

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**Л.В.Однодворець**

# ОСНОВИ МІКРОЕЛЕКТРОНІКИ

**Конспект лекцій**



Суми 2020

Конспект лекцій з дисципліни «Основи мікроелектроніки»  
для студентів спеціальності 014 – Середня освіта (Фізика)  
/ Укладач: Л.В.Однодворець. – Суми: СумДУ, 2020. – 163 с.

## ЗМІСТ

<b>Розділ 1 Основи мікроелектроніки</b> .....	5
1.1 Основні поняття, положення та етапи розвитку мікроелектроніки .....	5
1.1.1 Основні поняття та терміни.....	5
1.1.2 Класифікація, характеристика та система умовних позначень основних типів інтегральних мікросхем (ІМС).....	7
<b>Розділ 2 Фізичні основи мікроелектроніки</b> .....	16
2.1 Загальна характеристика та класифікація напівпровідників .....	16
2.2 Власна електронна та діркова електропровідність. Рухливість носіїв заряду.....	20
2.3 Контактні явища у мікроелектронних структурах.....	24
2.4 Характеристика випрямного контакту метал-напівпровідник.....	27
2.5 Діод Шотткі.....	35
2.6 Ефект Ганна.....	37
<b>Розділ 3 Напівпровідникові ІМС</b> .....	39
3.1 Типи конструкцій та структура НІМС.....	39
3.2 Ізоляція елементів у НІМС.....	42
3.3 Транзистори у НІМС .....	45
3.3.1 Біполярні транзистори.....	45
3.4 Діоди у напівпровідникових ІМС.....	51
3.5 Напівпровідникові резистори.....	52
3.6 Напівпровідникові конденсатори.....	53
3.7 Індуктивність у НІМС.....	54
<b>Розділ 4 Плівкові та гібридні інтегральні мікросхеми</b> .....	55
4.1 Конструкція плівкових та гібридних ІМС.....	55
4.2 Підкладки плівкових інтегральних мікросхем.....	57

4.3 Плівкові резистори.....	63
4.4 Плівкові конденсатори.....	67
4.5 Індуктивні елементи гібридних інтегральних мікросхем.....	70
4.6 R-с-структури.....	75
4.6 Плівкові провідники, контактні площадки та міжшарова ізоляція.....	76
<b>Розділ 5 Великі інтегральні мікросхеми (ВІС).....</b>	<b>78</b>
5.1 Загальна характеристика та основні параметри ВІС.....	78
5.2 Класифікація та сфери застосування ВІС.....	78
<b>Розділ 6 Сучасні напрями розвитку електроніки..</b>	<b>83</b>
6.1 Функціональна мікроелектроніка.....	83
6.2 Хемотроніка .....	83
6.3 Магнітоелектроніка.....	89
6.3.1 Загальна характеристика.....	89
6.3.2 Циліндричні магнітні домени.....	90
6.3.3 Перетворювачі Холла.....	92
6.3.4 Магніторезистори.....	93
6.3.5 Магніодіоди.....	96
6.3.6 Магнітотранзистори і магніотиристоры.....	96
6.4 Акустоелектроніка.....	101
6.5 Оптоелектроніка.....	104
6.6 Кріогенна електроніка.....	117
6.7 Діелектрична електроніка.....	121
6.7 Біоелектроніка.....	121
<b>Розділ 7. Напівпровідникові прилади спеціального функціонального призначення.....</b>	<b>123</b>
7.1 Стабілітрон .....	123
7.2 Тиристор.....	129
Список літератури.....	137

## **Розділ 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,

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 безкліпсні 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.

<b>ВИРОБИ МІКРО- ЕЛЕКТРОНІКИ</b>
--

ІНТЕГРАЛЬНІ МІКРОСХЕМИ	ФУНКЦІОНАЛЬНІ ПРИЛАДИ ТА МІКРОСХЕМИ	МІКРО- КОМПОНЕНТИ
---------------------------	---	----------------------

Напів- провідникові	Теплові	Багатошарові печатні плати
Плівкові	Оптоелектронні	Гнучкі кабелі
Гібридні	П'єзоелектричні	Мікро- рознімання
Сумісні	Електрохімічні	Індикатори
ВІС	Механічні	Мікро- перемикачі
НВЧ-ІМС	На ефекті Ганна	Елементи конструкцій
Мікропроцесори	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 конструкторивно-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 якої 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 багатошарові структури з декількома підкладками, які розміщені паралельно одна одній у кілька поверхів. Така система з'єднання елементів називається багаторівневим або багатошаровим 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 багатошарову 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 технологій, 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-епітаксіальною 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-кристальні				

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).

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

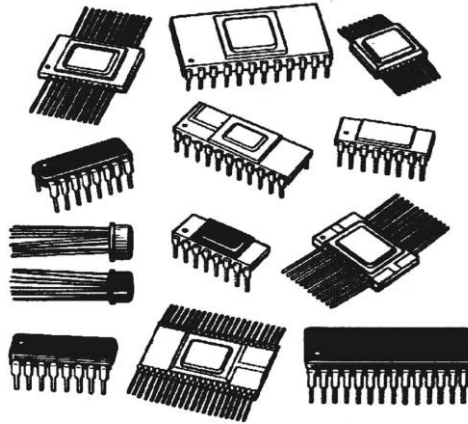


Рисунок 1.2 - Загальний вигляд різних типів ІМС

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 відпові-

Таблиця 1.1 - Класифікація інтегральних мікросхем за функціональними ознаками

Підгрупа	Вид	Позначення типономіналу
Генератори	Гармонічних сигналів	ГС
	Прямокутних сигналів	ГГ
	Шуму	ГМ
	Інші	ГП
Детектори	Амплітудні	ДА
	Імпульсні	ДИ
	Частотні	ДС
	Фазові	ДФ
	Інші	ДП
Логічні елементи	І - НІ	ЛА
	АБО-НІ	ЛЕ
	І	ЛИ
	АБО	ЛЛ
	НІ	ЛН
	І-АБО	ЛС
Багатофункціональні і схеми	Аналогові	ХА
	Цифрові	ХЛ
	Комбіновані	ХК
	Інші	ХП
Модулятори	Амплітудні	МА
	Частотні	МС
	Фазові	МФ
	Імпульсні	МИ
	Інші	МП
Набори елементів	Діодів	НД

	Транзисторів Резисторів Конденсаторів Комбіновані Інші	НТ НР НЕ НК НП
Перетворювачі	Частоти Фази Напруги Потужності	ПС ПФ ПН ПМ
Схеми вторинних джерел електроживлення	Випрямлячі Перетворювачі Стабілізатори напруги Стабілізатори струму	ЕВ ЕМ ЕН ЕТ
Тригери	Типу JK Типу RS Типу D Типу T Дінамічні Шмидта Комбіновані	ТВ ТР ТМ ТТ ТД ТЛ ТК
Підсилювачі	Високої частоти Проміжної частоти Низької частоти Імпульсних сигналів Диференційні Інші	УВ УР УН УИ УД УП
Фільтри	Верхніх частот Нижніх частот полосові Режекторні Інші	ФВ ФН ФЕ ФР ФП
Елементи	Регістри	ИР

арифметичних та дискретних пристроїв	Суматори	ИМ
	Лічильники	ИЕ
	Шифратори	ИВ
	Дешифратори	ИД
	Комбіновані	ИК
	Інші	ИП

дає 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.

## Розділ 2. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ МІКРОЕЛЕКТРОНІКИ

### 2.1 Загальна характеристика та класифікація напівпровідників

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

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

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_A}{kT}\right), \quad (1.1)$$

де  $\sigma_0$  - 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. На рисунку 2.1 показана залежність провідності власного напівпровідника від температури. Знаючи  $\alpha$ , можна визначити величину  $E_A$  - енергію активації електропровідності. 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. 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  $E_A$  для нього значно більша, ніж у Si та Ge, і тому при температурі 300 K його власна провідність мала.

**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.

**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 фото-елементів. 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  $\text{Cu}_2\text{O}$  (купроксні випрямлячі) та  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  (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 ( $\text{V}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , 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 рінях 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. 2.2).

У вузьких областях  $\sim kT$  складні залежності енергії носіїв від їх квазіімпульсу  $p$  від  $E(p)$  (закон дисперсії) набувають найбільш простого вигляду. Так, для електронів поблизу  $E_c$  закон дисперсії має вигляд (формула 2.2)

$$E = E_c + \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^3 \frac{(p_i - p_{0i}^e)^2}{m_i^e}, \quad (1.2)$$

де  $i$  - номер осі координат;  $p_0^e$  - квазіімпульс, який відповідає  $E_C$ ;  $m_i$  - ефективна маса електронів провідності. Аналогічно для дірок (формула 2.3)

$$E = E_V + \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^3 \frac{(p_i - p_{0i}^d)^2}{m_i^d}. \quad (1.3)$$

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  $E_g = 0$ .

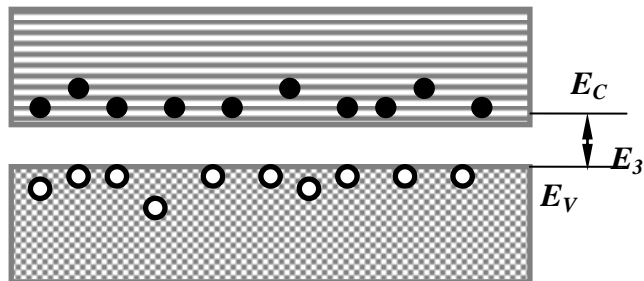


Рисунок 2.1 - Валентна зона (білі кружечки - дірки) та зона провідності (чорні кружечки-електрони провідності):  $E_g$ -ширина забороненої зони;  $E_C$ -дно зони провідності;  $E_V$ - потолок валентної зони

## 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 перемішуватися, 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 ( $i_{др}$ ). Повний струм провідності складається з електронного та діркового струму:

$$i_{др} = i_{ндр} + i_{рдр}. \quad (1.4)$$

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

$$j_{др} = j_{ндр} + j_{рдр}. \quad (1.5)$$

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

$$j_{ндр} = n \cdot e \cdot V_n, \quad (1.6)$$

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  $E$ :

$$V_n = \mu_n \cdot E. \quad (1.7)$$

де  $\mu_n$  - 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  $V_{др}$  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. Одиницею вимірювання рухливості є  $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ . Рухливість носіїв заряду в різних напівпровідниках різна (таблиця 1.2), з підвищенням температури вона зменшується, оскільки збільшується кількість зіткнень носіїв з атомами кристалічної решітки. Підставивши вираз (1.7) у формулу (1.6), одержимо

$$j_{\text{ндр}} = n \cdot e \cdot \mu_n \cdot E. \quad (1.8)$$

У цьому виразі добуток  $n \cdot e \cdot \mu_n$  являє собою питому провідність  $\sigma_n$ , це випливає з закону Ома для густини струму

$$j_{\text{ндр}} = \sigma_n \cdot E. \quad (1.9)$$

Таблиця 1.2 - Рухливість носіїв заряду

Напівпровідник	Рухливість електронів при $T = 290 \text{ К}$ , $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$	Рухливість дірок при $T = 290 \text{ К}$ , $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$
Ge	0,45	0,35
Si	0,13	0,05
GaSb	0,40	0,14
InAs	3,30	0,04
InSb	7,70	0,08

Аналогічні співвідношення можуть бути записані і для дірок. Тоді густина повного струму дрейфу у власному напівпровіднику

$$j_{\text{др}} = n \cdot e \cdot \mu_n \cdot E + p \cdot e \cdot \mu_p \cdot E = (\sigma_n + \sigma_p) \cdot E, \quad (1.10)$$

а повна питома провідність

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p = n \cdot e \cdot (\mu_n + \mu_p). \quad (1.11)$$

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 (таблиця 1.2), 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 р-типу - напівпровідник n-типу (НП(р) - 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 електро-провідності 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 та 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. В інжекційних контактах зовнішнє електричне поле порушує рівновагу потоків носіїв заряду через контакт двох твердих тіл з різними роботами виходу електронів.

Розглянемо різні типи контактів більш детально.

**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 р-

p- 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.

**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. 2.3) 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 не випрямним (омічним) контактом.

### Контакт метал-напівпровідник р-типу (Me-НП(p)).

У цьому випадку (рис. 2.2) з напівпровідника в метал переходить більша кількість електронів, ніж в зворотному

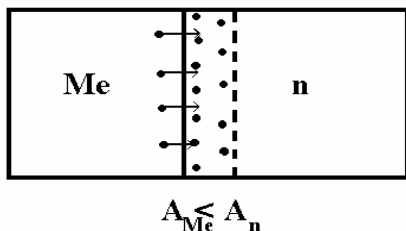


Рисунок 2.2 - Контакт металу з напівпровідником n-типу

напрямку, і в приграничному шарі напівпровідника також формується область, яка збагачена основними носіями (дірками), з малим значенням опору. Цей тип контакту також не випрямний. Обидва типи не випрямних контактів застосовуються в напівпровідникових приладах при розробці виводів від n- та p-областей. Для цієї мети підбирають відповідні метали.

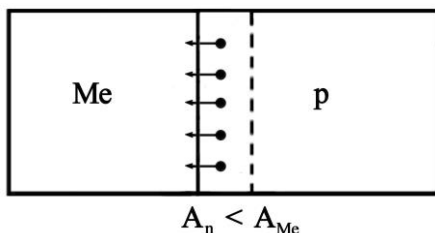


Рисунок 2.3 - Контакт металу з напівпровідником p-типу

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 р-типу при  $A_{Me} < A_n$ .

## **2.4 Характеристики 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.

Розглянемо діод Шоткі (ДШ) як завершений самостійний, конструктивно виділений елемент ІМС, побудований на основі бар'єра Шоткі.

Найпростішу структуру діода Шоткі в інтегрованій мікросхемі (ІМС) зображено на рисунку 2.4. 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/м<sup>3</sup>. 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 дифузією й рекомбінацією. Надлишковий заряд електронів у металі миттєво розподіляється в об'ємі і спричинює дрейфовий струм. Внаслідок цього в контакті метал-напівпровідник немає дифузійної ємності, яка стримує швидкодію ДШ. Діоди Шотткі можуть працювати на частотах до 100 ГГц.

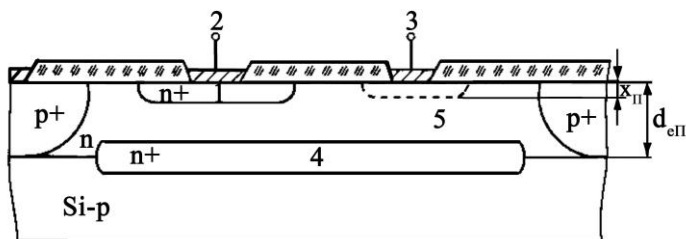


Рисунок 2.4 - Структура діода Шотткі

Вольт-амперна характеристика ДШ майже така, як діода з р-п-переходом. Проте на її вигляд впливає форма потенціального бар'єра біля поверхні металу. Сили дзеркального відображення згладжують бар'єр, а зовнішня напруга спричинює ефект, подібний ефекту Шоттки за емісії електронів у вакуум.

Простий механічний контакт металу і напівпровідника не дає бажаних результатів, оскільки на поверхнях, що контактують, зберігаються атоми і молекули адсорбованого повітря, поверхневі оксидні плівки, а поверхневий шар напівпровідника має багато домішок і дефектів структури. Усе це перешкоджає створенню однорідного контакту.

Енергетичні діаграми напівпровідника n-типу і металу, зорієнтовані відносно енергетичного рівня вільного електрона, зображено на рис. 2.5. Розглянемо енергетичне положення електронів провідності в металі й напівпровіднику відносно положення вільних електронів. Оскільки електрони провідності взаємодіють з іонами кристалічних ґраток, енергія їх значно менша за енергію вільних електронів.

Щоб електрон з dna зони провідності металу або напівпровідника перемістився у вакуум (став вільним), йому потрібно передати енергію, що дорівнює зовнішній роботі виходу відповідно  $E_m$  і  $E_n$ . Зовнішня робота виходу залежить від властивостей кристалічної ґратки і для використовуваних матеріалів дорівнює 4 - 6 еВ (зовнішня робота виходу для Si дорівнює 4,15 еВ). Для переміщення електрона з рівня Фермі у вакуум потрібно затратити термодинамічну роботу виходу  $E_{mm}$  і  $E_{nm}$ . Термодинамічна робота виходу для використовуваних металів дорівнює 4-6 еВ (для Al - 4,1, Mo - 4,7, Pt - 5,3). Хоча висота

потенціальних бар'єрів для електронів металів і напівпровідників значна, проте деяка частина електронів провідності може вийти у вакуум.

Оскільки метал ізольовано від напівпровідника, то емісія електронів не буде довготривалою. Зі зменшенням кількості електронів у кожному з матеріалів вони заряджатимуться позитивно. Електричне поле, яке при цьому виникає, стримуватиме емісію електронів. Наблизимо метал до напівпровідника (приведемо в контакт) на відстань сталої ґратки. Дослідимо випадок, коли термодинамічна робота виходу з металу більша за відповідну з напівпровідника ( $E_{mn} > E_{nm}$ ). У перший момент між металом і напівпровідником електричного поля не буде. Виникне два потоки електронів: перший - із напівпровідника в метал; другий - із металу в напівпровідник. Потік електронів із напівпровідника буде більшим, ніж з металу. В металі накопичується негативний заряд електронів, а в напівпровіднику - позитивний заряд іонізованих атомів домішки. Між металом і напівпровідником виникне різниця потенціалів  $U$ . За таких умов для переходу електрона з напівпровідника в метал йому потрібно долати додатковий

$$\Delta E = -qU. \quad (1.12)$$

Потік електронів із напівпровідника в метал зменшуватиметься:

$$j_{nm} = \frac{m(kT)^2}{2\pi^2 h^3} \exp\left(-\frac{E_{nt} + \Delta E}{kT}\right), \quad (1.13)$$

а потік електронів із металу в напівпровідник залишиться без змін.

Різниця потенціалів між матеріалами зростатиме доти, доки потоки не зрівняються і настане

термодинамічна рівновага:  $j_{HM} = j_{MH}$ . Як наслідок, максимальна висота додаткового бар'єра в стані рівноваги становитиме

$$\Delta E_0 = E_{MT} - E_{HT}. \quad (1.14)$$

Це означає, що в стані рівноваги рівні Фермі металу і напівпровідника суміщаються (рис. 1.8 в).

