

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет

Л. В. Однодворець, І. М. Пазуха

МАТЕРІАЛИ І КОМПОНЕНТИ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

Навчальний посібник

Рекомендовано вченою радою Сумського державного університету

Суми
Сумський державний університет
2020

УДК 621.38

О-43

Рецензенти:

С. М. Данильченко – кандидат фізико-математичних наук, завідувач відділу радіаційної біофізики Інституту прикладної фізики НАН України (м. Суми);

О. В. Лисенко – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри прикладної математики та моделювання складних систем Сумського державного університету

*Рекомендовано до видання
вченою радою Сумського державного університету
як навчальний посібник
(протокол № 13 від 25 червня 2020 року)*

Однодворець Л. В.

О-43 Матеріали і компоненти функціональної електроніки :
навчальний посібник / Л. В. Однодворець, І. М. Пазуха. –
Суми : Сумський державний університет, 2020. – 196 с.

У навчальному посібнику подані науково-навчальні матеріали для вивчення дисциплін «Матеріали мікро- і наноелектроніки» та «Основи мікроелектроніки».

Видання рекомендоване студентам закладів вищої освіти денної, заочної й дистанційної форм навчання за спеціальністю «Електроніка».

УДК 621.38

© Однодворець Л. В., Пазуха І. М., 2020

© Сумський державний університет, 2020

ЗМІСТ

	С.
Передмова	5
Розділ 1 Матеріали мікро- й наноелектроніки	6
1.1 Класифікація матеріалів електроніки за їх призначенням.....	6
1.2 Провідникові матеріали	9
1.2.1 Класифікація провідникових матеріалів	9
1.2.2 Фізичні явища в провідниках.....	17
1.3 Напівпровідникові матеріали	19
1.3.1 Загальна характеристика та класифікація напівпровідників.....	19
1.3.2 Власна електронна й діркова електропровідності. Рухливість носіїв заряду.....	23
1.3.3 Фізичні процеси в напівпровідниках	27
1.3.4 Контактні явища.....	31
1.4 Діелектричні матеріали	40
1.4.1 Активні діелектрики	40
1.4.2 Пасивні діелектрики.....	46
1.5 Низькорозмірні структури електроніки.....	50
1.6 Високоентропійні сплави	53
 Розділ 2 Вироби мікроелектроніки	
та їх базові компоненти	58
2.1 Резистори	60
2.1.1 Напівпровідникові резистори	60
2.1.2 Плівкові резистори.....	61
2.2 Конденсатори	65
2.2.1 Напівпровідникові конденсатори	65
2.2.2 Плівкові конденсатори.....	66
2.3 Індуктивні елементи	69
2.4 Плівкові RC-структури.....	75
2.5 Діоди.....	76

2.5.1	Діоди універсального призначення	77
2.5.2	Імпульсні діоди.....	79
2.5.3	Тунельні й обернені діоди	81
2.5.4	Діоди у напівпровідникових ІМС.....	83
2.5.5	Діод Шотткі	84
2.6	Транзистори.....	86
2.6.1	Біполярні транзистори	86
2.6.2	Польові транзистори	92
2.7	Напівпровідникові прилади спеціального призначення.....	106
2.7.1	Стабілітрон.....	106
2.7.2	Тиристор.....	113
2.8	Напівпровідникові інтегральні мікросхеми (НІМС).....	120
2.8.1	Типи конструкцій і структура НІМС	120
2.8.2	Ізоляція елементів у НІМС.....	123
2.9	Плівкові й гібридні інтегральні мікросхеми	125
2.10	Великі інтегральні мікросхеми (ВІМС).....	130
Розділ 3 Функціональна електроніка.....		135
3.1	Оптоелектронні прилади.....	135
3.1.1	Фоторезистори та фотодіоди.....	137
3.1.2	Фототранзистори й фототиристори.....	141
3.1.3	Оптрони.....	145
3.1.4	Світловипромінювальні діоди	160
3.1.5	Волоконно-оптичні лінії зв'язку.....	162
3.2	Магнітоелектронні компоненти	173
3.3	Прилади хемотроніки	181
3.4	Акустоелектроніка.....	186
3.5	Компоненти кріотроніки	190
Список літератури.....		194

Передмова

Сучасний етап розвитку мікроелектроніки характеризується широким використанням інтегральних мікросхем (ІМС) в електронних інформаційних, сенсорних і радіотехнічних системах, що містять мільйони й десятки мільйонів елементів та компонентів, пов'язаних із прогресом електронного матеріалознавства, покращанням якості устаткування й появою якісно нових технологій. У цих умовах винятковою важливу роль відіграє необхідність підвищення надійності апаратури та мініатюризації елементів, компонентів, пристроїв і систем. Усі зазначені завдання успішно виконує інтегральна та функціональна мікроелектроніка.

Функціональна мікроелектроніка базується на можливості приладів бути альтернативою складних електронних схем, безпосередньо використовуючи фізичні явища, що відбуваються в результаті перетворення одного виду енергії на інший. Розроблення функціональних матеріалів з унікальними й водночас прогнозованими властивостями дає можливість виготовлення електронних систем для виконання комплексних логічних завдань й функції пам'яті.

Упровадження в промисловість різних типів роботів ставить перед мікроелектронікою нові виклики: оснащення роботів штучним інтелектом та забезпечення їх сенсорними системами, здатними забезпечувати адекватні реакції на зовнішні умови.

У навчальному посібнику розглянуті властивості матеріалів мікро- й наноелектроніки, фізичні основи роботи та конструктивно-технологічні особливості базових елементів і компонентів інтегральних мікросхем, принципи функціонування, будова, робочі параметри і характеристики пристроїв і компонентів функціональної електроніки.

РОЗДІЛ 1

МАТЕРІАЛИ МІКРО- Й НАНОЕЛЕКТРОНІКИ

1.1 Класифікація матеріалів електроніки за їх призначенням

Матеріали електроніки за своїм призначенням поділяють на три основні групи: електротехнічні, конструкційні та спеціального призначення.

Електротехнічні матеріали – матеріали, що мають особливі властивості щодо електромагнітного поля (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Загальна класифікація матеріалів електроніки

На майже всі електротехнічні матеріали впливає електричне або магнітне поле. Матеріали з певними властивостями щодо електричного поля поділяють на провідникові, напівпровідникові (НП) і діелектричні. Матеріали, що мають певні властивості щодо магнітного поля, можуть бути на сильно- й слабомагнітними.

Водночас серед сильномагнітних матеріалів також варто розрізняти провідникові, напівпровідникові та діелектричні, що обумовлює визначає частотний діапазон їх практичного використання.

Провідникові матеріали – матеріали, в яких переважає механізм провідності вільних електронів. Для провідникових матеріалів характерною є істотно виражена електропровідність. За практичним використання їх можна поділити на матеріали високої провідності й матеріали високого опору.

Напівпровідникові матеріали – матеріали, в яких переважає механізм електронно-діркової провідності. Особливістю напівпровідникових матеріалів є значна залежність питомої провідності від концентрації та виду домішок або різних енергетичних впливів (температури, освітленості, електромагнітних полів тощо).

Діелектричні матеріали – матеріали, в яких переважає механізм йонної провідності. Діелектричні матеріали функціонально здатні поляризуватися й зберігати електростатичне поле. За своїм призначенням їх можна поділити на пасивні (електроізоляційні) та активні (сегнетоелектрики, п'єзоелектрики тощо) діелектрики. Властивостями активних діелектриків можна керувати за допомогою зовнішнього енергетичного впливу.

Основна характеристика електротехнічних матеріалів – питома електропровідність σ , що є коефіцієнтом пропорційності між густиною струму j і напруженістю електричного поля E в законі Ома:

$$j = \sigma \cdot E. \quad (1.1)$$

Питома електропровідність σ залежить лише від властивостей матеріалу. Електропровідність чистих матеріалів та багатокомпонентних систем оцінюють за оберненою величиною – питомим опором, $\rho = 1/\sigma$.

Для основних груп електротехнічних матеріалів електроніки питомий опір становить:

- для провідникових матеріалів – $\rho \leq 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{м}$;
- для напівпровідникових матеріалів – $\rho = 10^{-5} - 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$;
- для діелектричних матеріалів – $\rho > 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Магнітні матеріали – матеріали, що можуть породжувати магнітне поле або видозмінювати зовнішнє.

Традиційна класифікація магнітних речовин ґрунтується на їх поділі за величиною й знаком магнітної сприйнятливості χ . Узагальнювальна блок-схема класифікації магнітних матеріалів електроніки зображена на рисунку 1.2.

Ізотропні матеріали, для яких $\chi < 0$ (напрями $\vec{H}$ і $\vec{J}$ є антипаралельними, де $\vec{H}$ та $\vec{J}$ – вектори напруженості й намагніченості магнітного поля відповідно), називають діамагнетиками. Для всіх інших речовин $\chi > 0$ (напрями $\vec{H}$ й $\vec{J}$ є паралельними), водночас матеріали, для яких



Рисунок 1.2 – Класифікація матеріалів електроніки

сприйнятливість коливається в межах 10^{-4} – 10^{-6} , називають парамагнетиками. Якщо $\chi \gg 1$, то матеріали вважають феромагнітними.

1.2 Провідникові матеріали

Провідниками електричного струму можуть бути як тверді тіла, так і рідини, а за відповідних умов навіть газу. До *твердих провідникових матеріалів* належать метали, металеві сплави й певні модифікації вуглецю, а до *рідких провідникових* – розплавлені метали та електроліти. Механізм проходження струму крізь метали у твердому й рідкому станах обумовлений рухом вільних електронів. Саме тому їх називають провідниками з електронною провідністю, або *провідниками першого роду*. Провідниками *другого роду* є електроліти (розчини кислот, лугів, і солей), а також розплави йонних з'єднань. Процес проходження струму крізь такі провідники пов'язаний із перенесенням йонів, у результаті якого склад електроліту постійно змінюється, а на електродах виділяються продукти електролізу.

Усі газу й пари, зокрема і пари металів, за низьких напруженостей електричного поля не проводять електричного струму. Проте якщо напруженість електричного поля перевищує певне критичне значення, за якого виникає явище ударної йонізації, газ може стати провідником. Істотно йонізований газ називають плазмою.

1.2.1 Класифікація провідникових матеріалів

Провідникові матеріали залежно від величини питомого опору та галузей використання можна поділити на такі групи: метали й сплави високої провідності; кріо-

та надпровідники; сплави високого опору; метали й сплави різного призначення; неметалічні провідникові матеріали.

Метали та сплави високої провідності. До них належать провідники з питомим опором $\rho \leq 10^{-7}$ Ом · м. Крім низького питомого опору, зазначені матеріали повинні відповідати вимогам, тобто бути високо міцними, корозійно стійкими, легко оброблюваними, зокрема легко лугуватися й зварювати.

Срібло. Серед усіх провідникових матеріалів срібло має найменшу питому провідність ($\rho = 1,6 \cdot 10^{-8}$ Ом · м), характеризується високою стійкістю до окиснення за нормальних умов, високою теплоємністю та теплопровідністю. У комплексі всі ці властивості забезпечують незначне нагрівання контактів і швидке відведення теплоти від контактних точок. Саме тому срібло використовують у широкій номенклатурі контактів елементної бази функціональної електроніки та як мікропровідник.

Мідь. Серед матеріалів високої провідності мідь є одним з найпоширеніших. Потрібно звернути увагу, що механічні та електричні властивості міді залежать не лише від хімічної чистоти, а й від її стану. Твердотягнена мідь марки МТ має меншу провідність і відносне подовження перед розривом, але більшу механічну міцність та твердість, ніж відпалена мідь марки ММ. У результаті відпалювання знижується міцність міді марок МТ, але підвищується провідність.

У електроніці мідь використовують як плівки для формування контактних майданчиків і провідних з'єднань між функціональними елементами схеми.

Алюміній. Алюміній є альтернативою міді в електроніці. Порівнюючи алюміній із міддю, варто зазначити, що його питомий опір у 1,6 раза більший за питомий опір міді, але водночас алюміній у 3,5 раза легший.

Завдяки меншій густині в алюмінію реалізується більша провідність на одиницю маси порівняно з міддю, тому за однакових опору й довжини дроти з алюмінію вдвічі легші від дротів із міді, незважаючи на більший поперечний переріз. Крім того, алюміній більш поширений у природі, ніж мідь, тому має меншу собівартість. Він легко окиснюється на повітрі, покриваючись оксидною плівкою, що відіграє роль захисного покриття. Ця властивість обумовлює високу корозійну стійкість, але водночас спричиняє труднощі під час лютування. Щодо інших матеріалів алюміній має від'ємний електрохімічний потенціал, що сприяє корозії в зоні контакту. Також недоліком алюмінію є низька механічна міцність. Порівняно з міддю відпалений алюміній утричі менш міцний.

В електроніці плівки алюмінію використовують як матеріал контактів та міжелементних з'єднань, що пов'язано з простотою технологічного процесу нанесення плівки на різні типи підкладок і високою адгезією до підкладок із Si та SiO₂.

Надпровідні матеріали. До надпровідних матеріалів належать матеріали, питомий опір яких після зниження температури до певного критичного значення різко зменшується, в результаті чого матеріал переходить у надпровідний стан (рис. 1.3). Питомий опір металів у надпровідному стані $\sim 10^{-25}$ Ом · м, що в 10^{17} разів менше за питомий опір міді за кімнатної температури.

У разі охолодження надпровідника, що знаходиться в зовнішньому магнітному полі, в момент переходу в надпровідний стан магнітне поле повністю виштовхується з його об'єму (ефект Мейснера).

За характером переходу з надпровідного в стан звичайної електропровідності в результаті дії зовнішнього магнітного поля розрізняють: **надпровідники 1-го роду** (перехід відбувається стрибкоподібно з досягненням

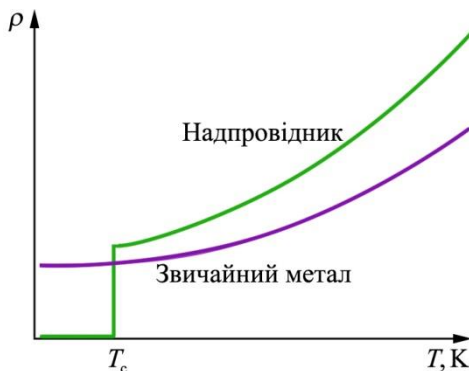


Рисунок 1.3 – Якісна температурна залежність питомого опору звичайного та над провідникового металів

критичного значення напруженості поля) і **надпровідники 2-го роду** (перехід поступовий). Залежності намагніченості $-4\pi M(H)$ від зовнішнього магнітного поля H для надпровідників 1-го та 2-го родів зображені на рисунку 1.4.

Більшість надпровідних металів є надпровідниками 1-го роду. Необхідно зауважити, що надпровідності не проявляють провідникові матеріали, що за нормальних умов належать до матеріалів із високою провідністю (срібло, мідь).

Крім чистих металів, надпровідниками є багато сплавів та інтерметалідних сполук. Ураховуючи те, що в сплавах спостерігається частковий ефект Мейснера (не відбувається повного виштовхування магнітного поля з об'єму), вони належать до надпровідників 2-го роду. В об'ємі останніх протікають кругові струми, що створюють магнітне поле, яке заповнює не весь об'єм, а розподіляється в ньому як окремі вихри (рис. 1.4 б). Явище надпровідності не спостерігається у феро- й антиферомагнітних матеріалах.

Відкриття явища надпровідності дало поштовх до

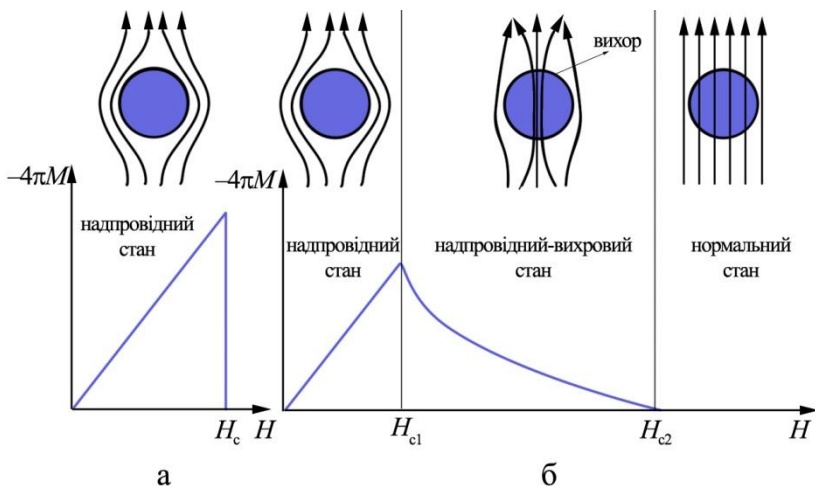


Рисунок 1.4 – Залежність намагніченості $-4\pi M(H)$ від зовнішнього магнітного поля H для надпровідників: а) 1-го роду; б) 2-го роду

розвитку нового напрямку – кріогенної електроніки – галузі, теорія і практика якої пов’язані із використанням електронних явищ у різних речовинах за низьких температур. Наприклад, порушення надпровідності матеріалу внаслідок дії зовнішнього магнітного поля використовують у функціонування кріотрона (детально конструкція та принцип роботи якого описані в 3-му розділі цього навчального посібника).

