції опору бази носіїв заряду, які інжектуються із емітера та мають S-подібну вхідну характеристику. Характер кривої 1 вказує на те, що чим більше час життя

інжектіваних носіїв в базі, тим глибше вони проникають в неї, і тим менше значення має залишкова напруга U_0 . Якщо транзистор помістити у магнітне поле на інжектівані носії починає діяти сила Лоренца, яка відхиляє їх до стінок бази або навпаки (в залежності від напрямку магнітного поля). Оскільки швидкість рекомбінації носіїв біля стінок бази значно більша, ніж в її об'ємі, це призведе до зміни час життя інжектіваних носіїв і, відповідно, U_0 . Магнітна чутливість для ОПТ складає величину порядку $\gamma = 2 \cdot 10^3$ В/АТл. Залежність U_0 від індукції магнітного поля B застосовують для створення датчиків магнітного поля, які працюють на постійному струмі, а також для побудови на основі цих датчиків генераторів з частотним виходом, тобто із залежністю частоти генерації від магнітного поля. Такі генератори дозволяють значно спростувати з'єднання датчиків з ЕОМ та мікромініатюризувати вимірювальні пристрої.

2. *Одноколекторні* – вертикальні біполярні транзистори (області емітера, бази та колектора розташовані один за одним в напрямку від поверхні в глибину напівпровідника), в яких під дією магнітного поля відбувається викривлення траєкторії носіїв заряду емітера, що приводить до збільшення ефективної довжини бази та відхиленню частини носіїв від колектора (рис.1.42). Збільшення γ таких транзисторів відбувається за рахунок зменшення ширини колектора. Реальні розміри колектора та емітера однакові (0,6x0,6) мм², відстань між ними $l = 0,8$ мм. Найбільша магніточутливість досягається при включенні ОКТ як двохполюсника (ланцюг емітер - колектор) при вимкнутій базі. В такому випадку при струмі $I_{e-k} = 0,6$ мА магніточутливість $\gamma = 2 \cdot 10^4$ В/АТл.

3. *Двохколекторні магнітотранзистори* – біполярні транзистори, в яких колектори K_1 і K_2 розміщуються симетрично відносно емітера. За відсутності магнітного поля струм емітера поділяють на дві рівні частини, які потрапляють на колектори (рис.1.43). Траєкторії електронів для цього випадку зображені суцільними лініями. Оскільки потенціали колекторів однакові, то падіння напруги між колекторами $\Delta U=0$ і, відповідно, виїждна напруга $U=0$.

4. *Польові магнітотранзистори* – польові транзистори, в яких опір каналу (вбудованого або індукваного) змінюється під дією магнітного поля (рис.1.44). Широке застосування вони знайшли як такі, що виконують функції датчика Холла.

Ефект Холла – це гальвано-магнітний ефект, який полягає у тому, що при протіканні струму в напівпровіднику виникає поперечна різниця потенціалів, якщо на цей напівпровідник діє магнітне поле, вектор якого перпендикулярний до напрямку струму. При ефекті Холла залежність між напругою та магнітною індукцією, яку ця напруга викликає, є лінійною.

Польові магнітотранзистори застосовуються для різномагнітних вимірювальних приладів: безконтактних вимірювачів сили струму, що особливо важливо для вимірювання сильних постійних струмів, які проходять по проводах великого діаметра і практично неможливо їх розривати для включення амперметра; вимірювання електричної потужності; вимірювання неелектричних величин (тиск, переміщення, кут) та рухливості і концентрації носіїв заряду в напівпровідниках.

9.6 Магнітотиристри

Магнітотиристри – це напівпроїдникові тристри типу р-п-р-п, в яких, в яких напругу ввімкнення можна змінювати, впливаючи зовнішнім магнітним полем.

За відсутності магнітного поля магнітотиристри мають деяку середню напругу ввімкнення. Збільшуючи напруженість магнітного поля в одному напрямку, можна підвищити напругу ввімкнення, а в протилежному напрямку – знизити, тобто змінювати ВАХ магнітотиристра.

ЛЕКЦІЯ 10 АКУСТОЕЛЕКТРОНІКА

Акустоелектроніка - галузь електроніки, яка присвячена теорії і практиці створення пристроїв, заснованих на акустоелектронній взаємодії, які служать для пере-творення та обробки сигналів. Це можуть бути перетворення тимчасові (затримка сигналів, вимірювання їх тривалості), частотні та фазові (перетворення частоти і спектра, фазовий зсув), амплітудні (підсилення та модуляція), складні (кодування та інтегрування). Усі ці види перетворень використовуються в радіолокації, далекому зв'язку, автоматичному управлінні, обчислювальній техніці та ряді інших галузей електроніки.

Виникнення в металі чи напівпровіднику струму або електрорухомої сили під дією ультразвукових хвиль називають акустоелектричним ефектом. Акустоелектричний ефект викликається дією або об'ємних ультразвукових хвиль в товщі звукопровода, або поверхневих акустичних хвиль - пружних хвиль, які поширюються по вільній поверхні твердого тіла або вздовж границі твердого тіла з другим середовищем та згасають при віддаленні від межі. Останнім часом широко застосовуються акустоелектронні прилади на поверхневих акустичних хвилях: лінії затримки, полосові фільтри, резонатори, датчики. Принцип дії таких приладів показано на рисунку 10.1. Як звукопровід 1 застосовують пластину, стрижень або провід з п'єзоелектричного матеріалу (ніобат літійу LiNbO_3 , п'єзокварц SiO_2 , германат вісмуту $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, п'єзокераміка та ін.) з полірованою поверхнею, на якій розміщені електромеханічні перетворювачі: вхідний 2 і вихідний 3. Такі перетворювачі називають зустрічно-штирьовими (ЗШП) та виконуються у вигляді гребінчастих електродів з тонкої металевої плівки (0,1 - 0,5 мкм).

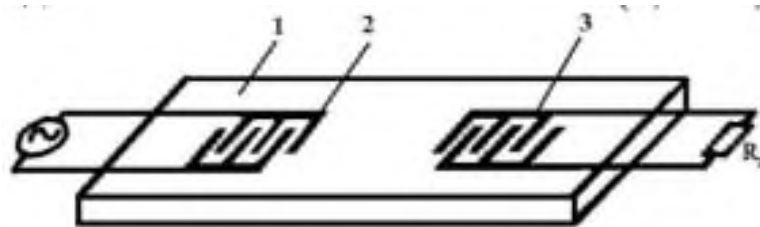


Рисунок 10.1 - Принцип будови акустоелектронного приладу на поверхневих акустичних хвилях

До вхідного ЗШП під'єднане джерело електричного сигналу, і в звукопроводі виникає поверхнева акустична хвиля. А у вихідному перетворювачі, до якого під'єднане навантаження, виникає електричний сигнал. Основними параметрами перетворювачів на поверхневих акустичних хвилях є: внесене загасання, вхідний та вихідний опір, частотна вибірковість, смуга частот, що пропускаються. Усі ці параметри залежать головним чином від пристрою ЗШП. Звичайний ЗШП не є односпрямованим. У приладі, зображеному на рисунку 6.13, тільки 50% енергії, випромінюваної вхідним ЗШП, йде до вихідного ЗШП. Інша енергія, що йде в інших напрямках, губиться. Інакше кажучи, розглянутий найпростіший акустоелектронний прилад вносить велике загасання. Тому важливою проблемою при створенні високоефективних акустоелектронних компонентів є зменшення внесеного загасання шляхом раціонального конструювання ЗШП. Необхідно також, щоб

перетворення електричних сигналів в акустичні і навпаки відбувалося в даній смузі частот. Це особливо важливо для смугових фільтрів і широкосмугових ліній затримки.

Геометричні розміри і форма вхідного ЗШП визначають ефективність перетворення електричного сигналу в акустичну хвилю. Для кожної частоти найбільш ефективно перетворення отримується при визначених розмірах ЗШП. Число штирів ЗШП визначає відносну смугу частот, що пропускаються. Найширша смуга буде при ЗШП, що складається з двох штирів. Чим більше штирів, тим менша ширина смуги пропускання.

Робота перетворювачів на поверхневих акустичних хвилях погіршується через вторинні явища, до яких належить, наприклад, відображення хвиль від границь звукопроводу і від границь електродів. Це відображення є основною причиною перекручувань вихідного сигналу і погіршення параметрів приладу. Шкідливим варто також вважати пряме проходження електричного сигналу з входу на вихід і передачу сигналу об'ємною акустичною хвилею. При зниженні загасання і зменшенні відображення за рахунок особливих конструкцій ЗШП досягається односпрямована передача.

Лінії затримки на поверхневих акустичних хвилях звичайно вносять загасання 0,5 - 1,5 дБ. Верхня частота, на якій працюють такі лінії, досягає 2 ГГц. Відносна смуга пропускання може бути дуже різної: від часток відсотка до 100%. Тривалість затримки в залежності від відстані між ЗШП і від конструкції складає одиниці - сотні мікросекунд. Затримка може бути фіксованою чи регульованою. На торці звукопроводу звичайно наносять звуковбирні покриття, щоб зменшити відображення хвиль.

Динамічний діапазон ліній затримки 80 - 120 дБ. Для гарної роботи ліній затримки важлива температурна стабільність її параметрів. Температурний коефіцієнт затримки (ТКЗ) близький до нуля, одержують або застосовуючи спеціальний матеріал для звукопроводу (наприклад, кремній з домішкою фосфору), або роблячи звукопровод із двох частин, що мають ТКЗ різного знака, що створює взаємну компенсацію. Діапазон робочих температур ліній затримки складає десятки градусів. Для збільшення часу затримки шлях хвилі роблять у вигляді спіралі чи ламаної лінії або з'єднують послідовно кілька ліній затримки. Лінії затримки, які регулюються мають декілька ЗШП, розміщених на різних відстанях. Вмикаючи той чи інший ЗШП, можна змінювати час затримки.

ЛЕКЦІЯ 11 ОПТОЕЛЕКТРОНІКА

Оптоелектроніка - це галузь електроніки, яка присвячена теорії і практиці створення приладів та пристроїв, заснованих на перетворенні електричних сигналів в оптичні та навпаки.

В оптоелектроніці використовується діапазон довжин хвиль 0,2 мкм - 0,2 мм. Оптоелектронний прилад – це сукупність джерела і приймача випромінювання. Як джерело випромінювання застосовують світлодіоди на основі GaAs, як фотоприймачі - фотодіоди та фототранзистори на основі Si.

Відміною та особливістю оптоелектронних приладів (ОЕП) від інших є те, що елементи в них оптично пов'язані, але електрично ізольовані один від одного. Завдяки цьому легко забезпечується узгодженість високо- та низьковольтних і високочастотних ланцюгів.

Оптоелектроніка розвивається за двома незалежними напрямками: оптичним та електронно-оптичним. Оптичний напрям базується на ефектах взаємодії твердого тіла з електромагнітним випромінюванням (голографія, фотохімія, електрооптика). Електронно-оптичний використовує принцип фотоелектричного перетворення при внутрішньому фотоефекті з одного боку, та фотолюмінесценції - з іншого (заміна гальванічного та магнітного зв'язку на оптичний, волоконні лінії зв'язку).

Головна проблема оптоелектроніки - суттєве зменшення паразитних зв'язків між елементами однієї мікросхеми та між мікросхемами.

На оптоелектронному принципі можуть бути створені безвакуумні аналогі електронних пристроїв і систем:

- дискретні та аналогові перетворювачі електричних сигналів (підсилювачі, генератори, ключові елементи, елементи пам'яті, логічні схеми, лінії затримки та ін.);

- перетворювачі оптичних сигналів (підсилювачі світла та зображення, плоскі екрани, які передають та відтворюють зображення);

- пристрої відтворення інформації (індикаторні екрани, цифрові табло, картинна логіка та ін.).

Основними факторами, що обумовлюють розвиток оптоелектроніки, є розроблення надчистих матеріалів, досконалої технології нових сучасних приладів та пристроїв, підготовка висококваліфікованих кадрів.

Для виготовлення активних та пасивних елементів оптичних мікросхем широко застосовуються напівпровідникові матеріали, резистивні та провідні метали і сплави, діелектричні з'єднання, плівкові матеріали, фоторезисти, дифузанти. На даний час номенклатура матеріалів, які використовуються в оптоелектроніці досить широка. До них належать речовини високої чистоти, чисті метали та сплави із спеціальними електрофізичними властивостями, дифузанти, різноманітні напівпровідникові з'єднання у вигляді порошків і монокристалів, монокристалічні пластини з кремнію, арсеніду і фосфіду галію, фосфіду індію, сапфір, гранат, різні допоміжні матеріали - технологічні гази, фоторезисти, абразивні порошки та ін.

Найважливішими матеріалами оптоелектроніки є такі речовини, як: GaAs, BaF₂, CdTe (для виготовлення підкладок); структури GaAlAs/GaAs/GaAlAs (електрооптичні модулятори); SiO₂ (матеріал для ізоляції), Si, CdHgTe,

PbSnSe(фотодіоди, фототранзистори). У деяких ІМС використовуються Ni, Cr, та Ag. Технологія виробництва оптоелектронних інтегральних мікросхем (ОЕІМС) постійно удосконалюється на основі розроблення нових фізико-технологічних процесів.

ОЕП мають наступні переваги: можливість просторової модуляції світлових пучків та їх значного перетинання при відсутності гальванічних зв'язків між каналами; велике функціональне навантаження світлових пучків завдяки можливості зміни багатьох їх параметрів (амплітуди, напрямку, частоти, фази, поляризації).