Різницю потенціалів на межі металу і напівпровідника за умов рівноваги називають висотою потенціального бар'єра:

$$U_0 = \frac{\Delta E_0}{q} = \frac{E_{MT} - E_{HT}}{q}. \quad (1.15)$$



Енергетичний рівень електрона у вакуумі

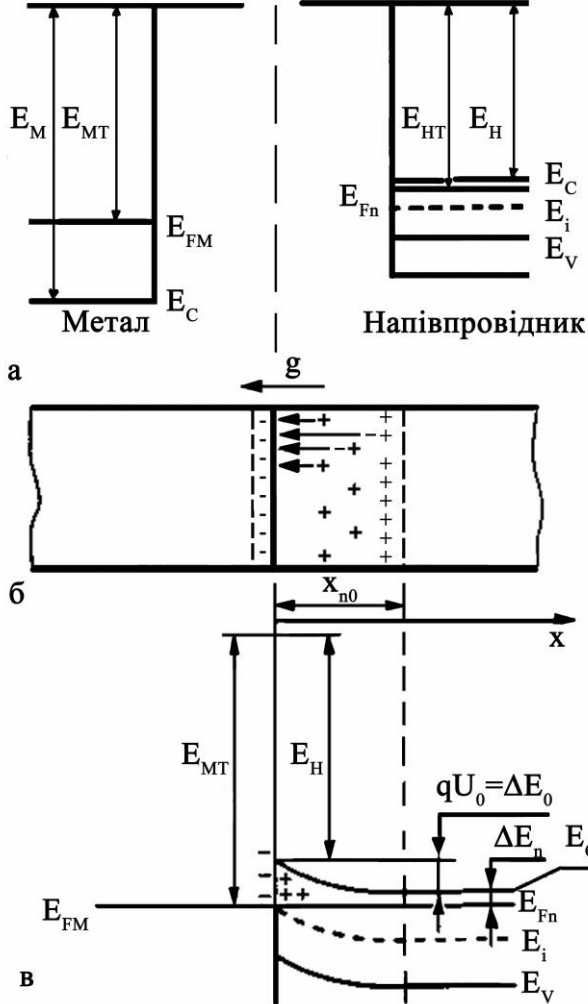


Рисунок 2.5 - Енергетичні діаграми металу та напівпровідника: а - метал і напівпровідник ізольовані; б -; в - метал і напівпровідник у контакті бар'єр:

У переході метал-напівпровідник створюється електричне поле, вектор напруженості якого напрямлений від напівпровідника до металу. Електричне поле майже не проникає в метал, а локалізується в приповерхневому шарі напівпровідника, товщину  $x_n$  якого розраховують так само, як для р-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, і не може змінити структуру енергетичних зон, а лише викривлює їх. Оскільки рівні Фермі металу і напівпровідника за умов рівноваги суміщаються, то відстань від дна зони провідності напівпровідника  $E_C$  до рівня Фермі  $E_{Fn}$  залежить від координати  $x$  і за енергетичною діаграмою вона визначається так:

$$\Delta E_n(x) = E_C - E_{Fn} + \Delta E(x), \quad (1.16)$$

де  $E_C$  - енергія дна зони провідності в глибині напівпровідника.

На відстані від контакту метал-напівпровідник більшій за  $x_{n0}$ , величина  $E_C - E_{Fn}$  визначається рівнем легування напівпровідника. Можна прийняти, що за температури 300 К концентрація електронів у зоні провідності  $n_0$ , як і концентрація іонізованих атомів донорної домішки, дорівнюватиме концентрації донорів у напівпровіднику n-типу  $N_d$ . У приповерхневому шарі на відстані  $x < x_{n0}$  рівень Фермі в напівпровіднику зміщуватиметься вниз, у напрямі валентної зони. Таке зміщення рівня Фермі пов'язане зі зменшенням концентрації електронів у приповерхневому шарі напівпровідника і відповідним зростанням потенціального бар'єра для електронів: від  $\Delta E(x)=0$  при

$x=x_{n0}$  до  $\Delta E(x)=\Delta E_0$  при  $x=0$ . Розподіл електронів у приповерхневому шарі напівпровідника визначається за формулою:

$$n(x) = n_0 \exp\left[-\frac{\Delta E(x)}{kT}\right] = N_D \exp\left[-\frac{U(x)}{U_T}\right], \quad (1.17)$$

де  $U(x) = \Delta E(x)/q$ ,  $U_T = kT/q$ .

Отже, подібно до р-n-переходу, контакт метал-напівпровідник за умови  $E_{mm} > E_{nm}$  створює на межі переходу потенціальний бар'єр  $U_0$  для електронів з області напівпровідника. У напівпровіднику виникає область просторового заряду (ОПЗ), збіднена основними носіями (електронами), а отже, заряджена позитивно. Електричне поле у переході майже не проникає в метал, а зосереджене у приповерхневому шарі напівпровідника. Такий контакт металу з напівпровідником дістав назву бар'єра Шоттки, а створені на його основі діоди - діодів Шоттки.

Залежно від полярності прикладеної до контакту напруги висота потенціального бар'єра і концентрація носіїв у приповерхневому шарі збільшаться або зменшаться:

$$U' = U_0 \pm U. \quad (1.18)$$

Якщо зовнішню напругу  $U$  ввімкнути у прямому напрямі, то вона послаблятиме електричне поле контакту і зменшуватиме висоту потенціального бар'єра:  $U' = U_0 - U$ .

Якщо зовнішню напругу  $U$  ввімкнути у зворотному напрямі, висота потенціального бар'єра зросте:  $U' = U_0 + U$ . Зросте товщина і збільшиться опір ОПЗ. Через контакт проходитиме лише зворотний струм термічно збуджених електронів металу в прискорювальному полі контактного шару.

## 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 р-n-переходів. Ці проблеми спричиняли крайові ефекти (рис. 1.9 а), які виникали по периметру металевого контакту в конструкції діода. Щоб уникнути крайового ефекту, були розроблені конструкції ДШ з розширеною металізацією, яка перекривала ізолювальний діелектричний шар  $\text{SiO}_2$  на деяку відстань від контакту з напівпровідником. Подальше удосконалення конструкцій ДШ привело до створення навколо контакту метал-напівпровідник захисного кільця р-типу (рис. 2.6). Напруга пробою збільшилась від 5 до 27 В, її збільшенню слугують конструкції з використанням захисного кільця і додаткового електрода (рис. 1.9 в), на який подають негативну напругу. В таких структурах напруга пробою близька до напруги пробою р-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. 2.6 г, не має перелічених недоліків. Контакт металу з напівпровідником здійснюється в спеціальному заглибленні в шарі n-типу.

Для таких конструкцій діодів висота потенціального бар'єра  $U_{MHO}$  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

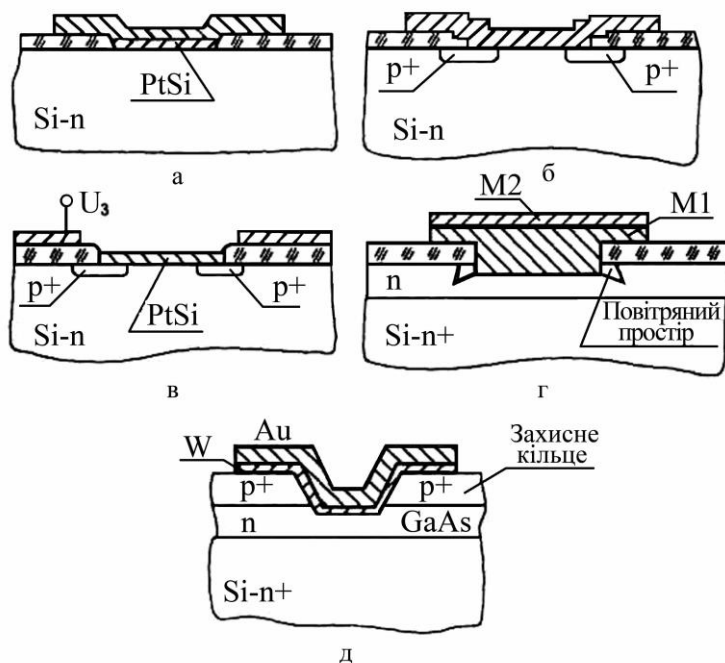


Рисунок 2.6 - Структури діодів Шотткі

вигорання. Напівпровідниковим матеріалом для цих діодів є арсенід галію. Діоди Шотткі зі структурою  $W-n-GaAs$  зображено на рис. 1.9 д. Стійкість до вигорання таких діодів дорівнює  $8 \cdot 10^{-7}$  Дж, висота потенціального бар'єра становить 0,64 В.

## 2.6 Ефект Ганна

**Ефект Ганна** - це ефект генерації височастотних 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  $E_1 - E_2$  (рис. 2.7). 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  $\Delta E$  (рис. 2.8). Якщо область підвищеної концентрації електронів перебуває ближче до катода, то  $\Delta E$  додається до зовнішнього електричного поля так, що поле усередині дипольного шару стає більшим, ніж зовні. Якщо при цьому дифузійний опір зразка додатний, тобто струм зростає із

зростанням поля, то струм  $i$  усередині шару більший, ніж зовні ( $\Delta j > 0$ ). Якщо ж дифузійний опір

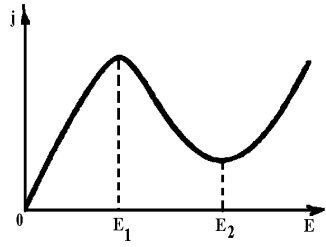


Рисунок 2.7 - Вольт-амперна характеристика:  $E$  - електричне поле, яке створюється різницею потенціалів;  $j$  - густина струму

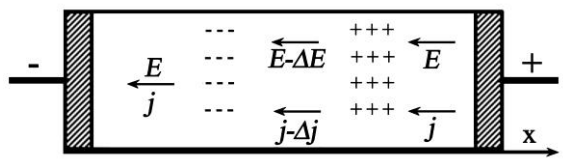


Рисунок 2.8 - Схема розвитку електричного домену

від'ємний (струм зменшується із зростанням поля), то струм менше там, де  $E$  більше, тобто всередині шару, і неоднорідність наростає. Внаслідок цього виникає електричний домен. Поза доменом  $E < E_1$ , завдяки чому нові домени не виникають. Стійкий стан зразка - це стан з одним доменом. Оскільки домен утворюється електронами провідності, він рухається в напрямку їх дрейфу із швидкістю  $v$ , величина якої є близькою до дрейфової швидкості. Домен виникає поблизу катода і, дійшовши до анода, зникає. У міру його зникнення падіння напруги на домені зменшується, а на іншій частині зразка збільшується. Одночасно зростає і струм у зразку. Частота коливань струму  $f = v/l$ .

У GaAs з електронною провідністю при кімнатній температурі  $E_f \sim 3 \cdot 10^5$  В/м,  $v \sim 10^5$  м/с і при  $l = 50 - 300$  мкм,  $f = 0,3 - 2$  ГГц. Розмір домену складає 10 - 20 мкм. Ефект Ганна, крім GaAs спостерігається в напівпровідниках InP, CdTe, ZnS, InSb, InAs та Ge з дірковою провідністю.

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

## **Розділ 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. 1.12 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) і, виконавши необхідні електричні з'єднання із зовнішніми виводами, герметизують.

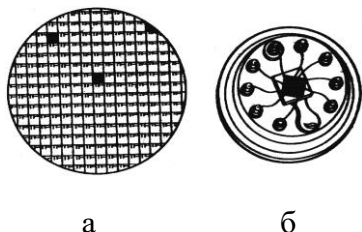


Рисунок 3.1 - ІМС:

а - підкладка;

б - з'єднання із зовнішніми виводами корпусу

Розрізняють чотири типи ІМС: планарно-дифузійні (однокристалні) на біполярних (БП) структурах; сумісні (з тонкоплівковими пасивними елементами); на основі структур метал-діелектрик-напівпровідник (МДН)); багатокристалні.

У планарно-дифузійних мікросхемах на біполярних структурах елементи являють собою області з різним типом електропровідності усередині монокристалічної напівпро-відникової 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 ІМС з тонкоплівковими елементами на підкладці з кремнію. Осадження тонких плівок проводять безпосередньо після виконання усіх дифузійних операцій, за допомогою

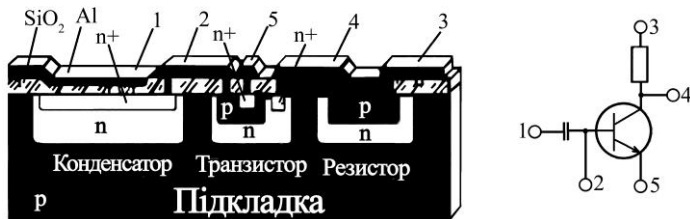


Рисунок 3.2 - Структура та електрична схема планарно- дифузійної НІМС

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.

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

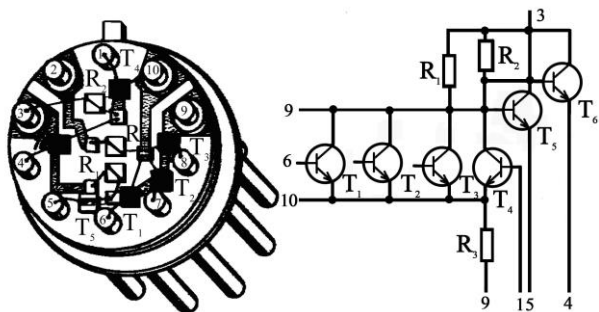


Рисунок 3.3 - Структура та електрична схема багатокристалльної НІМС

важко автоматизувати операції збирання. Багатокристалльні мікросхеми мають кращі робочі характеристики, оскільки вплив паразитних зв'язків у них менший за однокристалльні ІМС.

### 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 мм<sup>2</sup>. 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.

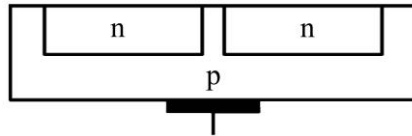


Рисунок 3.4 - Ізоляція n-p-переходом

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 опорі 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 SiO<sub>2</sub>, 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.

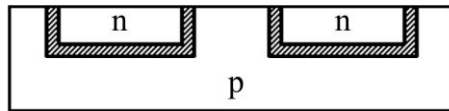


Рисунок 3.5 - Ізоляція діелектричним шаром

Третій тип ізоляції - *комбінований*. У цьому випадку бокові сторони «кишень» ізолювані діелектричним шаром  $\text{SiO}_2$ , 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.

Одержала поширення *ізоляція типу кремній на сапфірі*. На сапфіровій підкладці, яка є гарним діелектриком, нарощують епітаксіальний шар кремнію (~ 1 мкм). Це стає можливим тому, що сапфір і кремній мають однакову

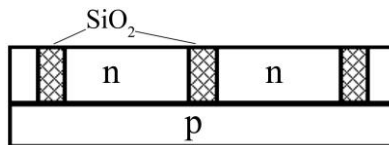


Рисунок 3.6 - Комбінована ізоляції

кристалічну решітку. Шар кремнію протравлюють так, що утворюються кремнієві «острівки» (рис.3.7). В цих «острівках» методом дифузії формуються необхідні елементи, які ізолюються



Рисунок 3.7 - Ізоляція типу «кремній на сапфірі»

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.

### 3.3 Транзистори у НІМС

#### 3.3.1 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, трипольосниками, що містять три напівпровідникові шари з різним типом електропровідності - *n-p-n* або *p-n-p* (рис.3.8).

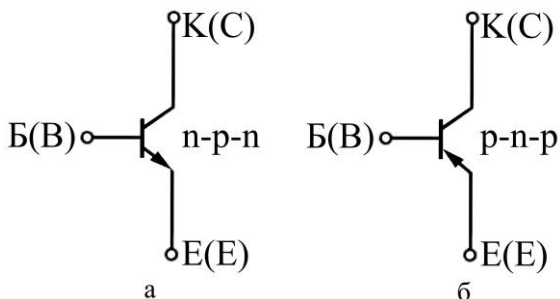


Рисунок 3.8 – Графічне позначення БТ

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 *n-p-n*- та *p-n-p*-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 *p-n*-переходи, які називають так само, як і області, між якими вони розташовані (рис. 3.9): *p-n*-перехід база-емітер (ВЕ) (керувальний перехід); *p-n*-перехід база-колектор (ВС).

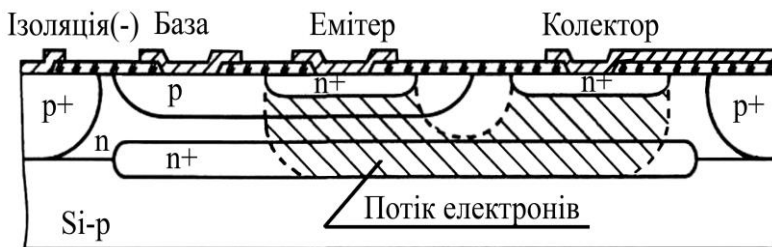


Рисунок 3.9 – Структура біполярного транзистора, виконаного за планарно-епітаксійною технологією із заглибленим  $n^+$ -шаром та ізоляцією обернено зміщеним p-n-переходом

**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, інжектованих 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 швидкість. Транзистори  $n^+$ -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 n-p-n-



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  $n$ - $p$ - $n$ -транзисторів.

Усі виводи від областей транзистора розміщують в одній площині на поверхні кристала. Така структура біполярного транзистора (див. рис. 1.20) 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.

Планарно-епітаксійний  $n^+$ - $p$ - $n$ -транзистор із заглибленим  $n^+$ -шаром (рис.3.10) створюють за допомогою двох дифузій, базової та емітерної, в рівномірно леговану область колектора  $n$ -типу. Концентраційні профілі домішок можуть мати вигляд, наведений на рис. 3.10. Криві, зображені тонкими лініями, є концентраційними профілями домішок, які були введені у напівпровідникову пластину двома дифузіями. Крива, зображе на товстою лінією, є результуючим концентраційним профілем домішок у кожній з трьох областей транзистора (Е, Б, К). Найбільш легованою є область емітера, найменш - область колектора.

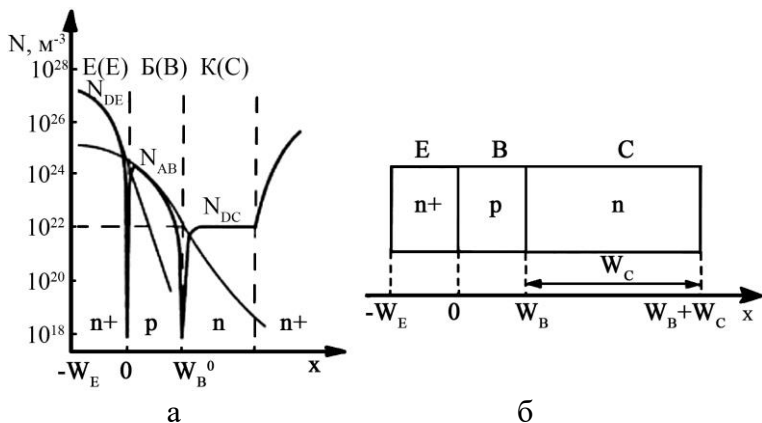


Рисунок 3.10 – Концентраційні профілі домішок в основних областях біполярного  $n^+$ - $p$ - $n$ -транзистора (а); ідеалізована одновимірна модель біполярного транзистора (б)

Підсилення в БТ відбувається завдяки тому, що незначні зміни напруги між базою та емітером спричиняють великі зміни струму між емітером і колектором. Якщо  $p$ - $n$ -перехід база-емітер поляризувати у прямому напрямі (на базу відносно емітера подати позитивну напругу), то висота потенціального бар'єра знизиться, і з області емітера в область бази буде інжектовано електрони. Більша частина електронного потоку з області емітера перетне базову область  $p$ -типу, епітаксійний шар  $k$ -типу, заглиблений шар  $n^+$ -типу, знову епітаксійний шар  $n$ -типу і область  $n^+$ -типу колектора. Шлях носіїв заряду показано на рис. 3.10.