Сплави високого опору. До сплавів високого опору належать матеріали з питомим опором за нормальних умов, не меншим ніж $0,3 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Вони характеризуються не лише високим питомим опором, а й низьким термічним коефіцієнтом опору (10^{-4} – 10^{-6} K^{-1}). Найпоширенішими є сплави на основі міді – манганін (86 % Cu, 12 % Mn, 2 % Ni; 60 % Cu, 40 % Ni) та хромнікелієві (ніхроми) й залізохромалюмінієві сплави.

Сплави високого опору використовують для виготовлення електровимірювальних приладів, еталонних резисторів, реостатів, електронагрівальних елементів тощо.

Метали та сплави різного призначення. Серед цієї групи провідникових матеріалів варто виділити: тугоплавкі й благородні метали.

Тугоплавкі метали – метали з температурою плавлення, більшою за 1 700 °K. Особливість цих матеріалів – висока хімічна стійкість за нормальних умов, що погіршується зі зростанням температури. Це призводить до того, що тугоплавкі метали в результаті нагрівання на повітрі до високих температур інтенсивно окиснюються з утворенням летких сполук. Завдяки цьому їх можна використовувати для виготовлення нагрівальних елементів, що функціонують у вакуумі або атмосфері інертних газів.

До основних тугоплавких металів належать:

- вольфрам (найбільша температура плавлення та найменший температурний коефіцієнт лінійного розширення серед усіх чистих металів);

- молібден (найменший питомий опір серед тугоплавких металів; характеризується високою міцністю й пластичністю);

- тантал (попередньо дегазований може поглинати гази за температур 600–1 200 °C; використовуваний для виготовлення конденсаторів із великою питомою ємністю);

- ніобій (найменша робота виходу серед тугоплавких металів, високе газопоглинання в інтервалі температур 400–900 °C, найвища температура переходу в стан надпровідності (9,2 K) серед елементарних речовин);

- хром (гарна адгезія до різних типів підкладок (скляних, ситалових, керамічних) і висока якість з'єднання з будь-яким провідниковим матеріалом дозволяють використовувати хром для виготовлення резисторів,

контактних майданчиків, струмопровідних з'єднань в інтегральних мікросхемах);

- реній (використовуваний для виготовлення термопар із робочим діапазоном температур до 2 500–2 800 °С у вакуумі, водні або інертному середовищі, прецизійних резисторів).

Благородні метали – найбільш хімічно стійкі метали:

- золото Au (характеризується стійкістю до оксидних та сірчистих плівок на атмосфері як за кімнатної температури, так і під час нагрівання; в електроніці використовуване як контактний матеріал, для міжелементних з'єднань та напівпрозорих електродів фоторезисторів);

- срібло Ag (найменший питомий опір серед металів, стійке до окиснювання за кімнатних температур. Використовуване як електроди плівкових конденсаторів і провідники у височастотних котушках індуктивності. Сріблом покривають внутрішні поверхні хвилеводів для одержання шарів високої провідності. Срібло легко лютується звичайними лютниками. Широке використання срібла неможливо через його природний дефіцит;

- паладій Pd (інтенсивно поглинає водень; чистим, а також у сплавах з Ag або Cu використовуваний як контактний матеріал);

- платина Pt (на атмосфері не утворює сірчистих плівок, майже не розчиняє водню, використовувана для виготовлення термопар із робочим діапазоном температур до 1 600 °С; основа для контактних сплавів, що забезпечують високу надійність контактів).

Неметалічні провідникові матеріали. До цієї групи провідникових матеріалів належать: вуглецеві й композиційні провідні матеріали (контактоли, кермети), провідникові матеріали на основі оксидів.

Композиційні провідні матеріали – механічна суміш провідного наповнювача (металів, графіту, сажі, певних оксидів і карбідів) із діелектричною зв'язкою (органічними й неорганічними діелектриками), електричними властивостями яких можна керувати способом зміни складу та характеру розподілу компонентів. Композиційним матеріалам властива частотна залежність електропровідності та старіння внаслідок тривалого навантаження.

Контактоли – малов'язкі або пастоподібні полімерні композиції, що складаються зі струмопровідного наповнювача (дрібнодисперсних порошків металів: срібла, нікелю, паладію) і зв'язувальної речовини, якою здебільшого є виступають синтетичні смоли (епоксидні, фенолформальдегідні тощо). Використовувані як струмопровідні клеї для формування контактів метал – метал та метал – напівпровідник і електродів та струмопровідних доріжок на поверхні діелектриків.

Кермети – металодіелектричні композиції з неорганічною зв'язкою. Питомим опором керметів керують способом зміни їх композиційного складу. В електроніці для виготовлення резисторів використовують кермети на основі скла з паладієм і сріблом.

Провідникові матеріали на основі оксидів. Чисті оксиди металів за нормальних умов здебільшого належать до діелектричних матеріалів. Проте в разі неповного окиснення або введення домішок певного типу провідність оксидів різко підвищується, а їх питомий опір може становити $\sim 10^{-5}$ Ом · м.

Найчастіше в електроніці використовують двооксид олова SnO₂, плівки якого характеризуються високим зчепленням із керамічною або скляною підкладками й стійкістю до різних хімічних середовищ (руйнуються лише плавиковою кислотою або киплячим лугом), а також

високою прозорістю у видимій та інфрачервоній частинах спектра.

1.2.2 Фізичні явища в провідниках

Контакт двох металів ($\text{Me}_1\text{--Me}_2$) належать до одних із найпоширеніших у мікроелектронних приладах із низьким електричним опором. Особливістю такого контакту є те, що на межі двох металів унаслідок різної енергії Фермі в останніх виникає контактна різниця потенціалів.

На рисунку 1.5 наведена енергетична діаграма двох металів Me_1 та Me_2 , що характеризуються енергіями Фермі E_{F1} і E_{F2} , до утворення контакту й після його формування (контакт у стані рівноваги). Термодинамічні роботи виходу електронів для Me_1 і Me_2 відповідно дорівнюють $E_{\text{вих}1}$ та $E_{\text{вих}2}$. Кінетична енергія електронів на рівні Фермі також у різних металів буде різною. Отже, під час формування

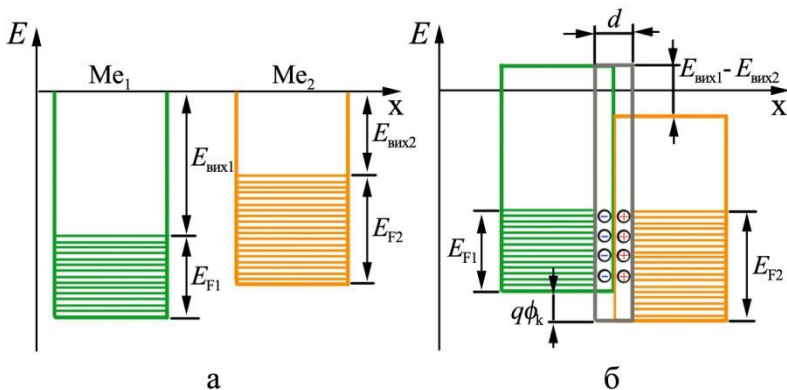


Рисунок 1.5 – Енергетична діаграма контакту двох металів Me_1 і Me_2 : а) до контакту; б) контакт у стані рівноваги

контакту Me_1 – Me_2 електрони намагаються досягнути стану з мінімальною енергією. Так виникає перехід носіїв заряду з області з більшою енергією Фермі в область із меншою (з металу 2 у метал 1). У результаті такого переходу Me_2 заряджається позитивно, а Me_1 – негативно. Між металами виникає різниця потенціалів, що перешкоджає переходу електронів. Коли робота електрона з подолання сил поля, які виникає в результаті створення різниці потенціалів, буде дорівнювати різниці енергій електронів, що проходять крізь контакт, система досягне рівноваги.

Контактну різницю потенціалів можна визначити за співвідношенням

$$U_{Me1-Me2} = U_{Me2} - U_{Me1} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_{Me1}}{n_{Me2}}, \quad (1.2)$$

де U_{Me1} та U_{Me2} – потенціали зіткнення металів; n_{Me1} і n_{Me2} – концентрації електронів у металах Me_1 та Me_2 ; k – стала Больцмана; T – термодинамічна температура; e – заряд електрона.

За різної температури між точкою лютування двох різних провідників T_1 і їх вільних кінців провідників T_2 виникає термоелектричний струм. Водночас на вільних кінцях простежується різниця потенціалів – термоелектрорушійна сила (термоЕРС). Це явище одержало назву ефекту Зеебека. Термоелектрорушійна сила визначається за співвідношенням

$$U = \frac{k}{q} (T_1 - T_2) \ln \frac{n_A}{n_B}. \quad (1.3)$$

Для двох конкретних речовин співвідношення (1.3)

можна переписати як:

$$U = C \cdot (T_1 - T_2), \quad (1.4)$$

де C – коефіцієнт термоЕРС, стала величина для цієї заданої пари провідників.

1.3 Напівпровідникові матеріали

1.3.1 Загальна характеристика та класифікація напівпровідників

Напівпровідники – широкий клас речовин зі значеннями питомої електропровідності, проміжними між питомою електропровідністю металів $\sigma \sim 10^6\text{--}10^4 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ і діелектриків $\sigma \sim 10^{-10}\text{--}10^{-12} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ (величина σ наведена за кімнатної температури).

Характерна особливість напівпровідників – зростання електропровідності зі зростанням температури, що в широкому інтервалі температур відбувається експоненціально:

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(\frac{E_A}{kT}\right), \quad (1.5)$$

де σ_0 – провідність за температури $T \rightarrow \infty$; E_A – енергія активації електропровідності; k – постійна Больцмана.

Електрони в напівпровідниках зв'язані з атомами енергією зв'язку E_A . Із підвищенням температури тепловий рух починає розривати зв'язки електронів, і їх частина стає вільними носіями заряду. На рисунку 1.6 зображена залежність провідності власного напівпровідника від температури.

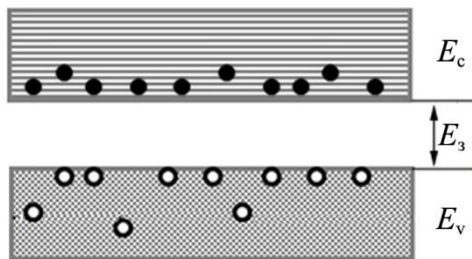


Рисунок 1.6 – Валентна зона (білі кружечки – дірки) та зона провідності (чорні кружечки – електрони провідності): E_z – ширина забороненої зони; E_c – дно зони провідності; E_v – найвищий енергетичний рівень валентної зони за кімнатної температури ($T = 300\text{ K}$)

Знаючи α , можна визначити величину E_A – енергію активації електропровідності. Для домішкових напівпровідників температурна залежність електропровідності більш складна. 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 способом зміни температури, введенням домішок є основою їх частого використання в мікроелектроніці.

Термін «напівпровідники» найчастіше розуміють як сукупність декількох найбільш типових груп речовин, напівпровідникові властивості яких чітко виражені вже за кімнатної температури.

Наведемо приклади таких груп:

1) елементи IV групи періодичної системи елементів – Si та Ge. Їх атоми 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 за температури 300 К його власна провідність мала;

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

3) елементи VI та V груп періодичної системи елементів. Елементи VI групи (Te, Se) були відомими раніше, ніж Si й Ge, водночас із Se широко виготовляли випростовувачі електричного струму та фотоелементи. Елементи V групи (As, Sb, Bi) – напівметали, близькі до напівпровідників, – використовують як приймачі інфрачервоного випромінювання. Серед сполук елементів VI групи (O, S, Se, Te) з елементами I–V груп досить багато напівпровідників, але більшість із них мало вивчена. Найбільш дослідженими є Cu_2O (купоросні випростовувачі) та Bi_2Te_3 (термоелементи);

4) з'єднання елементів VI групи з перехідними металами (Ti, V, Mn, Fe, Ni). У таких напівпровідниках переважає йонний зв'язок. Більшість з яких має магнітне впорядкування (магнітні напівпровідники), а в певних (V_2O_3 , Fe_3O_4 , NiS) у разі зміни температури й тиску спостерігається фазовий перехід напівпровідник – метал.

Закони руху носіїв заряду в напівпровідниках описує зонна теорія твердого тіла. У ньому взаємодія сусідніх атомів приводить до розщеплення енергетичних рівнів. 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 енергії, що відповідає енергії забороненої зони. Для глибоких рівнів розщеплення невелике, тому що електрони на них екрануються зовнішніми оболонками, а їх взаємодія із сусідніми атомами незначна. Зона утворена цими рівнями, називається валентною. Поряд із глибокими заповненими рівнями, на яких перебувають електрони, в атомі є більш високі (пусті). Вони можуть бути заповненими, якщо атом захопить зайвий електрон і перетвориться на від'ємно заряджений йон. У твердому тілі розщеплюються незайняті рівні й утворюється незаповнена зона – *зона провідності*. За температури абсолютного нуля вона є повністю вільною, на її рівнях немає жодного електрона. Між валентною та зоною провідності знаходиться заборонена. Відповідно до принципу Паулі максимальна кількість електронів на одному рівні обмежена. Це означає, що в багатозарядних атомах усі електрони не можуть накопичуватися на нижньому енергетичному рівні, тому також заповнюють верхні. Тепловий рух закидає частину електронів із валентної в зону провідності, водночас у валентній зоні з'являються дірки. Електрони й дірки найчастіше накопичуються поблизу нижнього краю (дна) зони провідності E_c або верхнього краю (стелі) валентної зони E_v на енергетичних відстанях від них $\sim kT$, значно менших за ширину дозволених зон (рис. 1.6).

У вузьких областях $\sim kT$ складні залежності енергії носіїв від їх квазіімпульсу p та $E(p)$ (закон дисперсії) набувають найбільш простого вигляду. Зокрема, для електронів поблизу E_c закон дисперсії такий (згідно з формулою 1.5):

$$E = E_c + \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^3 \frac{(p_i - p_{0i}^e)^2}{m_i^e}, \quad (1.6)$$

де i – номер осі координат; p_0^e – квазіімпульс, що відповідає E_c ; m_i – ефективна маса електронів провідності. Аналогічно для дірок (згідно з формулою 1.4)

$$E = E_v + \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^3 \frac{(p_i - p_{0i}^d)^2}{m_i^d}. \quad (1.7)$$

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

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

1.3.2 Власна електронна й діркова електропровідність. Рухливість носіїв заряду

У функціонуванні всіх мікроелектронних пристроїв визначальну роль відіграють явища перенесення рухливих носіїв заряду, або так звані кінетичні явища. Їх причиною є те, що в процесі свого переміщення рухливі носії заряду переносять масу, заряд, енергію та ін. За умов, за яких потоки носіїв заряду стають спрямованими, виникає ряд електричних ефектів, на яких базується практичне застосування напівпровідників (електропровідність, ефект Холла, зміна опору в магнітному полі, термоЕРС). Електрони й дірки, що можуть переміщуватися, тобто створювати електропровідність, називають рухливими носіями заряду, або носіями заряду. *Генерація пар носіїв заряду* – це виникнення пари електрон провідності – дірка

провідності. Завдяки хаотичному руху електронів і дірок провідності обов'язково відбувається 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, що складається з електронної та діркової. Незважаючи на те що кількість електронів і дірок у власному напівпровіднику однакова, електронна електропровідність переважає, що пояснюється більшою рухливістю електронів порівняно з рухливістю дірок. Якщо до напівпровідника не застосовують напруги, то електрони й дірки провідності здійснюють хаотичний тепловий рух, водночас ніякого струму немає. У результаті різниці потенціалів у напівпровіднику виникає електричне поле, що прискорює електрони й дірки та утворює їх поступальний рух – струм провідності. Рух носіїв заряду в результаті дії електричного поля називають дрейфом носіїв, а струм провідності – струмом дрейфу ($i_{др}$). Повний струм провідності складається з електронного та діркового:

$$i_{др} = i_{nдр} + i_{рдр}. \quad (1.8)$$

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

$$j_{др} = j_{nдр} + j_{рдр}. \quad (1.9)$$

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

$$j_{\text{ндр}} = n \cdot e \cdot V_n, \quad (1.10)$$

де n – концентрація електронів; e – заряд електрона; V_n – середня швидкість поступального руху електронів у результаті дії поля.