Оптоелектронні прилади - це прилади, принцип дії яких побудований на використанні електромагнітного випромінювання оптичного діапазону. До основних груп оптоелектронних приладів відносять наступні:

- оптовипромінювачі - світловипромінюючі діоди і лазери;
 - фотоелектричні приймачі випромінювання
 - фоторезистори і фотоприймачі з р-п-переходом;
 - прилади, що керують випромінюванням - модулятори, дефлектори і ін.;
- прилади для відображення інформації - індикатори;
- прилади для електричної ізоляції - оптрони;
 - оптичні канали зв'язку та оптичні запам'ятовуючі пристрої.

Перераховані вище групи приладів здійснюють генерацію, перетворення, передачу і збереження інформації. Носіями інформації в оптоелектроніці є нейтральні в електричному розумінні частинки - фотони, які нечуттєві до впливу електричних і електромагнітних полів, не взаємодіють між собою і створюють односпрямовану передачу сигналу, що забезпечує високу перешкодозахищеність і гальванічну розв'язку вхідних і вихідних ланцюгів. Оптоелектронні прилади приймають, перетворюють і генерують випромінювання у видимій, інфрачервоній і ультрафіолетовій областях спектру.

Принцип дії оптоелектронних приладів заснований на використанні зовнішнього або внутрішнього фотоефекта. **Зовнішнім фотоефектом** називається вихід вільних електронів з поверхневого шару фотокатода в зовнішнє середовище під дією світла. **Внутрішнім фотоефектом** називається вільне переміщення всередині речовини електронів, звільнених від зв'язків в атомах під дією світла, і змінюючих його електропровідність або визиваючих появу ЕДС на границі двох речовин (р-п-переході). ОЕП знайшли широке застосування в автоматичних контрольних і вимірвальних системах, обчислювальній техніці, фототелеграфії, звуковідтворюючій апаратурі, кінематографії, спектрофотометрії, для перетворення світлової енергії в електричну, в автоматичні для розв'язки електричних ланцюгів.

Оптрон - напівпровідниковий прилад, в якому конструктивно об'єднані джерело та приймач випромінювання, пов'язані між собою оптичним зв'язком. У джерелі випромінювання електричні сигнали перестворюються в світлові, які діють на фотоприймач та створюють у ньому знову ж електричні сигнали. Якщо оптрон має тільки один випромінювач та один приймач випромінювання, то його називають оптопарою або елементарним оптроном. Мікросхема, яка складається із однієї або декількох оптопар з додатковими пристроями для узгодження та підсилення сигналу, називається оптоелектронною інтегральною мікросхемою. На вході та

виході оптрону завжди є електричні сигнали, а зв'язок входу і виходу відбувається завдяки світловому сигналу.

Фоторезистори - це напівпровідникові резистори, які змінюють свій опір під впливом світлового потоку. В залежності від спектральної чутливості фоторезистори поділяють на дві групи: для видимої частини спектру та для інфрачервоної частини спектру. Для виготовлення фоторезисторів використовують з'єднання Cd та Pb. Чутливі елементи виготовляють із монокристалів або полікристалів цих з'єднань. Позначення фоторезисторів ранніх випусків: 1 елемент - літери, які означають тип приладу (ФС - фотоопір), 2 елемент - літера, яка означає матеріал світлочутливого елемента (А - сернистий свінець, К - сернистий кадмій, Д - селеністий кадмій), 3 елемент - цифра, яка означає тип конструктивного виконання. Літера Б перед цифрою - герметичний варіант виконання, П - плівковий матеріал фоточутливого елемента, М - монокристалічний матеріал фоточутливого елемента. Літера Т - тропічний варіант, призначений для експлуатації в умовах підвищених температур та вологості.

Фотодіоди - це напівпровідникові діоди, в яких використовується внутрішній фотоелектричний ефект. Світловий потік керує зворотним струмом фотодіодів. Під дією світла на електронно-дірковий перехід відбувається генерація пар носіїв заряду, провідність діода зростає та збільшується зворотний струм. Такий режим роботи називається фотодіодним режимом (фотоперетворювальний).

У лавинних фотодіодах відбувається лавинне розмноження носіїв в n-p-переході і за рахунок цього в десятки разів зростає чутливість. Фотодіоди з бар'єром Шоттки мають високу швидкодію. Фотодіоди з гетеропереходами працюють як генератори ЕРС. Германієві фотодіоди використовують як індикатори інфрачервоного випромінювання; кремнієві – для перетворення світлової енергії у електричну (сонячні батареї для автономного живлення різноманітної апаратури у космосі); селенові - для виготовлення фотоекспонетрів та світло-технічних вимірювань, оскільки їх спектральна характеристика є близькою до спектральної характеристики ока людини.

Фототранзистори - це напівпровідникові прилади з двома p-n-переходами, призначеними для перетворення світлового потоку в електричний струм. Від звичайного біполярного транзистора фототранзистор конструктивно відрізняється тим, що в його корпусі передбачене прозоре вікно, через яке світло може попадати на область бази.

Напруга живлення подається на емітер і колектор, його колекторний перехід виявляється закритим, а емітерний - відкритим. База залишається вільною. При освітленні фототранзистора в його базі генеруються електрони і дірки. У колекторному переході відбувається розподіл електронно-діркових переходів, що досягли, внаслідок дифузії, межі переходу. Дірки (неосновні носії зарядів у напівпровіднику), перекидаються полем переходу в колектор, збільшуючи його власний струм, а електрони (основні носії зарядів) залишаються в базі, знижуючи її потенціал. Зниження потенціалу бази приводить до утворення додаткової прямої напруги на емітерному переході і підсилення інжекції дірок із емітера в базу. Інжектвані в базу дірки, досягаючи колекторного переходу, викликають додаткове

збільшення струму колектора. Навіть невелика зміна прямої напруги емітера викликає велику зміну струму колектора, тобто фототранзистор є підсилювачем.

Струм колектора освітленого фототранзистора виявляється досить великим; відношення світлового струму до темного сягає декількох сотень. Застосовують два варіанти ввімкнення фототранзисторів: діодне - з використанням тільки двох виводів (емітера і колектора) і транзисторне - з використанням трьох виводів, коли на вхід подають не тільки світловий, а й електричний сигнал. В оптоелектроніці, автоматичі та телемеханіці фототранзистори використовують для тих же цілей, що і фотодіоди, але вони уступають їм за порогом чутливості і температурним діапазоном. Чутливість фототранзисторів зростає з інтенсивністю їх освітлення.

Фототиристор - це напівпровідниковий прилад з чотиришаровою p-n-p-n-структурою, який сполучає у собі властивості тиристора та фотоприймача і перетворює світлову енергію в електричну. При відсутності світлового сигналу і керуючого струму фототиристор закритий і через нього проходить тільки темновий струм.

Перевагами фототиристорів є: висока навантажувальна здатність при малій потужності керуючого сигналу; можливість одержувати необхідний вихідний сигнал без додаткових каскадів підсилення; наявність пам'яті, тобто підтримка відкритого стану після зняття керуючого сигналу; велика чутливість; висока швидкодія. Вищевказані властивості фототиристорів дозволяють спростити схеми, вимкнувши з них підсилювачі і релейні елементи, що є дуже важливим у промисловій електроніці, наприклад у високовольтних перетворювачах. Найчастіше фототиристори використовують для комутації світловим сигналом потужних електричних сигналів.

ЛЕКЦІЯ 11 КРІОГЕННА ЕЛЕКТРОНІКА

Кріогенна електроніка (кріотроніка) - галузь електроніки, що займається питаннями застосування електронних явищ, що відбуваються в різних речовинах при низьких температурах. Розвиток кріоелектроніки пов'язаний головним чином з тим, що при температурах, нижчих за визначену (критичну), у деяких речовинах спостерігається явище надпровідності, тобто їхній електричний опір практично стає таким, що дорівнює нулю. Явище надпровідності було відкрито у 1911 р. голландським фізиком Х. Камерлінг-Оннесом. Теоретичне пояснення цього явища на основі квантової фізики дали вперше в 1957 р. американські вчені Д. Бардін, Л. Купер, Д. Шриффер та радянський академік Н. Н. Боголюбов. Перехід від кінцевого значення опору до надпровідності відбувається стрибком при критичній температурі. Але стан надпровідності зникає при дії на надпровідник магнітного поля визначеної напруженості або коли сила струму в надпровіднику перевищує деяке максимальне значення.

Найпростіший, історично перший кріогенний перемикальний прилад - кріотрон, являє собою надпровідник 1 (рис. 11.1), який можна переводити зі стану з нульовим опором у стан з кінцевим опором, впливаючи магнітним полем.

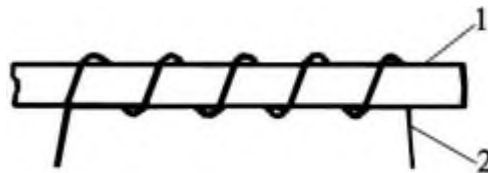


Рисунок 11.1 - Дротовий кріотрон

Поле створюється струмом, що протікає в іншому, керуючому, надпровіднику 2, що виготовляють з металу з більш високою критичною температурою, ніж у керованого провідника 1. Більш досконалим є плівковий кріотрон (рис. 11.2), в якому перпендикулярно один до одного розташовані керована 1 і керуюча 2 плівки, розділені шаром діелектрика 3. Товщина плівок близько 1 мкм, ширина - 1 - 10 мм. Керуюча плівка робиться більш вузькою. Обидві плівки перебувають у надпровідному стані, але якщо пропустити через керуючу плівку струм, не менший від деякого критичного значення, то магнітне поле цього струму порушить надпровідність керованої плівки на ділянці перетинання плівок, і тоді опір керованої плівки стане більше нуля. Можливі й інші конфігурації кріотронів.

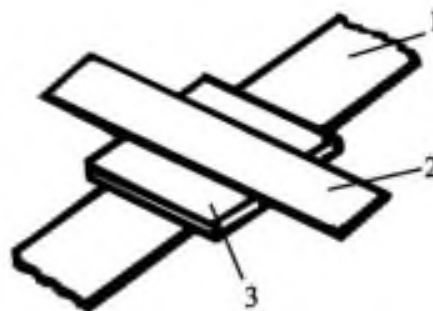


Рисунок 11.2 - Плівковий кріотрон

Основне застосування кріотронів - це перемикальні елементи швидкодіючі ЕОМ. Два різко різних стани керованого провідника відповідають знакам 0 і 1. Час перемикання (переходу кріотрона з одного стану в інший) складає малі частки мікросекунди. Тому швидкодія ЕОМ на кріотронах дуже висока. Важливо також, що на керування кріотроном витрачається дуже мала потужність. Плівкові кріотрони можуть бути зроблені дуже малого розміру, і тоді на площі в 2 см² розміщаються тисячі кріотронів. Саме плівкові кріотрони можливо застосовувати в мікроелектронних пристроях.

На велику увагу заслуговує отримання в замкнутому надпровідному контурі постійного струму, що може тривалий час протікати за відсутності джерела ЕРС. Такий струм можна, наприклад, збудити методом електромагнітної індукції в металевому кільці, що перебуває у надпровідному стані. Унаслідок того, що опір надпровідного кільця та втрати на нагрівання дорівнюють нулю, струм у кільці існує десятки днів практично без послаблення. На використанні цього явища ґрунтується робота запам'ятовувальних пристроїв, у яких відсутність струму відповідає нулю, а наявність струму - одиниці. Можна також для запам'ятовування знаків 0 і 1 використовувати у надпровідному замкнутому контурі струми різних напрямків.

Особливий інтерес викликають кріогенні прилади, дія яких ґрунтується на ефекті, відкритому в 1962 році англійським ученим Б. Джозефсоном. Суть ефекту Джозефсона полягає в наступному. Якщо два надпровідники розділені дуже тонким (менше 1 нм) шаром діелектрика, то через цей шар може протікати постійний струм, хоча спадання напруги на цій ділянці буде дорівнює нулю. У цьому випадку через тонкий шар діелектрика протікає своєрідний тунельний струм. Під дією магнітного поля з визначеною напруженістю, якщо струм перевищить деяке граничне значення, ефект Джозефсона зникне, тобто струм узагалі припиниться. Таким чином, на ефекті Джозефсона можуть працювати кріогенні перемикальні елементи. Час перемикання джозефсоновських елементів дуже малий (до 10-11 с). На таких елементах можуть бути побудовані надшвидкодіючі ЕОМ з малим споживанням потужності і великим числом арифметичних операцій (декілька мільярдів за секунду).

Слід відзначити, що наднизькі температури використовуються також у різних радіоелектронних пристроях для зниження втрат у них. Створено, наприклад, коливальні системи (резонатори) з надвисокою добротністю, що сягає до сотень тисяч і навіть мільйонів, коаксіальні кабелі з мізерно малим загасанням, резонансні фільтри з надвисокою вибірковістю. Дуже важливо і те, що при низьких температурах знижується рівень власних шумів. Це сприяє підвищенню чутливості радіоприймальних пристроїв і дозволяє приймати дуже слабкі сигнали, напри- 120 клад від космічних об'єктів. При звичайних температурах приймання таких сигналів вкрай утруднене, тому що вони значно слабкіше власних шумів вхідної частини радіоприймального пристрою. Основним недоліком усіх кріогенних пристроїв є необхідність створення для їх роботи наднизьких температур. До останнього часу для цієї мети використовувався рідкий гелій, у якого температура переходу з газоподібного стану в рідкий складає 4 К. Холодильні установки для підтримки такої низької температури складні та громіздкі. Це обмежує практичне застосування кріогенної апаратури. Нові перспективи з'явилися перед кріоелектронікою у зв'язку з відкриттям високотемпературної надпровідності. У 1987 році було встановлено,

що деякі речовини, зокрема металооксидні з'єднання типу кераміки, можуть ставати надпровідниками при значно більш високих температурах. Це означає, що для таких надпровідників замість дорогого рідкого гелію можна використовувати рідкий азот, у якого критична температура складає 77 К. Рідкий азот виробляється у великих кількостях і відносно дешевий. Тому в електроніці більш ефективним є використання високотемпературних надпровідників.