Основною областю транзистора буде область під емітером, тому вертикальний потік електронів від  $n^+$ -емітера до заглибленого  $n^+$ -шару у відповідних областях зображують ідеалізованою одновимірною моделлю транзистора (рис. 3.11). Напруги  $U_{BE}$  та  $U_{BC}$  створюють

пряме та зворотне зміщення на  $p$ - $n$ -переходах БЕ(ВЕ) та БК(ВС). Залежно від полярності напруг  $U_{BE}$  та  $U_{BC}$  транзистор може працювати в одному з чотирьох режимів: пряме зміщення переходів ВЕ та ВС - режим насичення; зворотне зміщення переходів ВЕ та ВС - режим блокування; пряме зміщення переходу ВЕ та зворотне зміщення переходу ВС - активний режим; зворотне зміщення переходу ВЕ та пряме зміщення переходу ВС - зворотно-активний режим.

В активному режимі БТ діє як підсилювач сигналу, який подають на перехід база-емітер (рис. 3.11). За прямого зміщення  $p$ - $n$ -переходу база-емітер в область бази дифундують електрони. Концентрація електронів значно менша, ніж концентрація дірок у базі; взаємним відштовхуванням електронів у базі нехтують. Оскільки товщина області бази набагато менша за дифузійну довжину електронів, вони дифундують крізь область бази майже без рекомбінації, тому майже всі електрони досягають збідненої області  $p$ - $n$ -переходу база - колектор і втягуються туди електричним полем. Ці електрони створюють струм колектора  $I_c$ . Струм бази  $I_b$  створюється в результаті рекомбінації дірок та електронів в ОПЗ між емітером і базою й струму основних носіїв заряду бази-дірок, які інжектують з бази в емітер. Струм бази буде малим порівняно зі струмом колектора, оскільки швидкість рекомбінації в базі дуже мала і концентрація домішки у ній набагато менша, ніж відповідна концентрація домішки в емітері. Струм емітера  $I_E$  складається зі струмів бази і колектора. Співвідношення між струмами колектора й емітера визначається статичним коефіцієнтом передавання емітерного струму  $\alpha_F$ , а підсилювальні властивості БТ визначаються статичним коефіцієнтом підсилення транзистора  $\beta_F$ .

### 3.3.2 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.3.12). У випадку БК-Е (база-колектор-емітер) база і

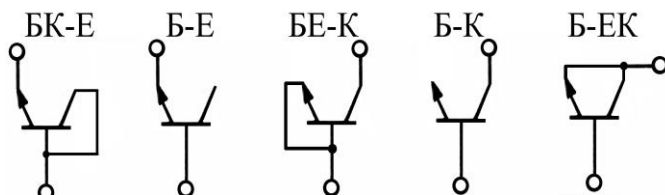


Рисунок 3.12 - Варіанти використання транзисторів у діодному ввімкненні

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.

### 3.3.3 Напівпровідникові резистори

У ІМС використовуються дифузійні резистори - області усередині кристалу з тим або іншим типом провідності (рис. 3.13). Опір дифузійного резистора залежить від довжини, ширини та товщини області, яка виконує роль резистора, питомого опору (концентрації домішок). Резистор типу  $p$  (рис. 3.13) 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. 3.13) 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  $p$  (рис. 3.13) 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.

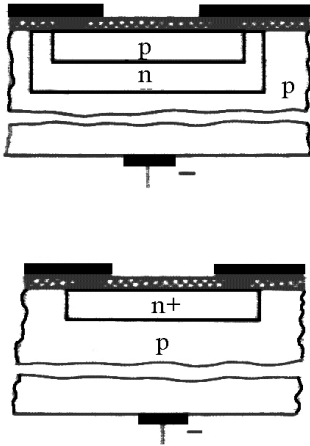


Рисунок 3.13 - Дифузійні резистори НІМС: р-типу (а), n-типу (б)

### 3.3.4 Напівпровідникові конденсатори

У дифузійних конденсаторах НІМС використовується бар'єрна ємність  $n$ - $p$ -переходу. Ємність такого конденсатора (рис. 3.14) 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

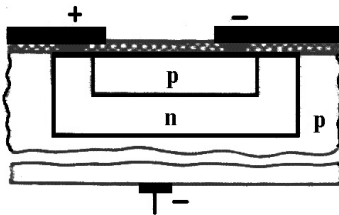


Рисунок 3.14 - Структура дифузійного конденсатора

коефіцієнт ємності (ТКС) складає величину  $\sim 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ , напруга пробою  $U_{n\leq} 10 \text{ В}$ . 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  $\text{SiO}_2$ . Друга - металева (алюмінієва) плівка, нанесена поверх вищевказаного шару. Номінали таких конденсаторів бувають до 500 пФ з допуском  $\pm 25\%$ ;  $U_n = 20 \text{ В}$ . Переваги МОН-конденсаторів - низький ТКС -  $2 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$  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.

### 3.3.5 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 3.15. 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. Значення  $R$  та  $C$  підібрані так, що  $R \gg 1/(\omega C)$ . Тоді струм  $I_{RC}$  в  $RC$ -ланцюгу можна приблизно

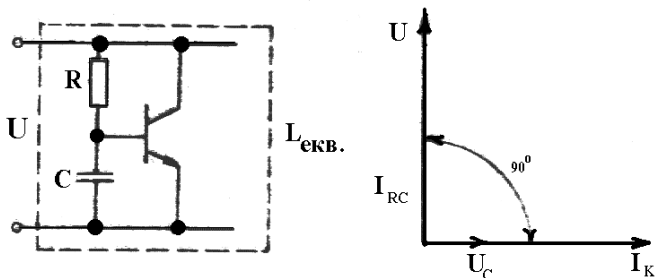


Рисунок 3.15 - Еквівалент індуктивності

ураховувати співпадаючим по фазі з напругою  $U$ . Але напруга  $U_C$  на конденсаторі відстає від струму  $I_{RC}$  на  $90^\circ$ . Напруга  $U_C$  подається на базу та керує колекторним струмом транзистора  $I_K$ , який співпадає по фазі з напругою  $U_C$ , тобто відстає від напруги  $U$  на  $90^\circ$ . Таким чином, транзистор в цій схемі створює для напруги  $U$  опір, еквівалентний деякому індуктивному опору  $x_L = U/I_K = \omega L_{екв}$ . Інакше кажучи, транзистор є еквівалентним деякій індуктивності  $L_{екв} = U/(\omega I_K)$ . Якщо встановлювати більше чи менше значення струму  $I_K$ , можна одержувати різні значення  $L_{екв}$ . Оскільки опір RC-ланцюга в багато разів більший  $x_L$ , то впливом цього ланцюжка нехтують.

## Розділ 4 ПЛІВКОВІ ТА ГІБРИДНІ ІНТЕГРАЛЬНІ МІКРОСХЕМИ

### 4.1 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. 4.1).

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. 4.1).

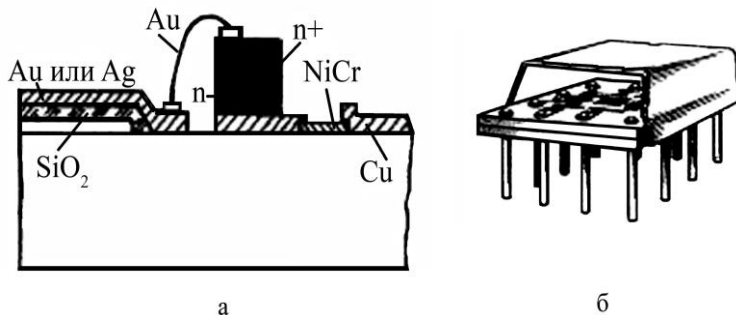


Рисунок 4.1 - Структура гібридної ІМС (а), загальний вигляд товстоплівкової ІМС (б)

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 ( $0,2 \text{ мкмФ/см}^2$  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.

## 4.2 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 мікрозборок. 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 мікрозборок);
- 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.

### **4.3 Конструктивно-технологічні особливості і робочі характеристики плівкових елементів ГМС**

#### **4.3.1 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 1.2.

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.

Таблиця 1.2 - 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

#### 4.3.2 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 з тим 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.



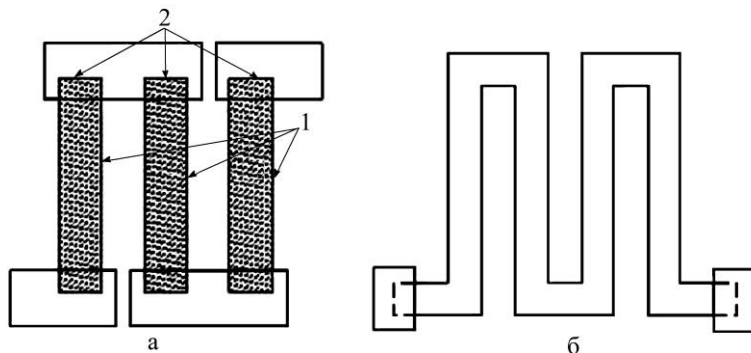


Рисунок 4.2 - Резистори інтегрованих мікросхем

Плівкові резистори (рис. 4.2) 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. 4.2 а) та на зразок меандру (рис. 4.2 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 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.

Опір тонкоплівкової резистивної смужки 1 для однорідної за товщиною резистивної плівки визначають за формулою:

$$R = \rho \frac{l}{db} = \left( \frac{\rho}{d} \right) \left( \frac{l}{b} \right) = R' k_{\phi}, \quad (1.20)$$

де  $\rho$  - питомий опір матеріалу плівки;  $d$  - товщина плівки;  $l, b$  - довжина і ширина резистивної смужки;  $R' = \rho/d$  - опір

квадрату резистивної плівки, Ом/□;  $k_\phi = l/b$  - коефіцієнт форми або число квадратів резистивної смужки.

Виводи 2 є контактними площинками до резистивної смужки, які переходять у провідники. Контактні переходи будь-яких типів мають кінцевий опір  $R_k$ , який залежить від  $R'$  резистивної смужки, ширини плівки  $b$ , питомої електропровідності контактного переходу і величини перекриття резистивної та провідникової плівок.

Для низькоомних резисторів в опір резистора потрібно враховувати також опір двох контактних переходів, тому опір плівкового резистора визначають за формулою:

$$R = R_0 k_\phi + 2R_k. \quad (1.21)$$

Резистивні смужки, як і плівкові провідники, отримують вакуумними методами з елементів, резистивних сплавів, керметів та ін. Основні характеристики матеріалів, використовуваних для виготовлення плівкових резисторів, наведено в таблиці 1.3.

Можливості використовуваних матеріалів дають змогу одержувати опір шару  $R_\square$ , від десятків омів до сотень кілоомів на квадрат і формувати резистори у широкому діапазоні опорів з досить високою точністю (близько 10 %). На одній основі можна отримати відхилення значень опорів резисторів близько 1 %. Плівкові резистори, створені на діелектричній основі, мають малу паразитну ємність і надійну ізоляцію.

Можливості використовуваних матеріалів дають змогу одержувати опір шару  $R_\square$ , від десятків омів до сотень кілоомів на квадрат і формувати резистори у широкому діапазоні опорів з досить високою точністю (близько 10 %). На одній основі можна отримати відхилення значень опорів резисторів близько 1 %. Плівкові резистори,

створені на діелектричній основі, мають малу паразитну ємність і надійну ізоляцію.

Найважливішим параметром для плівкових резисторів є термічний коефіцієнт опору  $\beta$ . Як правило, його визначають для стабільних плівок, які пройшли термообробку. Установлено, що коефіцієнт  $\beta$  залежить від товщини плівки, причому із зменшенням товщини  $\beta$  зменшується, а при збільшенні наближається до значення, яке характерне для масивного металу. Для окремих типів металевих плівок  $\beta$  має від'ємне значення і може бути різним в залежності від технології одержання плівок. Важливою задачею при розробці резисторів інтегральних мікросхем є одержання найменшого значення термічного коефіцієнту опору в діапазоні робочих температур. Як показують результати досліджень, існує область товщин плівок, для якої є характерним малий термічний коефіцієнт опору, який наближається до нульового значення. Ця область товщин називається перехідною. Для конкретного

Таблиця 1.3 - Характеристики матеріалів плівкових резисторів

Матеріал резистора	Матеріал контактних площинок	$R'$ , Ом/□	$\beta \times 10^4$ град <sup>-1</sup>
Хром	Cu	500	0,6
Ніхром	Cu	300	1,0
Тантал ТВЧ	Al з підшаром V (Ni-Cr)	100	-2,0
Сплав РС-3001	Au з підшаром Cr (Ni-Cr)	1000-2000	-0,2
Полісиліцій $p$ -типу	Алюміній	50 - 250	+0,5.-25
Полісиліцій $n^+$ -типу	Алюміній	2 - 5	+1,0

матеріалу вона визначається умовами одержання плівки та може переміщуватися в залежності від цих умов.

Для виготовлення товстоплівкових резисторів застосовують пасти на основі золота, платини, паладію та ін. Пасти наносять на поверхню діелектричної основи крізь трафарет. Товщина шарів становить близько 20 мкм. Відносна похибка опору резистора може бути  $\pm 0,4$ . Для зменшення похибки опору товстоплівкового резистора застосовують індивідуальне підстроювання.

### 4.3.3 Плівкові конденсатори

Плівкові конденсатори (рис. 1.29 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

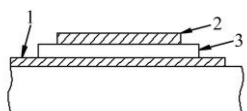
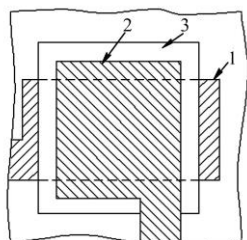


Рисунок 4.3 – Конденсатори ІМС



100 - 200 В; температуру випаровування 1000 - 1200 °С; бути сумісним з матеріалом обкладинок. Ємність плоского плівкового

конденсатора визначають за формулою:

$$C = C_0 S + C_p P = (\varepsilon \varepsilon_0 / d) S + C_p P, \quad (1.22)$$

де  $\varepsilon$  - діелектрична проникність матеріалу діелектрика;  $d$  - товщина діелектрика (0,2-0,3 мкм);  $S$  - площа перекриття обкладинок;  $C_0 = (\varepsilon \varepsilon_0 / d)$  - питома ємність діелектрика;  $C_p$  - питома периметрична ємність, спричинена крайовим ефектом;  $P$  - периметр перекриття обкладинок.

За площі перекриття обкладинок  $S > 5 \text{ мм}^2$  крайовим ефектом можна знехтувати і ємність конденсатора розраховують за спрощеною формулою:

$$C = C_0 S = (\varepsilon \varepsilon_0 / d) S. \quad (1.23)$$

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/мм<sup>2</sup>, 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 багатошарових структурах конденсаторів за допомогою почергового нанесення провідникових і діелектричних плівок або використання діелектричних плівок з великим значенням  $\varepsilon$ .

Конденсатори ємністю менш як 30 пФ створюють за допомогою спеціальних конструкцій, одна з яких - гребінчата (рис.1.30).

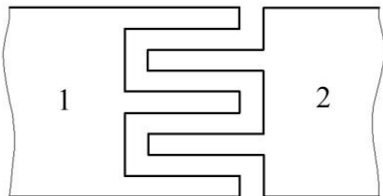


Рисунок 4.4 – Гребінчата структура конденсатора

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.

Ємність гребінчатого конденсатора може бути розрахована за формулою:

$$C = \beta_C \varepsilon_t L, \quad (1.24)$$

де  $\beta_C$  - коефіцієнт, що залежить від ширини плівкових провідників та відстані між ними. Для випадку  $b_1 = b_2 = b$ ,

$a = 0,3b$ ,  $\beta_C = 0,023$ ;  $\varepsilon_t = \frac{\varepsilon_B + \varepsilon_{pr}}{2}$  - розрахункове значення

діелектричної проникності з урахуванням діелектричної проникності основи  $\varepsilon_B$  і діелектричної проникності захисного шару  $\varepsilon_{pr}$ ;  $L$  - довжина периметра перекриття обкладинок.

Товщину діелектричної плівки  $d$  визначають з умови забезпечення необхідної електричної стійкості конденсатора:

$$d = \frac{Uk}{\xi_{\max}}, \quad (1.25)$$

де  $k$  - коефіцієнт запасу електричної стійкості ( $k = 2-10$ );  $\xi_{\max}$  - максимальна електрична стійкість діелектрика. Товщину діелектрика вибирають у межах 0,05-1,0 мкм.

Для виготовлення плівкових конденсаторів використовують такі сполуки:  $SiO$ ,  $SiO_2$ ,  $GeO$ ,  $ZnS$ ,  $MgF_2$ ,  $BaTiO_3$ ,  $CrTiO_3$ ,  $Al_2O_3$ ,  $TaO$  та ін. Електричні характеристики деяких діелектричних матеріалів плівкових конденсаторів наведено в таблиці 1.4. Тонкоплівкові конденсатори мають високу добротність, широкий частотний діапазон. Відносна похибка ємності плівкових конденсаторів становить 0,1 - 0,15. Для формування товстоплівкових конденсаторів використовують діелектричні пасти, які мають  $\epsilon > 500$  (наприклад, на основі титанату барію). Використовуючи ці діелектрики, створюють товстоплівкові конденсатори з питомою ємністю 150 - 200 пФ/мм<sup>2</sup>. Обкладки товстоплівкових конденсаторів виготовляють із провідникових паст.

Таблиця 1.4 - Електричні характеристики діелектричних матеріалів плівкових конденсаторів

Матеріал	$\epsilon$	$\xi_{\max} 10^{-5}$ , В/мм	$C_0$ , пФ/мм <sup>2</sup>	$U$ , В
Монооксид Si	5 - 6	2,0 – 3,0	50	60
			100	30
Монооксид Ge	11 - 12	1,0	50	10
			100	7
			1500	5
Боросилікатне скло	4	3,0 – 4,0	25	24
			50	15
			100	10
Трисульфід Sb	14	2,0	50	10
			100	5
Пентаоксид Ta	23	2,0	600	15
			1000	10

Діоксид Si	4	1,5 - 10,0	50 100	
------------	---	------------	-----------	--

#### 4.3.4 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.4.5 а), плоских квадратних (рис.4.5 б) спіралей або окремих витків (рис. 4.5 в), які наносять на діелектричну або магнітну основу чи плівку.

Основними параметрами плівкових індуктивних елементів є індуктивність  $L$ , добротність  $Q$ , власна 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. Індуктивність плоскої спіралі круглої форми розраховують за формулою:

$$L \approx 5 \frac{(D_2 + D_1)^2 W^2}{15D_2 - 7D_1}, \quad (1.26)$$

а індуктивність плоскої спіралі квадратної форми - за формулою:

$$L \approx 6 \frac{(D_2 + D_1)^2 W^2}{15D_2 - 7D_1} \quad (1.27)$$



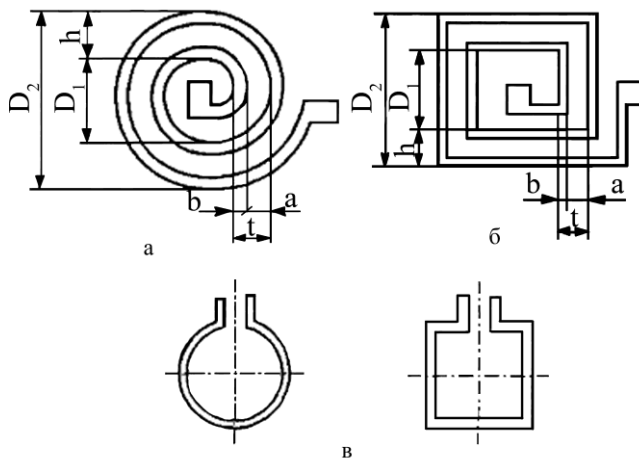


Рисунок 4.5 - Індуктивні елементи ІМС

де  $D_1, D_2$  - внутрішній та зовнішній діаметри спіралі, мм;  $W$  - число витків (індуктивність  $L$  вимірюється в нГн).