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

$$V_n = \mu_n \cdot E, \quad (1.11)$$

де μ_n – коефіцієнт пропорційності, який називається рухливістю носіїв заряду (у нашому разі електронів).

Рухливість носіїв заряду – це відношення швидкості їх спрямованого руху у твердому тілі $V_{\text{др}}$ до напруженості електричного поля E , тобто фізична величина, що чисельно дорівнює середній швидкості поступального руху носіїв заряду в результаті дії поля з одиничною напруженістю. Одиницею вимірювання рухливості є $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Рухливість носіїв заряду в різних напівпровідниках різна (таблиця 1.1), із підвищенням температури вона зменшується, тому що збільшується кількість зіткнень носіїв з атомами кристалічної ґратки.

Підставивши вираз (1.11) у формулу (1.10), одержимо

$$j_{\text{ндр}} = n \cdot e \cdot \mu_n \cdot E. \quad (1.12)$$

У цьому виразі добуток $n \cdot e \cdot \mu$ є питомою провідністю σ_n , про що можна зробити висновок із закону Ома для густини струму

Таблиця 1.1 – Рухливість носіїв заряду

Напівпровідник	Рухливість електронів при $T = 290 \text{ K}$, $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	Рухливість дірок при $T = 290 \text{ K}$, $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$
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

$$j_{\text{ндр}} = \sigma_n \cdot E. \quad (1.13)$$

Аналогічні співвідношення можна записати для дірок. Тоді густина повного струму дрейфу у власному напівпровіднику

$$j_{\text{др}} = n \cdot e \cdot \mu_n \cdot E + p \cdot e \cdot \mu_p \cdot E = (\sigma_n + \sigma_p) \cdot E, \quad (1.14)$$

а повна питома провідність

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p = n \cdot e \cdot (\mu_n + \mu_p). \quad (1.15)$$

Отже, питома провідність залежить від концентрації носіїв та їх рухливості. У напівпровідниках у разі підвищенні температури завдяки інтенсивній генерації пар носіїв концентрація останніх зростає швидше, ніж зменшується їх рухливість, тому з підвищенням температури провідність зростає. Для порівняння варто зазначити, що в металах концентрація електронів провідності майже не залежить від температури й із підвищенням температури провідність зменшується через зменшення рухливості електронів. Рухливість дірок менша за рухливість електронів (табл. 1.1), а діркова провідність – від електронної.

1.3.3 Фізичні процеси в напівпровідниках

Ефект Ганна – це ефект генерації високочастотних коливань електричного струму в напівпровіднику під достатньо високою напругою, прикладеною до нього, відкритий американським фізиком Дж. Ганном у 1963 році в кристалі арсеніду галію (GaAs) з електронною провідністю. Цей ефект ретельно досліджений, пояснені фізичні процеси в напівпровідниках за високої напруженості електричного поля, що на них впливає, та розроблені прилади для генерації коливань НВЧ. Генерація виникає, якщо постійна напруга U , прикладена до напівпровідника довжиною l , така, що середнє електричне поле E в зразку дорівнює $E = U/l$, що відповідає спадній ділянці вольт-амперної характеристики $E_1 - E_2$ (рис. 1.7). Коливання струму мають вигляд періодичної послідовності імпульсів із частотою їх повторення, зворотно пропорційною напруженості електричного поля E . У разі ефекту Ганна в зразку періодично з'являється, переміщується по ньому й зникає область сильного електричного поля – домен Ганна. Домен виникає внаслідок того, що однорідний розподіл електричного поля є нестійким. Дійсно, якщо в напівпровіднику випадково з'являється неоднорідний розподіл концентрації електронів у вигляді дипольного шару, то між зарядженими областями виникає додаткове поле ΔE (рис. 1.8). Якщо область підвищеної концентрації електронів ближча до катода, то ΔE додається до зовнішнього електричного поля так, що поле всередині дипольного шару стає більшим, ніж зовні. Якщо водночас дифузійний опір зразка додатний, тобто струм зростає зі зростанням поля, то струм усередині шару більший, ніж зовні ($\Delta j > 0$). Якщо дифузійний опір від'ємний (струм зменшується зі зростанням поля), то струм менше там, де E

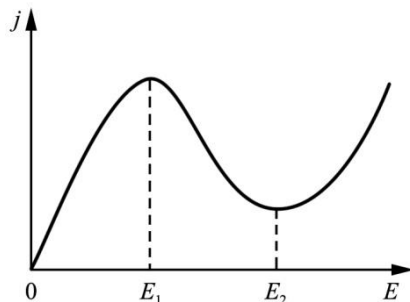


Рисунок 1.7 – Вольт-амперна характеристика:
 E – електричне поле, утворене різницею потенціалів;
 j – густина струму

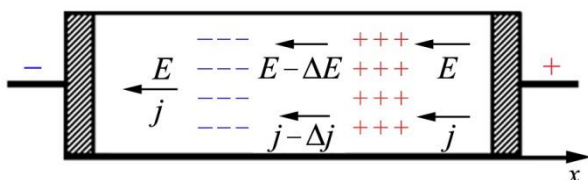


Рисунок 1.8 – Схема розвитку електричного домену

більше, тобто всередині шару, і неоднорідність наростає. У результаті цього виникає електричний домен. Поза доменом $E < E_1$, завдяки цьому нові домени не виникають. Стійкий стан зразка – це стан з одним доменом. Оскільки домен утворюють електрони провідності, він рухається в напрямку їх дрейфу зі швидкістю v , близькою до дрейфової. Домен виникає поблизу катода й, дійшовши до анода, зникає. Відповідно до його зникнення падіння напруги на домені зменшується, а на іншій частині зразка збільшується. Одночасно зростає струм у зразку. Частота коливань струму $f = v/l$.

У GaAs з електронною провідністю за кімнатній температури $E \sim 3 \cdot 10^5 \text{ В / м}$, $v \sim 10^5 \text{ м / с}$ і при

$l = 50\text{--}300$ мкм, $f = 0,3\text{--}2$ ГГц. Розмір домену становить $10\text{--}20$ мкм. Ефект Ганна, крім GaAs, спостерігається в напівпровідниках InP, CdTe, ZnS, InSb, InAs і Ge з дірковою провідністю.

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

Якщо на НП одночасно діють електричне й магнітне поля, то в напівпровіднику виникають так звані гальваномагнітні ефекти, найбільш поширеним серед яких є ефект Холла.

Ефект Холла – це гальвано-магнітний ефект, який полягає в тому, що під час прикладання зовнішнього магнітного поля з індукцією $\vec{B}$ на НП-пластину зі струмом густиною $\vec{j}$ (водночас напрямком силових ліній магнітного поля перпендикулярний до напрямку проходження струму) на бічних гранях пластини в напрямку, перпендикулярному до струму й магнітного поля, виникає різниця потенціалів – ЕРС Холла (рис. 1.9). Поява різниці потенціалів пов'язана з тим, що на носіях заряду, що рухаються в магнітному полі зі швидкістю v , діє сила Лоренца, яка відхиляє їх до бічних граней пластини,

$$F_{\text{л}} = q \cdot v \cdot B \cdot \cos\alpha, \quad (1.16)$$

де α – кут між напрямками вектора швидкості та індукції магнітного поля.

Як відомо, напрямок сили Лоренца обумовлений лише напрямками електричного й магнітних полів і не залежить від типу носіїв заряду, тому електрони й дірки у напівпровідниках будуть відхилятися в одному напрямку за заданих напрямів векторів напруженості електричного поля та індукції магнітного поля. Проте, оскільки

електрони й дірки мають заряди, протилежні за знаком, полярність ЕРС Холла в напівпровіднику n -типу буде протилежною полярності, що виникає в напівпровіднику p -типу. Цю особливість використовують для визначення типу електропровідності напівпровідників.

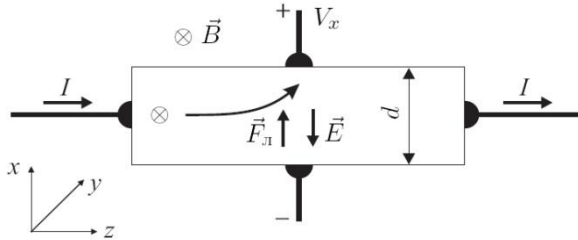


Рисунок 1.9 – Механізм виникнення ЕРС Холла в напівпровіднику

Величину ЕРС Холла обчислюють за співвідношенням

$$e_x = X \frac{IB}{a}, \quad (1.17)$$

де $X = 1/qr$, – стала Холла (p – концентрація дірок); I – струм, що проходить у пластині напівпровідника перпендикулярно до напрямку ліній магнітної індукції B ; a – ширина пластини.

Для напівпровідника n -типу величина сталої Холла визначається за співвідношенням $X = 1/qn$, де n – концентрація електронів. Проте внаслідок розсіювання носіїв струму в напівпровіднику їх швидкості будуть неоднаковими, тому в правій частині співвідношення для сталої Холла вводиться коефіцієнт A .

У разі напівпровідника змішаного типу внаслідок відхилення електронів і дірок магнітним полем в одну

сторону, величина сталої Холла буде обчислюватися за більш складним співвідношенням, що враховує концентрацію електронів n та дірок p провідності

$$X = \frac{A}{q} \cdot \frac{p\mu_p^2 - n\mu_n^2}{(p\mu_p - n\mu_n)^2}, \quad (1.18)$$

де μ_n і μ_p – рухливість електронів та дірок провідності відповідно.

За $p = 0$ одержуємо сталу Холла для домішкового напівпровідника n -типу $X_n = -A/(q \cdot n) = -A \cdot \mu_n/\sigma_n$, а за $n = 0$ – сталу Холла для домішкового напівпровідника p -типу $X_p = -A/(q \cdot p) = -A \cdot \mu_p/\sigma_p$. Зауважимо, що для Ge й Si – основних матеріалів сучасної електроніки – $A = 3/8$.

Фотоелектричний ефект. Принцип функціонування оптоелектронних приладів базується на використанні зовнішнього або внутрішнього фотоефекту. *Зовнішнім фотоефектом* називається вихід вільних електронів із поверхневого шару фотокатода в зовнішнє середовище в результаті дії світла. *Внутрішнім фотоефектом* називається вільне переміщення всередині речовини електронів, звільнених від зв'язків в атомах у результаті дії світла, що змінюють його електропровідність або викликають появу ЕРС на межі двох речовин (p - n -переході).

1.3.4 Контактні явища

На основі фізичних властивостей контактів метал – напівпровідник (Me–НП), напівпровідник p -типу–напівпровідник n -типу (НП(p)–НП(n)) ґрунтуються принципи дії більшості мікроелектронних елементів. Важливе значення має пасивна роль контактів, що полягає

в забезпеченні підведення електричного струму. На межі поділу між двома різними за типом електропровідності напівпровідниками або напівпровідником і металом виникають потенціальні бар'єри, що є наслідком перерозподілу концентрацій рухомих носіїв заряду між контактувальними матеріалами. Електричні властивості пограничного шару залежать як від величини, так і від напрямку зовнішньої напруги, що прикладається. Якщо пограничні шари мають нелінійні вольт-амперні характеристики, то їх називають випростувальними переходами. Нелінійні властивості переходів використовують для випростування електричного струму, перетворення, підсилення генерації електричних сигналів. На основі випростувальних переходів функціонують біполярні діоди й транзистори, тунельні діоди, діоди Шоттки, та інші прилади.

Усі електричні контакти поділяють на три типи: лінійні, нелінійні й інжекційні.

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

Нелінійні контакти – це контакти, якщо мають нелінійну ВАХ, використовувані для випростування струму, детектування й генерації сигналів, помноження частоти.

Інжекційні контакти – це контакти, що використовувані як джерело надлишкових носіїв заряду для їх проникнення в напівпровідник або діелектрик у результаті дії електричного поля. В інжекційних контактах зовнішнє електричне поле порушує рівновагу потоків носіїв заряду через контакт двох твердих тіл із різними роботами виходу електронів.

Розглянемо різні типи контактів на основі НП більш

детально.

Контакт напівпровідник – напівпровідник (НП–НП). Область на межі двох напівпровідників із різними типами електропровідності називають електронно-дірковим або *p-n*-переходом. Електронно-дірковий перехід має несиметричну провідність, тобто нелінійний опір. Функціонування більшості напівпровідникових приладів (діодів, транзисторів та ін.) базується на використанні властивостей одного або декількох *p-n*-переходів. Якщо на переході немає зовнішньої напруги, носії заряду в кожного напівпровідника здійснюють хаотичний тепловий рух. Відбувається їх дифузія з одного напівпровідника в інший. Отже, з напівпровідника *n*-типу в напівпровідник *p*-типу дифундують електрони, а в зворотному напрямку з – дірки.

Контакт напівпровідник – діелектрик (НП–Д). Найбільш поширеними є контакти Si – SiO. Шар оксиду кремнію містить йонізовані атоми донорів. Якщо вони знаходяться близько до поверхні поділу, то впливають на рух носіїв струму напівпровідника й змінюють їх концентрацію в приповерхневому шарі. Наявність збіднених або збагачених шарів впливає на функціонування окремих елементів напівпровідникової інтегральної мікросхеми.

Контакт метал – напівпровідник *n*-типу (Me–НП(*n*)). Якщо в контакті металу з напівпровідником *n*-типу (рис. 1.10 а) робота виходу електронів із металу менша, ніж робота виходу з напівпровідника, переважатиме вихід електронів із металу в напівпровідник. Тому в шарі напівпровідника навколо межі накопичуються основні носії (електрони), він стає збагаченим, тобто в ньому збільшується концентрація електронів. Опір такого шару буде низьким за будь-якої полярності напруги, що прикладається, і такий перехід не матиме

випростовувальних властивостей. Його називають непрямым (омічним) контактом.

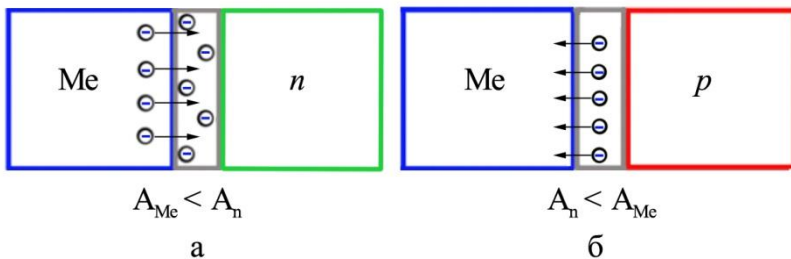


Рисунок 1.10 – Контакт металу з напівпровідником:
а) *n*-типу; б) *p*-типу

Контакт метал – напівпровідник *p*-типу (Me–НП(*p*)). У такому разі (рис. 1.10 б) із напівпровідника в метал переходить більша кількість електронів, ніж у зворотному напрямку, водночас у примежовому шарі напівпровідника формується область збагачена основними носіями (дірками), із низьким опором. Цей тип контакту також непрямої. Обидва типи непрямі контакти використовуються в напівпровідникових приладах для розроблення виводів від *n*- і *p*-областей. Для цього підбирають відповідні метали.

Аналогічними є випрямні властивості контакту металу з напівпровідником *p*-типу за $A_{Me} < A_p$.

Розглянемо більш детально характеристики випрямного контакту метал – напівпровідник. На рисунку 1.11 зображені енергетичні діаграми контакту Me–НП *n*-типу для двох варіантів: метал та напівпровідник ізольовані один від одного (позиція а); метал і напівпровідник у контакті (позиції б та в). Згідно з рисунком 1.11 енергетичні діаграми напівпровідника *n*-типу й металу орієнтовані щодо енергетичного рівня

вільного електрона. Розглянемо енергетичне положення електронів провідності в металі та напівпровіднику щодо вільних електронів. Оскільки електрони провідності взаємодіють з йонами кристалічних ґраток, їх енергія значно менша за енергію вільних електронів.