ЛЕКЦІЯ 12 ДІЕЛЕКТРИЧНА ЕЛЕКТРОНІКА, БІОЕЛЕКТРОНІКА

12.1 Діелектрична електроніка

З точки зору теорії розсіювання носіїв заряду будь-яке неметалеве тверде тіло в товстому шарі має властивості напівпровідника, в тонкому - діелектрика. Ефекти, які пов'язані з протіканням емісійних струмів у неметалевих твердих тілах, не вивчаються ні фізикою напівпровідників, ні фізикою діелектриків. Закономірності фізичних явищ, приладові та схемні розробки на основі вищезазначених ефектів, складають зміст нового розділу фізики твердого тіла і електроніки - діелектричної електроніки.

Якщо між двома металевими електродами помістити діелектричну плівку товщиною 1 - 10 мкм, то електрони, які емігрують з металу, заповнять всю товщину плівки та напруга, яка прикладається до такої системи, викличе струм у діелектрику.

До приладів діелектричної електроніки належать діоди та транзистори, які мають характеристики, аналогічні електровакуумним приладам. Їх перевагами є мікромініатюрність, мала інерційність, низький рівень шумів, мала чутливість до зміни температури і радіації.

12.2 Біоелектроніка

Біоелектроніка (біоніка) - це один з напрямів біоніки, який вирішує задачі електроніки на основі аналізу структури та життєдіяльності живих організмів. Біоелектроніка вивчає нервову систему людини та займається моделюванням нервових клітин (нейронів та нейронних сіток) для подальшого формування нових елементів та пристроїв обчислювальної техніки, автоматики і телемеханіки. Дослідження нервової системи показали, що вона має ряд властивостей та переваг перед найсучаснішими обчислювальними пристроями. Основні з них: удосконалене сприймання зовнішньої інформації незалежно від форми, в якій вона надходить; висока надійність, значно вища, ніж у технічних систем; мікромініатюрність елементів (при кількості елементів 10^{10} - 10^{11} об'єм мозгу людини складає $1,5 \text{ дм}^3$); економічність роботи (споживання енергії мозгом людини не перевищує декількох десятків ват); високий ступінь самоорганізації, швидке пристосування до нових ситуацій, до зміни програм діяльності. Нервова система складається з клітин - нейронів. Нейрони (рис. 12.1), де б вони не знаходились, мають однакову структуру і приблизно однакові логічні характеристики.

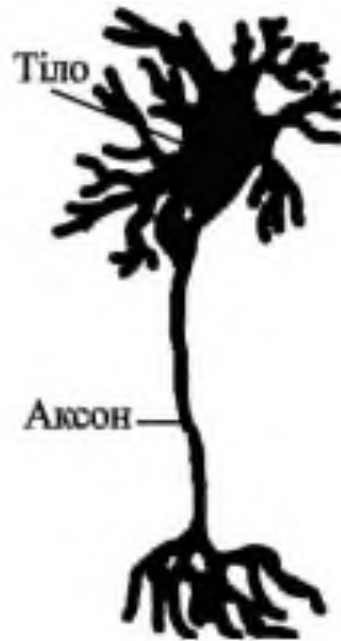


Рисунок 12.1 – Схема нейрона

Вони є універсальними логічними елементами. На основі нейронів будуються нейронні мережі, які свідчать про той неймовірний факт, що з допомогою одного елемента можна побудувати систему, яка може виконувати найскладніші задачі. Для реалізації складних нейронних мереж достатньо мати нейроподібний елемент, який має аналогово-логічні властивості і за своїми функціональними можливостями наближається до біологічних рецепторних і центральних нейронів. Дослідження показали, що модель нейрона може бути виконана у вигляді двох інтегральних мікросхем на МДН-транзисторах. На сучасному етапі проводяться інтенсивні наукові дослідження в різних напрямках біоелектроніки.

ЛЕКЦІЯ 13 НАПІВРОВІДНИКОВІ ПРИЛАДИ СПЕЦІАЛЬНОГО ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

13.1 Стабілітрон

Стабілітроном називається напівпровідниковий діод, напруга на якому в області електричного пробою при зворотному включенні слабо залежить від струму в заданому діапазоні і який призначений для стабілізації напруги. Стабілітрони працюють у режимі електричного пробою. Під дією сильного поля в області р-п-переходу зворотний струм різко зростає при малих змінах прикладеної напруги. Цю особливість ВАХ кремнієвого діода в області пробою використовують для стабілізації напруги, а також фіксації напруг і струмів в схемах, звідси інша назва кремнієвих стабілітронів - опорні діоди.

Пробосм р-п переходу називається явище різкого збільшення зворотного струму діода при досягненні зворотною напругою деякого критичного значення.

Розрізняють наступні види пробою: електричний (тунельний і лавинний) та тепловий.

Тунельний і лавинний пробої обумовлені фізичними процесами, що відбуваються в р-п-переході в сильних електричних полях, а тепловий – процесами, обумовленими нагріванням р-п-переходу при протіканні через нього зворотного струму.

Електричний пробій є оборотним і робота напівпровідникових, приладів у режимі електричного пробою допускається. Тепловий пробій є необоротним, тобто напівпровідниковий прилад після теплового пробою виходить з ладу.

Як матеріал для напівпровідникових стабілітронів використовується кремній, тому що він має більш високу температурну стабільність порівняно з германієм. На рис. 13.1 наведена ВАХ стабілітрона.

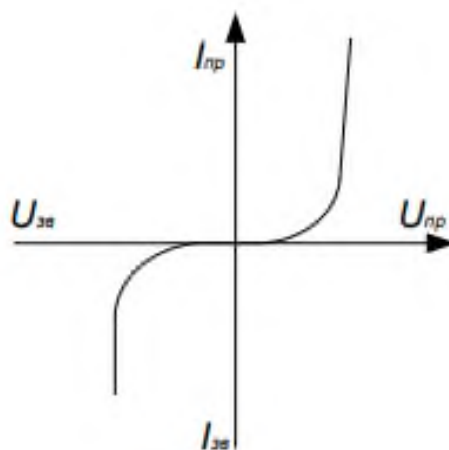


Рисунок 13.1 - ВАХ кремнієвого стабілітрона

Оскільки реальна ВАХ в області пробою має деякий нахил, то напруга стабілізації залежить від струму стабілізації $I_{ст}$. Максимальний струм стабілізації $I_{ст.мах}$ обмежений допустимою потужністю розсіяння $P_{мах}$ і можливістю переходу електричного пробою в тепловий, який є незворотнім. Мінімальний струм стабілізації $I_{ст.мін}$ відповідає початку стійкого електричного пробою. При менших

струмах в діоді виникають значні шуми, походження яких пов'язане з механізмом лавинного пробую (шуми в передпробійній області використовуються в спеціальних приладах - напівпровідникових генераторах шуму). Диференціальне опір гдиф характеризує якість стабілізації і визначається кутом нахилу ВАХ в області пробую (воно зростає із зростанням напруги стабілізації). В основному стабілітрони застосовуються для стабілізації напруги.

Параметри стабілітронів

1. Напруга стабілізації – номінальне значення напруги на стабілітроні при заданому зворотному струмі стабілітрона в області пробую. Напруга стабілізації, приблизно, дорівнює напрузі пробую. У стабілітронах напругою стабілізації до 7 В використовується тунельний пробій, а з напругою стабілізації більше 15 В - лавинний пробій. В даний час розроблені стабілітрони на стабілізування напруги від одиниць вольт до сотень вольт.

2. Диференціальне динамічний опір стабілітрон. Величина диференційного опору залежить від напруги стабілізації. Мінімальне значення спостерігається у діодів з напругою стабілізації 7 .. 10 В. Це пояснюється тим, що в цій області діють обидва механізми пробую. При переході в область лавинного пробую, тобто при збільшенні, і в область тунельного пробую, тобто при зменшенні, диференційна провідність різко зростає). ст r зменшується з ростом струму стабілітрона. Чим менше ст r , тим вище ступінь стабілізації напруги.

3. Опір постійному струму - характеризує втрати в діоді у даній робочій точці.

4. Критерій (коефіцієнт) якості стабілітрона Q – відношення статичного опору до диференційного при даному струмі стабілізації. Критерій якості на відміну від диференціального опору характеризує не просто нахил ВАХ, а і його відношення до величини напруги стабілізації. Так як максимальним змінам струму повинні відповідати мінімальні зміни напруги, то величина Q для хороших стабілітронів повинна бути як можна більше. Для сучасних стабілітронів Q лежать у межах 20.. 100.

5. Температурний коефіцієнт напруги стабілізації - ТКН – показує зміну напруги стабілізації від температури. Залежно від виду пробую стабілітрона ТКН може бути позитивним або негативним. Якщо пробій тунельний, то ТКН негативний, а якщо пробій лавинний, то ТКН позитивний. Для зменшення ТКН використовується послідовне включення двох або декількох стабілітронів з ТКН з різним знаком. При позитивному ТКН послідовно зі стабілітронів можна включати р-п перехід в прямому напрямку. Такий спосіб компенсації використовується в прецизійних стабілітронах. У цих стабілітронах послідовно з основним р-п переходом у прямому напрямку включено два компенсуючих переходи. Прецизійні стабілітрони використовуються як еталонні джерела напруги (нормальних елементів) II класу. Такі стабілітрони мають ТКН 0,01% / град, у той час як у звичайних він становить 0,05 - 0,09% / град..

6. Мінімальний (сттін I) і максимальний (сттах I) струми стабілізації. Струм стабілізації обмежується шумами стабілітрону. При малих струмах пробій носить нестійкий характер, і ефективна напруга шумів на стабілітроні досягає декількох сотень мікрвольт. З ростом струму пробій

переходить у стійкий стан і шуми зменшуються. Максимальний струм стабілізації обмежується допустимою потужністю розсіювання стабілітрона. У сучасних стабілітронів він становить від десятків міліампер до десятків ампер. Напівпровідникові стабілітрони крім основного призначення в даний час знаходять широке застосування для обмеження постійної та імпульсної напруги, в якості елементів міжкаскадного зв'язку в електронних схемах, як керовані ємності, шумові генератори і т.д

13.2 Тиристор

Тиристор - це напівпровідниковий прилад, що має чотириохарову р-п-р-п структуру з трьома послідовними р-п переходами, що характеризується двома стійкими станами в прямому напрямі і замикаючими властивостями в протилежному напрямі.

Переваги: малі габарити та маса, висока експлуатаційна надійність, великий терміном служби, широкий діапазоном температур, можливість імпульсного керування.

Тиристори дозволяють одержати високий коефіцієнт корисної дії перетворення енергії, мають високу надійність та довговічність, малі габарити, прості в експлуатації.

Тиристор має два статичні стани: закритий або стан низької провідності (проходить малий струм) і відкритий або стан високої провідності (проходить великий струм). У будь-якому з двох статичних станів тиристор може перебувати скільки завгодно довго. Перехід з одного стану в інший здійснюється відносно швидко під дією короткочасного зовнішнього сигналу.

Тиристори застосовуються в радіолокації, обладнаннях радіозв'язку, автоматиці, як керовані ключі, порогові елементи, перетворювачі енергії, тригери, що не споживають струм у початковому стані. Порівняно з біполярними транзисторами тиристори можуть забезпечувати значно більший коефіцієнт підсилення за струмом вмикання, мати великий струм у відкритому стані і витримувати велику напругу у закритому стані, що важливо для досягнення високих параметрів потужних пристроїв. Тиристори класифікують за кількістю виводів, видом вихідної вольт-амперної характеристики (ВАХ) та способами вмикання та керування.

За кількістю виводів тиристори поділяють на типи: діодні тиристори (диністори), що мають тільки два виводи - анод та катод; тріодні тиристори (триністори), що мають три виводи (два основні і один керуючий) - анод, катод і керуючий електрод; чотириелектродні (тетродні) тиристори, що мають чотири виводи (два вхідні і два вихідні).

За видом вихідної ВАХ тиристори поділяють на типи:

- тиристори, що не проводять струм у зворотному напрямі;
- тиристори, що проводять струм у зворотному напрямі (тиристори із зворотною провідністю або тиристори-діоди) - симетричні (двопровідні тиристори, симістори або триаки), які можуть перемикаються у відкритий стан в обох напрямках.

За способом вимкнення виділяють тиристори, які вимикаються тільки у вихідному анодному колі, і тиристори, які вимикаються за допомогою вхідного керуючого кола (вимикаючи тиристори).

За способом керування тиристри поділяють на тиристри з керуючим електродом, оптотиристри, магнітотиристри та фототиристри). Тиристри з керуючим електродом відкриваються зовнішнім електричним сигналом, оптотиристри - внутрішнім оптичним сигналом (випромінювач та фототиристор складають в оптотиристрі єдину конструкцію), магнітотиристри.