З метою збільшення індуктивності спіралей застосовують основи з матеріалів з підвищеною магнітною проникністю  $\mu$  або покривають спіралі плівками з підвищеним значенням  $\mu$ . Плівкові спіралі квадратної форми мають за тих самих значень  $D_1, D_2, W$  більшу індуктивність, ніж спіралі круглої форми.

Оскільки провідник спіралі має велику довжину, його опір досягає одиниць омів, що знижує добротність індуктивних елементів. Максимального значення добротності досягають для круглої спіралі за співвідношення  $D_1/D_2 = 0,4$ , а для квадратної спіралі -  $D_1/D_2 = 0,36$ . Проте квадратну конструкцію індуктивного елемента легше виконати і вона займає меншу площу, ніж кругла. Мінімальну площу займають індуктивні елементи, внутрішній діаметр яких  $D_1$  дорівнює нулю й співвідношення  $D_1/D_2 = 0$ .

Значення добротності для круглої спіралі розраховують за таким виразом:

$$Q = 2 \cdot 10^3 \frac{Wb(D_2 + D_1)\sqrt{f}}{15D_2 - 7D_1} \quad (1.28)$$

а для квадратної:

$$Q = 1,6 \cdot 10^3 \frac{Wb(D_2 + D_1)\sqrt{f}}{15D_2 - 7D_1} \quad (1.29)$$

де  $b$  - ширина провідника, мм;  $f$  - частота, ГГц.

Індуктивні елементи надвисоких частот мають значення індуктивності до 10 - 20 нГн, їх виконують у вигляді круглого або квадратного витка (рис. 1.31 в). Індуктивність плоского прямокутного провідника розраховують за формулою:

$$L = 0,2l \left[ \ln \left( \frac{l}{b} + d \right) + 1,19 + 0,22 \frac{(b+d)}{l} \right] \quad (1.30)$$

де  $l$  - індуктивність, нГн;  $l$ ,  $b$ ,  $d$  - відповідно довжина, ширина і товщина прямокутного провідника, мм.

За допомогою наведеної формули розраховують індуктивність плоских виводів компонентів. Індуктивність круглого витка обчислюють за формулою:

$$L = 0,2l \left[ \ln \left( \frac{2l}{b+d} \right) - 2,451 \right] \quad (1.31)$$

де  $L$  - індуктивність, нГн;  $l$ ,  $b$ ,  $d$  - відповідно периметр, ширина і товщина провідника витка, мм.

Індуктивність квадратного витка визначають за формулою:

$$L = 0,2l \left[ \ln \left( \frac{2l}{b+d} \right) - 2,853 \right] \quad (1.32)$$

де  $L$  - індуктивність, нГн;  $l$ ,  $b$ ,  $d$  - відповідно сторона квадрата, ширина і товщина провідника витка, мм.

Відрізок циліндричного провідника може також використовуватись як індуктивний елемент ІМС, його індуктивність розраховують за формулою:

$$L = 0,2l [\ln(l/d) + 0,386] \quad (1.33)$$

де  $L$  - індуктивність, нГн;  $l$ ,  $d$ , - відповідно довжина і діаметр провідника, мм.

Однак частіше формулу (1.33) використовують для розрахунків індуктивності виводів компонентів ГС. 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.

#### 4.3.5 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  $360^\circ$ . 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.

Основним параметром  $RC$ -структури є стала часу:

$$\tau = RC = R' C_0 l^2, \quad (1.34)$$

де  $R'$  - питомий поверхневий опір резистивної смужки;  $C_0$  - питома ємність конденсатора;  $l$  - довжина резистивної смужки.

Для побудови мікроелектронних пристроїв частотної селекції використовують  $RC$ -нульові фільтри, в яких на заданій частоті  $\omega_0$  коефіцієнт передачі дорівнює нулю (рис. 4.6).

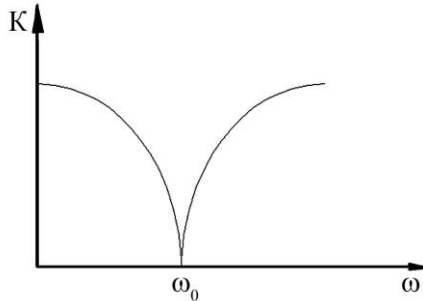


Рисунок 4.6 – Характеристика RC-нульового фільтра ІМС

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.

### **4.3.6 Характеристики плівкових матеріалів провідників та контактних площадок**

У гібридних інтегральних мікросхемах з'єднання між елементами виготовляють з металевих плівок, яким необхідно мати наступні властивості: високу електропровідність (низький питомий опір); достатньо високу адгезію до діелектричної підкладки; корозійну стійкість; забезпечувати можливість приєднання контактів з дроту.

Жоден із існуючих металів не відповідає всім цим вимогам, тому все більше застосування в мікроелектроніці знаходять багатошарові плівкові структури (багатошарові плівки). Розглянемо тришарову плівку, як паралельне

з'єднання трьох окремих шарів (співвідношення 1.35 і 1.36):

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}, \quad (1.35)$$

$$R = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3}. \quad (1.36)$$

Достатньо, щоб один із шарів мав великий опір. Нижній шар багат шарової плівки виготовляють з матеріалів, які мають високу адгезію до підкладки (Cr, Mn, V, Ni-Cr). При певних умовах плівки вищевказаних металів можуть утворювати оксиди з фазовим складом Me (метал) + MeO. Наявність оксиду забезпечує високу адгезію плівок. Товщина адгезійного шару дорівнює 300 - 500 Å. Для забезпечення високої електропровідності застосовують плівки Ni, Cu, Au, Al. Таблиця 1.5 ілюструє типові характеристики найбільш поширених матеріалів, які використовують для виготовлення міжелементних з'єднань та контактних площадок мікросхем.

Для одержання тришарової плівки конденсацію у вакуумі необхідно провести три рази, тому вакуумна установка повинна мати три випарника. Конденсація шарів відбувається по черзі на підігріту підкладку для забезпечення достатньої адгезії. Після конденсації необхідно провести термічну обробку плівок для кристалізації та заліковування дефектів. У тонкопліткових ІМС виникає необхідність у перетинанні провідників один одним. Для цього потрібно використовувати конденсацію діелектричного шару.

Експериментально показано, що ємність одного перетинання для успішної роботи мікросхеми не повинна перебільшувати 2 пФ. Як матеріали для діелектричного шару використовують  $SiO$ ,  $SiO_2$  чи  $Al_2O_3$ . Мінімальна товщина діелектричних плівок становить 0,5 мкм. Ці матеріали мають питомий опір  $\sim 10^{14}$  Ом·м, пробивну напругу  $\sim 10^6$  В. При використанні міжшарової ізоляції у структурі метал-діелектрик-метал виникають гальванодифузійні ефекти. Суть в тому, що атоми металу будуть дифундувати в шар діелектрика під дією зовнішнього поля, в результаті чого відбувається руйнування діелектрика.

Таблиця 1.5 - Характеристики матеріалів для виготовлення міжелементних з'єднань та контактних площадок

Матеріал	Товщина, нм	Питомий опір, Ом·м	Спосіб приєднання зовнішніх виводів
Шар 1 Ni-Cr Шар 2 Cu Шар 3 Ni	10 - 30 400 - 1000 50 - 70	0,02 - 0,04	зварювання непрямим імпульсним нагрівом
Шар 1 Ni-Cr Шар 2 Cu Шар 3 Ag	10 - 30 400 - 1000 80 - 100	0,02 - 0,04	пайка мікропаяльником; зварювання непря-

			МІМ імпульсним нагрівом
Шар 1 Ni-Cr Шар 2 Cu Шар 3 Au	10 - 30 600 - 800 50 – 60	0,02 - 0,04	пайка мікропаяльником; зварювання непрямым імпульсним нагрівом
Шар 1 Ni-Cr Шар 2 Al Шар 3 Ni	40 - 50 250 - 350 50 – 70	0,10 - 0,20	зварювання подвійним електродом

## Розділ 5 ВЕЛИКІ ІНТЕГРАЛЬНІ СХЕМИ (ВІС)

### 5.1 Класифікація, основні параметри і галузі застосування ВІС

Основною тенденцією інтегральної микро-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.

Функціональна складність - середнє число перетворень у мікросхемі, що припадають на одну змінну:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=p} B_i \cdot N_{0i}}{n}, \quad (1.37)$$

де  $\sum_{i=1}^{i=p} B_i$  - кількість однокаскадних логічних елементів в інтегральній мікросхемі,  $N_{0i}$  - кількість розгалужень на виході кожного  $i$ -го каскаду;  $n$  - кількість змінних, поданих на входи інтегральної мікросхеми.

Інтегральна густина - кількість елементів, які припадають на одиницю площі ВІС:

$$\varpi = \frac{N}{S} = \frac{10^k}{S}, \quad (1.38)$$

Функціональна густина - кількість перетворень з однією змінною, які припадають на одиницю площі ВІС:

$$\tau = \frac{F}{S}. \quad (1.39)$$

Інформаційна складність - середня кількість елементів у ВІС, які припадають на перетворення однієї змінної:

$$H = \frac{N}{F} = \frac{10^k \cdot n}{\sum_{i=p}^{i=1} B_i \cdot N_{0i}}. \quad (1.40)$$

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 їхня сприйнятливність 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-підсистеми 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 підсистеми.

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.

## **Розділ 6 СУЧАСНІ НАПРЯМИ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОНІКИ**

### **6.1 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.).

## 6.2 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 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. 6.1), має електроди однакової площі з того самого матеріалу. Вольт-амперна характеристика такої комірки також симетрична (рис.6.2а). У несиметричній комірці площі електродів різні і вольт-

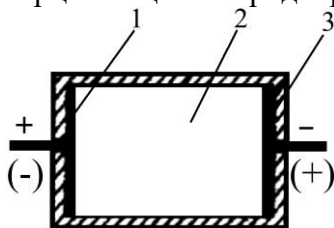


Рисунок 6.1 - Найпростіша електрохімічна комірка

амперна характеристика несиметрична (рис.6.2 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 щільною або капіляром, що з'єднує відсіки.

**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,

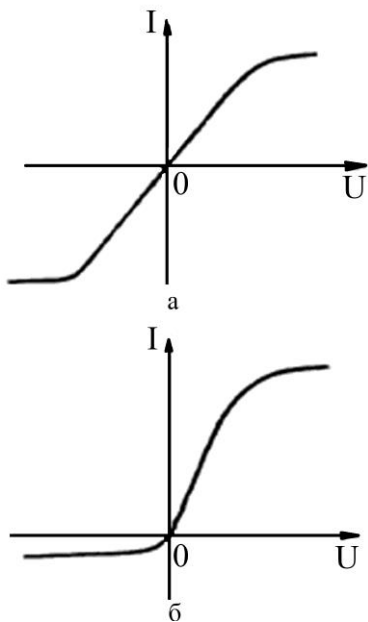


Рисунок 6.2 - Вольт-амперні характеристики симетричної (а) та несиметричної (б) електрохімічних комірок

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 хемотроніки 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 1.35. 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  $10^5$  Гц.

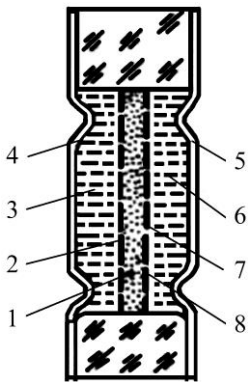


Рисунок 6.3 - Схема будови електрокінетичної комірки

Цікавими електрохімічними приладами для накопичення електричного заряду є **іонікси (іоністори)** - еквіваленти конденсаторів надвеликої ємності. Срібний і вугільний електроди розділені твердим електролітом, таким, як рубідій - іодид срібла  $RbAg_4I_5$  або сульфід - іодид срібла  $Ag_3SI$ . При протіканні струму на поверхні вугільного електрода, що є конденсаторі, питома ємність у іоніксів може досягати  $10 \text{ Ф/см}^2$ , тобто на три порядки вище, ніж в оксидних (електролітичних)

конденсаторів. Іонікси можуть зберігати заряд один- два роки зі зменшенням його усього лише на 3 - 5 %. Основним недоліком іоніксів є низька робоча напруга, не більше 0,5 В. Крім того, це інфранизькочастотні прилади, тому що вже при частоті 20 Гц їх ємність зменшується в 100 разів. Робочі температури в них від -60 до +175 °С. Для більш високих напруг іонікси з'єднують послідовно. Наприклад, для одержання ємності 5 Ф при робочій напрузі 5 В треба з'єднати послідовно 10 іоніксів ємністю по 50 Ф. Така батарея іоніксів може використовуватися як джерело струму і давати, наприклад, струм 1 мА протягом 5000 с при зниженні напруги від 5 до 4 В.

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 електрохімічних 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.

### **6.3 Магнітоелектроніка**

### **6.3.1 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).

Розрізняють декілька груп сучасних магнітних елементів: циліндричні магнітні домени; перетворювачі Холла; магніторезистори; магнітодіоди; магнітотранзистори та магнітотиристри.

### **6.3.2 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 дротової петлі із струмом (рис.1.38). 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 Гауса) - зміну магнітного опору під дією

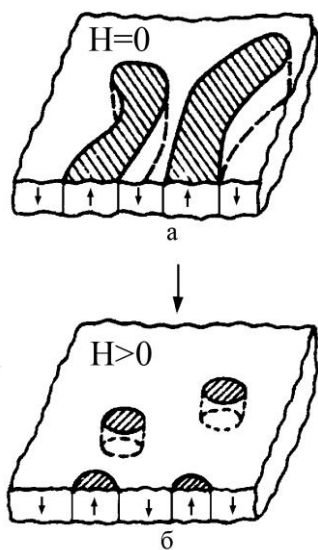


Рисунок 6.4 - Схема утворення ЦМД: а - домени за відсутності магнітного поля, б - ЦМД, які утворилися під дією зовнішнього магнітного поля

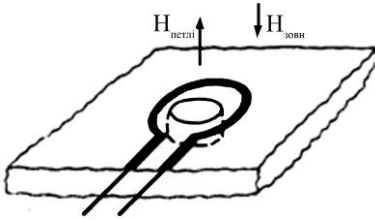


Рисунок 6.5 - Генератор доменів

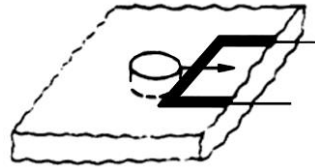


Рисунок 6.6 – Магніто-резистивна петля для зчитування інформації

змінного магнітного поля (рис. 6.6). Через петлю пропускають постійний струм. Якщо під петлю 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.

### 6.3.3 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.6.7). 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 полючи і сили Лоренца. Одна з цих сил більше інший і викликає відхилення

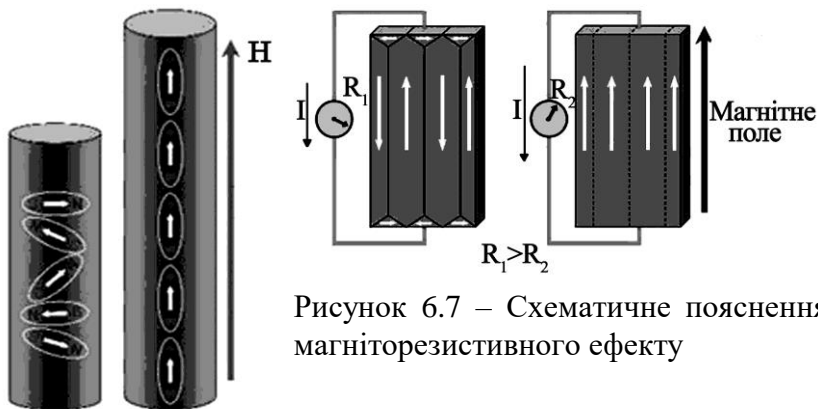


Рисунок 6.7 – Схематичне пояснення магніторезистивного ефекту

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.

### 6.3.4 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 непрямою омичним контактом, між якими знаходиться область

високоомного напівпровідника (рис.1.40 а). Відмінність від традиційних напівпровідникових діодів полягає тільки в тому, що магнітодіод 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-n-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 **магнітодіодний ефект**. Вольт-амперні характеристики магнітодіодів показують, що з підвищенням магнітної індукції прямий струм зменшується (рис.1.41 б). Великий опір бази призводить до того, що магнітодіоди мають значно більшу пряму напругу, ніж звичайну діоди.

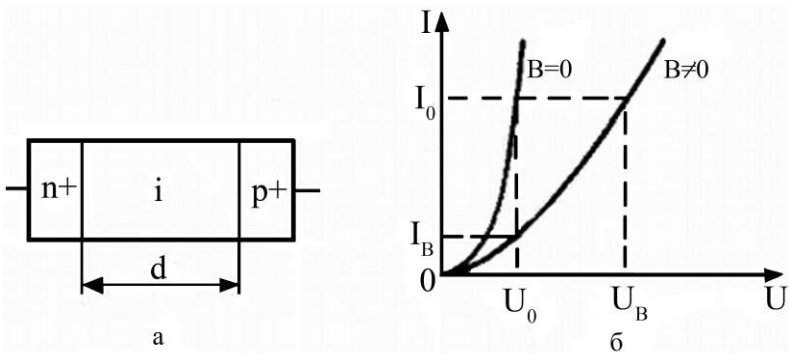


Рисунок 6.8 - Конструкція (а) і вольт-амперна характеристика (б) магнітодіода



Основним параметром магніодіода є його магнітна чутливість – відношення змінної напруги  $U$  до магнітної індукції і струму живлення  $I$ :

$$\gamma = \frac{U}{IB}. \quad (1.41)$$

Розрізняють два типи магнітної чутливості: вольтову магніточутливість  $\gamma_U$  – зміну напруги на магніодіоді при зміні магнітного поля на 1 мТл і постійному значенні струму через магніодіод, яка розраховується за формулою:

$$\gamma_U = \left( \frac{\Delta U}{\Delta B} \right)_{I=const} \quad (1.42)$$

Струмова магніточутливість  $\gamma_I$  визначається зміною струму через магніодіод при зміні магнітного поля на 1 мТл і постійній напрузі:

$$\gamma_I = \left( \frac{\Delta I}{\Delta B} \right)_{U=const}. \quad (1.43)$$

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. . Схеми на магніодіодах може також замінювати колектор в електродвигуні постійного струму.

### 6.3.5 Магнітотранзистори

**Магнітотранзистори** - 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 магнітотранзистора.

Магнітотранзистори класифікують на чотири типи: одноперехідні (ОПТ), однокелектронні (ОКТ), двоколекторні (ДМТ) та польові (ПМТ). Розглянемо кожний тип магнітотранзисторів більш детально.

1. *Одноперехідні* – магнітотранзистори, що діють на основі модуляції опору бази носіїв заряду, які інjektуються із емітера та мають S-подібну вхідну характеристику (рис.1.41).