Щоб електрон із дна зони провідності металу або напівпровідника перемістився у вакуум (став вільним), йому потрібно передати енергію, що дорівнює зовнішній роботі виходу відповідно E_{Me} та $E_{\text{нп}}$. Зовнішня робота виходу залежить від властивостей кристалічної ґратки. Для матеріалів, використовуваних в електроніці, дорівнює 4–6 еВ (наприклад, для Si – 4,15 еВ). Для переміщення електрона з рівня Фермі у вакуум необхідна термодинамічна робота виходу E_{MeT} і $E_{\text{нпT}}$, зокрема для використовуваних металів вона дорівнює 4–6 еВ (для Al – 4,1 еВ; Mo – 4,7 еВ; Pt – 5,3 еВ). Хоча висота потенціальних бар'єрів для електронів металів та напівпровідників значна, проте деяка частка електронів провідності може вийти у вакуум.

Оскільки метал ізольовано від напівпровідника, емісія електронів не буде довготривалою. Зі зменшенням кількості електронів у кожному з матеріалів вони заряджатимуться позитивно. Електричне поле, що водночас виникатиме, стримуватиме емісію електронів. Наблизимо метал до напівпровідника (приведемо в контакт) на відстань сталої ґратки.

Розглянемо умови, за яких термодинамічна робота виходу з металу більша за відповідну з напівпровідника ($E_{\text{MeT}} > E_{\text{нпT}}$). У перший момент між металом і напівпровідником не буде електричного поля. Виникне два потоки електронів – із напівпровідника в метал і з металу в напівпровідник. Потік електронів із напівпровідника буде більшим, ніж із металу. У металі накопичується негативний заряд електронів, а в напівпровіднику –

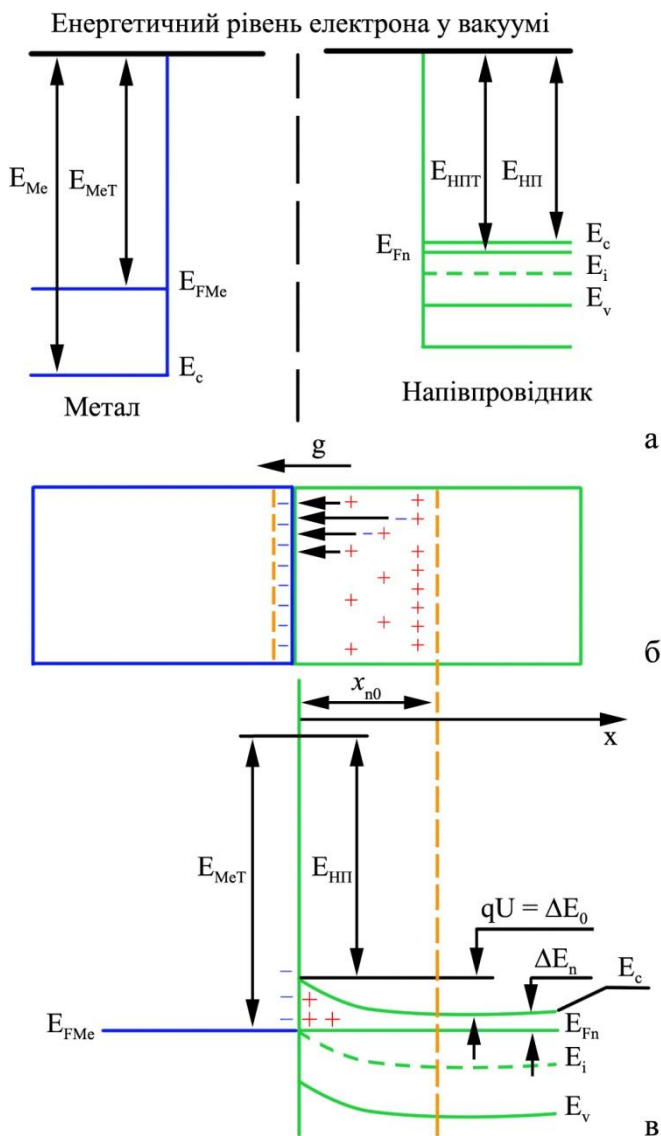


Рисунок 1.11 – Енергетичні діаграми металу й напівпровідника: а) метал і напівпровідник ізольовані; б) – в) метал та напівпровідник у контакті

позитивний йонізованих атомів домішки. Між металом та напівпровідником виникне різниця потенціалів U . За таких умов для переходу електрона з напівпровідника в метал йому потрібно долати додатковий потенціал

$$\Delta E = -qU. \quad (1.19)$$

Потік електронів із напівпровідника в метал зменшуватиметься:

$$j_{HM} = \frac{m(kT)^2}{2\pi^2 h^3} \exp\left(-\frac{E_{HT} + \Delta E}{kT}\right), \quad (1.20)$$

а потік електронів із металу в напівпровідник залишиться без змін.

Різниця потенціалів між матеріалами зростатиме доти, доки потоки не зрівняються й настане термодинамічна рівновага $j_{HM-Me} = j_{Me-NIP}$. Відповідно до цього, максимальна висота додаткового бар'єра в зазначеному стані дорівнюватиме

$$\Delta E_0 = E_{MeT} - E_{NIP}. \quad (1.21)$$

Це означає, що в стані рівноваги рівні Фермі металу й напівпровідника суміщаються (рис. 1.11 в).

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

$$U_0 = \frac{\Delta E_0}{q} = \frac{E_{MT} - E_{HT}}{q}. \quad (1.22)$$

У переході метал – напівпровідник створюється електричне поле, вектор напруженості якого спрямований від напівпровідника до металу. Електричне поле майже не проникає в метал, а локалізується в приповерхневому шарі напівпровідника, товщину x_n якого розраховують як для p - n -переходу. Шар збіднюється основними носіями заряду (електронами), а просторовий заряд у ньому створюється позитивно йонізованими донорними атомами. Електричне поле в переході накладається на поле атомів у ґратці, але воно значно менше, ніж останнє, тому не може змінити структури енергетичних зон, а лише викривлює їх. Оскільки рівні Фермі металу й напівпровідника за рівноваги суміщаються, то відстань від дна зони провідності напівпровідника E_c до рівня Фермі E_{Fn} залежить від координати x і за енергетичною діаграмою визначається так:

$$\Delta E_n(x) = E_c - E_{Fn} + \Delta E(x), \quad (1.23)$$

де E_c – енергія дна зони провідності в глибині напівпровідника.

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

$\Delta E(x) = \Delta E_0$ у разі $x = 0$. Розподіл електронів у приповерхневому шарі напівпровідника визначається за формулою

$$n(x) = n_0 \exp\left[-\frac{\Delta E(x)}{kT}\right] = N_D \exp\left[-\frac{U(x)}{U_T}\right], \quad (1.24)$$

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

Отже, подібно до *p-n*-переходу, контакт метал – напівпровідник за $E_{\text{мет}} > E_{\text{нпт}}$ 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, позитивно заряджена. Електричне поле в переході майже не проникає в метал, а зосереджене в приповерхневому шарі напівпровідника. Такий контакт металу з напівпровідником називають бар'єром Шотткі, а створені на його основі діоди – діодами Шотткі.

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

$$U' = U_0 \pm U. \quad (1.25)$$

Якщо зовнішню напругу U ввімкнути прямо, 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: $U' = U_0 + U$. Збільшаться товщина та опір ОПЗ. Через контакт проходитиме лише зворотний струм термічно

збуджених електронів металу в прискорювальному полі контактного шару.

1.4 Діелектричні матеріали

За функціями в електроніці діелектричні матеріали можна поділи на дві основні групи – активні (керовані); та пасивні (електроізоляційні й конденсаторні).

1.4.1 Активні діелектрики

Активними називаються діелектрики, властивостями яких можна керувати за допомогою зовнішніх енергетичних впливів і використовувати ці впливи для створення функціональних елементів електроніки.

До активних діелектриків належать:

- сегнето-, п'єзо- та піроелектрики;
- електро-, магніто- й акустооптичні матеріали;
- матеріали квантової електроніки;
- рідкі кристали;
- діелектричні кристали з нелінійними оптичними властивостями.

Сегнетоелектрики – матеріали, що характеризуються спонтанною намагніченістю, напрямок якої можна змінювати за допомогою зовнішнього електричного поля.

За відсутності зовнішнього електричного поля сегнетоелектрики мають доменну структуру. Домени – це макроскопічні області, зі спонтанною поляризацією, що виникає в результаті протікання внутрішніх процесів у діелектрику. Оскільки напрямки електричних моментів у різних доменів різний, то сумарна поляризованість зразка буде дорівнювати нулю.

У результаті впливу зовнішнього електричного поля змінюються напрямки електричних моментів доменів, що створює ефект значної поляризації.

Основні властивості сегнетоелектриків:

- надвисокі значення діелектричної проникності ($\epsilon \sim 10^3$ – 10^4);

- діелектрична проникність, а відповідно й поляризація P , залежать від зовнішнього електростатичного поля (*нелінійні діелектрики*). Ця властивість одержала назву *діелектричного гістерезису*;

- наявність точки К'юрі – температури, за якої (та вищої) сегнетоелектричні властивості зникають.

Крива поляризації сегнетоелектрика зображена на рисунку 1.12. За зазначеної температури відбувається фазовий перехід 2-го роду.

Галузі застосування сегнетоелектриків: виготовлення малогабаритних низькочастотних конденсаторів із великою питомою ємністю, та нелінійних

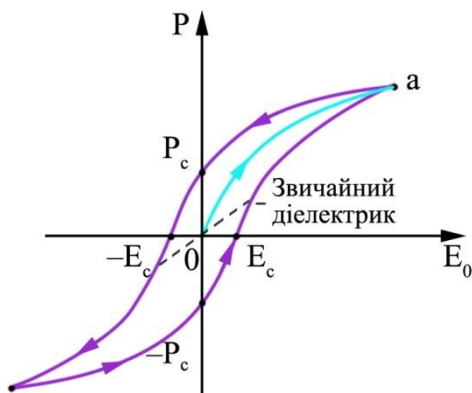


Рисунок 1.12 – Крива поляризації сегнетоелектрика: а – точка насичення; P_c – залишкова поляризованість; E_c – коерцитивна сила

конденсаторів (варикондів) п'єзоелектричних і піроелектричних перетворювачів, як комірки пам'яті (сегнетоелектрики з прямокутною петлею гістерезису); для модуляції оптичних сигналів.

П'єзоелектрики – діелектричні матеріали зі значно вираженим п'єзоелектричним ефектом.

Прямий п'єзоелектричний ефект – явище поляризації діелектриків у результаті дії механічних напруг. Ефект відкрили у 1880 р. брати К'юрі. Електричний заряд, що виникає на поверхнях діелектричного матеріалу у результаті докладання механічних зусиль, буде змінюватися за лінійним законом зі збільшенням деформації зразка.

П'єзоелектричний ефект простежується лише в йонних кристалах без центра симетрії. Якщо кристал має центр симетрії, то в разі однорідної механічної деформації центр симетрії зберігається, а центри позитивних і негативних йонів кристала збігаються, отже, в них не може виникати п'єзополіризації. Знак зв'язаних зарядів на гранях кристала в разі деформації обумовлений її напрямом і характером. Якщо внаслідок стискання на певній грані виникає позитивний заряд, то внаслідок розтягування ця грань заряджається негативно (рис. 1.13).

Можливий *зворотний п'єзоелектричний ефект*, що полягає у виникненні деформації η кристала від дії прикладеного електричного поля E_0 .

П'єзоелектричні властивості спостерігаються у кварці, керамічних матеріалах на основі титанату барію BaTiO_3 , ніобату барію-свинцю $(\text{PbBa})\text{Nb}_2\text{O}_6$ і цирконату-титанату свинцю $\text{Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3$. Уведення домішок дозволило сформувати ряд п'єзокерамічних матеріалів із прогнозованими й необхідними для практичного використання властивостями.

Піроелектрики – діелектричні матеріали зі значно

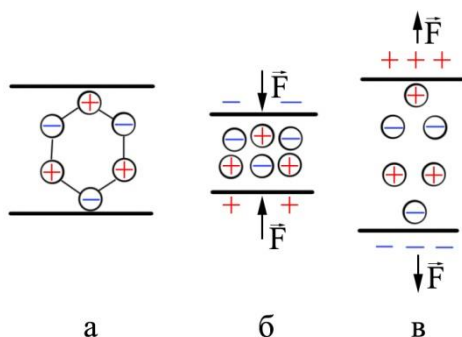


Рисунок 1.13 – Схема пояснення п'єзоелектричного ефекту: а) недеформований кристал; б) на кристал діє стискальна сила; в) на кристал діє розтягувальна сила

вираженням піроелектричним ефектом.

Піроелектричний ефект – ефект, пов'язаний зі зміною спонтанної поляризації в результаті зміни температури. У лінійному наближенні $\Delta P = \gamma \Delta T$, де γ – піроелектричний коефіцієнт.

Температурна зміна спонтанної намагніченості обумовлена такими причинами:

1) під час зростання температури порушується впорядкованість розміщення елементарних дипольних моментів;

2) під час нагрівання змінюються лінійні розміри діелектрика й п'єзоелектрична поляризація, що обумовлено деформацією (вторинним піроефектом).

Піроелектричні властивості проявляють такі лінійні діелектрика, як сульфат літію, турмалін і всі сегнетоелектричні матеріали.

Піроелектричний ефект використовують у теплових датчиках та приймачах променистої енергії, призначених для реєстрації інфрачервоного й надвисокочастотного випромінювання.

Електрети – тверді тіла, що довгостроково зберігають поляризацію та електричне поле, створюване в довкіллі.

Розрізняють: *термоелектрети* – електрети, що виготовляють з охолодженого в сильному електричному полі розплаву полярних діелектриків; *фотоелектрети* – електрети, виготовлювані з фотоелектропровідних діелектричних матеріалів способом одночасного впливу світла й електричного поля; *електроелектрети* – електрети, утворювані в результаті впливу на діелектрик електричного поля без нагрівання або опромінення.

Електрети використовують для виготовлення мікрофонів, сенсорів атмосферного тиску, вологості та механічної вібрації, медичних сенсорів тощо.

Рідкі кристали – речовини, що перебувають у проміжному стані між ізотропною рідиною й твердим кристалічним тілом. Вони одночасно проявляють властивості, характерні для рідкої (плинність, здатність перебувати в краплеподібному стані) та твердої (анізотропію властивостей, зокрема оптичну) фаз.

За загальною симетрією рідкі кристали поділяють на три види (рис. 1.14):

– смектичні (з шаруватою будовою);

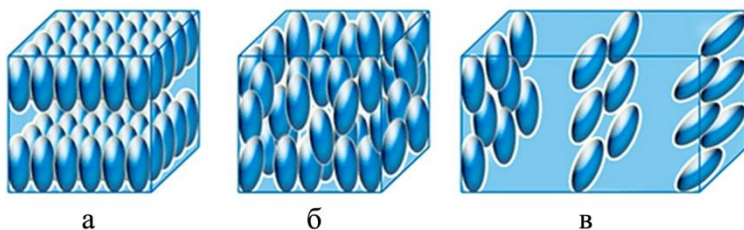


Рисунок 1.14 – Схематичне зображення будови рідких кристалів: а) смектичного; б) нематичного; в) холестеричного

– нематичні (довгі осі молекул орієнтовані вздовж одного загального напрямку);

– холестеричні (на молекулярному рівні подібна до нематичних, проте їх структура додатково закручена навколо осі, перпендикулярної молекулярних осей).

За електричними властивостями нематичні рідкі кристали є полярними діелектриками з питомим опором $\rho = 10^6 - 10^{10} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Величину питомого опору можна регулювати способом розчинення дисоціювальних йонних сполук.

У сильних електричних полях молекули нематичних рідких кристалів із позитивною діелектричною анізотропією стають орієнтованими в напрямку поля, а молекули з негативною – перпендикулярно до напрямку поля. Це дозволяє використовувати нематичні рідкі кристали у виготовленні

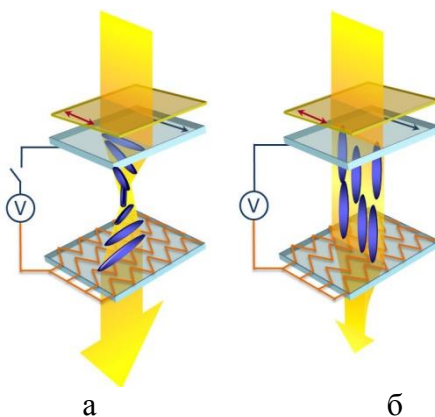


Рисунок 1.15 – Схема функціонування електрооптичної комірки на рідких кристалах у двох режимах:
а) на просвічування (молекули орієнтовані вздовж поля);
б) на відбиття (молекули орієнтовані перпендикулярно до поля) (б)

електрооптичних комірок для керування світловим потоком (рис. 1.15).