Вищевказані властивості фототиристорів дозволяють спростити схеми, вимкнувши з них підсилювачі і релейні елементи, що є дуже важливим у промисловій електроніці, наприклад у високовольтних перетворювачах. Найчастіше фототиристри використовують для комутації світловим сигналом потужних електричних сигналів. При включенні діністора за схемою, наведеною на рисунку 13.2, колекторний р-п-перехід закритий, емітерні - відкриті. Опори відкритих переходів малі, тому майже вся напруга джерела живлення прикладена до колекторного переходу, що має високий опір.

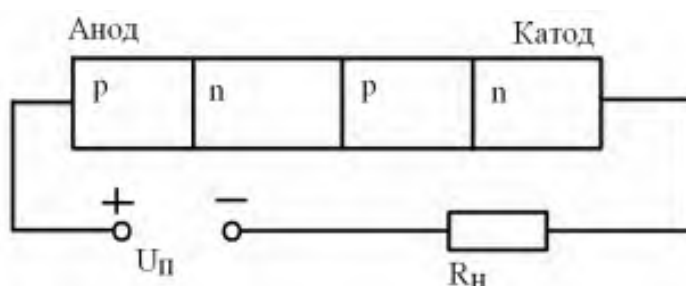


Рисунок 13.2 – Схема включення діністора

Через тиристор протікає малий струм (ділянка 1 на рис. 13.3). При збільшенні напруги джерела живлення, струм тиристора збільшується незначно, поки напруга не наблизиться до деякого критичного значення, рівному напрузі включення $U_{вкл}$. При напрузі $U_{вкл}$ в діністорі створюються умови для лавинного розмноження носіїв заряду в області колекторного переходу. Відбувається зворотній електричний пробій колекторного переходу (ділянка 2 на рис. 13.3).

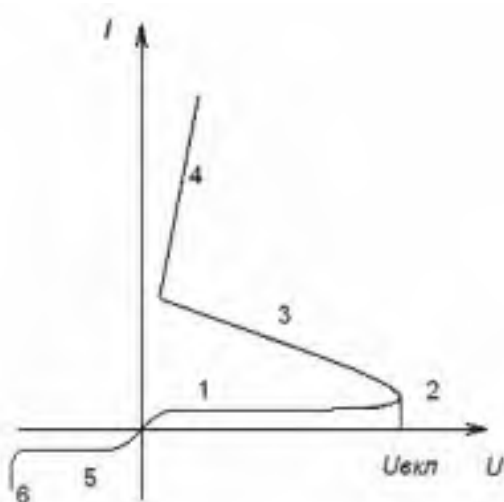


Рисунок 13.3 – Вольт-амперна характеристика діністора: 1 – зростання струму через р-п-переходи тиристора; 2- колекторний пробій; 3 – лавиноподібне збільшення струму; 4 – робочий режим; 5 – зворотне ввімкнення; 6 – електричний пробій.

У n -області колекторного переходу утворюється надмірна концентрація електронів, а в p - області - надмірна концентрація дірок. Зі збільшенням цих концентрацій знижуються потенційні бар'єри всіх переходів діністора. Зростає інжекція носіїв через емітерні переходи. Процес носить лавиноподібний характер і супроводжується перемиканням колекторного переходу у відкритий стан. Зростання струму відбувається одночасно зі зменшенням опорів усіх областей приладу. Тому збільшення струму через прилад супроводжується зменшенням напруги між анодом і катодом.

На ВАХ цю ділянку позначено цифрою 3 (рис.13.3). Тут прилад має негативний диференціальний опір. Напруга на резисторі зростає і відбувається перемикання діністора. Після переходу колекторного переходу у відкритий стан ВАХ має вигляд, відповідної прямої гілки діода (ділянка 4 на рис. 13.3). Після перемикання напруга на діністорі знижується до 1В. Якщо і далі збільшувати напругу джерела живлення або зменшувати опір резистора R , то буде спостерігатися зростання вихідного струму, як у звичайній схемі з діодом при прямому включенні. При зменшенні напруги джерела живлення відновлюється високий опір колекторного переходу. Час відновлення опору цього переходу може становити десятки мікросекунд. Переведення триністора із закритого стану у відкритий в електричному колі здійснюється зовнішньою дією на прилад. В тріодних тиристорах, які є найбільш вживаними, управління станом приладу здійснюється в колі третього - керуючого електроду.

Триністор – це чотирьохшарова структура типу p - n - p - n з трьома переходами, в якому p -шар виконує функцію аноду, а n - шар - катоду, а керуючий електрод зв'язаний із p - шаром структури . Напруга живлення подається на тиристор таким чином, що $p_1 - n_1$ та $p_2 - n_2$ відкриті, а перехід $p_2 - n_1$ – закритий. Опір відкритих переходів малий, тому майже вся напруга живлення $U_{пр}$ прикладена до закритого переходу P_2 , який має великий опір. Звідси струм через тиристор дуже малий. При підвищенні напруги $U_{пр}$ струм тиристора збільшується до деякого критичного значення, яке рівне напрузі переключення $U_{пер}$. Після цього починається лавиноподібне збільшення струму через тиристор. Для зменшення напруги переключення на керуючий електрод подають напругу і струм керування $I_{кр}$ дозволяє тиристорі переключитися при меншій напрузі. Вольт-амперна характеристика для різних струмів керування показана на рисунку 13.4.

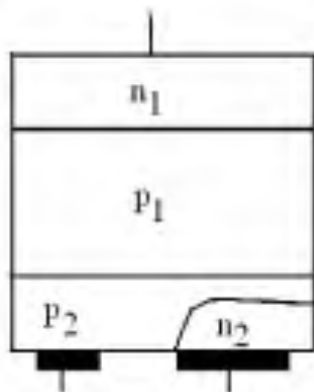


Рисунок 13.4 – Напівпровідникова структура тиристора

Нижче наведені і пояснені основні терміни, які використовуються в довідкових даних на тиристорі:

1. Напруга живлення ($U_{вкл}$) - це така напруга, при якому тиристор переходить у відкритий стан;
2. Імпульсна зворотна напруга ($U_{зв.мах}$) - це напруга, при якому наступає електричний пробій. Для більшості тиристорів $U_{вкл} = U_{зв.мах}$;
3. Максимально допустимий прямий, середній за період струм ($I_{мах}$);
4. Пряме падіння напруги на відкритому тиристорі ($U_{пр} = 0,5 \div 1В$);
5. Зворотний максимальний струм ($I_{зв.мах}$) - це струм, зумовлений рухом неосновних носіїв при прикладенні напруги зворотної полярності;
6. Струм утримання ($I_{утр}$) - це анодний струм, при якому тиристор закривається;
7. Час відключення ($T_{викл}$) - це час, протягом якого закривається тиристор;
8. Гранична швидкість наростання анодного струму ($V_{Iмах}$). Якщо анодний струм буде швидко наростати, то р-п переходи будуть завантажуватися струмом нерівномірно, внаслідок чого буде відбуватися місцевий перегрів і тепловий пробій;
9. Гранична швидкість наростання анодного напруги ($V_{Uмах}$). Якщо гранична швидкість наростання напруги анодного буде більше паспортної, тиристор може мимовільно відкритися від електромагнітної перешкоди;
10. Керуючий струм відмикання ($I_{кр.мін}$) - це струм, який необхідно подати, щоб тиристор відкрився без «коліна»;
11. Керуюча напруга відмикання ($U_{кр.мін}$) - це напруга, яку необхідно подати для відкриття тиристора без «коліна».

ЛЕКЦІЯ 14 СТРУКТУРА І ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТВЕРДИХ ТІЛ

14.1 Кристалізація і склування

При достатньому зближенні частинок між ними виникають *сили взаємодії* (*forces interworking*). Незалежно від природи цих сил, загальний характер їх залишається однаковим (рис. 14.1, а): на відносно великих відстанях виникають *сили тяжіння* (*forces interworking*) F_{np} , що збільшуються із зменшенням відстані між частинками r (крива 1); на невеликих відстанях виникають *сили відштовхування* $F_{від}$, які із зменшенням r збільшуються значно швидше, ніж F_{np} (крива 2). Так, для іонних кристалів $F_{np} \sim 1/r^2$, а $F_{від} \sim 1/r^9$.

На відстані $r=r_0$ сили відштовхування врівноважують сили тяжіння і результуюча сила F звертається в нуль (крива 3). Оскільки $F=U/r$, де U – енергія взаємодії частинок, то при $r=r_0$ величина U досягає мінімального значення, рівного $-U_{св}$ (рис. 14.1, б). Тому стан частинок, що зближують на відстань r_0 , є станом стійкої рівноваги, внаслідок чого під впливом сил взаємодії частинки повинні б розташовуватися в строгому порядку на відстані r_0 один від одного, утворюючи тіло з правильною внутрішньою структурою.

Проте крім *потенційної енергії* (*potential energy*) взаємодії частинки мають *кінетичну енергію* (*kinetic energy*) теплового руху, намагаючись зруйнувати порядок в їх розташуванні. Стан і властивості речовини визначаються відносною роллю цих двох чинників. В газоподібному стані відстані між частинками такі великі, що сили взаємодії між ними практично не виявляються. Тому в проміжках між зіткненнями, що носять випадковий характер, частинки поведуться фактично як вільні, створюючи хаотичний поступальний рух. Фіксованих положень рівноваги вони не мають.

У рідинах, густина яких приблизно на три порядки вища густини їх насиченої пари, відстані між молекулами r зменшуються, а сили взаємодії збільшуються настільки, що молекули не можуть вільно переміщатися в просторі: кожна молекула виявляється мовби укладеною в комірку, створену сусідніми молекулами, в якій вона створює безладні коливання біля тимчасових положень рівноваги (рис. 2.2, а). Позначимо період цих коливань τ_0 , а висоту потенційного бар'єра, який створює для даної молекули її оточення, U . Вірогідність того, що ця молекула набуває енергії теплового руху, достатньої для подолання потенційного бар'єра і переходу в нове положення рівноваги, рівна $\exp(-U/KT)$, де K – постійна Больцмана; T – абсолютна температура. За одиницю часу молекула, що коливається, «підходить» до бар'єра $V_0 = 1/\tau_0$ раз. Помножуючи це число на вірогідність $\exp(-U/KT)$, одержуємо середнє число переходів молекули з одних положень рівноваги за інші за одиницю часу; $\nu = 1/\tau_0 \exp(-U/KT)$. Величина τ , зворотна ν , виражає середній час «осілого життя» молекули, яке вона проводить, коливаючись біля даного положення рівноваги:

$$t = \tau_0 \exp(U/KT). \quad (2.1)$$

Для простих рідин, таких, наприклад, як розплавлені метали, $t \gg 10^{-10}$ с; $t_0 \gg 10^{-10}$ с. Отже, біля кожного положення рівноваги молекула робить приблизно 10^3 коливань потім переходить в нове положення рівноваги і т.д.

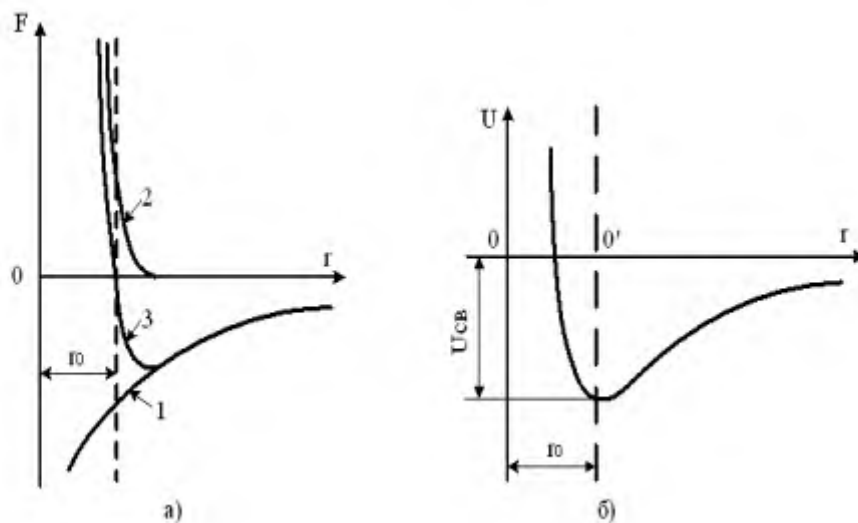


Рисунок 14.1 – Залежність сили взаємодії (а) і потенціальної енергії взаємодії атомів (б) від відстані між ними

Подібних переходів вона робить 10^{10} за секунду, що приводить до інтенсивного руху її по всьому об'єму рідини. Цей рух і обумовлює основну властивість рідини – текучість, за кількісну міру якої приймають в'язкість η . Наведені міркування показують, що в'язке протікання рідин є типовим активаційним процесом, що протікає з енергією активації U . Звичайно цю енергію (*energy*) відносять до моля речовини і вираз (2.1) записують так:

$$t = t_0 \exp(U_a / RT), \quad (2.2)$$

де U_a – енергія активації; R – універсальна газова стала.

При зниженні температури і переході речовини в твердий стан відстані між молекулами ще дещо зменшуються і енергетично вигідною стає перебудова частинок з утворенням правильної структури, в якій кожна з частинок виявляється укладеною в комірку постійних розмірів і постійного розташування (рис. 14.2, б). Оскільки така структура є щільнішою, то потенціальний бар'єр, що оточує частинку, підвищується в порівнянні з рідким станом. Разом зі зниженням температури це призводить до того, що частота переходу частинок з комірки в комірку різко зменшується. Частинки фактично закріплюються в певних положеннях рівноваги, роблячи біля них коливання з частотою $\nu = 10^{18} - 10^{14} \text{ с}^{-1}$, і лише час від часу (приблизно раз протягом декількох діб) можуть переходити з однієї комірки в іншу.