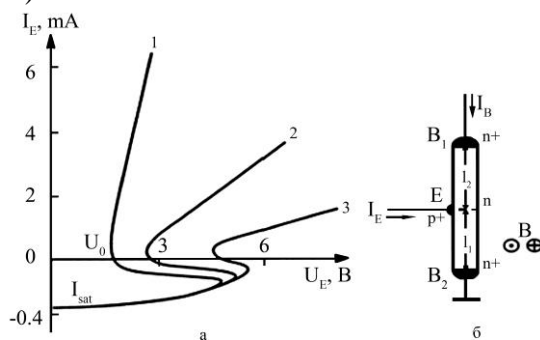


Рисунок 6.9 – Вхідна характеристика ОПТ: крива 1 –  $B=0$ ; крива 2 –  $B = 0,3$  Тл; крива 3 –  $B = 0,6$  Тл

Характер кривої 1 вказує на те, що чим більше час життя інjektованих 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 інжектвані 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 інжектованих носіїв  $i$ , 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 манітного 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  $\gamma$  таких транзисторів відбувається за рахунок зменшення ширини колектора. Реальні розміри колектора та емітера однакові  $(0,6 \times 0,6)$  мм<sup>2</sup>, 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. *Двоколекторні 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.6.10). Траєкторії електронів для цього випадку зображені суцільними лініями. Оскільки потенціали колекторів однакові, то падіння напруги між колекторами  $\Delta U=0$  і ,ві повідно виїхідна напруга  $U=0$ .

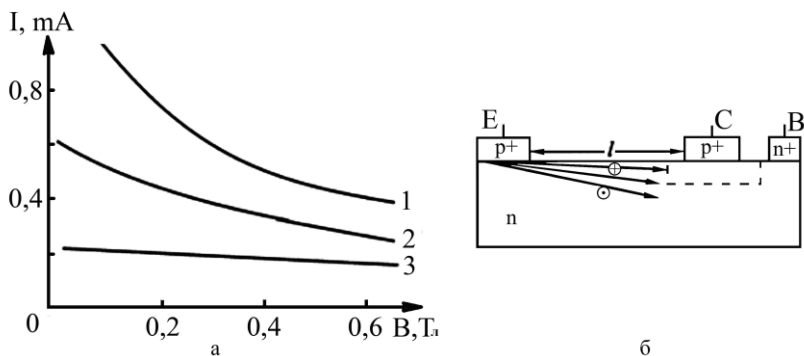


Рисунок 6.10 – Вхідна характеристика (а) та схематичне зображення руху носіїв заряду (б) в одноколекторному магнітотранзисторі: крива 1 – 25 В; крива 2 – 20 В, крива 3– 15 В

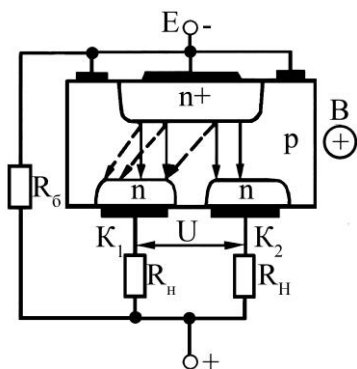


Рисунок 6.11 - Структура та схема ввімкнення ДКТ

Якщо на транзистор почне діяти поперечне магнітне поле (вектор магнітної індукції  $B$  такого поля спрямований

перпендикулярно до площини креслення), то під впливом сили Лоренца електрони колекторного струму будуть відхилятися. Їхні траєкторії показані штрихованими лініями (Рис.6.11). На колектор  $K_1$  буде потрапляти більше електронів, і його струм збільшиться, а струм колектора  $K_2$  відповідно зменшиться. Потенціали колекторів стануть різними. Вихідна напруга між колекторами збільшиться  $U \neq 0$  зі збільшенням магнітної індукції  $B$ .

4. *Польові магнітотранзистори* – польові транзистори, в яких опір каналу (вбудованого або індукваного) змінюється під дією магнітного поля (рис.6.12). Широке застосування вони знайшли як такі, що виконують функції датчика Холла.

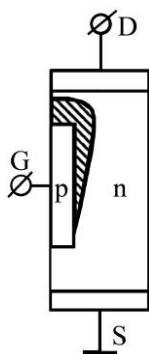


Рисунок 6.12 - Структура ПМТ з р-n-переходом: D – сток, S – витік, G - джерело

**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. Електрорушійна сила (ЕРС) датчика Холла:

$$U_H = \frac{IBR_H}{d}. \quad (1.44)$$

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.

### 6.3.6 Магніотиристиори

**Магніотиристиори** – це напівпровідникові тиристиори типу *p-n-p-n*, в яких, в яких напругу ввімкнення можна змінювати, впливаючи зовнішнім магнітним полем. За відсутності магнітного поля магніотиристиори мають деяку середню напругу ввімкнення. Збільшуючи напруженість магнітного поля в одному напрямку, можна підвищити напругу ввімкнення, а в протилежному напрямку – знизити, тобто змінювати ВАХ магніотиристиора (рис.6.12). Емітер виконує роль аноду (А), керувальні електроди (с1, с2)

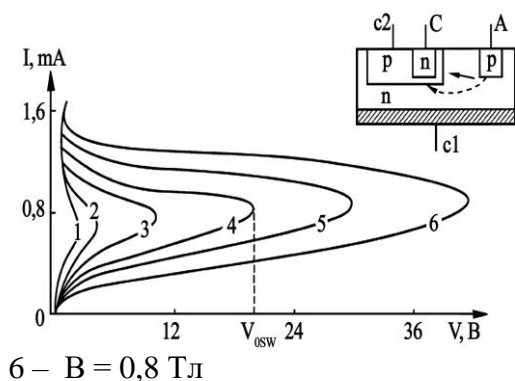


Рисунок 6.12 – ВАХ Si- магніотиристиора, відстань між p-областями 100 мкм:  
 1 –  $B = -1 \text{ Тл}$ ;  
 2 –  $B = -0,8 \text{ Тл}$ ;  
 3 –  $B = -0,4 \text{ Тл}$ ;  
 4 –  $B = 0$ ;  
 5 –  $B = 0,4 \text{ Тл}$ ;

## 6.7 Акустoeлектроніка

**Акустoeлектроніка** - галузь електроніки, яка присвячена теорії і практиці створення пристроїв, заснованих на акустoeлектронній взаємодії, які служать для пере-творення та обробки сигналів. Це можуть бути перетворення тимчасові ( затримка сигналів, вимірю-вання 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, обчислювальної техніці та ряді інших галузей електроніки.

Виникнення в металі чи напівпровіднику струму або електрорухомої сили під дією ультразвукових хвиль називають **акустoeлектричним ефектом**. Акустoeлектричний 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 затухають при віддаленні від межі. Останнім часом широко застосовуються акустoeлектронні прилади на поверхневих акустичних хвилях: лінії затримки, полосові фільтри, резонатори, датчики. Принцип дії таких приладів показано на рисунку 6.13. Як звукопровід 1 застосовують пластину, стрижень або провід з п'єзоелектричного матеріалу (ніобат літїю  $LiNbO_3$ , п'єзокварц  $SiO_2$ , германат вісмуту  $Bi_{12}GeO_{20}$  , 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).

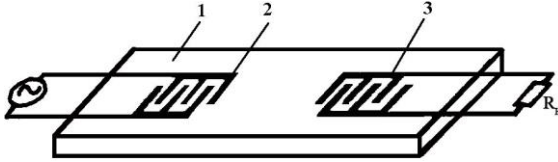


Рисунок 6.13 - Принцип будови акустoeлектронного приладу на поверхневих акустичних хвилях

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 акустoeлектронний прилад вносить велике загасання. Тому важливою проблемою при створенні високоефективних акустoeлектронних 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 звукобірні покриття, щоб зменшити відображення хвиль.

Динамічний діапазон ліній затримки 80 - 120 дБ. Для гарної роботи лінії 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 звукопровід 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.

## 6.8 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, BaF<sub>2</sub>, CdTe (для виготовлення підкладок); структури GaAlAs/GaAs/GaAlAs (електрооптичні модулятори); SiO<sub>2</sub> (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 фотокатоду 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 вимірювальних 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 перетворюються в світлові, які діють на фотоприймач та створюють у ньому знову ж електричні сигнали. Якщо оптрон має тільки один випромінювач та один приймач

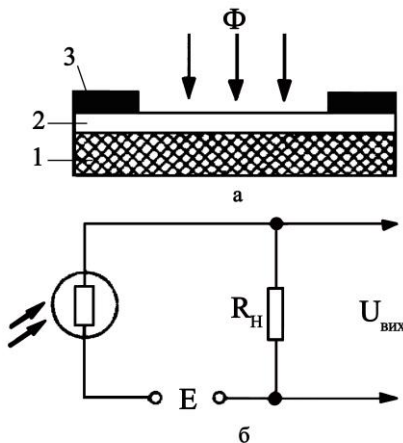
випромінювання, то його називають оптопарою або елементарним оптроном.

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 (рис.6.14). 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.



## Рисунок 6.14 - Принцип будови та схема ввімкнення фоторезистора

Позначення сучасних фоторезисторів: 1 елемент - літери, які означають тип приладу (СФ - опір фоточутливий), 2 елемент - цифра, яка означає матеріал світлочутливого елемента (2 - сернистий кадмій, 3 - селеністий кадмій, 4 - селеністий свінець), 3 елемент - цифра, яка означає порядковий номер розробки.

Фоторезистори мають високу стабільність параметрів. Зміна фотоструму є достатньо точною характеристикою його стану. При подовжній експлуатації спостерігається стабілізація фотоструму, при цьому його величина може змінюватись на 20 - 30%. Фоторезистори є чутливими до швидкої зміни температур. Зберігати фоторезистори слід при температурі 5 - 35 °С та вологості не більше за 80%.

До основних параметрів фоторезисторів відносять:

1. Темновий струм ( $I_m$ ) - струм, який проходить через фоторезистор при робочій напрузі через 30 с після зняття освітленості 200 лк.
2. Світловий струм ( $I_c$ ) - струм, який проходить через фоторезистор при робочій напрузі та освітленості 200 лк від джерела світла з кольоровою температурою 2850 К.
3. Температурний коефіцієнт фотоструму ( $TK I_\phi$ ) - зміна фотоструму при зміні температури фоторезистора на 1 °С.

4. Робоча напруга ( $U_{\phi}$ ) - напруга, яку можна прикласти до фоторезистора при тривалій експлуатації без зміни його параметрів більше за встановлені.
5. Темновий опір ( $R_m$ )- опір фоторезистора при температурі 20°C через 30 с після зняття освітленості 200 лк.
6. Питома чутливість ( $K_0$ ) - відношення фотоструму до добутку величин світлового потоку, який падає на нього та прикладеної напруги:  $K_0 = I_{\phi} / (\Phi U_{\phi})$ , де  $\Phi$  - світловий потік, лм.
7. Постійна часу ( $\tau$ ) - час, продовж якого фотострум змінюється в  $e$  разів при його освітленні.
8. Потужність розсіювання ( $P_{роз.}$ ) - максимально допустима потужність, яку фоторезистор може розсіювати при безперервному електричному навантажуванні та температурі навколишнього середовища, не змінюючи параметрів більше норми, яка встановлена технічними умовами.
9. Опір ізоляції ( $R_i$ ).
10. Довгохвильова межа ( $\lambda$ ).  
Основними характеристиками фоторезисторів є такі:
  1. Вольт-амперна ( $I = f(U)$ ) - залежність світлового, темного або фотоструму (при  $\Phi = const$ ) від прикладеної напруги (рис.1.49).
  2. Світлова або люкс-амперна ( $I = f(E)$ ) - залежність фотоструму від світлового потоку, який падає або освітленості (при  $U = const$ ).
  3. Спектральна ( $I = f(\lambda)$ ) - залежність фотоструму від довжини хвилі світлового потоку (при  $U = const$ ).
  4. Частотна ( $I_{\phi} = f(F_{\phi})$ ) - залежність фотоструму від частоти модуляції світлового потоку (при  $U = const$ ).



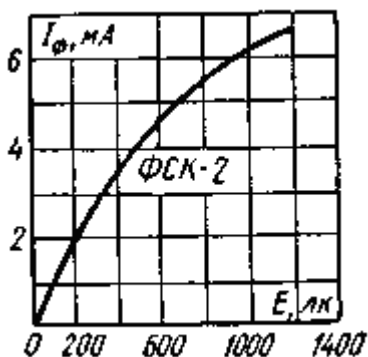


Рисунок 6.15 – Вольт – амперна характеристика фоторезистора ФСК-2

Висока інтегральна чутливість дозволяє використовувати резистори іноді без підсилювачів, а малі габарити є причинами їхнього широкого застосування. Основні недоліки фоторезисторів - їх інерційність і сильний вплив температури, що приводить до великого розкиду характеристик.

**Фотодіоди** - це напівпровідникові діоди, в яких використовується внутрішній фотоэффект. 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). Другий тип режиму - вентильний (фотогенераторний). На відміну від вентильного для фотодіодного режиму необхідним є зовнішнє джерело живлення.

Основні параметри фотодіодів : інтегральна чутливість (~10 мА/лм); робоча напруга (10 - 30 В); темновий струм (~ 2 - 20 мкА).

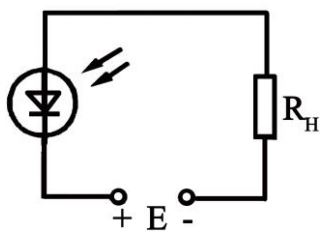


Рисунок 6.16 - Схема ввімкнення фотодіода для роботи у фотодіодному режимі

Основні характеристики фотодіодів: вольт-амперна ( $I = f(U)$ ) - залежність світлового, темного або фотоструму (при  $\Phi = \text{const}$ ) від прикладеної напруги (рис. 1.50); енергетична ( $I_{\Phi} = f(\Phi)$ ) - залежність фотоструму від світлового потоку (при  $U = \text{const}$ ) - лінійна, мало залежить від напруги (рис.6.16).

У лавинних фотодіодах відбувається лавинне розмноження носіїв в п-р-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 р-п-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.

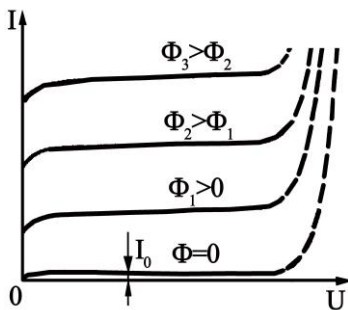


Рисунок 6.17 - Вольт-амперні характеристики фотодіода для фотодіодного режиму

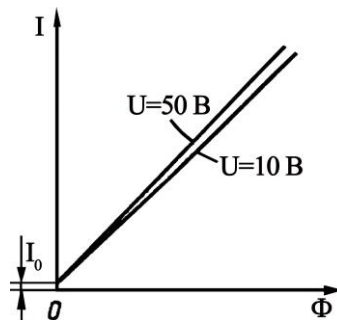


Рисунок 1.51 - Енергетичні характеристики фотодіода

Напруга живлення подається на емітер і колектор, його колекторний перехід виявляється закритим, а емітерний - відкритим. База залишається вільною (рис. 6.17). 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.

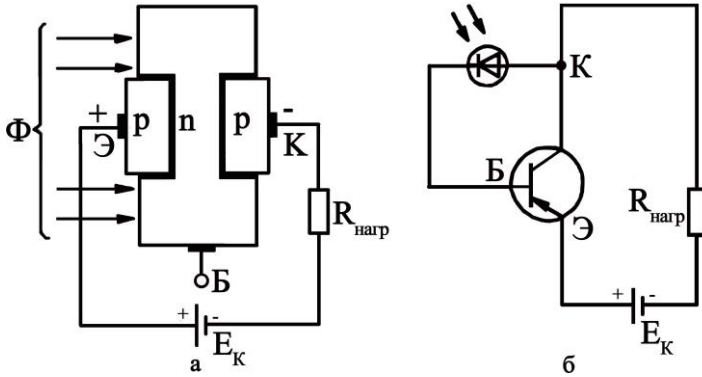


Рисунок 6.18 - Структурна схема біполярного фототранзистора з вільною базою (а) і схема ввімкнення фототранзистора (б)

Струм колектора освітленого фототранзистора виявляється досить великим; відношення світлового струму до темнового 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, автоматиці 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 р-п-р-п-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. Відкривається фототиристор світловим

поток, що надходить на бази  $p_2$  і  $n_1$  через «вікно» в його корпусі (рис. 6.19), і створює електронно-діркові пари. Це приводить до виникнення первинних фотострумів і утворення загального фотоструму. З цього випливає, що при надходженні світлового потоку на бази  $p_2$  і  $n_1$  зростає емітерний струм і коефіцієнт передачі струму  $\alpha$  від емітера до колектора є функцією освітленості, яка змінює струм р-n-переходів. Опір фототиристорів змінюється в межах від 0,1 Ом (у відкритому стані) до  $10^8$  Ом (у закритому); час переключення складає величину  $10^{-5}$  -  $10^{-6}$  с.

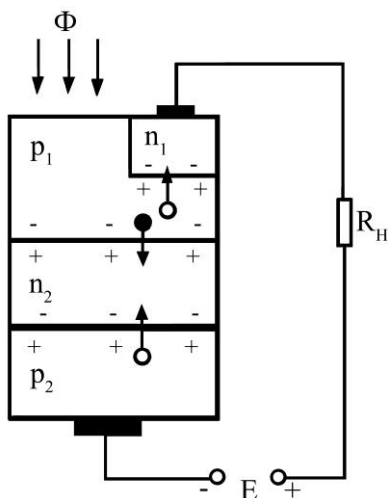


Рисунок 6.19 - Структура фототиристора

Зі світлової характеристики  $I_{np} = f(\Phi)$  при  $U_{np} = const$  (рис.1.54 а) видно, що після ввімкнення фототиристора струм через нього зростає до  $I_{np} = E_{np} / R_{нагр.}$  і більше не змінюється, тобто має два стабільних стани та може

бути використаний як елемент пам'яті. Із вольт-амперної характеристики  $I_{np} = f(U_{np})$  при  $\Phi = const$  ( $\Phi_2 > \Phi_1 > \Phi_0$ ) видно, що зі збільшенням світлового потоку напруга і час ввімкнення зменшуються.

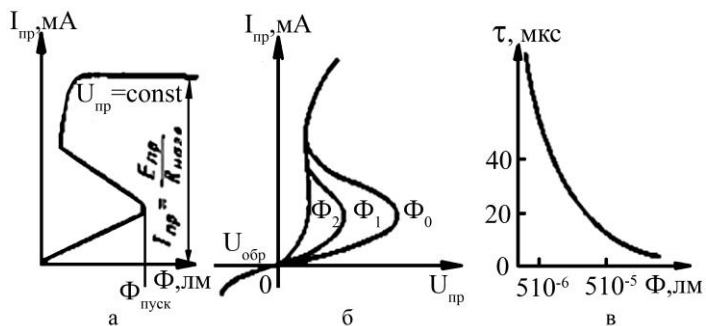


Рисунок 6.20 - Характеристики фототиристора: а - світлова, б - ВАХ, в - залежність часу від світлового потоку

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.