Особливість холестеричних рідких кристалів – їх молекули зі зміною температури змінюють орієнтацію, а відповідно й саму спіраль. Залежно від кроку спіралі холестеричні рідкі кристали змінюють колір. Проявляється *термохромний ефект* – зміна кольорів текстури в результаті зміни температури. Також у рідких кристалах спостерігаються ефект динамічного розсіювання світла й польовий «твіст»-ефект, використовувані для створення пристроїв відображення інформації (рис. 1.16).

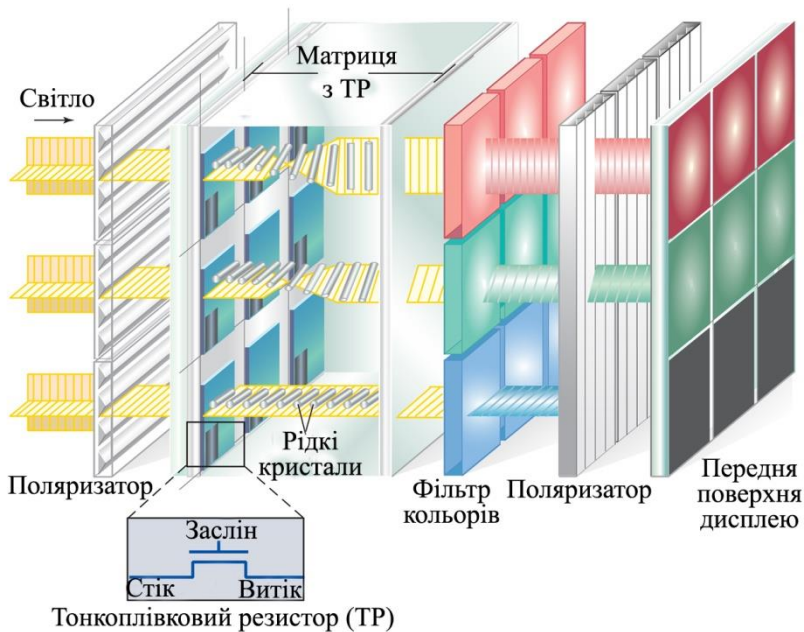


Рисунок 1.16 – Базова архітектура рідкокристалічного дисплея з матрицею активних тонкоплівкових елементів

1.4.2 Пасивні діелектрики

Серед пасивних діелектричних матеріалів виділяють: електроізоляційні полімери; еластомери; композиційні порошкові пластмаси; просочувальні речовини, компаунди та лаки; волокнисті непросочувальні матеріали; лакотканини й шаруваті пластики; монокристалічні діелектрики та матеріали на їх основі; стекла; кераміки.

Зупинимося більш детально на певних із них.

Електроізоляційні полімери. *Полімери* – високомолекулярні сполуки, молекули яких складаються з великої кількості структурно повторюваних ланок – мономерів.

За структурою макромолекул полімери поділяють на три основні види: *лінійні* (макромолекули – ланцюжкові послідовності повторюваних ланок), що є гнучкими й еластичними, можуть набухати та розчинятися в органічних розчинниках з утворенням твердих розчинів; *розгалужені*, що характеризуються наявністю мономерних ланок, відгалужених від основного ланцюга макромолекули; *просторові* (макромолекули зв'язані в просторову сітку), яким властиві висока твердість і нерозчинність в органічних речовинах (рис. 1.17).

Композиційні пластмаси – діелектричні матеріали, що складаються зі зв'язувальної речовини (штучних смол – просторових або лінійних полімерів) та наповнювачів (кварцового піску, деревного борошна, скловолокна тощо). Також до складу додають барвники й пластифікатори. Використовувані як електроізоляційні матеріали в радіоелектроніці для виготовлення корпусів, панелей, кнопок тощо.

Різновид композиційних пластмас – шаруваті пластики, в яких наповнювачем є листові волокнисті

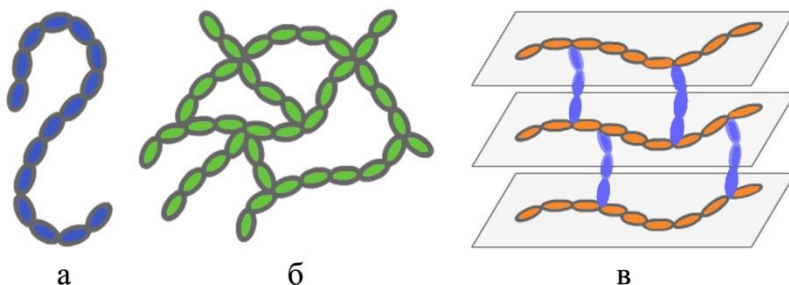


Рисунок 1.17 – Структура полімерів: а) лінійна;
б) розгалужена; в) просторова

матеріали (гетинакс, текстоліт).

Електроізоляційні компаунди – діелектричні матеріали, суміші ізоляційних речовин (смола, ефірів, целюлози тощо). Компаунди виготовляють способом розігрівання до високих температур із подальшим охолодженням розплавленого компаунду.

За призначенням розрізняють два види компаундів – просочувальні й заливні, а за властивостями – термопластичні та термореактивні.

Неорганічні стекла – діелектричні матеріали, що є неорганічними квазіаморфними твердими речовинами, в яких за наявності ближнього порядку розміщення частинок немає дальнього.

За хімічним складом їх поділяють на елементарні, халькогенідні й оксидні. Діелектричні властивості проявляють лише оксидні стекла. Найпоширеніші силікатні стекла на основі SiO_2 , що характеризуються високою хімічною стійкістю. За складом та електричними властивостями їх можна поділити на три групи: безлужові; лужені без важких оксидів або з їх незначним вмістом; лужені з високим вмістом важких оксидів.

Кварцове скло – неорганічний просторовий

полімер, що має найменший температурний коефіцієнт лінійного розширення серед усіх відомих речовин, високу межу міцності на стиск, високо прозорий для випромінювання в ультрафіолетовій, видимій та інфрачервоній частинах спектра.

За функціональним призначенням стекла поділяють на: *електровакуумні* (основний параметр – коефіцієнт лінійного розширення, який повинен бути приблизно однаковим із матеріалом металевго дроту або стрічки, що лютуються в скло); *ізоляторні* (основне призначення – виготовлення герметизованих виводів у металеві корпуси конденсаторів, діодів, транзисторів тощо); *кольорові* (силікатні стекла, прозорі для вимірювання у видимій частині спектра з кольоровим забарвленням (синім, зеленим, фіолетовим, жовтим тощо); *лазерні* (робоче тіло у твердотільних лазерах); *скловолокно* (характеризується високою нагрівостійкістю, гарними електроізоляційними властивостями); *світловоди* (тонкі скляні волокна, використовувані для передавання світла між джерелами й приймачем випромінювання).

Ситали – склокристалічні матеріали, одержувані способом майже повної стимульованої кристалізації стекол спеціально підібраного складу.

За технологією виготовлення їх поділяють на фотоситали (кристалізація скла обумовлена фотохімічними й каталітичними процесами) та термоситали (кристалізація скла обумовлена каталітичними процесами); *за технічним призначенням* – установочні (використовувані як підкладки інтегральних мікросхем) і конденсаторні (ситалові конденсатори характеризуються підвищеною електричною міцністю порівняно з керамічними).

Кераміка – група діелектричних матеріалів із різними властивостями, об'єднаними спільністю технологічного циклу та властивостями: високою

нагрівостійкістю, гарними електричними властивостями за достатньої механічної міцності, стабільністю характеристик, надійністю, стійкістю до впливу випромінювання високої енергії тощо.

За технічним призначенням кераміки поділяють на установлювальні (для виготовлення ізоляторів) та конденсаторні (різні види конденсаторів), а *за електричними* – на низькочастотні (ізоляторний фарфор) і високочастотні (ультрафарфор). Проміжним між низько- й високочастотною керамікою є радіофарфор.

Корундова кераміка – кераміка з алюмінооксиду, що характеризується низькими діелектричними втратами в діапазоні радіочастот і за підвищених температур. Різновидом корундової кераміки є **полікор** – діелектричний матеріал, з особливо щільною структурою, завдяки якій часто використовуваний для виготовлення пасивних елементів гібридних інтегральних мікросхем.

1.5. Нанорозмірні матеріали електроніки

До нанорозмірних матеріалів належать такі структури: кристал, квантова яма, квантова нитка й квантова точка (рис. 1.18).

Кристал – тривимірна структура (3D) – макроскопічний об'єкт, що характеризується далеким упорядкуванням атомів.

Густина квантових станів $g(E)$ носіїв заряду 3D кристала описується параболою, тобто $g(E) \sim E^{1/2}$. Оскільки в межах однієї зони функція $g(E)$ є квазібезперервною, то електричні властивості змінюються безперервно в результаті впливу електромагнітних полів.

Квантова яма – двовимірна структура (2D) – тонкий шар кристала, товщина якого співрозмірна довжині хвилі де Бройля.

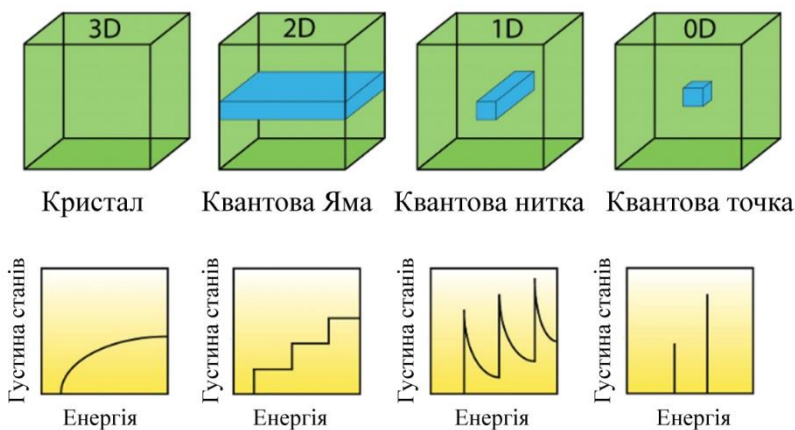


Рисунок 1.18 – Схематичне зображення та якісна залежність густини квантових станів від енергії електронів для різних типів нанорозмірних структур

Густина квантових станів $g(E)$ носіїв заряду для квантової ями має східчастий характер. Серед унікальних властивостей 2D-нанорозмірних напівпровідникових структур варто виділити квантовий ефект Холла та балістичне транспортування носіїв заряду.

Квантовий ефект Холла спостерігається у двовимірних НП-структурах за низьких температур у сильних магнітних полях. Цей ефект проявляється в тому, що на графіку залежності напруги Холла від прикладеного зовнішнього магнітного поля наявні плоскі сходинок (плато) (рис. 1.19).

Балістичне транспортування. У макроскопічних системах середня довжина вільного пробігу носіїв заряду завжди менша за розміри системи. Рух носіїв заряду, що зумовлює електропровідність, має дифузний характер, а траєкторія руху є ламаною лінією (рис. 1.20 а).

У нанорозмірних системах умови для транспортування істотно відрізняються від відповідних

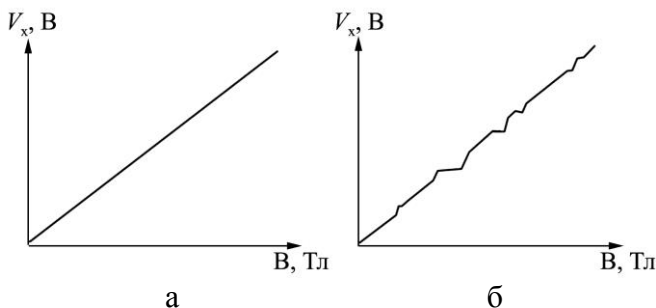


Рисунок 1.19 – Якісна залежність напруги Холла від прикладеного зовнішнього магнітного поля за прояву класичного (а) та квантового (б) ефектів Холла

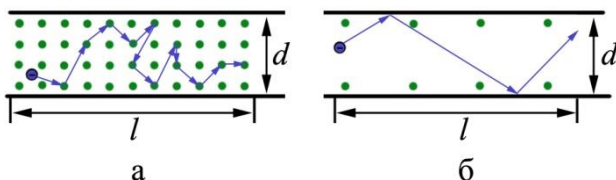


Рисунок 1.20 – Схематичне зображення траєкторії руху носіїв заряду під час перенесення заряду:
а) дифузійного; б) балістичного

умов у макроскопічних системах. У структурах, розміри яких менші за довжину вільного пробігу носіїв заряду, їх перенесення відбувається без розсіювання (рис. 1.20 б). Таке перенесення заряду називають *балістичним транспортуванням*. Його основні ефекти обумовлені співвідношенням між розмірами структури, в якій відбувається перенесення носія заряду, та характерними довжинами вільного пробігу.

Квантова нитка – одновимірна структура (1D) – об'єкт, у якому рух носіїв заряду вільний лише в одному

напрямку (наприклад, до осі y), а у двох інших (x і z) обмежений. Густина квантових станів $g(E)$ носіїв заряду для квантової нитки характеризується серією різких піків, що відповідають розмірним рівням.

Квантова точка – нульвимірна структура (0D) – об'єкт, у якому рух носіїв заряду обмежений у всіх трьох напрямках: x , y та z . Густина квантових станів $g(E)$ носіїв заряду характеризується серією вузьких максимумів. Особливістю 0D-нанорозмірних напівпровідникових структур є те, що під час переходу носіїв заряду між енергетичними рівнями може випромінюватися фотон, тобто спостерігатися явище люмінесценції.

1.6 Високоентропійні сплави

Металеві плівки, так звані високоентропійні плівкові сплави (ВЕС), є унікальним новим класом багатокомпонентних матеріалів. ВЕСи містять не менш ніж 5 основних металевих елементів, атомний відсоток кожного з яких становить 5–35 %. У зазначених з'єднаннях формується однофазний стабільний твердий розчин заміщення (переважно ГЦК- або ОЦК-ґратки), одночасно високоміцний і термодинамічно стійкий. Процес базується на високій ентропії змішування, що забезпечує стабілізацію утворення твердого розчину й запобігає формуванню інтерметалідних фаз під час кристалізації.

Формування однофазного твердого розчину заміщення замість багатофазного з'єднання суперечить правилу фаз Гіббса, що визначає кількість фаз відповідно до кількості складових елементів, а саме:

$$P = C + 1 - F, \quad (1.25)$$

де P – кількість фаз у системі в стані рівноваги;

C – кількість складових; F – максимальна кількість ступенів свободи.

Отже, в шести- й семиелементних системах повинно формуватися мінімум 7 і 8 рівноважних фаз відповідно. Проте це правило не діє для ВЕС, тому що в них формування фазово-структурного складу регулюється ентропією змішування. Згідно з постулатами термодинаміки твердий розчин у речовині формується завдяки мінімуму вільної енергії системи. Проте це також потребує високої ентропії з'єднання у вихідному й рідкому станах для стабілізації сформованого твердого розчину та запобігання утворенню інтерметалідів. Величина конфігураційної ентропії змішування описується співвідношенням Больцмана

$$\Delta S_{\text{конф}} = R \ln n, \quad (1.26)$$

де $\Delta S_{\text{конф}}$ – конфігураційна ентропія змішування; R – універсальна газова стала; n – кількість елементів у системі.

Отже, конфігураційна ентропія системи збільшується зі зростанням кількості складових (рис. 1.21).

Кількісним параметром, що описує вплив ентропії та ентальпії змішування, і також температури плавлення на утворення твердого розчину, є коефіцієнт Ω .

$$\Omega = \frac{T_n \cdot \Delta S_{\text{зм}}}{|\Delta H_{\text{зм}}|}, \quad (1.27)$$

де T_n – середня температура плавлення сплаву з n -елементами; $\Delta S_{\text{зм}}$ – ентропія змішування; $\Delta H_{\text{зм}}$ – ентальпія змішування.

Середню температуру плавлення можна визначити зі співвідношення

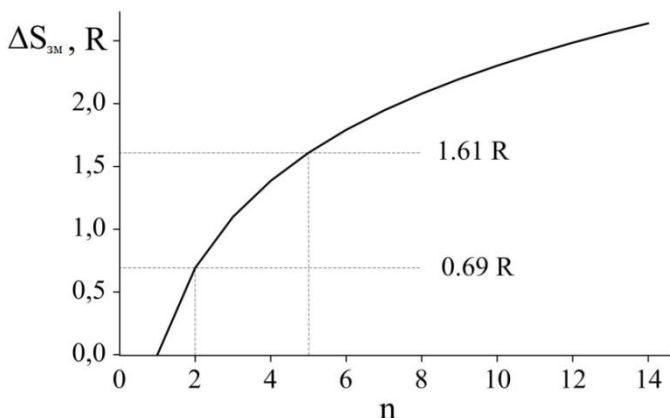


Рисунок 1.21 – Ентропія змішування еквімолярного сплаву залежно від кількості складових системи

$$T_m = \sum_{i=1}^n c_i (T_m)_i, \quad (1.28)$$

де $(T_m)_i$ – точка плавлення i -го елемента.