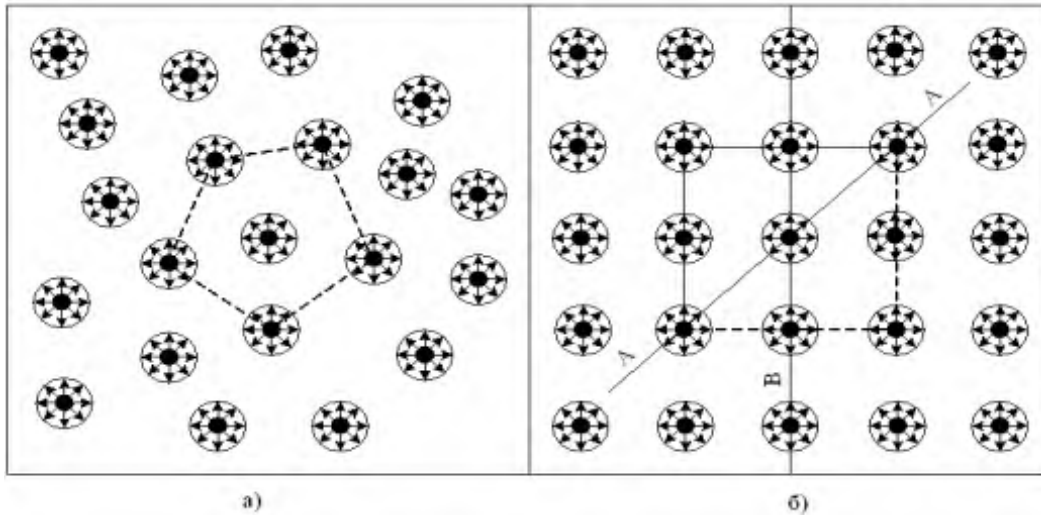


Рисунок 14.2 – Розташування частинок в рідинах (а) і твердих кристалічних тілах (б)

Із структурної точки зору ці три стани речовини розрізняються порядком розташування частинок одна відносно одної – своєю внутрішньою *структурою* (*structure*).

Твердому кристалічному стану властива наявність так званого далекого порядку, тобто строгої повторюваності в будь-яких напрямках, наприклад, АА, ВВ і т. д., одного і того ж елементу структури – атома, групи атомів або молекул (рис. 14.2, б). Геометрично така строга періодичність описується завданням кристалічних ґраток. У фізичних відношеннях тіла з подібною структурою в загальному випадку *анізотропу* (*anisotropy*) – їх властивості залежать від напрямку в ґратках.

Для рідкого стану характерна відсутність далекого порядку, але наявність так званого близького порядку – певної взаємної упорядкованості в розташуванні елементів структури (рис. 14.2, а). Проте ця впорядкованість порівняно швидко втрачається і вже на відстані, порівняній з розмірами структурних елементів, зникає майже повністю.

У газоподібному стані відсутній як далекий, так і близький порядок.

Блиький порядок, властивий рідкому стану, не є стабільним: впорядковані групи молекул безперервно руйнуються тепловим рухом, створюються знову і т. д. Тому для кожної температури можна говорити лише про деякий усереднений близький порядок і деяку усереднену рівноважну структуру рідини з властивою їй енергією активації процесу руху молекул, що обумовлює в'язкість. При зміні температури відбувається перегруповування молекул і встановлення нового рівноважного стану. Подібний процес встановлення в системі рівноваги називається *релаксацією* (*relaxation*), а час, протягом якого рівновага встановлюється, називається *часом релаксації* τ . За порядком величини він дорівнює часу «осілого життя» молекул, визначуваному співвідношенням (2.2); З цього співвідношення видно, що із зменшенням енергії активації U_a і підвищенням температури T час встановлення рівноважної структури рідини різко зменшується. У низькомолекулярних простих рідинах τ настільки мале (10^{-10} с), що встановлення рівноваги в них протікає практично миттєво. Зі зниженням температури час релаксації збільшується, проте, аж до температури кристалізації (плавлення) він

залишається ще настільки малим, що не тормозить процес перегруповування частинок і створення з них енергетично вигідної при цій температурі просторово впорядкованої структури – кристала. Тому процес кристалізації таких рідин протікає практично стрибкоподібно (крива 1 на рис. 14.3) і одержати їх в переохолодженому стані надзвичайно важко.

Інакше кажучи, з розплавами високомолекулярних неорганічних і органічних сполук типу скла і *полімерів (polymer)*, між великими молекулами таких сполук через їх взаємне переплетення вже в рідкому стані встановлюється, як правило, сильна взаємодія. Це обумовлює високу енергію активації U_a і, отже, високу в'язкість η і великий час релаксації τ таких розплавів. Так, поблизу точки плавлення в'язкість заліза приблизно дорівнює 740^{-3} Па·с, а в'язкість кварцу 106 Па·с. Тому при охолодженні розплавів високомолекулярних сполук в'язкість і час релаксації збільшуються настільки, що практично запобігають можливості перебудови елементів структури в упорядкованому стані за певний час. Тому розплав, майже не змінюючи своєї внутрішньої структури, переходить в твердоподібне або, як прийнято говорити, *склоподібний стан (glassy condition)*.

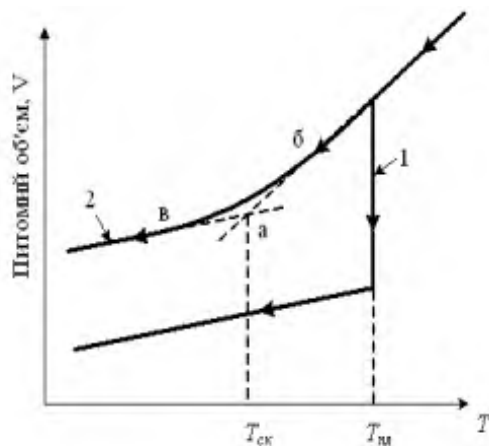


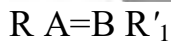
Рисунок 14.3 – Зміна питомого об'єму у процесі кристалізації (1) і склування (2)

Такий процес називають - *склування*. На відміну від кристалізації він відбувається не при строгій певній температурі – температура плавлення $T_{пл}$, а в інтервалі температур (див. рис. 14.3 крива 2). За температуру склування $T_{ск}$ приймають температуру, яка відповідає точці a перетину ділянок рівня кривій 2.

14.2 Рідкі кристали

Деякі речовини при підвищенні температури переходять з твердого стану в рідкий не відразу, а через стан, в якому їх структура є проміжною між структурою рідини і кристала. В такому стані вони називаються *рідкими кристалами (thin crystal)*.

Рідкі кристали можуть утворювати тільки речовини з сильно витягнутими негнучкими молекулами. Прикладом можуть служити невеликі органічні молекули із загальною формулою



де R і R' – короткі, частково гнучкі ланцюги; а зв'язок $A - B$ – подвійний або потрійний. Такі «молекули-стрижні» завжди намагаються розташуватися уздовж одного напрямку, тобто певною мірою впорядковано. У міру зростання температури ступінь впорядкованості зменшується і ґратки-решт зникає повністю. Діапазон температур, в межах якого існує рідкокристалічна фаза, складає звичайно декілька десятків градусів. Відмінність у взаємному розташуванні молекул в кристалічній, рідкокристалічній і рідкій фазах показано на рис. 14.4. Як видно з цього рисунка, далекий порядок розташування, центрів молекул в рідкокристалічному стані відсутній, рідкі кристали текучі і утворюють краплі подібні звичайним рідинам. Є, проте, певний порядок у напрямі молекул, що приводить до анізотропії властивостей таких кристалів (оптичних, електричних, магнітних і ін.). Наприклад, різниця показників заломлення для світла, поляризованого паралельно і перпендикулярно орієнтації молекул, складає звичайно приблизно 0,2. Чудовою властивістю рідких кристалів, що зумовила їх широке застосування в сучасній електроніці для відображення інформації, є те, що завдяки низькій в'язкості рідких кристалічних тіл орієнтацію молекул в них можна змінювати порівняно невеликими електричними полями. Зміна ж орієнтації молекул приводить до зміни оптичних властивостей рідкого кристала. Як видно з рис. 14.4, б, молекули в кристалічній фазі орієнтовані уздовж одного напрямку не строго, мають флуктуації в їх орієнтації. Це приводить до великої оптичної мікронеоднорідності середовища і сильному розсіюванню світла в ній. Достатньо сказати, що розсіювання світла типовими рідкими кристалами приблизно в 10^6 разів більше, ніж звичайними ізотропними рідинами. В зовнішньому електричному полі всі молекули намагаються розташуватися уподовж або упоперек напрямку поля залежно від того, в якому напрямі їх поляризація вища, і пропускання світла різко зростає. Виявляється, проте, що якщо в рідкому кристалі присутні іони-домішки, здатні переміщатися в зовнішньому полі (електропровідність при цьому, як правило, складає всього лише $10^{-9} - 10^{-8} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$), то в сильнішому полі впорядкованість в розташуванні молекул може бути порушена і кристал знову стане мутнішим.

Якщо молекули є не рівні, а злегка закручені стрижні, то вони укладаються один відносно одного в спіральні структури, схематично показані на рис. 14.5, а. Така рідкокристалічна фаза спостерігається в чистому ефірі холестерину і тому називається *холестеричною (holeyer phase)* (на відміну від *нематичної (nematik phase)*, поданої на рис. 14.4, б). Холестерична фаза виникає не тільки в чистих речовинах, але і в розчинах закручених молекул в нематичних рідинах. Холестерики мають ряд специфічних властивостей, зокрема оптичних, що становлять великий інтерес для електроніки. Структура холестерину періодична уздовж осі спіралі, що приводить до брегівського віддзеркалення світла на довжині хвилі, рівна кроку спіралі, поділеного на показник заломлення. При цьому брегівське віддзеркалення може відбуватися у видимому діапазоні довжин хвиль. Холестерик також повертає

площину поляризації світла, розповсюдженого уздовж осі спіралі на кут, залежний від товщини середовища і кроку спіралі. За допомогою зовнішнього електричного поля можна змінювати крок спіралі, повертати її вісь, переводити кристал з холестеричної в нематичну фазу.

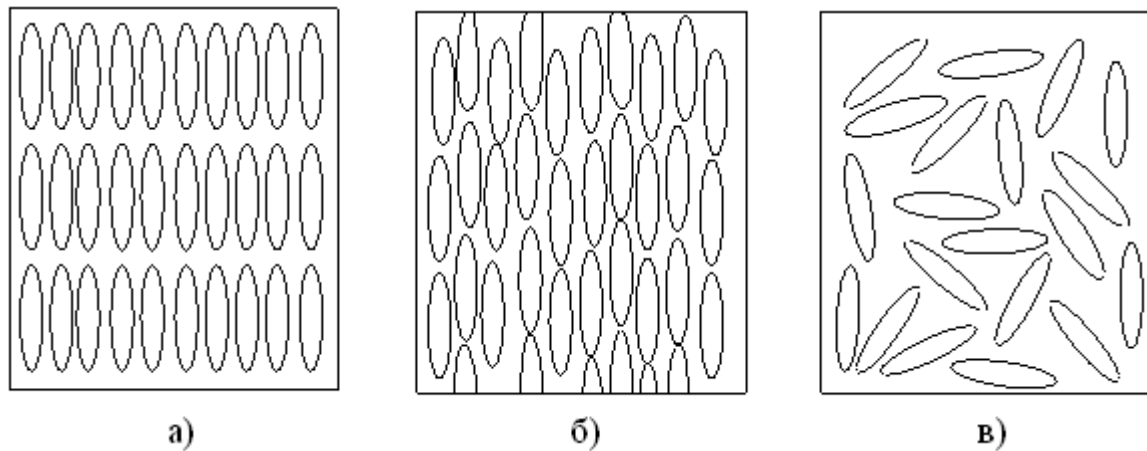


Рисунок 14.4 – Схематичне зображення розташування молекул в кристалічній (а), рідкокристалічній (нематичній) (б) і рідкій (в) фазах