## 6.6 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 криогенний перемикальний прилад - *кріотрон*, являє собою надпровідник 1 (рис. 1.55), який можна переводити зі стану з нульовим опором у стан з кінцевим опором, впливаючи магнітним полем. 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. 6.21), 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

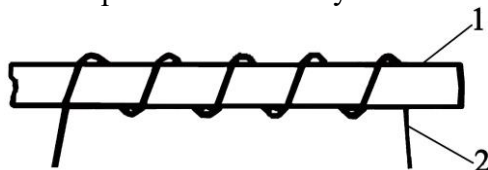


Рисунок 6.21 - Дротовий кріотрон

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.

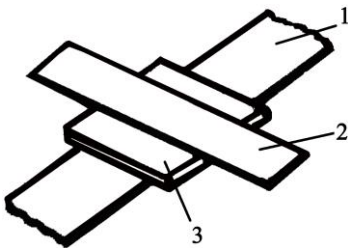


Рисунок 6.22 - Плівковий кріотрон

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  $2 \text{ см}^2$  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 надшвидкодючі 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, наприклад 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.

## **6.7 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.

## 6.8 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. 6.23), де б вони не знаходились, мають однакову структуру і приблизно однакові логічні характеристики. 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

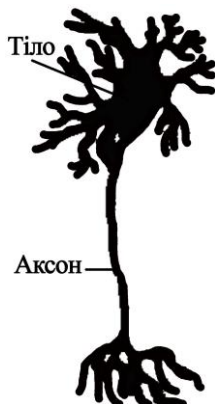


Рисунок 6.23 – Схема нейрона

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.

## Розділ 7 НАПІВРОВІДНИКОВІ ПРИБЛАДИ СПЕЦІАЛЬНОГО ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

### 7.1 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  $p-n$ -переходу зворотний струм різко зростає при малих змінах прикладеної напруги. Цю особливість ВАХ кремнієвого діода в області пробою (рис.7.1, *a*) використовують для стабілізації напруги, а також фіксації напруг і струмів в схемах, звідси інша назва кремнієвих стабілітронів - опорні діоди.

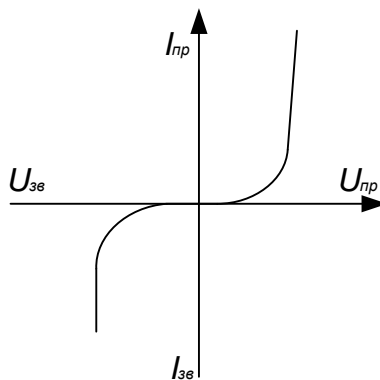


Рис. 7.1. ВАХ кремнієвого стабілітрона

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

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

Тунельний і лавинний пробію 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 пробію є оборотним і робота напівпровідникових, приладів у режимі електричного пробую допускається. Тепловий пробію є необоротним, тобто напівпровідниковий прилад після теплового пробую виходить з ладу.

Як матеріал для напівпровідникових стабілітронів використовується кремній, тому що він має більш високу температурну стабільність порівняно з германієм.

На рис. 7.1 наведена ВАХ стабілітрона. Оскільки реальна ВАХ в області пробую має деякий нахил, то напруга стабілізації залежить від струму стабілізації  $I_{cm}$ . Максимальний струм стабілізації  $I_{cm,max}$  обмежений допустимою потужністю розсіяння  $P_{max}$  і можливістю переходу електричного пробую в тепловий, який є незворотнім. Мінімальний струм стабілізації  $I_{cm,min}$  відповідає початку стійкого електричного пробую. 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  $r_{диф}$  характеризує якість

стабілізації і визначається кутом нахилу ВАХ в області пробою (воно зростає із зростанням напруги стабілізації). В основному стабілітрони застосовуються для стабілізації напруги. Схема найпростішого стабілізатора напруги показана на рис.7.2. Стабілітрон приєднують паралельно навантаженню  $R_H$ , а в загальне коло включають обмежувальний резистор  $R$ , що є функціонально необхідним елементом.

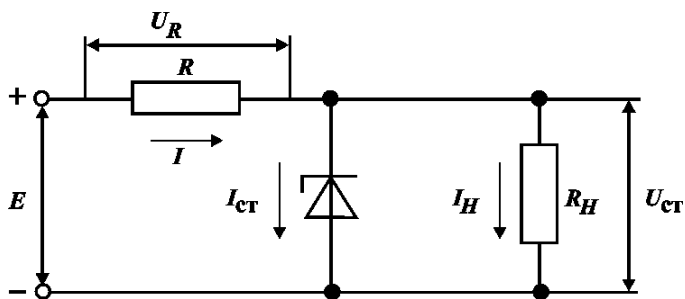


Рисунок 7.2 - Схема стабілізатора напруги

Для схеми, наведеної на рис. 7.2, справедливе рівняння:

$$I_{ст} = \frac{E}{R} - \frac{R + R_H}{RR_H} U_{ст}.$$

З фізичної точки зору принцип стабілізації напруги в даній схемі пояснюється наступним чином. Збільшення напруги джерела живлення на величину  $\Delta E$  призводить до збільшення загального струму в ланцюзі  $I = I_{ст} + I_H$ . Оскільки при зміні струму, що проходить через стабілітрон, напруга на ньому залишається практично незмінною і рівною напрузі стабілізації, то зміненням струму навантаження  $I_H$  можна знехтувати. Збільшення напруги джерела живлення на величину  $\Delta E$  майже цілком

відбудеться на обмеженому резисторі  $R$ . При зменшенні напруги джерела живлення на величину  $\Delta E$  загальний струм в ланцюзі зменшується, що призводить до зменшення струму, що проходить через стабілітрон. Якщо це зменшення не вийшло за межі стабілізації, то в цьому випадку при збереженні постійної напруги на навантаженні напруга на резисторі  $R$  зменшиться на величину  $\Delta E$ . Таким чином, наявність обмежувального резистора  $R$  в розглянутій найпростішій схемі стабілізатора напруги є принципово необхідною. Зміна опору навантаження при незмінній напрузі джерела живлення не призведе до зміни напруги на обмежувальному резисторі  $R$ , а викличе зміну струму, що проходить через стабілітрон.

Крім стабілізації постійної напруги, стабілітрони використовуються в стабілізаторах обмежувачами імпульсної напруги, в схемах випрямлення, в якості керованих ємностей, шумових генераторів і елементів міжкаскадних зв'язків у підсилювачах постійного струму та імпульсних пристроях.

### Параметри стабілітронів

1. *Напруга стабілізації* – номінальне значення напруги на стабілітроні при заданому зворотному струмі стабілітрона в області пробою. Напруга стабілізації, приблизно, дорівнює напрузі пробою. 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* –

$r_{cm}$



$$r_{cm} = \frac{dU_{cm}}{dI_{cm}}$$

Для тунельного пробою диференційна провідність  $p$ - $n$  переходу

$$r_{cmT} = B \frac{U_{cm}}{I_{cm}},$$

де  $B$  – коефіцієнт, що враховує властивості матеріалу.

Для лавинного пробою:

$$r_{cmЛ} = \frac{U_{cm}}{n \cdot MI_{cm}}.$$

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 пробою. При переході в область лавинного пробою, тобто при збільшенні, і в область тунельного пробою, тобто при зменшенні, диференційна провідність різко зростає).  $r_{cm}$  зменшується з ростом струму стабілітрона. Чим менше  $r_{cm}$ , тим вище ступінь стабілізації напруги.

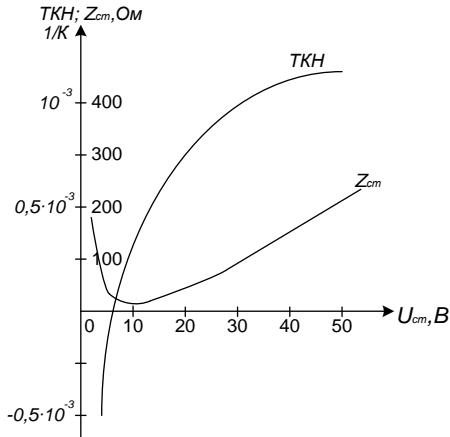


Рисунок 7.3 - Характер залежності температурного коефіцієнта напруги стабілізації (ТКН) і динамічного опору від напруги стабілізації стабілітронів

3. **Опір постійному струму**  $R_{cm} = \frac{U_{cm}}{I_{cm}}$  характеризує

втрати в діоді у даній робочій точці.

4. **Критерій (коефіцієнт) якості стабілітрона**  $Q$  – відношення статичного опору до диференційного при даному струмі стабілізації:

$$Q = \frac{R_{cm}}{r_{cm}} = \frac{dI_{cm}}{dU_{cm}} \frac{U_{cm}}{I_{cm}}$$

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.

$$TKH = \frac{1}{U_{cm}} \frac{dU_{cm}}{dT} \cdot 100\% .$$

Залежно від виду пробою стабілітрона ТКН може бути позитивним або негативним. Якщо пробій тунельний, то ТКН негативний, а якщо пробій лавинний, то ТКН позитивний. Характер зміни ТКН для стабілітронів з різною напругою пробою показаний на рис.2.3. Для зменшення ТКН використовується послідовне включення двох або декількох стабілітронів з ТКН з різним знаком. При позитивному ТКН послідовно зі стабілітронів можна включати  $p-n$  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.

На практиці середній ТКН визначається за формулою:

$$TKH = \frac{2(U_{cm2} - U_{cm1})}{(U_{cm2} + U_{cm1})(T_2 - T_1)}.$$

**6. Мінімальний ( $I_{cm\min}$ ) і максимальний ( $I_{cm\max}$ ) струми стабілізації.**

Мінімальний 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 стабілітрону. 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.

## 7.2 Тиристор

Тиристор - це напівпровідниковий прилад, що має чотирьохшарову 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 тріаки), які можуть перемикатися 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** тиристори поділяють на тиристори з керуючим електродом, оптотиристори, магнітотиристори та фототиристори). Тиристори з керуючим електродом відкриваються зовнішнім електричним сигналом, оптотиристори - внутрішнім оптичним сигналом (випромінювач та фототиристор складають в оптотиристорі єдину конструкцію), магнітотиристори –

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.

При включенні діністора за схемою, наведеною на рисунку 7.4, колекторний *p-n*-перехід закритий, емітерні - відкриті. Опори відкритих переходів малі, тому майже вся напруга джерела живлення прикладена до колекторного переходу, що має високий опір. Через тиристор протікає малий струм (ділянка 1).

При збільшенні напруги джерела живлення, струм тиристора збільшується незначно, поки напруга не наблизиться до деякого критичного значення, рівному напрузі включення  $U_{\text{вкл}}$ . При напрузі  $U_{\text{вкл}}$  в діністорі

створюються умови для лавинного розмноження носіїв заряду в області колекторного переходу. Відбувається зворотній електричний пробій колекторного переходу (ділянка 2 на рис. 1.62). 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.

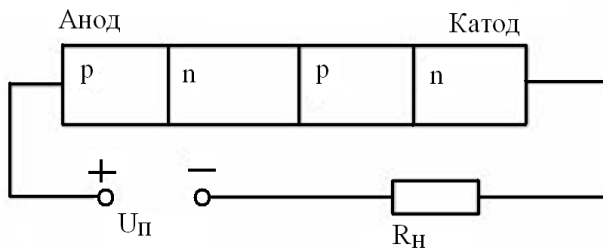


Рисунок 7.4 – Схема включення діністора

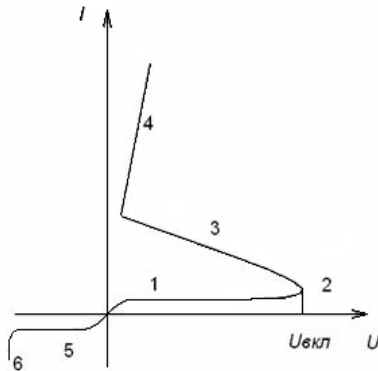


Рисунок 7.5 – Вольт-амперна характеристика діністора:

- 1 – зростання струму через р-п-переходи тиристора;
- 2- колекторний пробій;
- 3 – лавиноподібне збільшення струму;
- 4 – робочий режим;
- 5 – зворотне ввімкнення;
- 6 – електричний пробій.

На ВАХ цю ділянку позначено цифрою 3 (рис.7.5). 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. 7.5). 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 (рис. 7.6), 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 (рис. 7.7), 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  $U_{np}$  прикладена до закритого переходу  $\Pi_2$ , який має великий опір. Звідси струм через тиристор дуже малий. При підвищенні напруги  $U_{np}$  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.

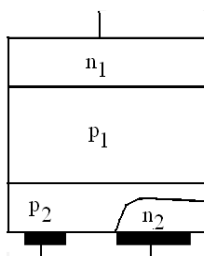


Рисунок 7.6 – Напівпровідникова структура тиристора

Вольт-амперна характеристика для різних струмів керування показана на рисунку 7.7.



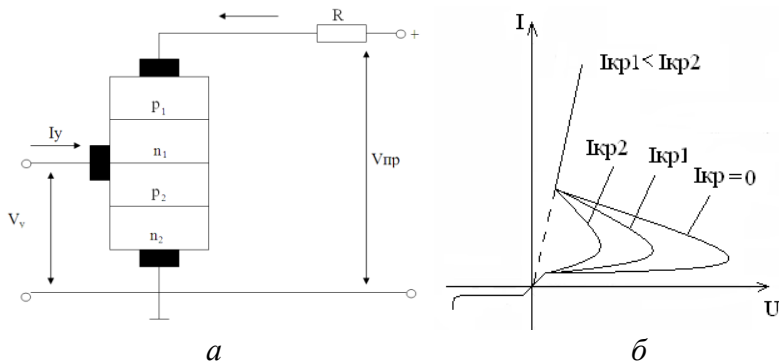


Рисунок 7.7 – Структурна схема (а) і вольт-амперна характеристика (б) триністора

Триак (симістор) - «двонаправлений триністор» (рис. 7.8). Особливістю триаків є здатність проводити струм як від анода до катода, так і в зворотному напрямку. На відміну від триністорів триак може керуватися як позитивним, так і негативним струмом між затвором і Т1.

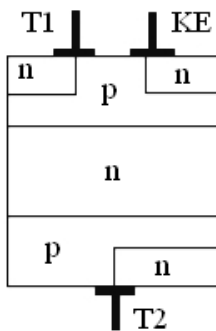


Рисунок 7.8 – Структура симістора

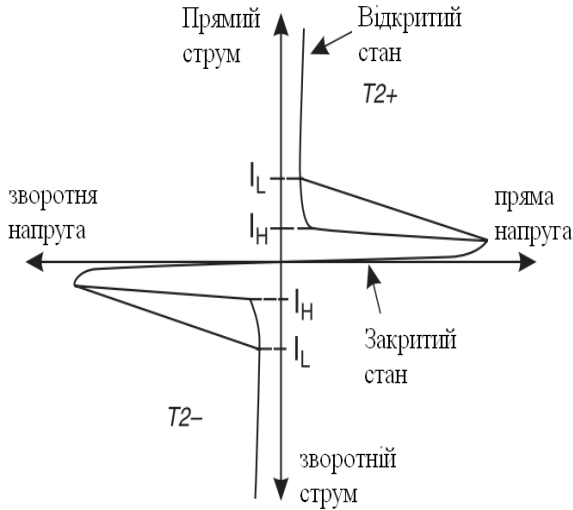


Рисунок 7.9 – Вольт-амперна характеристика симістора

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 ( $U_{зв..max}$ ) - це напруга, при якому настає електричний пробій. Для більшості тиристорів  $U_{вкл} = U_{зв..max}$ ;
3. Максимально допустимий прямий, середній за період струм ( $I_{max}$ );
4. Пряме падіння напруги на відкритому тиристорі ( $U_{np} = 0,5 \div 1В$ );
5. Зворотний максимальний струм ( $I_{зв..max}$ ) - 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 ( $T_{вкл}$ ) - це час, протягом якого закривається тиристор;
8. Гранична швидкість наростання анодного струму ( $V_{I_{max}}$ ). Якщо анодний струм буде швидко наростати, то  $p-n$  переходи будуть завантажуватися струмом нерівномірно, внаслідок чого буде відбуватися місцевий перегрів і тепловий пробій;
9. Гранична швидкість наростання анодного напруги ( $V_{U_{max}}$ ). Якщо гранична швидкість наростання напруги анодного буде більше паспортної, тиристор може мимовільно відкритися від електромагнітної перешкоди;
10. Керуючий струм відмикання ( $I_{кр.min}$ ) - це струм, який необхідно подати, щоб тиристор відкрився без «коліна»;
11. Керуюча напруга відмикання ( $U_{кр.min}$ ) - це напруга, яку необхідно подати для відкриття тиристора без «коліна».

## **Розділ 8 ОПТОЕЛЕКТРОННІ ЗАСОБИ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ**

### **8.1 Оптонари**

Спочатку коротка історична довідка. Ідея створення та застосування оптронів відноситься до 1955 р., коли в роботі Loebner E.E "Optoelectronic devices network" була запропонована ціла серія приладів з оптичними та електричними зв'язками між елементами, що дозволяло здійснювати посилення і спектральне перетворення світлових сигналів, створювати прилади з двома стійкими станами - бістабільні оптрони, оптоелектронні пристрої накопичення і зберігання інформації логічні схеми, реєстри зсуву. Там же був запропонований і термін "оптрон", утворений як скорочення від англійського "optical-electronic device".

Описані в цій роботі оптрони виявилися непридатними для промислової реалізації, так як ґрунтувалися на недосконалій елементній базі - неефективних і інерційних порошкових електролюмінесцентних конденсаторах (випромінювач) і фоторезисторах (приймач). Недосконалі були і найважливіші експлуатаційні характеристики приладів: низькотемпературна й тимчасова стабільність параметрів, недостатня стійкість до механічних впливів. Тому на перших порах оптрон залишався лише цікавим науковим досягненням не знаходять застосування в техніці.

Лише в середині 60-х років розвитку напівпровідникових світловипромінюючих діодів і технологічно досконалих високоефективних швидкодіючих кремнієвих фотоприймачів з р - n-переходами (фотодіоди та

фототранзистори) почала створюватися елементарна база сучасної оптронів техніки. До початку 70-х років виробництво оптронів в провідних країнах світу перетворилося на важливу і швидко розвивається галузь електронної техніки, успішно доповнює традиційну мікроелектроніку.

**Оптрон** - напівпровідниковий прилад, в якому конструктивно об'єднані джерело та приймач випромінювання, пов'язані між собою оптичним зв'язком. У джерелі випромінювання електричні сигнали перетворюються 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 (рис.8.1).

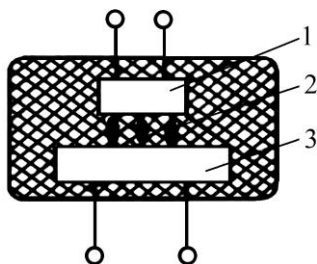


Рисунок 8.1 - Принцип будови оптопари: 1 - випромінювач, 2 - оптичний прозорий клей, 3 - фотоприймач

Принцип дії оптронів оснований на подвійному перетворенні енергії. У випромінювачі енергія електричного сигналу перетворюється в світлову, а в фотоприймачі оптичний сигнал викликає зміну струму, напруги або опору.



Рисунок 8.2 - Узагальнена структурна схема оптрона

Призначення окремих елементів оптрона і види перетворення енергії показані на узагальненій структурній схемі оптрона (рис. 8.2).