За значенням коефіцієнту Ω оцінюють здатність з'єднання формувати твердий розчин. Як уже зазначали, висока ентропія значно збільшує ступінь змішуваності та знижує вільну енергію Гіббса. Згідно з рівнянням Гіббса зниження вільної енергії приводить до збільшення ймовірності утворення випадкових твердих розчинів, водночас внесок ентропії у формування такої структури буде більш вагомим за підвищеної температури.

Кристалічні ґратки ВЕС викривлюються внаслідок змішування атомів різних радіусів. На відміну від традиційних сплавів, у яких можна чітко розділити розчинники й розчинені атоми, у ВЕС атоми складових елементів мають однакову ймовірність зайняти той або

інший вузол у кристалічній ґратці сформованого неупорядкованого розчину.

Параметр δ використовується для опису впливу різниці атомних радіусів складових елементів, і він становить:

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i \left(1 - \frac{r_i}{\bar{r}}\right)^2},$$

де r_i – атомний радіус i -го компонента; c_i – концентрація i -го компонента; $\bar{r}$ – середній атомний радіус, що визначається за співвідношенням

$$\bar{r} = \sum_{i=1}^n c_i r_i.$$

Насамперед, викривлення кристалічних ґраток впливають на напружено-деформований стан матеріалу. Зміною концентрації лише одного елемента з, наприклад, п'яти можна досягти зміни структури з аморфної на кристалічну, а за властивостями – збільшення питомого електричного опору в результаті зміни щільності точкових дефектів.

Той факт, що кожен атом складової ВЕС може з однаковою ймовірністю зайняти той або інший вузол у кристалічній ґратці, впливає на кінетику дифузії. Різномірність атомів приводить до зміни потенціальної енергії між вузлами кристалічних ґраток, а флуктуації потенціальної енергії знижують дифузію елементів у матриці.

У ВЕС навіть порівняно невеликі зміни концентрації окремих компонентів можуть приводити до

значних змін фазового складу, механічних, електрофізичних і магніторезистивних властивостей.

Плівкові ВЕС виготовляють способом пошарової або одночасної конденсації окремих компонент ефективною товщиною до 8 нм (загальна товщина – до 60 нм), що завдяки конденсаційно-стимульованій дифузії й малим товщинам забезпечує перемішування атомів і формування твердих розчинів.

РОЗДІЛ 2

ВИРОБИ МІКРОЕЛЕКТРОНІКИ ТА ЇХ БАЗОВІ КОМПОНЕНТИ

Бурхливий розвиток електроніки зумовив необхідність удосконалення й розроблення мікроелектронних виробів із високим ступенем інтеграції (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Класифікація виробів електроніки

Інтегральні мікросхеми (ІМС) – мікроелектронні вироби, що виконують функції оброблення сигналу й (або) накопичення інформації, мають високу щільність розміщення неподільно виконаних та електрично з'єднаних елементів, компонентів і кристалів, які відповідно до вимог до випробувань, приймання, постачання і експлуатації розглядають як неподільні.

Елемент ІМС – конструктивно виділена і сформована невіддільно від кристала частина ІМС, що реалізує функцію одного з електрорадіоелементів (наприклад, діода, транзистора, резистора, конденсатора) і згідно з вимогами до випробувань, приймання, постачання й експлуатації не може розглядатись як самостійний виріб, тому її заборонено випробовувати, упаковувати та експлуатувати.

Компонент ІМС – частина ІМС, що реалізує функцію одного з електро- та радіоелементів і відповідно до вимог до випробувань, приймання, постачання та експлуатації може бути виділеною як самостійний виріб. Компоненти виготовляють окремо й установлюють у мікросхему під час виконання складально-монтажних операцій. До простих компонентів належать безкорпусні діоди, транзистори, конденсатори, резистори, малогабаритні котушки індуктивності та трансформатори тощо. Складні компоненти – це безкорпусні ІМС, функціональні мікросхеми тощо.

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

У цьому розділі розглянемо базові компоненти мікроелектроніки.

2.1 Резистори

2.1.1 Напівпровідникові резистори

У напівпровідникових інтегральних мікросхемах (НІМС) використовують дифузійні резистори – області всередині кристала з тим або іншим типом провідності (рис. 2.2). Опір дифузійного резистора залежить від довжини, ширини й товщини області, що відіграє роль резистора, питомого опору (концентрації домішок). Резистор *p*-типу (рис. 2.2) виготовляють одночасно з базами транзисторів. У такому разі питомий опір становить сотні Ом на квадрат і можна одержати номінали до десятків кОм. Для збільшення опору резистор іноді роблять зигзагоподібною конфігурації. Якщо необхідні відносно малі опори (одиниці або десятки Ом), то резистори виготовляють одночасно з емітерними областями *n*-типу (рис. 2.2 б) транзисторів. Температурний коефіцієнт опору (ТКО) дифузійних напівпровідникових резисторів $\beta \sim 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

Останнім часом для виготовлення резисторів також застосовують метод йонної імплантації, згідно з яким

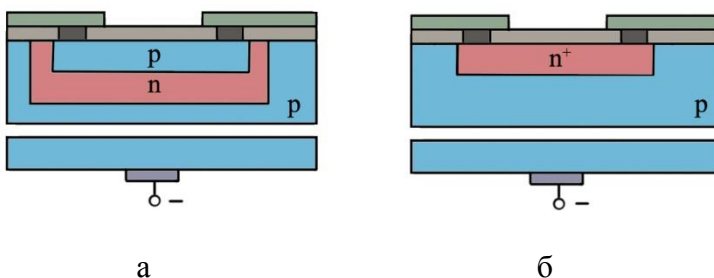


Рисунок 2.2 – Дифузійні резистори НІМС: а) *p*-типу;
б); *n*-типу

відповідне місце кристала бомбардують йонами домішки, що проникають у нього на глибину 0,2–0,3 мкм. Питомий опір становить до 20 кОм/□.

У резистора *p*-типу (рис. 2.2 а) разом із кристалом формується паразитний *n-p-n*-транзистор. Під час проектування ІМС завжди вибираються такі режими функціонування резистора, за яких паразитний транзистор є перекритим майже не шкодить. Паразитна ємність обмежує робочі частоти, на яких опір резистора можна вважати активним. На частотах, вищих за певне граничне значення опір резистора стає комплексним.

2.1.2 Плівкові резистори

Плівкові резистори створюють на діелектричній основі або плівці, нанесеній на металеву, напівпровідникову чи діелектричну основу. Під час їх виготовлення на підкладку наносять резистивні плівки. Якщо опір резистора не повинний бути дуже високим, плівку виготовляють зі сплаву високого опору, наприклад ніхрому. А для резисторів високого опору використовують суміш металу з керамікою, що називають керметом. На кінцях резистивної плівки роблять виводи – металеві плівки, що водночас є лініями, які з'єднують резистор з іншими елементами. Конфігурація резисторів обумовлена їх номінальним значенням, точністю, методом формування геометричних розмірів, матеріалом резистивної смужки та її питомим опором, площею, призначеною для резистора на основі.

Плівкові резистори (рис. 2.3) складаються з резистивної смужки 1 простої або складної форми й двох чи більше виводів 2 для приєднання до інших елементів мікросхеми. Найтехнологічнішими є конструкція послідовно з'єднаних резистивних смужок (рис. 2.3 а) та

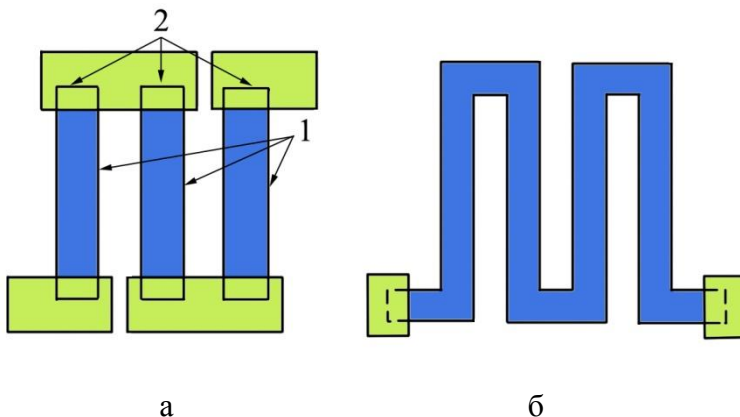


Рисунок 2.3 – Резистори інтегрованих мікросхем:
а) конструкція послідовно з'єднаних резистивних смужок
(1) за допомогою контактних майданчиків (2);
б) конструкція на зразок меандру

конструкція на зразок меандру (рис. 2.3 б).

Питомий опір плівкових резисторів виражають в особливих одиницях – омах на квадрат (Ом/□), тому що опір такої плівки у формі квадрата не залежить від розмірів останнього. Дійсно, якщо зробити сторону квадрата, наприклад, удвічі більшою, то довжина шляху струму збільшиться вдвічі. Проте площа поперечного перерізу плівки для струму також зросте вдвічі, а отже, опір не зміниться.

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

$$R = \rho \frac{l}{db} = \left(\frac{\rho}{d} \right) \left(\frac{l}{b} \right) = R' k_{\phi}, \quad (2.1)$$

де ρ – питомий опір матеріалу плівки; d – товщина плівки; l , b – довжина й ширина резистивної смужки; $R' = \rho/d$ – опір квадрата резистивної плівки, Ом/□; $k_\phi = l/b$ – коефіцієнт форми або кількість квадратів резистивної смужки.

Виводи 2 є контактними площинками до резистивної смужки, що переходять у провідники. Контактні переходи будь-яких типів мають кінцевий опір R_κ , що залежить від R' резистивної смужки, ширини плівки b , питомої електропровідності контактного переходу й 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

$$R = R_0 k_\phi + 2R_\kappa. \quad (2.2)$$

Резистивні смужки, як плівкові провідники, виготовляють вакуумними методами з елементів, резистивних сплавів, керметів та ін. Основні характеристики матеріалів для плівкових резисторів наведено в таблиці 2.1.

Властивості використовуваних матеріалів дають можливість досягти опору шару $R_\square$ від десятків омів до сотень кілоомів на квадрат і формувати резистори в широкому діапазоні опорів із досить високою точністю (близько 10 %). На одній основі можна одержати відхилення значень опорів резисторів близько 1 %. Плівкові резистори, створені на діелектричній основі, мають малу паразитну ємність та надійну ізоляцію. Найважливішим параметром для плівкових резисторів є термічний коефіцієнт опорів β . Здебільшого його визначають для термооброблених стабільних плівок.

Таблиця 2.1 – Характеристики матеріалів плівкових резисторів

Матеріал резистора	Матеріал контактних площадок	R' , Ом/□	$\beta \cdot 10^4$ град ⁻¹
Хром	Cu	500	0,6
Ніхром	Cu	300	1,0
Тантал ТВЧ	Al із підшаром V (Ni – Cr)	100	-2,0
Сплав РС-3001	Au із підшаром Cr (Ni – Cr)	1 000–2 000	-0,2
Полісиліцій p -типу	Алюміній	50–250	+0,5–25
Полісиліцій n^+ -типу	Алюміній	2–5	+1,0

Установлено, що коефіцієнт β залежить від товщини плівки, водночас зі зменшенням товщини β зменшується, а зі збільшенням наближається до значення, властивого масивному металу. Для окремих типів металевих плівок β від'ємний і може бути різним залежно від технології виготовлення плівок. Важливим завданням під час розроблення резисторів інтегральних мікросхем є одержання найменшого значення термічного коефіцієнта опору в діапазоні робочих температур. Згідно з результатами досліджень область товщин плівок, для якої характерний малий термічний коефіцієнт опору, що наближається до нуля. Її називають перехідною. Для конкретного матеріалу вона залежить від умов виготовлення плівки та може переміщуватися.

Для товстоплівкових резисторів використовують пасти на основі золота, платини, паладію та ін., що наносять на поверхню діелектричної основи крізь трафарет. Товщина шарів – близько 20 мкм. Відносна

похибка опору резистора може становити $\pm 0,4$. Для зменшення похибки опору товстоплівкового резистора застосовують індивідуальне підлаштування.

2.2 Конденсатори

2.2.1 Напівпровідникові конденсатори

У дифузійних конденсаторах НІМС використовують бар'єрну ємність n - p -переходу. Ємність такого конденсатора (рис. 2.4) залежить від площини й товщини переходу, діелектричної проникності напівпровідника та концентрації домішок. Оскільки область емітера має електропровідність n^+ -типу, перехід у конденсаторі буде більш тонким. Ємність таких конденсаторів не перевищує 1 500 пФ із припуском $\pm 20\%$. Температурний коефіцієнт ємності (ТКЄ) становить величину $\sim 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, а напруга пробиття $U_n \leq 10 \text{ В}$. Дифузійні конденсатори функціонують лише за зворотної напруги, що для одержання постійної ємності повинна бути постійною.

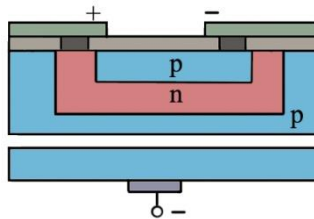


Рисунок 2.4 – Структура дифузійного конденсатора

Другий тип конденсаторів – МОН-конденсатори, використовувані в схемах на МОН-транзисторах. Одна обкладинка – дифузійний шар кремнію типу n^+ , на якій

нанесено тонкий шар діелектрика SiO_2 . Друга – металева (алюмінієва) плівка, нанесена поверх вищезазначеного шару. Номінали таких конденсаторів – до 500 пФ із припуском $\pm 25\%$; $U_n = 20 \text{ В}$. Переваги МОН-конденсаторів – низький ТКЄ – $2 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$ і можливість функціонування за будь якої полярності. Нелінійність ємності, тобто її залежність від напруги значно менша, ніж у дифузійних конденсаторів. Як в інших елементах, у конденсаторів ІС утворюються паразитні ємності щодо кристала та паразитні транзистори.

2.2.2 Плівкові конденсатори

Плівкові конденсатори (рис. 2.5) складаються з двох провідникових обкладинок 1, 2 (переважно з алюмінію), розділених діелектриком 3, що перекриваються. Залежно від товщини діелектрика плівкові конденсатори бувають тонко- та товстоплівковими. Діелектрик плівкового конденсатора повинен відповідати таким вимогам: бути ізолювальним матеріалом, здатним утворювати непористі плівки, бути стійким до змін температури; сумісним із матеріалом обкладинок, мати пробивну напругу 100–200 В; високу адгезію до матеріалу підкладки температуру випаровування 1 000–1 200 °С; бути. Ємність плоского плівкового конденсатора визначають за формулою:

$$C = C_0 S + C_p P = (\varepsilon_0 / d) S + C_p P, \quad (2.3)$$

де ε – 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.

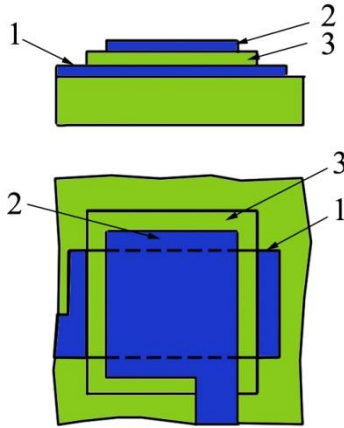


Рисунок 2.5 – Конденсатори ІМС

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

$$C = C_0 S = (\epsilon_0 / d) S. \quad (2.4)$$

Конструкцію конденсатора формують на діелектричній основі або ізоляційному шарі. Як діелектрик для плівкових конденсаторів використовують різні діелектричні матеріали з питомою ємністю $10\text{--}1\,000 \text{ пФ/мм}^2$, що наносять на поверхню вакуумними методами. Це дає можливість створювати якісні конденсатори ємністю $20\text{--}1\,000 \text{ пФ}$ із робочою напругою $6\text{--}50 \text{ В}$. Ємність понад $1\,000 \text{ пФ}$ можна одержати в багатошарових структурах конденсаторів за допомогою почергового нанесення провідникових і діелектричних

плівок або використання діелектричних плівок із великим значенням ϵ .