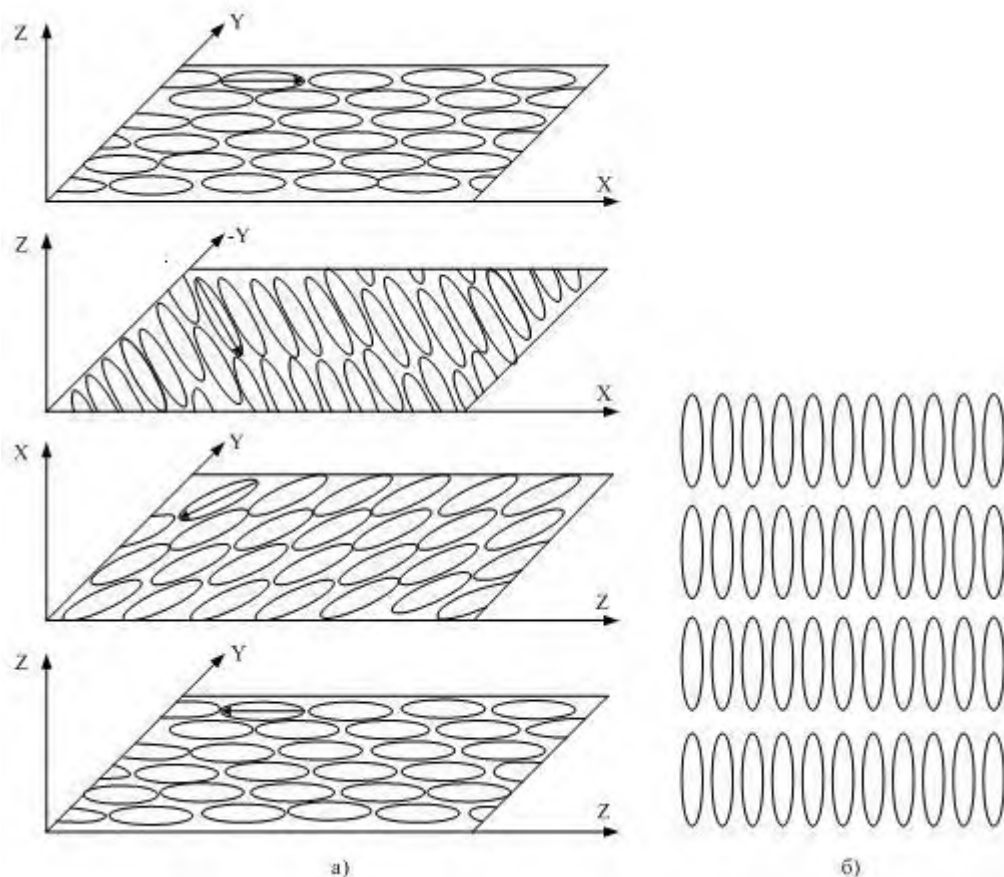


Рисунок 14.5 – Схема розташування молекул в холестеричній (а) і смектичній (б) рідкокристалічних фазах

Тому якщо помістити холестерик між двома поляроїдами, то пропускання світла такою системою змінюватиметься з поданням на нього різниці потенціалів. На цьому принципі побудовані електричні знакові індикатори, використовувані в

деяких типах електронного годинника, мікрокалькуляторів і под. Крок спіралі, а отже, довжина хвилі брегівського віддзеркалення і колір холестерину різко змінюються з температурою. Так, в *холестерилнонаноаті* довжина хвилі брегівського віддзеркалення змінюється від 450 до 600 нм при підвищенні його температури всього на 1°C. Це дозволяє застосовувати холестерики для візуального знаходження «гарячих» точок в мікросхемах, вигляду зображення в інфрачервоному промінні і т.д.

Дуже чутливими до теплових і механічних властивостей бувають також рідкі кристали в так званій *сметичній (smektik phase)* фазі, в якій молекули розподілені шарами з чітко визначеним періодом (рис. 14.5,б). Сметики більш впорядковані, ніж нематики, і для даної речовини сметична фаза виникає завжди при нижчій температурі, ніж нематична.

Рідкокристалічні елементи споживають малу потужність, їм можна надавати різні розміри і форми, варіювати колір індикаторів. Вони дешеві і порівняно прості у виготовленні. Їм властиві і деякі недоліки: обмежений температурний діапазон роботи, порівняно велика інерційність (одиниці – десятки мілісекунд), старіння і ін. Проте в останнє десятиліття ця область електроніки надзвичайно бурхливо розвивається, багато недоліків виявляються цілком переборними, відкриваються нові можливості і в наш час важко передбачити межі застосування рідких кристалів не тільки в дисплеях, але і в інших системах.

ЛЕКЦІЯ 15 ТЕРМОЕЛЕКТРОРУШІЙНА СИЛА

У 1823 р. Т. Зеебек встановив, що в колі, що складається з двох різнорідних провідників 1 і 2, виникає електрорушійна сила V_T , якщо контакти цих провідників А і В підтримуються при різних температурах T_2 і T_x (рис. 15.1, б). Ця ЕРС називається *термоелектрорушійною силою*. Як показує експеримент, у відносно неширокому діапазоні температур вона пропорційна різниці температур контактів А і В:

$$V_T = a(T_T - T_x) \quad (15.1)$$

Коефіцієнт пропорційності

$$a = dV_T / dT \quad (15.2)$$

називають *диференціальною* або *питомою* термоерс. Вона залежить від природи дотикових провідників і від температури.

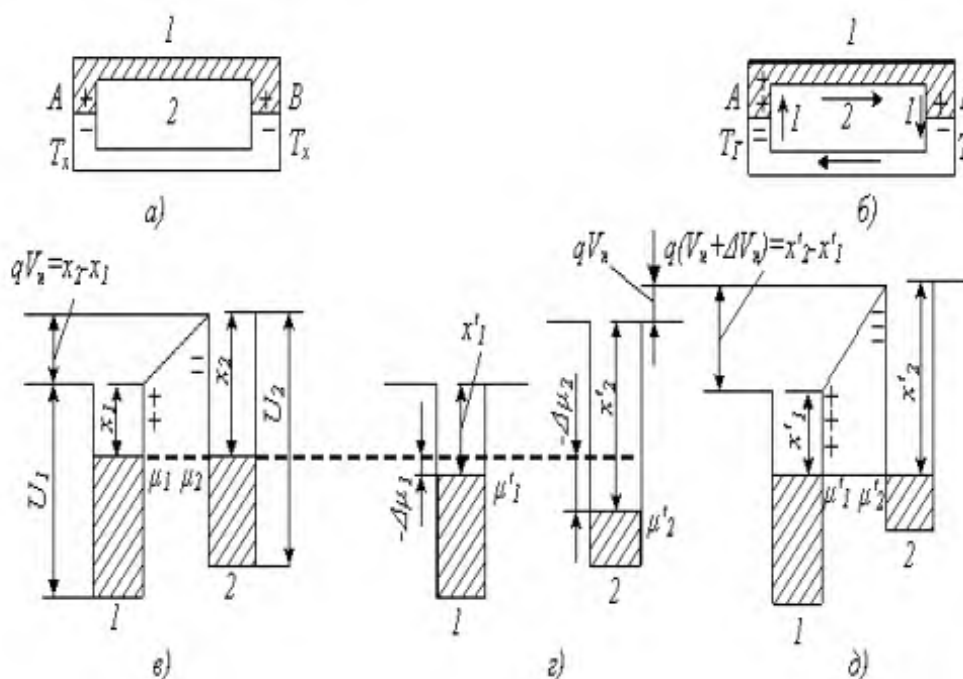


Рисунок 15.1 – Виникнення термоелектрорушійної сили

Існує два основні джерела виникнення термоерс: зміна контактної різниці потенціалів з температурою (контактна складова V_k) і утворення направленого потоку носіїв в провіднику за наявності градієнта температури (об'ємна складова $V_{зв}$). Розглянемо фізичну природу цих складових.

15.1 Контактна складова термоерс

На рис. 15.1, а показано електричне коло, що складається з двох різнорідних провідників, які знаходяться в контактні один з одним при температурі T_x ; на рис. 15.1, в – зони провідності цих провідників в рівноважному стані. Рівні Фермі μ_1 і μ_2 встановлюються на одній висоті і між провідниками виникає контактна різниця потенціалів $\Delta V_k = (1/q)(x_2 - x_1)$ де x_2, x_1 – термодинамічні

роботи виходу електронів з провідників. При однаковій температурі контактів А і В різниці потенціалів однакові за величиною і направлені назустріч одна одній. Тому вони врівноважують одна одну і результуюча напруга рівна нулю.

Нагріватимемо тепер контакт А до температури $T_2 > T_x$, залишаючи контакт В при температурі T_x . В нормальних металах і електронних напівпровідниках підвищення температури викликає зниження рівня Фермі. Позначимо це положення провідника 1 через $-\Delta\mu_1$, у провідника 2 через $\Delta\mu_2$. Зміна положення рівня Фермі приводить до зміни термодинамічної роботи виходу, яка в провіднику 1 стає рівною $\dot{x}_1 = x_1 - \Delta\mu_1$, у провіднику 2 $\dot{x}_2 = x_2 - \Delta\mu_2$. Якщо $\Delta\mu_1 \neq \Delta\mu_2$ то при цьому рівні Фермі у провідників 1 і 2 в гарячому контакті виявляються не на одній висоті, що свідчить про порушення рівноваги в цьому контакті, сталому при температурі T_x (рис. 15.1, г). Нова рівновага досягається за рахунок перетікання електронів з першого провідника в другий до встановлення рівнів Фермі на одній висоті (рис. 7.1, д). Виникаюча контактна різниця потенціалів тепер буде

$$\text{рівна } V_k + \Delta V_k = (1/q) (\dot{x}_2 - -\dot{x}_1) = \left(\frac{1}{q}\right) (x_2 - x_1) - \left(\frac{1}{q}\right) (\Delta\mu_2 - \Delta\mu_1). \text{ Вона більша, ніж в контакті В, що знаходиться при температурі } T_x < T_2, \text{ на величину}$$

$$\Delta V_k = -(1/q)(\Delta\mu_2 - \Delta\mu_1). \quad (15.3)$$

Таким чином, підвищення температури одного з контактів приводить до зміни контактної різниці потенціалів в ньому і виникненню між гарячим і холодним контактами різниці потенціалів ΔV_k , яка і є контактною складовою термоерс.

Позначимо різницю температур між контактами через ΔT . Тоді $\Delta\mu_1$ і $\Delta\mu_2$ можна подати таким чином:

$$\Delta\mu_1 = (d\mu_1/dT)\Delta T,$$

$$\Delta\mu_2 = (d\mu_2/dT)\Delta T.$$

Підставляючи це в (15.3), одержуємо

$$\Delta V_k = -\frac{1}{q} \left[\frac{d\mu_2}{dT} - \frac{d\mu_1}{dT} \right] \Delta T. \quad (15.4)$$

Звідси легко визначити контактну складову питомої термоерс кола, що складається з провідників 1 і 2 (рис. 7.1, б):

$$a_k^{2,1} = \frac{dV_k}{dT} = -\frac{1}{q} \left[\frac{d\mu_2}{dT} - \frac{d\mu_1}{dT} \right]. \quad (15.5)$$

Вона рівна різниці контактних складових

$$a_k = \frac{1}{q} \frac{d\mu}{dT} \quad (15.6)$$

окремих провідників, створюючих це коло.

Для металів згідно з (15.6) енергія μ рівна

$$\mu(T) = \mu(0) \left[1 - \frac{\pi^2}{12} \left[\frac{-kT}{\mu(0)} \right]^2 \right],$$

де $\mu(0)$ – енергія Фермі при 0К. Диференціюючи це за T і підставляючи $\frac{d\mu}{dT}$ у (15.6), знаходимо

$$a_k = - \frac{\pi^2 k^2}{6q\mu(0) T}. \quad (15.7)$$

Для невироджених напівпровідників n -типу енергія Фермі рівна

$$\mu_n = kT \ln \frac{n}{N_c} = kT \ln \frac{nh^3}{2(2\pi\mu_0 kT)^{3/2}}.$$

Диференціюючи μ за T і підставляючи в (15.6), одержуємо

$$a_k = \frac{k}{q} \left[\frac{\mu_n}{kT} + T \frac{d(\ln n)}{dT} - \frac{3}{2} \right]. \quad (15.8)$$

15.2 Об'ємна складова термоерс

Концентрація носіїв заряду в провіднику залежить від температури. У металів ця залежність дуже слабка і обумовлена термічним розширенням, що викликає зміну об'єму провідника. У напівпровідників, навпаки, із збільшенням температури концентрація носіїв може збільшуватись дуже сильно. Тому на гарячому кінці напівпровідника концентрація носіїв заряду може виявитися вищою, ніж на холодному, внаслідок чого від гарячого кінця до холодного виникає дифузійний потік, що приводить в n -напівпровіднику до появи на холодному кінці негативного об'ємного заряду, на гарячому – позитивного заряду. Ці заряди створюють різницю потенціалів V_0 , яка і є об'ємною складовою термоерс.

У стаціонарному стані в кожній точці провідника дифузійний потік носіїв врівноважується дрейфовим потоком, викликаним різницею потенціалів $V_{зв}$ і направленим від гарячого кінця до холодного. Для n -напівпровідника дифузійний потік електронів дорівнює $-D_n(dn/dx)$ де D_n – коефіцієнт дифузії електронів; dn/dx – градієнт їх концентрації; дрейфовий потік рівний $nv_d = -nu_n e$, де v_d – дрейфова швидкість; u_n – рухливість електронів; e – напруженість поля, що виникло в напівпровіднику. В стаціонарних умовах

$$nu_n e + D_n(dn/dx) = 0. \quad (15.9)$$

Розв'язання цього рівняння приводить до такого результату для об'ємної складової термоерс, обумовленою дифузією носіїв заряду, що виникає унаслідок зміни їх концентрації з температурою:

$$a_{зв} = \frac{dV_{зв}}{dT} = \frac{k}{q} T \frac{d(\ln n)}{dT}. \quad (15.10)$$

Підкреслимо ще раз, що у металів, у яких концентрація носіїв надзвичайно слабо залежить від температури, ця складова практично рівна нулю; вона буде мала також в напівпровідниках в температурному інтервалі виснаження домішок.

Існує ще одна причина виникнення об'ємної складової термоерс – інтенсифікація теплового руху носіїв заряду з підвищенням температури. Збільшення температури викликає збільшення середньої енергії носіїв, а отже, і зміна їх довжини вільного пробігу l , яка таким чином пов'язана з енергією носіїв E :

$$l \sim E^r. \quad (15.11)$$

Показник r залежить від механізму розсіювання: при розсіюванні носіїв на теплових коливаннях ґраток $r=0$, при розсіюванні на іонізованих домішках $r=2$ і т.д.