- Вхідний пристрій забезпечує узгодження джерела випромінювання з попередніми електронними елементами за струмом та напругою та оптимізацію його робочого режиму.

- Джерело випромінювання перетворює електричний сигнал у світловий, тому до нього застосовуються високі вимоги за ККД, швидкодією, спрямованістю випромінювання та постійністю електричних і оптичних параметрів.

- Оптичне середовище здійснює зв'язок між випромінювачем та фотоприймачем. Воно забезпечує й механічну цілісність конструкції. Для максимально повної передачі енергії оптичний канал повинен мати високе пропускання без спотворення форми сигналу і мінімальне розсіювання випромінювання в сторони, а також захищати елементи оптрона від зовнішніх світлових впливів.

- Значно розширити функціональні можливості оптронів дозволяє використання керованого оптичного каналу.

- Під дією пристрою управління змінюються параметри оптичного середовища або чутливість фотоприймача, що змінює коефіцієнт передачі оптрона.

Так, оптрони з відкритим оптичним каналом, в яких зв'язок між джерелом та приймачем випромінювання здійснюється через повітряний зазор, застосовуються для зчитування інформації з перфоносіїв, що пересуваються в цьому зазорі. Використовуючи в якості оптичного середовища електрооптичні або магнітооптичні матеріали, можна керувати параметрами оптронів за допомогою електричного чи магнітного поля. Якщо ж властивості оптичного каналу змінюються при зовнішніх механічних впливах, то такі прилади можуть успішно застосовуватись в якості різноманітних давачів положення, пересування, вібрації, прискорення, рівня і виду рідини.

***Вимоги до оптичних матеріалів оптронів:***

- високий коефіцієнт заломлення;
- високий питомий опір;
- хороша адгезія з кристалами Si і GaAs;
- еластичність;
- механічна прочність.

Основний матеріал - полімерні оптичні клеї.

$n = 1,4 - 1,6$ ;  $\rho = 10^{14} - 10^{16}$  Ом·м;  $\Delta T = (-60) - (+120)$  °С.

***Електрооптичні матеріали*** - це органічні або неорганічні діелектрики, в яких виникає електрооптичний ефект, тобто показник заломлення таких матеріалів залежить від прикладеної напруги, причому найчастіше ці залежності бувають лінійними або квадратичними (і електрооптичні ефекти бувають лінійні і квадратичні).

Лінійний електрооптичний ефект (ефект Поккельса) спостерігався тільки у твердих кристалах, які не мають центру симетрії – в сегнетоелектриках, наприклад, в ніобіті літію та танталат літію, в кристалічних солях групи дігідрофосфата калію  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , і групи перовскитів (титанат барію  $\text{BaTiO}_3$  і тверді розчини на його основі).

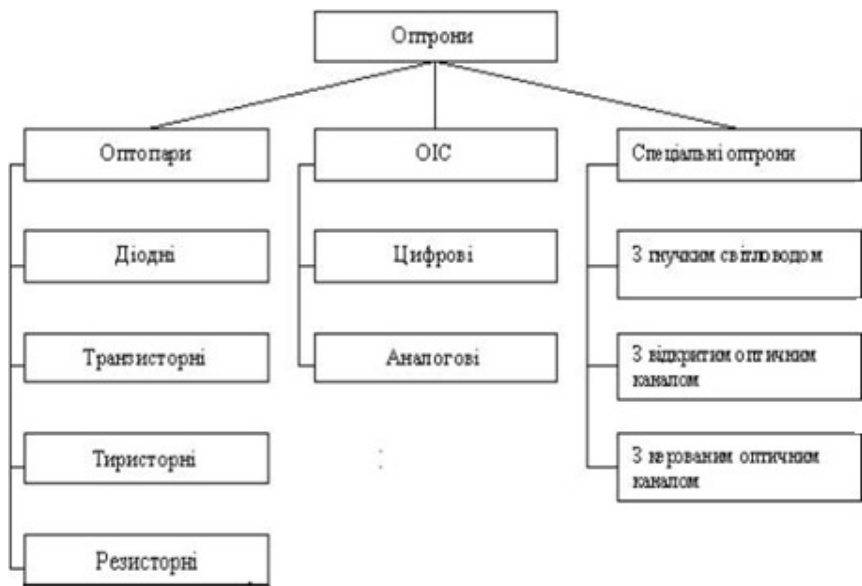
Квадратичний електрооптичний ефект (ефект Керра ) характерний для кристалів, які мають центр симетрії , а також для ізотропних рідин , наприклад , для нітробензолу або сірководню .

**Магнітооптичні матеріали** – це матеріали, які здатні обертати площину поляризації світла, яке пройшло через зразок або відбилось від нього, і використовуються для керування світловими потоками.

Прозорі - ферит-гранати  $(YBi)_3Fe_5O_{12}$ , ферити – шпінелі:  $MeFe_2O_4$ , где Me —  $Ni^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Li^+$ ,  $Cu^{2+}$

Для ефективної роботи оптрона всі його елементи повинні бути узгоджені за спектральними, електричними та експлуатаційними характеристиками.

За ступенем складності і типом оптичного каналу виділяють три групи оптронів: оптопари, оптоелектронні інтегральні мікросхеми, спеціальні оптрони.





Оптопари (або елементарні оптрони) – це оптоелектронні напівпровідникові прилади, які складаються з випромінювального та фотоприймального елементів, між якими є оптичний зв'язок, що забезпечує електричну ізоляцію між входом та виходом.

В теперішній час промисловістю освоєний випуск різних типів оптопар.

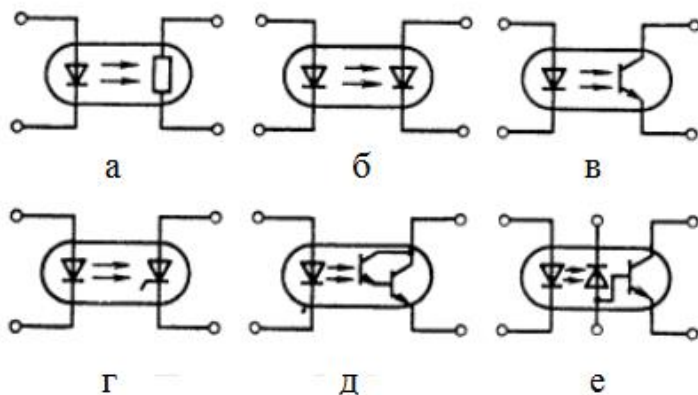


Рисунок 8.3 - Схеми резисторної (а), діодної (б), транзисторної (в), тиристорної (г), із складеним транзистором (д) і діодно-транзисторної (е) оптопар

Як елемент електричного кола оптопара описується чотирма групами параметрів або характеристик:

1. **вхідними** (номінальний струм  $I_{\text{вх ном}}$ , напруга  $U_{\text{вх}}$ , ємність  $C_{\text{вх}}$ );
2. **вихідними** (максимально припустима пряма  $U_{\text{вих max}}$ , і зворотна  $U_{\text{вих зв max}}$  напруги, струм  $I_{\text{вих max}}$ , залишкова напруга  $U_{\text{зал}}$ , ємність  $C_{\text{вих}}$ );
3. **передаточними** (коефіцієнт передачі за струмом  $K_{\Gamma} = I_{\text{вих}} / I_{\text{вх}}$ , час зростання вихідного струму  $t_{\text{зр}}$ , затримки  $t_{\text{зат}}$ , швидкодія оптрона  $t$ ),

4. **параметрами, що характеризують ізоляцію** (максимально припустима напруга між входом та виходом  $U_{із}$ , опір ізоляції  $R_{із}$ , і прохідна ємність  $C_{пр}$ ).

**Основними параметрами і характеристиками оптопар різних типів є наступні:**

- 1) максимальний струм ( $I_{max.}=10-16$  мА,  $I_{вих} = 0,2 - 7$  мА) та напруга ( $U_{max.} = 2,5 - 6$  В,  $U_{вих} = 20 - 250$  В) на вході і виході;
- 2) вихідний опір при нормальній роботі ( $R_{вих.}=200$  Ом – 10 кОм);
- 3) темновий вихідний опір  $R_T = 10^6 - 10^7$  Ом (темновий струм при відсутності вхідного струму);
- 4) час вимкнення ( $\sim 100 - 200$  мс);
- 5) фотоЕРС (до 0,8 В);
- 6) коефіцієнт передачі струму - відношення вихідного струму до вхідного ( $k=0,1 - 1\%$ );
- 7) вхідна вольт-амперна і передаточна характеристики (залежність вихідного опору від вхідного струму).

**Оптоелектронна інтегральна мікросхема (ОЕІМС)** складається з однієї або кількох оптопар та електрично з'єднаних з ними одного або кількох узгоджувальних або підсилювальних пристроїв. В залежності від області застосування ОІМС поділяють на цифрові, призначені для високошвидкісної передачі цифрової інформації по електрично ізольованих колах, і аналогові, які використовуються для обробки неперервних сигналів.

**Спеціальні оптрони** відрізняються від інших приладів побудовою оптичного каналу. В оптронах з гнучким світловодом випромінювання передається оптичним кабелем, в результаті чого джерело та фотоприймач стають віддаленими один від одного на значну відстань. Оптрони з відкритим і керованим оптичним каналом

використовуються як основа для побудови різноманітних давачів і схем, що перемикаються, наприклад, оптоелектронних безконтактних кнопок.

**Оптопарі класифікують на чотири групи :**

- резисторні (фоторезистор - світлодіод);
- тиристорні (фототиристор - світлодіод);
- транзисторні (фототранзистор - світлодіод);
- діодні (фотодіод - світлодіод).

Елементну основу оптронів складають фотоприймачі і випромінювачі та оптичне середовище між ними.

***До фотоприймачів пред'являються такі загальні вимоги:***

- малі габарити і маса,
- висока довговічність і надійність,
- стійкість до механічних і кліматичних впливів,
- технологічність,
- низька вартість.

***До джерел випромінювання застосовуються вимоги:***

- спектральне узгодження з обраним фотоприймачем;
- висока ефективність перетворення енергії електричного струму в енергію випромінювання;
- переважна спрямованість випромінювання;
- високу швидкодію;
- простота і зручність збудження і модуляції випромінювання.

***Переваги оптронів:***

- можливість забезпечення ідеальної електричної (гальванічної) розв'язки між входом і виходом;
- можливість реалізації безконтактного оптичного управління електронними об'єктами;

- односпрямованість розповсюдження інформації по оптичному каналу, відсутність зворотної реакції приймача на випромінювач;
- широка частотна смуга пропускання оптрона, відсутність обмеження з боку низьких частот (що властиво імпульсним трансформаторам); можливість передачі по оптронів ланцюга, як імпульсного сигналу, так і постійної складової;
- можливість управління вихідним сигналом оптрона шляхом впливу (в тому числі і неелектричного) на матеріал оптичного каналу і що впливає звідси можливість створення різноманітних датчиків, а також різноманітних приладів для передачі інформації;
- можливість створення функціональних мікроелектронних пристроїв з фотоприймача, характеристики яких при висвітленні змінюються за складним заданому закону;
- несприйнятливість оптичних каналів зв'язку до впливу електромагнітних полів, що у випадку "довгих" оптронів (з протяжним волоконно-оптичним світловодом між випромінювачем і приймачем) обумовлює їх захищеність від перешкод і витоку інформації, а також виключає взаємні наведення;
- фізична і конструктивно-технологічна сумісність з іншими напівпровідниковими і мікроелектронних приладами.

### **Недоліки оптронів:**

- значна споживана потужність, обумовлена необхідністю подвійного перетворення енергії

(електрика - світло - електрика) і невисокими ККД цих переходів;

- підвищена чутливість параметрів і характеристик до впливу підвищеної температури і проникаючою ядерної радіації;
- більш або менш помітна тимчасова деградація (погіршення) параметрів;
- відносно високий рівень власних шумів, обумовлений, як і два попередніх недоліку, особливостями фізики світлодіодів;
- складність реалізації зворотних зв'язків, викликана електричною роз'єднаністю вхідний і вихідний ланцюгів;
- конструктивно-технологічне недосконалість, пов'язане з використанням гібридної непланарної технології, (з необхідністю об'єднання в одному приладі декількох - окремих кристалів з різних напівпровідників, що розташовані в різних площинах).

Перераховані недоліки оптронів у міру вдосконалення матеріалів, технології, схемотехніки частково усуваються, але, тим не менше, ще тривалий час будуть носити достатньо принциповий характер. Однак їх гідності настільки високі, що забезпечують впевнену внеконкурентність оптронів серед інших приладів мікроелектроніки.

### *Застосування*

1. Для зв'язку блоків апаратури, між якими є значна різниця потенціалів; для захисту вхідних ланцюгів вимірювальних пристроїв від перешкод і наведень і т.д.
2. Оптичне, безконтактне управління потужнострумової і високовольтними ланцюгами.

Запуск потужних тиристорів, триаків, сімісторів, управління електромеханічними релейними пристроями.

3. Створення "довгих" оптронів (приладів з протяжним гнучким волоконно-оптичним світловодом) відкрило зовсім новий напрямок застосування виробів оптронів техніки - зв'язок на коротких відстанях.
4. В радіотехнічних схемах модуляції, автоматичного регулювання посилення та ін
5. Оптронні датчики: вологості і газові, датчики визначення чистоти обробки поверхні предмета, швидкості його переміщення і т. п.
6. Досить специфічним є використання оптронів в енергетичних цілях, тобто робота діодного оптрона в фотовентильном режимі. У такому режимі фотодіод генерує електричну потужність в навантаження і оптрон до певної міри подібний малопотужного вторинному джерела живлення, повністю розв'язала від первинного ланцюга.
7. Універсальність оптронів є причиною того, що сферами застосування цих приладів стали обчислювальна техніка, автоматика, зв'язкова і радіотехнічна апаратура, автоматизовані системи управління, вимірювальна техніка, системи контролю і регулювання, медична електроніка, пристрої візуального відображення інформації.

## Розділ 9. ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ СИСТЕМИ І ЛІНІЇ ЗВ'ЯЗКУ

### 9.1 Застосування волоконно-оптичних систем

Коротко зупинюся на історії створення волоконно-оптичних приладів, сучасному стані розвитку волоконної оптики та галузях застосування для чіткого визначення актуальності вивчення даної теми.

- **Волоконна оптика** – це галузь оптоелектроніки, яка вивчає фізичні явища, що виникають в оптичних волокнах та прилади і системи, до складу яких входять компоненти на основі оптичних волокон.

Задачі сучасних дослідників у цій галузі – це проектування і розробка надчутливих волоконно-оптичних сенсорів фізичних величин, ліній волоконно-оптичного зв'язку з наднизькою дисперсією.

Принцип передачі світла усередині оптоволокна був вперше продемонстрований за часів королеви Вікторії в 1870 році англійським фізиком Джоном Тіндалем на прикладі світла через потік води. При цьому він використовував той же ефект повного внутрішнього віддзеркалення, на якому заснований принцип дії сучасних волоконних світлопроводів. Але якщо по такому

світлопроводу направити просто "біле" світло, то воно швидко затухне.

**Ефект Тиндаля** – при проходженні світлових променів через середовище, в якому взвішені мілкі тверді частинки, наприклад, пильне або задимлене повітря, колоїдні розчини, мутне скло, ефект розсіювання зменшується по мірі змінення спектральної окраски променів від фіолетово-синьої до жовто-червоної частини спектра.

Лише такі властивості лазерного випромінювання, як монохроматичність і когерентність, зумовили можливість поширення його по діелектричному оптоволокну з мінімальними втратами.

Застосування волоконно-оптичних приладів, поліпшення характеристик кабельних і волоконно-оптичних систем спричинило підвищення якості вже існуючих послуг зв'язку і створення цілого ряду нових:

- можливість користування всесвітньою мережею Інтернет і електронною поштою з доступом до приватних осіб, що мають ПК;
- формування інтелектуальних мереж зв'язку (комп'ютерна телефонія);
- створення безпечних систем освітлення архітектурних об'єктів і важкодоступних зон освітлення (наприклад, експонатів музеїв та медичних барокамер), декоративних систем освітлення (реклама і штучні ялинки);
- використання оптичних волокон (ОВ) в гідрофонах сейсмічних або гідролокаційних приладів (наприклад, системи з гідрофонами на основі більше 100 сенсорів для нафтовидобувної промисловості);
- створення лазерних мікроскопів;



- виробництво оптоволоконних сенсорів температури і тиску, малий розмір і фактична відсутність необхідності в електричній енергії яких, дає оптоволоконним сенсорам перевагу перед традиційними електричними;
- застосування ОВ в медичній техніці для формування зображення і дослідження внутрішніх органів людини через невеликий отвір (ендоскопія).

Темпи розвитку волоконної оптики і оптоелектроніки на світовому ринку випереджають всі інші галузі техніки і складають ~40 % у рік. У ряді країн, серед яких США, Англія, Японія, Франція, Італія й інші, вже зараз при будівництві споруджень зв'язку використовуються в основному оптичні кабелі. Вони займають домінуюче місце на мережах міжміського і міського зв'язку. Про масштаби розвитку волоконно-оптичних ліній зв'язку свідчать обсяги виробництва оптичного волокна в США. За останні 5 років було виготовлено близько 100 млн. км волокна. Така кількість дозволила б зробити 2500 витків довкола всієї земної кулі .

## 9.2 Фізичні принципи розповсюдження світла по оптичним волокнам

Оптоволоконó або оптичне волокно — це скляна або пластикова нитка, яка використовується для перенесення світла завдяки повному внутрішньому віддзеркаленню. Джгут, сплетений із тисяч оптичних волокон називається **світловодом**. Його діаметр складає до декількох десятків міліметрів.

Конструктивно ОВ складається з трьох частин: центральної частини - серцевини з показником заломлення  $n_1$ ; оболонки з показником заломлення  $n_2$  ( $n_2 < n_1$ ); захисного покриття (шар полімеру - акрилат).

З метою запобігання впливу зовнішніх факторів на оптичні властивості оптоволокна (волога, подряпини, мікротріщини), навколо оптичної оболонки наносяться шари полімеру (акрилат).

**В реальних ОВ  $n_1 \sim 1,48$ , а  $n_2 \sim 1,46$ . Різні сорти скла 1,6 – 2,04, кварц 1,54.**

Якщо ядро та оптична оболонка виготовлені з одного матеріалу (наприклад, чисте кварцеве скло), зміна показника заломлення досягається підбором спеціальних домішок, які вводяться у чистий розплав кварцу.

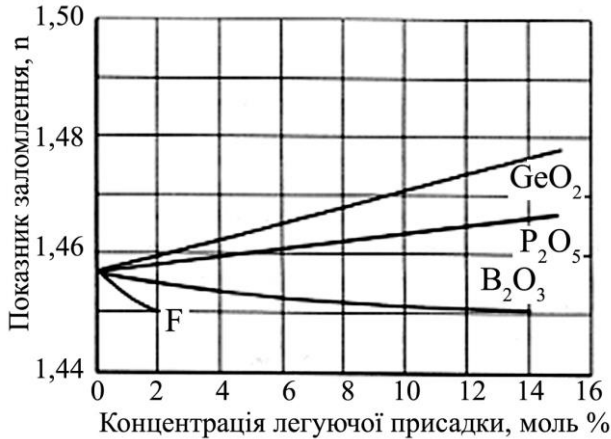


Рисунок 9.1 - Показники заломлення кварцового скла з різними легуючими присадками

Другий варіант - ядро оптоволокна також може виготовлятися із скла, а оптична оболонка - з пластику (PCS-оптоволокно).