Конденсатори ємністю, меншою за 30 пФ, виготовляють створюють за допомогою спеціальних конструкцій, одна з яких – гребінчаста (рис. 2.6).

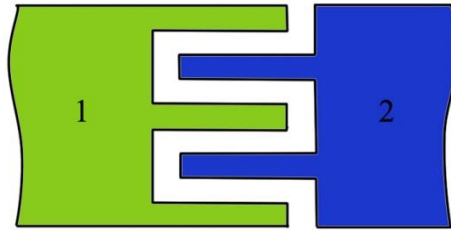


Рисунок 2.6 – Гребінчаста структура конденсатора

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

Ємність гребінчастого конденсатора розраховують за формулою

$$C = \beta_C \epsilon_t L, \quad (2.5)$$

де β_C – коефіцієнт, що залежить від ширини плівкових провідників та відстані між ними. Для $b_1 = b_2 = b$, $a = 0,3b$, $\beta_C = 0,023$; $\epsilon_t = (\epsilon_B + \epsilon_{pr})/2$ розрахункове значення діелектричної проникності з урахуванням діелектричної проникності основи ϵ_B та захисного шару ϵ_{pr} ; L – довжина периметра перекриття обкладинок.

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

$$d = \frac{Uk}{\xi_{\max}}, \quad (2.6)$$

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, SiO₂, GeO, ZnS, MgF₂, BaTiO₃, CrTiO₃, Al₂O₃, TaO та ін. Електричні характеристики певних діелектричних матеріалів плівкових конденсаторів наведено в таблиці 2.2.

Тонкоплівкові конденсатори мають високу якість, широкий частотний діапазон. Відносна похибка ємності плівкових конденсаторів становить 0,1–0,15. Для формування товстоплівкових конденсаторів передбачені діелектричні пасти з $\varepsilon > 500$ (наприклад, на основі титанату барію). Використовуючи ці діелектрики, створюють товстоплівкові конденсатори з питомою ємністю 150–200 пФ/мм². Обкладинки товстоплівкових конденсаторів виготовляють із провідникових паст.

2.3 Індуктивні елементи

У напівпровідникових інтегральних схемах неможливо зробити котушок індуктивності, тому ІС проєктують так, щоб індуктивність була не потрібною. Проте, якщо необхідно мати індуктивний опір, можна створити еквівалент індуктивності з транзистора, резистора й конденсатора. Приклад такого еквівалента зображений на рисунку 2.7. Змінна напруги U підводиться

Таблиця 2.2 – Електричні характеристики діелектричних матеріалів плівкових конденсаторів

Матеріал	ϵ	$\xi_{\max} 10^{-5},$ В/мм	$C_0,$ пФ/мм ²	$U, \text{В}$
Монооксид Si	5–6	2,0–3,0	50	60
			100	30
Монооксид Ge	11–12	1,0	50	10
			100	7
			1 500	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
			1 000	10
Діоксид Si	4	1,5–10,0	50	
			100	

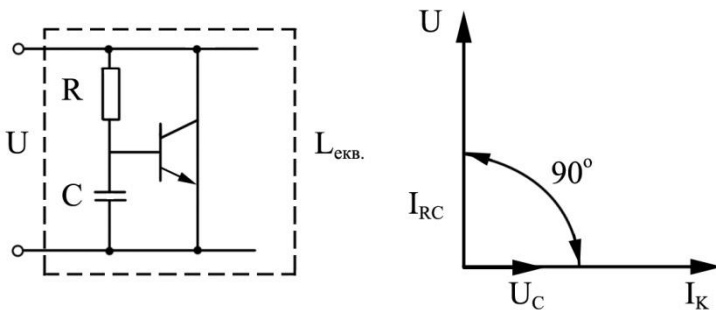


Рисунок 2.7 – Еквівалент індуктивності

між колектором та емітером транзистора. Для спрощення не наведене подавання на транзистор постійної напруги. Частина змінної напруги U через RC -ланцюг подається на базу. Значення R і C підібрані так, що $R \gg 1/(\omega C)$. Тоді струм I_{RC} у RC -ланцюгу можна вважати таким, що збігається за фазою з напругою U . Але напруга U_C на конденсаторі відрізняється від струму I_{RC} на 90° . Напруга U_C подається на базу й керує колекторним струмом транзистора I_K , що збігається за фазою з напругою U_C , тобто відрізняється від напруги U на 90° . Отже, транзистор у цій схемі створює для напруги U опір, еквівалентний певному індуктивному опору $x_L = U/I_K = \omega L_{\text{екв}}$. Інакше кажучи, транзистор є еквівалентним певній індуктивності $L_{\text{екв}} = U/(\omega I_K)$. Якщо встановлювати більше чи менше значення струму I_K , можна одержувати різні значення $L_{\text{екв}}$. Оскільки опір RC -ланцюга в багато разів більший за x_L , ним нехтують.

Плівкові котушки ГІМС бувають двох типів: мікрокотушками, що монтуються на плату мікросхеми; індуктивними елементами – круглими (рис. 2.8 а), плоскими квадратними (рис. 2.8 б) спіралями або окремими витками (рис. 2.8 в), які наносяться на діелектричну чи магнітну основу або 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 обумовлена зовнішнім діаметром спіралі D_2 , обмеженим розмірами 15–20 мм.

Без магнітних основ або плівок значення індуктивності не перевищує одиниць мікрогенрі. Індуктивність плоскої круглої спіралі розраховують за формулою

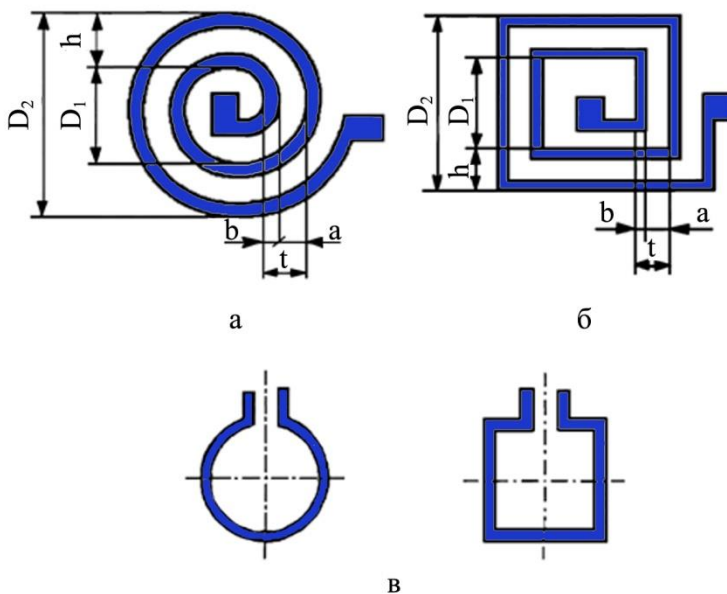


Рисунок 2.8 – Індуктивні елементи ІМС: а) плоска кругла спіраль; б) плоска квадратна спіраль; в) окремі витки

$$L \approx 5 \frac{(D_2 + D_1)^2 W^2}{15D_2 - 7D_1}, \quad (2.7)$$

а плоскої квадратної – за

$$L \approx 6 \frac{(D_2 + D_1)^2 W^2}{15D_2 - 7D_1} \quad (2.8)$$

де D_1 , D_2 – внутрішній і зовнішній діаметри спіралі, мм; W – кількість витків (індуктивність L вимірюється в нГн).

Для збільшення індуктивності використовують основи з матеріалів із підвищеною магнітною проникністю

μ або покривають спіралі плівками з підвищеним значенням μ . Плівкові квадратні спіралі мають за тих самих значень D_1, D_2, W більшу індуктивність, ніж круглі.

Оскільки провідник спіралі довший, його опір досягає одиниць омів, що знижує добротність індуктивних елементів. Для круглої спіралі максимального значення добротності досягають за співвідношення $D_1/D_2 = 0,4$, а для квадратної – $D_1/D_2 = 0,36$. Проте квадратну конструкцію індуктивного елемента легше виконати й вона займає меншу площу, ніж кругла. Мінімальної площі потребують індуктивні елементи, внутрішній діаметр D_1 яких дорівнює нулю, а отже, $D_1/D_2 = 0$.

Значення добротності для круглої спіралі розраховують за формулою

$$Q = 2 \cdot 10^3 \frac{Wb(D_2 + D_1)\sqrt{f}}{15D_2 - 7D_1}, \quad (2.9)$$

а для квадратної –

$$Q = 1,6 \cdot 10^3 \frac{Wb(D_2 + D_1)\sqrt{f}}{15D_2 - 7D_1}, \quad (2.10)$$

де b – ширина провідника, мм; f – частота, ГГц.

Індуктивні елементи надвисоких частот мають значення індуктивності до 10–20 нГн, їх виготовляють у формі круглого або квадратного витка (рис. 2.8 в). Індуктивність плоского прямокутного провідника розраховують за формулою

$$L = 0,2l \left[\ln \left(\frac{l}{b} + d \right) + 1,19 + 0,22 \frac{(b+d)}{l} \right], \quad (2.11)$$

де l – індуктивність, нГн; l , b , d – відповідно довжина, ширина й товщина прямокутного провідника, мм.

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

$$L = 0,2l \left[\ln \left(\frac{2l}{b+d} \right) - 2,451 \right], \quad (2.12)$$

де L – індуктивність, нГн; l , b , d – відповідно периметр, ширина та товщина провідника витка, мм.

Формула індуктивності квадратного витка така:

$$L = 0,2l \left[\ln \left(\frac{2l}{b+d} \right) - 2,853 \right], \quad (2.13)$$

де L – індуктивність, нГн; l , b , d – відповідно сторона квадрата, ширина й товщина провідника витка, мм.

Відрізок циліндричного провідника також можна використовувати як індуктивний елемент ІМС, його індуктивність розраховують за формулою

$$L = 0,2l [\ln(l/d) + 0,386], \quad (2.14)$$

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

Проте частіше формулу (2.14) використовують для обчислення індуктивності виводів компонентів ГІС. Індуктивні елементи ІМС НВЧ повинні мати довжину провідника, істотно набагато меншу за довжину хвилі.

Серед недоліків індуктивних елементів варто зазначити такі: великі розміри, значна відносна похибка

індуктивності (0,2–0,3) і неможливість простого підлаштування.

Якщо виготовити дві плоскі котушки з протилежних сторін підкладки, можна одержати плівковий трансформатор. Товщина підкладки обумовлюватиме величину взаємної індукції. Але коефіцієнт останньої буде низьким, тому що матеріал підкладки не є магнетиком.

2.4 Плівкові RC-структури

Плівкові RC-структури з розподіленими параметрами використовують як фільтри, фазозсувні елементи, а також елементи селективного зворотного зв'язку для виготовлення активних фільтрів. Вони забезпечують зсув фази понад 360°. Найпоширеніші 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 , що мають спільну обкладинку з високоомного матеріалу з опором R . Якщо $n = 0$, обидві структури перетворюються на просту конструкцію RC-типу. Розрізняють RC-структури з постійними й змінними вздовж конструкції питомими параметрами. RC-структури, в яких питомі параметри вздовж конструкції не змінюються, називаються однорідними. Їх виготовляють на ізоляційній основі як багат шарові структури з провідникових, діелектричних і резистивних плівок.

Основним параметром RC-структури є стала часу

$$\tau = RC = R'C_0 l^2, \quad (2.15)$$

де R' – питомий поверхневий опір резистивної смужки;

C_0 – питома ємність конденсатора; l – довжина резистивної смужки.

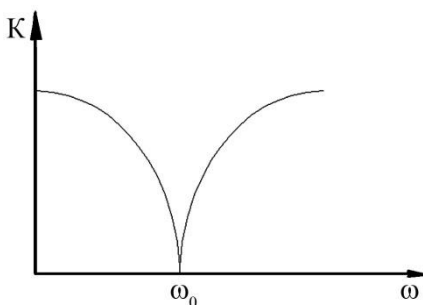


Рисунок 2.9 – Характеристика RC -нульового фільтра ІМС

Для побудови мікроелектронних пристроїв частотної селекції використовують RC -нульові фільтри, в яких на заданій частоті ω_0 коефіцієнт передавання дорівнює нулю (рис. 2.9). Коефіцієнти $M = \omega_0 RC$ та $n = R_1/R$ обумовлюють положення нуля коефіцієнта передавання фільтра. RC -структури розраховують і конструюють виконують у тій самій послідовності, що й резистори та конденсатори.

2.5 Діоди

Напівпровідниковий діод – це електроперетворювальний напівпровідниковий прилад з одним електричним переходом і двома виводами.

Залежно від галузі використання розрізняють випростовувальні, універсальні (високоомні), імпульсні, надвисокочастотні, тунельні обернені діоди, варикапи, стабілітрони, фото- й світлодіоди. За типом переходу діоди поділяються на площинні та точкові. Площинні діоди мають p - n -перехід, лінійні розміри якого, що

обумовлюють площу переходу, значно перевищують його товщину. До точкових належать діоди, лінійні розміри переходу яких менші від товщини запірного шару.

2.5.1 Діоди універсального призначення

Універсальними (високочастотними) діодами є одноперехідні напівпровідникові прилади, використовувані для випростовування (за меншого електричного навантаження), модуляції, детектування й інших нелінійних перетворювань електричних сигналів, частота яких не перевищує 1 000 МГц.

У ряді потужних перетворювальних установок вимоги до середнього значення прямого струму, зворотної напруги перевищують номінальні значення параметрів наявних діодів. Зазначену проблему усувають паралельним або послідовним з'єднанням останніх. Паралельне з'єднання застосовують тоді, коли потрібний прямий струм, більший за граничний струму одного діода. Проте, якщо діоди одного типу просто паралельно з'єднати, то внаслідок незбігу прямих гілок ВАХ вони будуть різнонавантаженими, а отже, в певний із них прямий струм перевищуватиме граничний.

Для вирівнювання струмів використовують діоди з малим розходженням прямих гілок ВАХ (виробляють їх підбір) або послідовно з діодами вмикають зрівняльні резистори з опором, що становить одиниці Ом. Іноді вмикають додаткові резистори (рис. 2.10 в) з опором, у кілька разів більшим, ніж прямий опір діодів, щоб струм у кожному діоді визначався насамперед опором R_d , тобто $R_d \gg R_{np \text{ в.д.}}$. Величина R_d – сотні Ом.

ВАХ універсального діода (рис. 2.11) не має ділянки насичення на зворотній гілці. Це можна пояснюється,

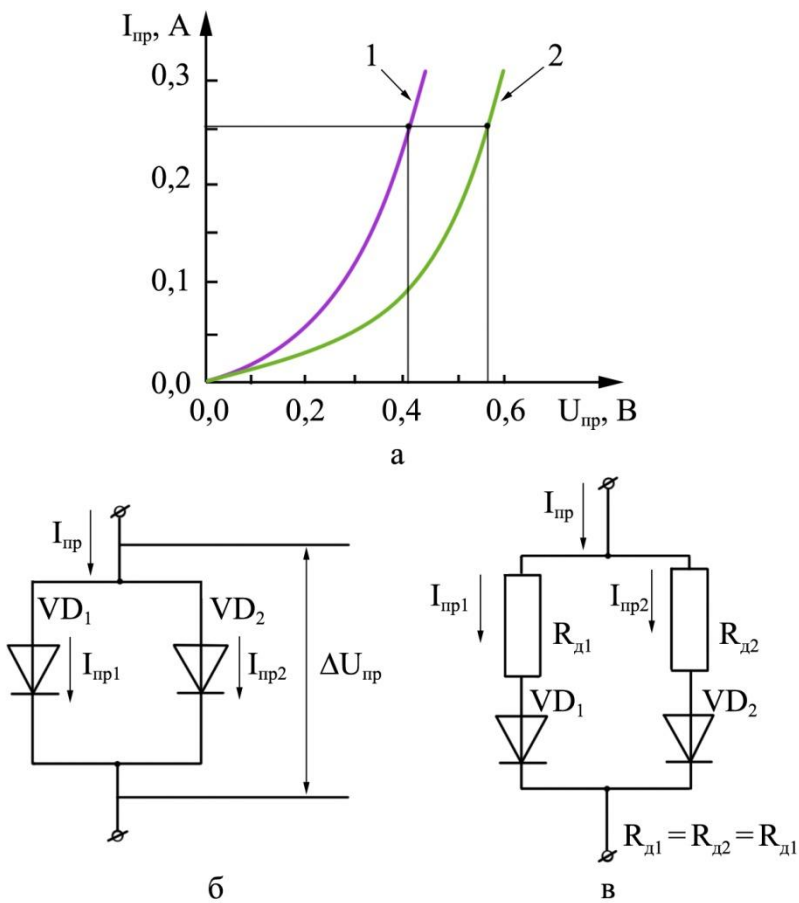


Рисунок 2.10 – Паралельне з'єднання випростовувальних діодів

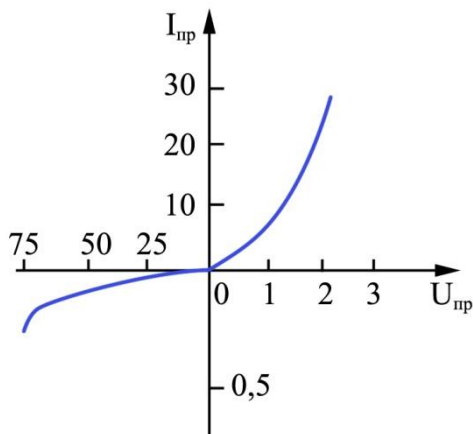


Рисунок 2.11 – ВАХ універсального діода

зокрема, нагріванням унаслідок незадовільного відведення тепла й ударною йонізацією, зумовленою неоднорідністю електричного поля в переході.