З (15.11) видно, що збільшення температури провідника, що викликає підвищення енергії носіїв, повинно приводити в загальному випадку до збільшення довжини їх вільного пробігу, а отже, і до зміни коефіцієнта дифузії, пропорційного l . Тому від гарячого кінця до холодного встановиться термодифузійний потік носіїв, що приводить до формування додаткової різниці потенціалів V_{ze} . Розрахунок показує, що для невироджених напівпровідників n -типу термодифузійні складові термоерс:

$$a'_{об} = -\left(\frac{k}{q}\right) (r + 1/2). \quad (15.12)$$

Складаючи (15.8), (15.10) і (15.12), одержуємо результуючу питому термоерс напівпровідника n -типу

$$a_n = \left(\frac{k}{q}\right) \left(r + 2 - \frac{\mu_n}{kT}\right). \quad (15.13)$$

Аналогічно для напівпровідника p -типу

$$a_p = \left(\frac{k}{q}\right) \left(r + 2 - \frac{\mu_p}{kT}\right), \quad (15.14)$$

де через $-\mu_p$ позначена відстань від рівня Фермі до валентної зони.

У металів термодифузійна складова термоерс також не рівна нулю. Враховуючи її і контактну складову (15.7) одержуємо такий вираз для питомої термоерс металу з параболічною залежністю енергії від хвильового вектора:

$$\alpha_{M=} = -\frac{\pi^2}{3q} (r + 1) \frac{kT}{\mu}. \quad (15.15)$$

Оцінімо величину α_m і α_{np} . Для типових металів, наприклад, для міді, $\mu \approx 7$ еВ; при $T=300K$ $kT=0,025$ еВ. Підставляючи це в (15.15) і вважаючи $r=2$, одержуємо $\alpha_m \approx 5$ мкВ/К, що задовільно узгоджується з експериментом.

Для n -напівпровідника, наприклад, для $n-Si$, з концентрацією донорної домішки $N_D=10^{20} M^3$ при $T=300K$ $\mu_n \gg -0,25$ еВ. Підставляючи це в (15.14), знаходимо $\alpha_n \gg 1$ мВ/К, що приблизно на 3 порядки вища, ніж у металів. Тому для об'єкта, що складається з напівпровідника і металу, частиною, що вноситься в термоерс металом, можна нехтувати і вважати, що вся термоерс обумовлена напівпровідником.

Слід помітити, що r , що входить в (15.15), може бути і величиною негативною. В цьому випадку із зростанням температури довжина вільного пробігу носіїв не збільшується, а, навпаки, зменшується, внаслідок чого термодифузійний потік направлений не від гарячого до холодного, а від холодного до гарячого кінця провідника і обумовлена ним різниця потенціалів направлена протилежно контактній складовій термоерс. В цьому випадку результуюча термоерс може виявитися рівною нулю або навіть змінити свій напрям. Така картина спостерігається, зокрема, у ряді перехідних металів і сплавів (ніхром, хромель і ін.).

Для напівпровідників із змішаною провідністю, в яких електричний струм переноситься одночасно електронами і дірками, термоерс знаходиться таким співвідношенням:

$$a_{np} = (a_n u_n n + a_p u_p p) / (m u_n + p u_p). \quad (15.16)$$

Для напівпровідників з власною провідністю $n = p = n_i$ і

$$a_i = (a_n u_n + a_p u_p) / (u_n + u_p). \quad (15.17)$$

Нехтуючи у виразах (15.13) і (15.14) доданками $(r + 2)$ згідно з рівнянням $c - m/kT$ і пам'ятаючи, що у напівпровіднику з власною провідністю $\mu_i \approx -E_g/2$ одержуємо

$$a_i \approx - \frac{E_g}{2qT} \frac{u_n - u_p}{u_n + u_p}. \quad (15.18)$$

Оскільки звичайно $u_n > u_p$ то a_i у власному напівпровіднику є величиною негативною. В акцепторному напівпровіднику при переході до власної провідності відбувається зміна позитивного знака термоерс на негативний.

На рис. 15.2 показана залежність термоерс акцепторного напівпровідника від температури. В області низьких температур, в якій рівень Фермі відносно слабо змінюється з температурою, величина $-\mu_p/kT$ буде приблизно обернено пропорційна температурі T . Тому і питома термоерс $a_p \sim 1/T$ (ділянка *аб* кривої рис.

15.2). В області виснаження домішки $-\frac{\mu_p}{kT} = \ln\left(\frac{N_n}{N_a}\right) = \ln N_n - \ln N_a$. Так $N_n \sim T^{3/2}$, то в цій області a_p злегка збільшується з підвищенням температури (ділянка *бв*).

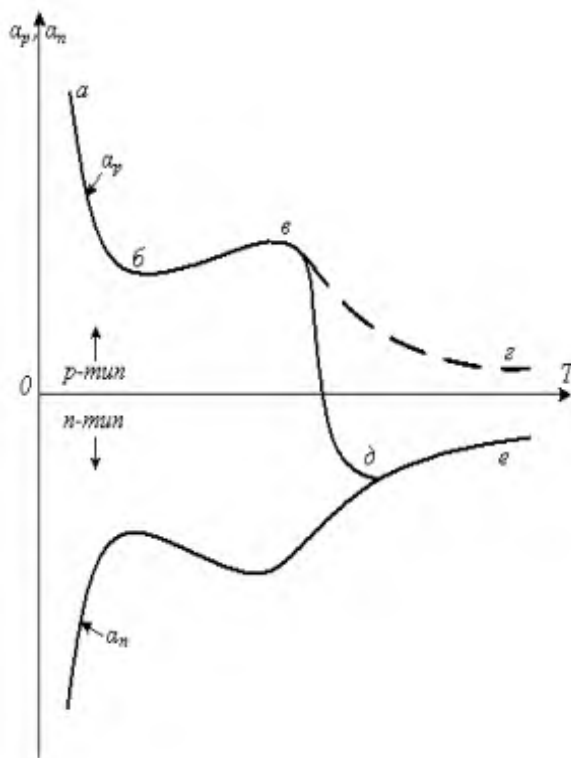


Рисунок 15.2 – Залежність термоерс акцепторного і донорного напівпровідників від температури

Нарешті в області переходу до власної провідності μ стає величиною практично постійною і рівною μ_i тому a_p знову зменшується з підвищенням температури і крива повинна б була йти так, як показано відрізком eg на рис. 7.2. Насправді ж внаслідок того, що в цій області концентрації електронів і дірок практично порівнюються, термоерс, різко зменшуючись, проходить через нуль і стає негативною (відрізок ed).

З подальшим підвищенням температури абсолютна величина термоерс згідно з формулою (7.18) зменшується (крива de для власного напівпровідника).

У нижній частині рис. 7.2 показана крива зміни термоерс. донорного напівпровідника з температурою. В області власної провідності вона зливається з кривою для p-напівпровідника.

Термоелектричний ефект одержав широке практичне застосування, у тому числі і в радіоелектроніці. Він дозволяє безпосередньо перетворювати теплову енергію в електричну, що використовується в термогенераторах. Теорія таких генераторів була розроблена А. Ф. Іоффе. Згідно з цією теорією к. п. д. перетворення теплової енергії в електричну визначається величиною a^2s/K , де K – коефіцієнт теплопровідності напівпровідника;

s – питома електропровідність.

Це можна зрозуміти з таких міркувань. В термогенераторах намагаються одержати найбільший перепад температур між гарячим і холодним кінцями напівпровідника при найменшій витраті теплової енергії. Чим нижча теплопровідність напівпровідника, тим більша величина термоерс. При цьому зменшувати теплопередавання від гарячого кінця до холодного за рахунок подовження напівпровідника не можна, оскільки при цьому збільшуватиметься внутрішній опір термогенератора і к. п. д. зменшуватиметься. З цієї ж причини вигідно мати максимальну питому електропровідність s напівпровідника. Оскільки із збільшенням ступеня легування напівпровідника a зменшується, а K і s збільшуються, то для кожного напівпровідника існує оптимальний ступінь легування, що забезпечує максимальну величину a^2s/K , а отже, і к. п. д.

Перші термогенератори були розроблені перед Великою Вітчизняною війною і під час війни використовувалися для живлення радіоапаратури. В 1953 р. для живлення ряду батарейних радіоприймачів був випущений промисловий зразок термогенераторів потужністю приблизно 1 кВт і вище.

У середині 70-х років з'явилися термогенератори, які використовують тепло, що виділяється при радіоактивному розпаді хімічних елементів. Прикладом такого генератора служить установка «Бета-1» потужністю 150 – 200 Вт, працююча на радіоактивному ізотопі цезію 144. Вона призначена для живлення радіоелектронної апаратури автоматичних радіометеорологічних станцій, штучних супутників Землі і т.д.

У 1964 р. був побудований експериментальний атомний реактор-перетворювач «Ромашка» потужністю 500 Вт, в якому теплова енергія безпосередньо перетворюється в електричну.

К. к. д. напівпровідникових термогенераторів досягає 15%, і в найближчому майбутньому він, мабуть, перевищить 20%.

Термоелектричний ефект використовується також для вимірювання температур (термопари), і при інших вимірюваннях, які можуть бути зведені до вимірювання температури. В теплових фотоприймачах (термоелементах) світло поглинається зачорненою приймальною площадкою, до якої приєднаний спай термопари, і нагріває її. За величиною виникаючої термоерс можна визначити потужність світлового потоку. В теплових амперметрах струм пропускається через спай термопари і нагріває його. За величиною виникаючої при цьому термоерс визначається сила струму. У вакууметрах через металевий провідник, до середини якого приєднаний спай термопари, пропускається фіксований струм. Температура спаю буде різною залежно від теплопровідності навколишнього газу. Остання ж визначається тиском газу. Тому, вимірюючи виникаючу термоерс, можна визначити тиск газу. Цим методом зручно вимірювати тиск в діапазоні

$$100 \cdot 10^{-1} - 10 \text{ Па.}$$

У техніці вимірювання електрофізичних параметрів напівпровідників термоелектричний ефект використовується для визначення переважаючого типу провідності (за знаком термоерс) і ширини забороненої зони (за формулою(15.18)).

ЛЕКЦІЯ 16 ЕФЕКТ ПЕЛЬТЬЄ

Ефект Пельтьє полягає в тому, що при пропусканні струму через контакт двох різнорідних матеріалів на додаток до Джоулового тепла в контакті виділяється або поглинається тепло, кількість якого Q_{II} пропорційно заряду It , що пройшов через контакт:

$$Q_n = \pm pIt. \quad (16.1)$$

Коефіцієнт пропорційності p називається коефіцієнтом Пельтьє.

Пояснимо природу цього ефекту на прикладі нейтрального контакту напівпровідника з металом. Нагадаємо, що нейтральним називають контакт двох матеріалів, що мають однакові роботи виходу. В такому контакті відсутні шари збагачення або збіднення, немає вигину зон. На рис. 16.1, а показана енергетична діаграма нейтрального контакту металу з n -напівпровідником. В рівноважному стані рівні Фермі металу (μ_M) і напівпровідника (μ_n) розташовуються на одній висоті, а дно зони провідності напівпровідника знаходиться вище за рівень Фермі металу на $-\mu_n$, так що для електронів, перехідних з металу в напівпровідник, існує потенціальний бар'єр висотою $-\mu_n$.

Прикладемо до такого контакту зовнішню різницю потенціалів, як показано на рис. 16.1, б. Під дією цієї різниці потенціалів в напівпровіднику, на якому спадає практично вся прикладена напруга, рівень Фермі, дно зони провідності і інші енергетичні рівні відчуватимуть поступове підняття на висоту qV при переміщенні від лівого контакту до правого. В системі виникає струм, направлений зліва направо; потік електронів, показаний на рис. 16.1, б стрілками, направлений справа наліво.

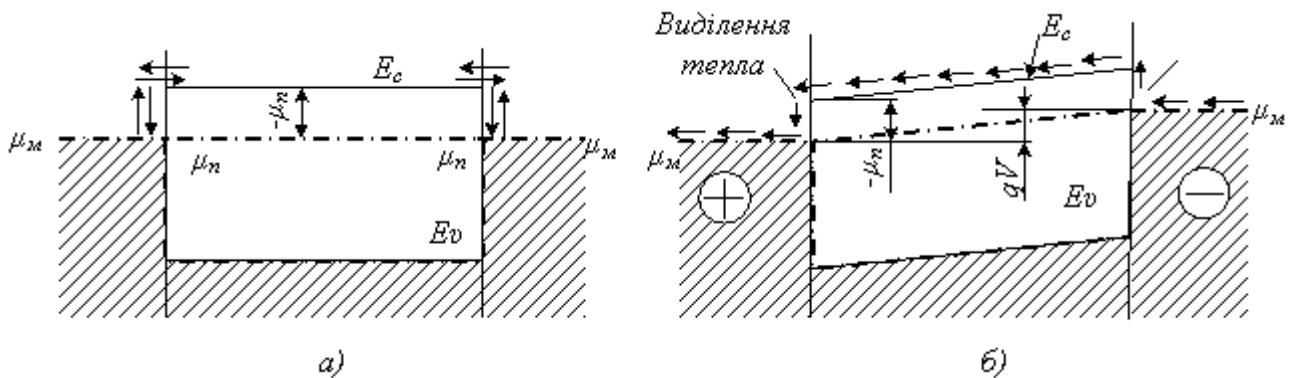


Рисунок 16.1 – До пояснення ефекту Пельтьє:

а – енергетична діаграма ланцюга метал–напівпровідник–метал в стані теплової рівноваги; б – те ж при пропусканні струму

З рис. 16.1, б видно, що електрони, перехідні в лівому контакті з напівпровідника в метал, мають в напівпровіднику більшу енергію, ніж в металі на величину, рівну $-\mu_n + \overline{E_n}$ де $-\mu_n$ — висота бар'єра, з якого скочуються електрони, що надходять з напівпровідника в метал; $\overline{E_n}$ – середня енергія електронів в напівпровіднику, що беруть участь в створенні струму. Вона не дорівнює середній тепловій енергії електронів $3/2$ кТ, як може здатися з першого погляду, оскільки

відносна роль швидких електронів у формуванні електричного струму вища, ніж повільних. Для невиродженого електронного газу розрахунок показує, що

$$E_n = (r + 2)kT. \quad (16.2)$$

де r – показник ступеня в співвідношенні (16.3).