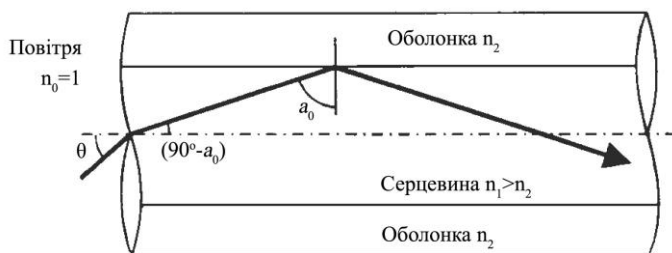


Рисунок 9.2 – Хід променів в оптоволокну.  $\alpha_0$  - кут повного відзеркалення

Показник заломлення серцевини може бути постійним або змінюватися.

Залежно від закону, за яким змінюється показник заломлення серцевини  $n_1$ , ОВ класифікують:

- ОВ із **ступінчастими профілями** показників заломлення:

постійним показником заломлення в серцевині  $n_1 = \text{const}$  та різким зменшення показника заломлення на межі серцевини і оболонки ( $n_2 \ll n_1$ );

- ОВ із **градієнтними профілями** показників заломлення:

ОВ, в якому профіль показника заломлення постійно змінюється в серцевині (як функція відстані від осі)  $n_1 = f(d)$ . Кутова апертура 3,370.

**ОВ характеризується двома важливими параметрами:**

- 1) Загасанням (втрати на поглинання і розсіювання)
- 2) Дисперсією.

**Загасання обумовлене:**

- 1) наявністю у склі домішок іонів Me перехідної групи:  $Fe^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Cr^{3+}$ , іонів гідроксильної групи  $OH^-$ ;
- 2) Флуктуаціями показника заломлення;
- 3) Розсіюванням на неоднорідностях, розміри яких спів мірні з довжиною хвилі;
- 4) Розсіюванням через різноманітні порушення геометрії ОВ в процесі виробництва:
  - мікровигини при нанесенні захисного покриття;
  - страти на з'єднання (стикові втрати);
  - некруглість оболонки, неконцентрічність оболонки і серцевини;
  - механічна втома;
  - утворення мікротріщин внаслідок впливу вологи.

Таким чином, рівень втрат в ОВ – коефіцієнт загасання:

$$\alpha = \frac{A}{L}.$$

A – загальні втрати енергії в ОВ, дБ;

L – довжина ОВ, км.

Дисперсія визначається основними факторами: різницею швидкостей розповсюдження світлових потоків; властивостями матеріалу ОВ.

У реальних волоконно-оптичних лініях мінімуми поглинання припадають на довжину хвилі 1300 і 1500 нм. При довжині хвиль від 1150 нм до 1300 нм дисперсія швидкостей розповсюдження різних довжин хвиль мінімальна. Залежність дисперсії від довжини хвилі показана на рисунку 3

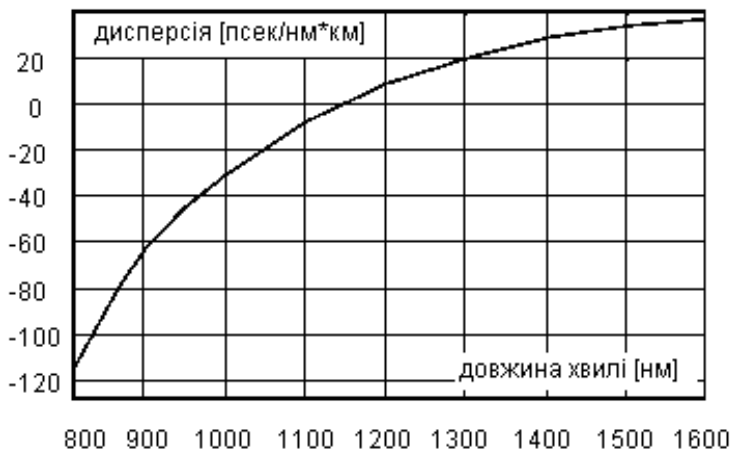


Рисунок 9.3 - Залежність дисперсії від довжини хвилі [2]

Залежність смуги пропускання волокна від його довжини приведена на рисунку 9.4.

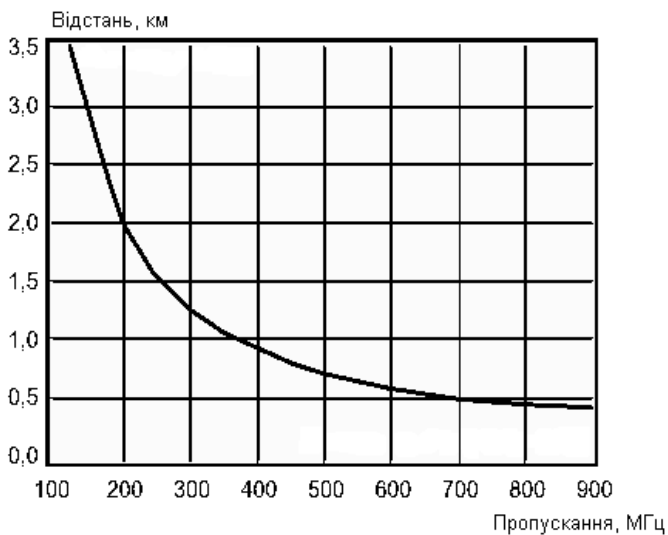


Рисунок 9.4 - Залежність смуги пропускання волокна від його довжини

### 9.3 Конструктивно-технологічні особливості оптичних волокон (ОВ) та світловодів

На відміну від радіосистем, у ВОЛЗ хвиля не поширюється у вільному просторі, а концентрується в самому об'ємі ОВ і передається по ньому в заданому напрямі (Рис.9.1). Передача сигналу по ОВ здійснюється за рахунок віддзеркалень світлової хвилі від границі серцевини і оболонки, які мають різні показники заломлення  $n_1$  і  $n_2$ .

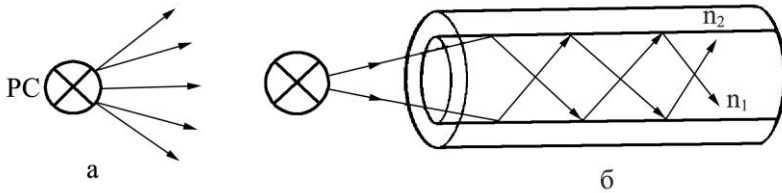


Рисунок 9.5 - Процес передавання сигналів: а – радіозв'язок; б – волоконно-оптичний зв'язок

На даний час при проектуванні та фізичній реалізації ВОЛЗ використовують багатожильні кабелі. Світло ( $\lambda \cong 1300 \div 1500$  нм) вводиться в ОВ діаметром  $D < 100$  мкм за допомогою світловипромінюючого діода або напівпровідникового лазера. Кабель може містити багато волокон, наприклад 8 на рисунку 9.6.

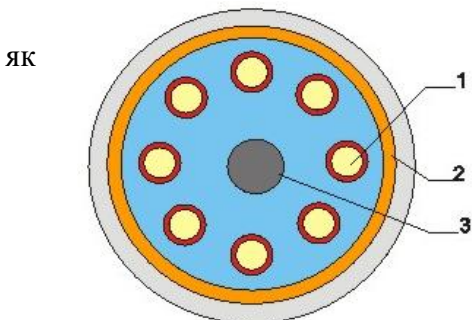


Рис.9.6. Перетин восьмижильного оптичного кабелю:  
1 – оптичне волокно; 2 – сталеві оплітки; 3 – сталевий трос

У центрі кабелю розміщується сталевий трос, який використовується при прокладенні кабелю. Із зовнішньої сторони кабель захищається від пацюків сталеву

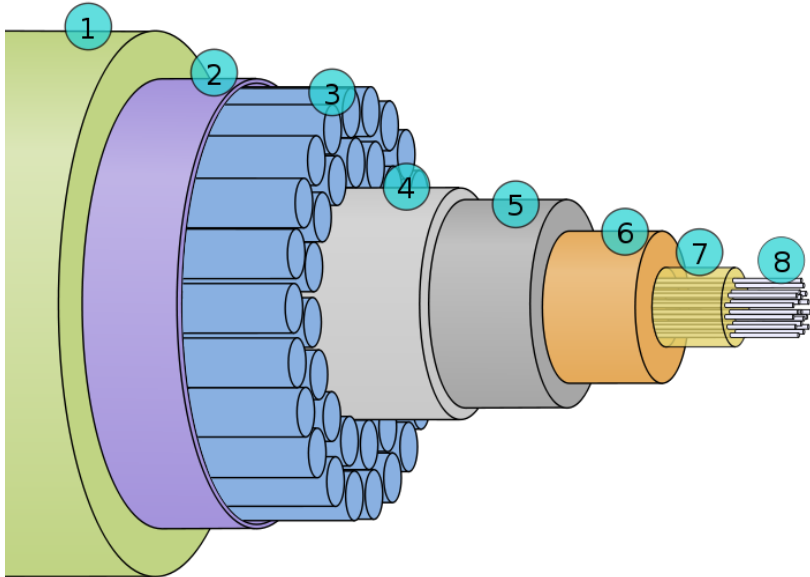


Рисунок 9.7 - Поперечний переріз підводного оптоволоконного кабелю : 1 – поліетилен; 2 – стрічка

“мілара”; 3 – переплетені металеві (сталеві) провoda; 4 – алюмінієвий водний бар’єр; 5 – полікарбонат; 6 – мідна або алюмінієва труба

опліткою і герметизується еластичним полімерним покриттям. Додатково для приклада можна привести рисунок поперечного перерізу підводного оптичного кабелю.

**До основних переваг ОВ можна віднести наступні:**

- економія кольорових металів;
- широкосмугова можливість передачі великого потоку інформації (декілька тисяч каналів);
- малі втрати і відповідно великі довжини ділянок трансляцій (30-100 км.);
- малі габаритні розміри і маса (у 10 разів менше, ніж у електричних кабелів);
- висока захищеність від впливу зовнішніх фізичних полів; надійна техніка безпеки (відсутність іскріння і короткого замикання).

## **9.5 З'єднувачі для оптичних волокон**

З'єднувачі для оптичних волокон мають конструкцію, показану на рис.8 і виготовляються з кераміки. Втрата світла в з'єднувачі може складати 10-20%, але якщо з'єднувати оптичні волокна методом зварювання, то втрати складуть не більше 1-2%. Окрім з'єднувачів і зварювання існує також техніка механічного зрощення волокон, яка характеризується втратами близько 10%.



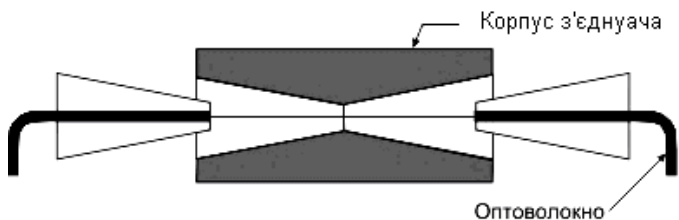


Рис.9.9 – Схема оптичного роз'єму

Використовуючи оптичні волокна можна створювати не тільки кільцеві структури. Можлива навіть побудувати фрагмент мережі, який по характеру зв'язків буде еквівалентний кабельному сегменту або хабу. Схема такого фрагмента мережі представлена на рис.9.9. Базовим елементом цієї субмережі є прозорий циліндр, на один із торців якого підключаються вихідні волокна всіх передавачів інтерфейсів пристроїв, що становлять субмережу. Сигнал з іншого торця через волокна поступає на вхід фотоприймачів інтерфейсів.

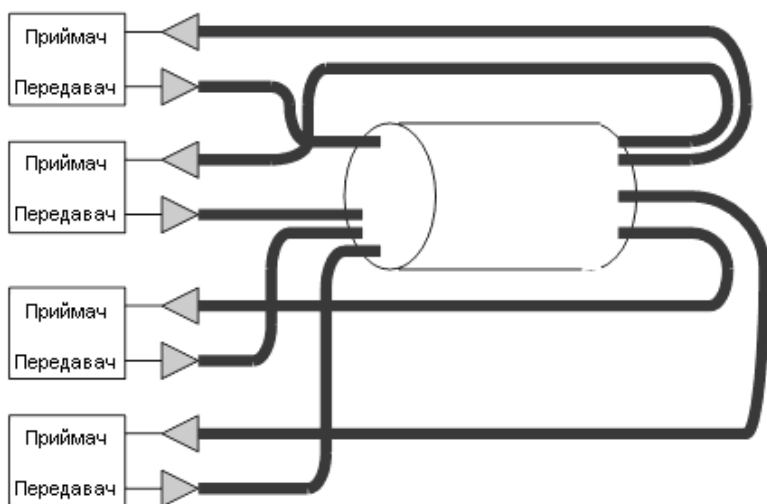


Рисунок 9.10 – Схема пасивного оптоволоконного хаба

## **9.7 Сучасний стан і перспективи розвитку волоконної оптики**

Оптичному волокну вже більше 50 років, але до сих пір відкриваються його досі невідомі властивості. Вчені університету штату Огайо з'ясували, що оптоволокно може бути в півтора рази міцніше, ніж вважалося раніше.

Найпопулярнішим типом скла для виробництва волокон є так званий E - glass. Цей матеріал був створений в 1950 році спеціально для потреб електроніки. Тепер він використовується для додавання міцності виробам з пластику - від душових кабін до інтер'єру автомобілів. Інші види скловолокна застосовуються для виробництва вогнетривких тканин, тросів і утеплювачів житлових приміщень.

Професор матеріалознавства Прабхат Гупта з колегами знайшов метод підвищення міцності E - glass та інших видів скла, що використовуються в оптоволоконних лініях зв'язку. Метод легко впровадити у виробництво - весь принцип нової технології зводиться до охолодження скляних волокон і деформування їх аж до зламування. Головне - попередньо пересвідчитися, що в склі немає дефектів.

Для вимірювань Гупта використовував волокна товщиною в 100 мікрон, охоложені до температури  $-195^{\circ}\text{C}$ . Потім зразки згинали в U - подібну форму і здавлювали між двома металевими пластинами. Заморожені волокна витримували тиск до півтора мільйона фунтів на  $\text{см}^2$ . Ця

цифра майже в 1,7 рази більше, ніж показували ранні експерименти - 870000 фунтів на см<sup>2</sup>.

Немає нічого дивного в тому, що відкрита властивість не була до сих пір виявлена. Матеріали удосконалюються для виконання певних завдань.

Іншим важливим відкриттям є створення фотонного мікročіпа малих розмірів. Кожні 80-100 км сигнал потребує очищення і посилення. Дотепер для цих цілей використовувалися громіздкі електронні підсилювачі, які гальмували сигнал.

Але досить недавно вчені продемонстрували науковому світу світловий підсилювач на кремнієвому чіпі, дія якого заснована на чотири-хвильовій взаємодії, яка підсилює оптичний сигнал «підкачкою» від іншого світлового джерела. Дана схема може використовуватися для очищення сигналу і формування чітких імпульсів. При цьому направляючий промінь складається із серії імпульсів, синхронізованих з вхідним сигналом.

Розміри такого пристрою дуже малі. Кремнієвим хвилевод складає декілька сотень нанометрів в поперечнику і 1,8 см завдовжки, він змонтований на кремнієвому чіпі розміром 1 нм. Довжина хвилеводу менше, ніж довжина хвилі випромінювання, тому початковий сигнал і сигнал «підкачки» обмінюються енергією на дуже короткій відстані. Крім того існує можливість не тільки посилення сигналу, але і зміни його довжини хвилі.

Пульсуючий сигнал «підкачки» об'єднаний із світловим променем іншої частоти підсилює сигнал, але не очищує його. Використання фотонного мікročіпа дозволяє усунути цей недолік, і на виході системи ми маємо посилений сигнал з чіткими імпульсами. Ця система працює в широкому діапазоні довжин хвиль, вона може

бути використана для складних оптоволоконних систем, в яких декілька довжин хвиль безперервно використовуються для передачі сигналів.

### Список літератури

1. Прищепа М.М., Погребняк В.П. Мікроелектроніка. Частина I. 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 акустoeлектроніка. - 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. Ефимов И.Е., Козырь И.Я., Горбунов Ю.И. Микроэлектроника. Физические и технологические основы, надежность. - Москва: Высшая школа, 1986. - 464 с.
7. Аваев Н.А., Наумов Ю.Е., Фролкин В.Т. Основы микроэлектроники. – Москва: Радио и связь, 1991. – 288 с.
8. Тилл У., Лаксон Дж. Интегральные схемы: Материалы, приборы, изготовление/ Под ред. М.В.Гальперина. – москва: Мир, 1985. – 504 с.
9. Радіотехніка: Енциклопедичний навчальний довідник: Навч. Посіб. / за ред. Ю.Л.Мазора, Є.А.Мачуського, В.І. Правди. – Київ: Вища школа, 1999. – 838 с.

10. Жеребцов И.П. Основы электроники. - Ленинград: Энергоатомиздат, 1989. - 242 с.
11. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. - Москва: Советское радио, 1980. - 264 с.
12. Герчановская В.П., Ипатов Э.Ф., Малова А.П. Новые профессии света. - Киев: Техника, 1989. - 120 с.
13. Носов Ю.Р., Сидоров А.С. Оптроны и их применение. - Москва: Радио и связь, 1981. - 320 с.
14. Андрущенко Л.М., Гроднев И.И., Панфилов И.П. Волоконно-оптические линии связи. - Москва: Радио и связь, 1984. - 260 с.
15. Лавриненко В.Ю. Справочник по полупроводниковым приборам. - Киев: Техніка, 1984. - 410 с.
16. Прохорский А.А. Основы автоматики и телемеханики. - Москва: Высшая школа, 1988. - 290 с.
17. Абрамов В.М. Электронные приборы и устройства. - Москва: Транспорт, 1989. - 110 с.
18. Александров Л.Н., Иванцев А.С. Многослойные пленочные структуры для источников света. - Новосибирск: Наука, 1981. - 130 с.
19. Мартышов К.И., Зайцев Ю.В. Технология производства резисторов. - Москва: Высшая школа, 1972. - 290 с.
20. Агаханян Т.М. Интегральные микросхемы. - Москва: Высшая школа, 1983. - 464 с.
21. Харченко В.М. Основы электроники. - Москва: Высшая школа, 1982. - 352 с.
22. Браммер Ю.А., Пащук И.Н. Импульсная техника. - Москва: Радио и связь, 1985. - 320 с.
23. Проценко І.Ю. Технологія та фізика тонких металевих плівок. - Суми: СумДУ, 2000. - 148 с.
24. Блех А., Селло Х., Грегор Л.В. Тонкие пленки в интегральных схемах // Технология тонких пленок. -

Т.2 / Под ред Л.Майссела, Р.Глэнга. - Москва: Сов. радио, 1977. - С.724 - 753.

25. Мікроелектроніка і наноелектроніка. Вступ до спеціальності / Ю. М. Поплавко, О. В. Борисов, В. І. Льченко та ін. – Київ: НТУУ «КПІ», 2010. – 160 с.