Таким чином, кожний електрон, перехідний в лівому контакті з напівпровідника в метал, переносить надмірну енергію

$$\Delta E = -\mu_n + (r + 2)kT, \quad (16.4)$$

яка виділяється в цьому контакті у формі додаткового (до джоулового) тепла. Це тепло і є теплотою Пельтьє. Поділивши (16.5) на заряд електрона q одержимо коефіцієнт Пельтьє

$$|p| = \frac{k}{q} \left[r + 2 - \frac{m_n}{kT} \right]. \quad (16.6)$$

У правому контакті електрони переходять із металу в напівпровідник, долаючи потенціальний бар'єр $-\mu_n$. Крім того, для встановлення рівноваги цих електронів з електронним газом в напівпровіднику їм необхідно набути ще енергію E_n ; всю цю енергію вони черпають з ґратки, охолоджуючи її в правому контакті.

Явище охолодження контакту при проходженні струму особливо важливе, оскільки дозволяє створювати термоелектричні холодильні пристрої – домашні холодильники, пристрої для охолодження бортової радіоелектронної апаратури, мікрохолодильники для біологічних цілей, різні термоелектричні термостати, столики мікроскопів з охолодженням і нагріванням і т.д. Зручним є те, що, змінюючи напрям струму, можна холодильник перетворювати в нагрівач і, навпаки, нагрівач в холодильник.

Легко бачити, що ефект Пельтьє є зворотним ефекту Зеебека. В першому випадку пропускання струму в колі приводить до виникнення в контактах різниці температур, в другому створення різниці температур в контактах викликає поява в колі термоерс і, отже електричного струму. Термодинамічний розгляд цих явищ показує що між коефіцієнтом Пельтьє і питомою термоерс існує такий простий зв'язок:

$$p = aT. \quad (16.7)$$

Найефективнішими матеріалами для створення як термоелектричних холодильників, так і термогенераторів є матеріали з максимальною величиною a^2s/χ . Для термоелектричного охолодження необхідний матеріал з високими значеннями коефіцієнта Пельтьє і питомої електропровідності. Остання вимога обумовлена тим, що на додаток до тепла Пельтьє завжди виділяється і джоулове тепло і, щоб ефект джоулового нагріву не перекрив ефект охолодження, необхідні матеріали з хорошою електропровідністю. З другого боку, при одній і тій же кількості тепла, що виділяється внаслідок ефекту Пельтьє на одному контакті і поглинається на іншому, різниця температур між контактами буде тим більша, чим менша теплопередача від гарячого кінця провідника до холодного, тобто чим менший коефіцієнт теплопровідності.

ЛЕКЦІЯ 17 ЕФЕКТ ХОЛЛА

Ефектом Холла називається явище, що полягає в тому, що при пропусканні струму уподовж провідної пластинки, поміщеної перпендикулярно до ліній зовнішнього магнітного поля, виникає поперечна різниця потенціалів внаслідок взаємодії носіїв заряду з магнітним полем.

Припустимо, що по провіднику, що має форму прямокутної пластини, протікає електричний струм I (рис. 17.1). У відсутність магнітного поля різниця потенціалів між точками C і D , що лежать на одній з екіпотенціальних поверхонь, рівна нулю. Якщо зразок помістити в магнітне поле, індукція якого B перпендикулярна до напрямку струму і площини зразка, то між точками C і D виникає різниця потенціалів V_x , названа холлівською е.р.с.

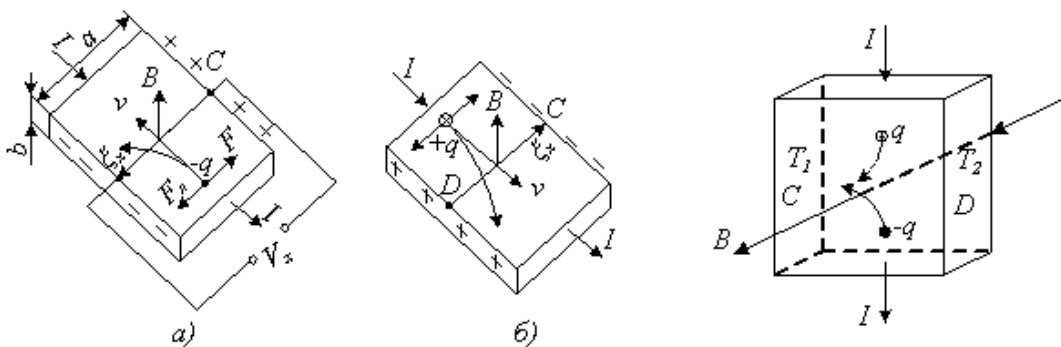


Рисунок 17.1 – До пояснення ефекту Холла в n-типу (а) і р-типу (б)

Рисунок 17.2 – Схема виникнення в напівпровідниках ефекту Етінгсгаузена у власному напівпровіднику

Як показує досвід, при не дуже сильних полях V_x виявляється пропорційна індукції поля B , силі струму I і обернено пропорційна товщині пластини b :

$$V_x = R_x BI / b = R_x B j a. \quad (17.1)$$

Тут j – густина струму в зразку; a – ширина зразка. Коефіцієнт пропорційності R_x є константою матеріалу і називається постійною Холла. Вона має розмірність E^3 / Q (L – довжина, Q – електричний заряд) і вимірюється в $\text{м}^3 / \text{Кл}$.

Розглянемо фізичну природу ефекту Холла. При протіканні струму в напрямі, вказаному на рис. 17.1, а стрілкою, електрони здійснюють дрейф із швидкістю V в протилежному напрямі. На кожний такий електрон діє з боку магнітного поля B сила Лоренца

$$F_a = q[vB], \quad (17.2)$$

де q – заряд електрона. Напрямок цієї сили визначається правилом свердлика. Оскільки кут між V і B рівний 90° , то чисельне значення сили Лоренца складає:

$$F_a = qvB. \quad (17.3)$$

Під дією сили Лоренца електрони відхиляються до зовнішньої межі пластини (штрихова лінія на рис. 17.1, а), заряджаючи її негативно. На протилежній грані

нагромаджуються позитивні заряди, що не компенсуються. Це призводить до появи електричного поля, направлено від C до D і рівного

$$e_x = V_x / a,$$

де V_x – різниця потенціалів між точками C і D (е.р.с. Холла).

Поле e_x діє на електрони з силою $F = - qe_x$, направленою проти сили Лоренца.

При $F = F_a$ поперечне електричне поле врівноважує силу Лоренца і подальше накопичення електричних зарядів на бічних гранях пластини припиняється. З умови рівноваги

$$qvB = qe_x \quad (17.4)$$

знаходимо

$$e_x = vB. \quad (17.5)$$

Враховуючи, що густина струму в провіднику $j = qnv$, де n – концентрація електронів, одержуємо $v = j/qn$. Підставивши цей вираз в (17.5), знайдемо

$$V_x = (1/qn)Bja. \quad (17.6)$$

Теорія приводить, таким чином, до виразу для V_x який збігається з (17.6), встановленим експериментально. Постійна Холла виявляється при цьому рівною

$$R_x = 1/qn. \quad (17.7)$$

Ефект Холла є могутнім експериментальним засобом вивчення властивостей носіїв заряду в напівпровідниках. Змірявши постійну Холла

R_x , можна визначити концентрацію носіїв, а за напрямом е.р.с. Холла визначити їх знак.

Пряма пропорційність між е.р.с. Холла і індукцією магнітного поля (для слабких полів) дозволяє використовувати напівпровідникові зразки як датчики для вимірювання напруженості магнітного поля. Розміри таких датчиків можуть бути достатньо малими (наприклад, $0,5 \times 0,5$ мм), так що з їх допомогою можна вести вимірювання з доброю просторовою роздільною здатністю.

Інерційність Холл-ефекту визначається максвеловським часом релаксації, тобто надзвичайно мала. Це дозволяє застосовувати датчики Холла для вимірювання високочастотних магнітних полів, для визначення сили струму за величиною створеного ним магнітного поля і т.п.

Як видно із співвідношення (17.7), холлівська е.р.с. пропорційна створенню сили струму, який протікає через датчик, на індукцію магнітного поля. Це дозволяє використовувати ефект Холла для перемножування двох сигналів, що необхідне, наприклад, у вимірниках потужності, фазових детекторах, лічильно-обчислювальних пристроях.

Останніми роками коло застосування датчиків Холла дуже розширилось, охопивши багато областей радіотехніки і електроніки.

ЛЕКЦІЯ 18 ЕФЕКТ ЕТТІНГСГАУЗЕНА

Ефект Еттінгсгаузена є супутнім ефекту Холла і полягає в тому, що при пропусканні струму через провідник, поміщений в поперечне магнітне поле), в напрямі, перпендикулярному до магнітного поля і струму, виникає градієнт температури. Найбільшу величину цей ефект має у власних напівпровідниках. Як було показано в попередньому підрозділі, в таких напівпровідниках електрони і дірки відхиляються магнітним полем в одну і ту ж сторону (до грані C на рис. 7.5). Внаслідок цього на одній грані зразка концентрація електронів і дірок виявляється вище рівноважної і там рекомбінація переважає над тепловою генерацією носіїв, а на іншій грані (на грані D рис. 7.5), навпаки, концентрація носіїв заряду нижча рівноважної і там тепла генерація переважає над рекомбінацією. Внаслідок цього тепло витрачається на генерацію електронно-діркових пар в одній частині зразка і виділяється в результаті їх рекомбінації в іншій частині цього зразка і в ньому виникає різниця температур.

Ефект Еттінгсгаузена спостерігається і в області домішкової провідності напівпровідників. В цьому випадку причиною його виникнення є відмінність часів вільного пробігу носіїв заряду, що мають різні швидкості теплового руху і внаслідок цього різні швидкості дрейфу «холодних» і «гарячих» носіїв. Згідно з формулою холлівське поле E_x компенсує дію сили Лоренца лише для носіїв заряду, які рухаються з деякою середньою дрейфовою швидкістю. Носії, дрейфуючі швидше, відхиляються у бік сили Лоренца, поволі дрейфуючі – в протилежну сторону. Які з цих носіїв є «гарячішими», залежить від переважаючого механізму їх розсіювання. Наприклад, якщо переважає розсіювання на теплових коливаннях ґратки, «гарячі електрони» мають меншу рухливість в порівнянні з «холодними» і тому вони відхилятимуться до грані C пластини і ця грань нагріватиметься; грань D , до якої відхиляються «холодні» електрони, охолоджуватиметься.

Ефект Еттінгсгаузена може бути використаний в тих же пристроях, що і ефект Пельтьє – в пристроях кондиціонування повітря, охолодження, термостатування і под., де потрібне перекачування тепла. При цьому матеріал, що використовується для цих цілей, так само як і в елементах Пельтьє, повинен мати по можливості меншу теплопровідність, щоб перетікання тепла від гарячої грані зразка до холодної було утруднено. Гальваномагнітні ефекти не вичерпуються приведеними ефектами Холла і Еттінгсгаузена. Крім того, існують ще *термомагнітні* ефекти, тобто ефекти, що виникають у присутності градієнта температури і магнітного поля. Проте найбільше практичне значення мають розглянуті ефекти Холла і Еттінгсгаузена.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Прищепя М.М., Погребняк В.П. Мікроелектроніка. Частина І. Елементи електроніки. – Київ: Вища школа, 2004. – 431 с.
2. Закалик Л.У., Ткачук Р.А. Основи мікроелектроніки. - Тернопіль, 1998. - 380 с.
3. Хоружний В.А., Письмецький В.О. Функціональна мікроелектроніка, опто- та акустоелектроніка. - Харків, 1995. - 186 с.
4. Сенько В.І., Панасенко М.В., Сенько Є.В. Електроніка і мікросхемотехніка. - Т.1. Елементна база електронних пристроїв. - Київ: Обереги, 2000. - 300 с.
5. Стахів П.Г., Коруд В.І., Гамола О.Є. Основи електроніки: функціональні елементи та їх застосування. - Львів: Новий світ-2000, 2003. - 128 с.
6. Радіотехніка: Енциклопедичний навчальний довідник: Навч. Посіб. / за ред. Ю.Л.Мазора, Є.А.Мачуського, В.І. Правди. – Київ: Вища школа, 1999. – 838 с.
7. Мікроелектроніка і наноелектроніка. Вступ до спеціальності / Ю. М. Поплавко, О. В. Борисов, В. І. Ільченко та ін. – Київ: НТУУ «КПІ», 2010. – 160 с