До параметрів універсальних діодів належать ємність за заданої зворотної напруги, а також діапазон робочих частот і температур.

2.5.2 Імпульсні діоди

Імпульсні діоди використовують як ключові елементи в пристроях імпульсної техніки. За конструкцією й характеристиками вони нагадують універсальні.

Крім високочастотних властивостей (мінімальної ємності $C_{бар}$), такі діоди повинні мати мінімальну тривалість перехідних процесів у момент умикання та вимикання. Перехідні процеси в діодах відбуваються завжди, особливо під час функціонування імпульсами малої тривалості або миттєвими перепадами напруг і струмів. Вони пов'язані з процесами накопичення й

розсмоктування носіїв у базі діода.

Швидкодія імпульсних діодів збільшується за допомогою введення спеціальних легувальних домішок, що зменшують середню тривалість життя неосновних носіїв. Такою домішкою до НП n -типу є, наприклад, золото.

Інший спосіб зменшення часу відновлення зворотного опору бази – використання бази з нерівномірною концентрацією домішок. Це можна здійснити, наприклад, за допомогою дифузії акцепторів до НП n -типу.

Ефективним способом збільшення швидкодії імпульсних діодів є використання в них бар'єрів Шотткі. Як відомо, в таких діодах немає інжекції.

Основні спеціальні параметри імпульсних діодів: імпульсна пряма напруга U_{np} за конкретного імпульсу прямого струму; час усталення прямої напруги t_{ycm} ; час відновлення зворотного опору $t_{від}$. Останній параметр зашифровано в третьому елементі позначення діода (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Елементи позначень імпульсних діодів

$t_{від}$	> 150 нс	30–150 нс	5–30 нс	1–5 нс	< 1 нс
Третій елемент позначення	5	6	7	8	9

Приклад позначення імпульсних діодів – 2Д504А – кремнієвий, імпульсний, призначений для пристроїв спеціального вжитку; час відновлення зворотного опору більший за 150 нс; номер розробки – 04; група А.

Більшість імпульсних діодів має металево-скляне або скляне конструктивне оформлення.

2.5.3 Тунельні й обернені діоди

Тунельними називаються діоди, в яких на прямій гілці ВАХ є ділянка з негативним диференціальним опором унаслідок тунельного ефекту (рис. 2.12).

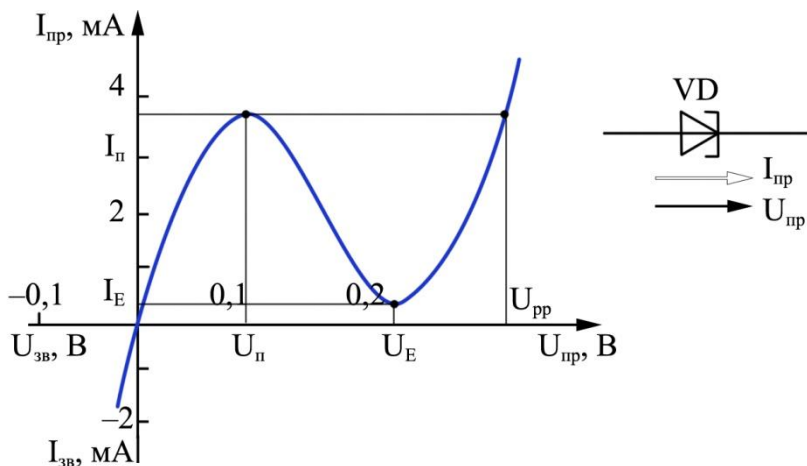


Рисунок 2.12 – ВАХ тунельного діода та її утворення

Тунельний ефект полягає в тунельному проникненні електрона через p - n -перехід, тобто такому проникненні, за якого електрон із ВЗ однієї області прямо потрапляє до ЗП іншої. Це стає можливим, якщо товщина переходу дуже мала (менша ніж $150 \text{ \AA}$) та енергетичним рівням, заповненим електронами в одній області, відповідають такі самі вільні дозволені рівні в сусідній. зазначені умови додержані в p - n -переходах із НП, що мають високу концентрацію домішок (10^{19} – 10^{21} см^{-3}). Товщина p - n -переходів у такому разі 10^6 см^{-3} , що зумовлює високу напруженість електричного поля переходу й забезпечує ймовірність тунельного ефекту. У

таких НП атоми домішок завдяки малій відстані взаємодіють між собою, і їх рівні розщеплюються в зони, прилеглі в НП p -типу до ВЗ, а в НП n -типу до ЗП. Такі напівпровідники називаються виродженими, тому що рівні Фермі в них розміщені в ЗП n -області та в ВЗ p -області.

P - n -переходи тунельних діодів виготовляють здебільшого способом сплавлення з германію, арсеніду галію й антимоніду галію. Оскільки для таких діодів використовують вироджені НП, що за характером провідності наближаються до металів, то робоча температура приладів досягає 400 °С.

Недоліком тунельних діодів є мала потужність унаслідок низьких робочих напруг (0,1–0,8 В) і незначних площ переходу.

За своїх призначенням тунельні діоди діляться на підсилювальні (третій елемент позначення – 1), генераторні (2), перемикальні (3).

На основі тунельних діодів конструюють підсилювачі, генератори, змішувачі у діапазоні хвиль до міліметрових, створюють різноманітні імпульсні пристрої: тригери, мультівібратори з дуже малим часом переключення.

Частковим варіантом тунельних діодів є обернені діоди, у яких у результаті тунельного ефекту провідність за зворотних напруг значно більша, ніж за прямих. P - n -переходи обернених діодів створюють за допомогою напівпровідників, що мають дещо меншу концентрацію домішок, тому їх рівні Фермі збігаються з краями ЗП і ВЗ (рис. 2.13 а). У разі ввімкнення у зворотному напрямі тунельні електрони з ВЗ p -області переходять на вільні рівні ЗП n -області, через p - n -перехід тече великий зворотний струм. У разі прямого ввімкнення діодів зони не перекриваються, тунельний ефект не відбувається, тому прямий струм обумовлений лише дифузійним. ВАХ

оберненого діода зображена на рисунку 2.13 б. Саме на її формі базується назва таких діодів.

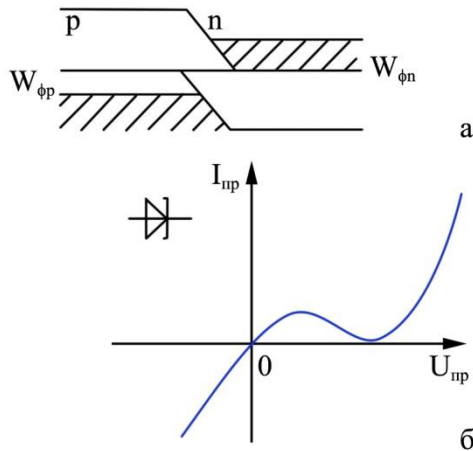


Рисунок 2.13 – Енергетична діаграма (а) та ВАХ (б) оберненого діода

Третій елемент їх позначення – 4. Мала інерційність унаслідок тунельного ефекту й велика крутість характеристики зумовлюють доцільність обернених діодів у детекторах і змішувачах діапазону надвисоких частот.

2.5.4 Діоди в напівпровідникових ІМС

Як діоди в напівпровідникових інтегральних мікросхемах використовують біполярні транзистори в діодному ввімкненні. Це зручно для виробництва. Можливі п'ять варіантів діодного ввімкнення транзисторів (рис. 2.14).

У разі БК – Е (база – колектор – емітер) база й колектор замкнуті накоротко, час перемикання з відкритого стану в закритий мінімальний – одиниці

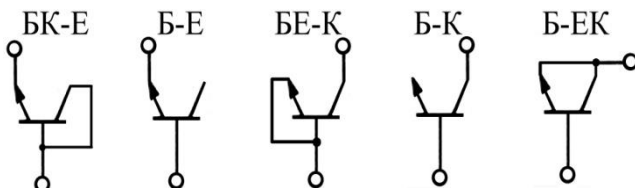


Рисунок 2.14 – Варіанти використання транзисторів у діодному ввімкненні

наносекунд. У разі Б – Е (база – емітер) використовують лише емітерний перехід. Час переходу в декілька разів більший. Обидва варіанти мають мінімальні ємність ($\sim 0,1\text{--}0,5$ пкФ) і зворотний струм ($0,5\text{--}1,0$ нА), але водночас мінімальну пробивну напругу. У разі БЕ – К (база – емітер – колектор), коли база й емітер замкнуті накоротко, та Б – К (база – колектор) із використанням одного колекторного переходу час переходу з відкритого стану в закритий – десятки наносекунд, пробивна напруга – $40\text{--}50$ В, зворотній струм – $15\text{--}30$ нм. Випадок Б – ЕК (база – емітер – колектор) із паралельним з’єднанням обох переходів має найбільший час переходу (100 нс), максимальний зворотний струм (до 40 нА), трохи більшу ємність і таку саму малу пробивну напругу, як перші два. Найчастіше застосовують варіанти БК – Е та Б – Е.

2.5.5 Діод Шотткі

У результаті зі швидкого розвитку технології інтегрованих мікросхем створено діоди Шотткі (ДШ) із майже ідеальними характеристиками. Проте раніше в ІМС ДШ не використовували. Це було пов’язано з тим, що за зворотного зміщення в діодах виникали значні струми просочування, а напруга пробиття була меншою, ніж $p\text{--}n$ -переходів. Ці проблеми спричиняли крайові ефекти по

периметру металевого контакту в конструкції діода. Щоб уникнути крайового ефекту, розробили конструкції ДШ із розширеною металізацією, що перекривала ізолювальний діелектричний шар SiO_2 на певній відстані від контакту з напівпровідником. Подальше вдосконалення конструкцій ДШ привело до створення навколо контакту метал – напівпровідник захисним кільцем p -типу

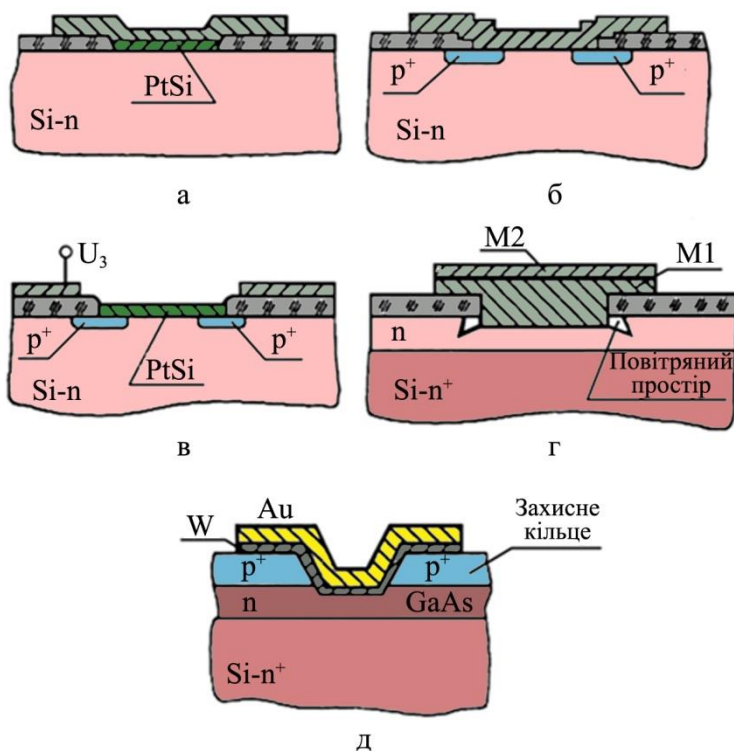


Рисунок 2.15 – Структури діодів Шотткі: а) класична; б) із захисним кільцем; в) додатковим електродом; г) з контактом метал – НП у спеціальному заглибленні в шарі n -типу; д) зі структурою W-n-GaAs

(рис. 2.15). Напруга пробною збільшилася від 5 В до 27 В, для цього слугують конструкції із захисним кільцем (рис. 2.15 б) і додатковим електродом (рис. 2.15 в), на який подають негативну напругу. У таких структурах напруга пробиття близька до напруги пробиття p - n -переходу. Також розроблені ДШ із захисним кільцем та трьома бар'єрами, з двома захисними кільцями тощо. Недоліками розглянутих конструкцій є зменшення швидкості перемикання ДШ, спричинене інжекцією неосновних носіїв заряду з p -кільця, збільшення ємності діода, ускладнення технологічних процесів.

Структура ДШ, зображена на рисунку 2.15 г, не має зазначених недоліків. Контакт металу з напівпровідником здійснюється в спеціальному заглибленні в шарі n -типу. У таких конструкціях діодів зменшені висота потенціального бар'єра $U_{\text{мн}0}$, бар'єрна ємність C та опір r_s . Коефіцієнт неідеальності наближається до одиниці. Два різних матеріали, використовувані для створення контакту, забезпечують термостабільність параметрів ДШ. Головною вимогою до діодів Шотткі, що функціонують у змішувачах НВЧ-діапазону, є стійкість до вигорання. Напівпровідниковим матеріалом для цих діодів є арсенід галію. Діоди Шотткі зі структурою W - n -GaAs зображено на рисунку 2.1 д. Стійкість до вигорання таких діодів дорівнює $8 \cdot 10^{-7}$ Дж, а висота потенціального бар'єра – 0,64 В.

2.6 Транзистори

2.6.1 Біполярні транзистори (БТ)

Найважливішою властивістю БТ є підсилювання електричних сигналів постійного, змінного й імпульсного струмів. У біполярного транзистора вихідний опір

відрізняється від вхідного. На цьому базується назва такого приладу – транзистор, що є скороченням слів *transfer resistor* (передавальний резистор). Підсилення в транзисторі відбувається завдяки тому, що порівняно невеликі зміни струму бази або напруги між базою та емітером можуть спричинити значні зміни струму між емітером і колектором. Водночас струм, яким керують, проходить емітерну й чутливу області бази та виходить із колектора.

Сучасні біполярні інтегровані транзистори є напівпровідниковими приладами, широко використовуваними в ІМС як керовані джерела або перемикачі струму. Біполярні транзистори є мінімум триполюсниками, що містять три напівпровідникові шари з різним типом електропровідності – *n-p-n* або *p-n-p* (рис. 2.16).

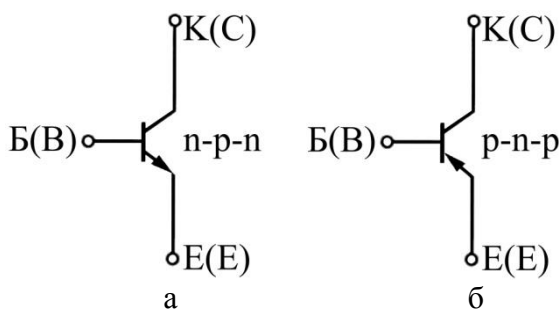


Рисунок 2.16 – Графічне позначення БТ з типом електропровідності: а) *n-p-n*; б) *p-n-p*

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, що належать до відповідних областей транзистора, містять

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*- і *p-n-p*-транзистори. Перша літера в позначенні транзистора означає тип електропровідності емітера, друга – бази, а третя – колектора; стрілка на емітері вказує на умовний напрям струму. Області, що контактують, утворюють два *p-n*-переходи, які називають так само, як і області, між якими вони розмішені (рис. 2.17): *p-n*-перехід база – емітер (BE) (керувальний перехід); *p-n*-перехід база – колектор (BC).

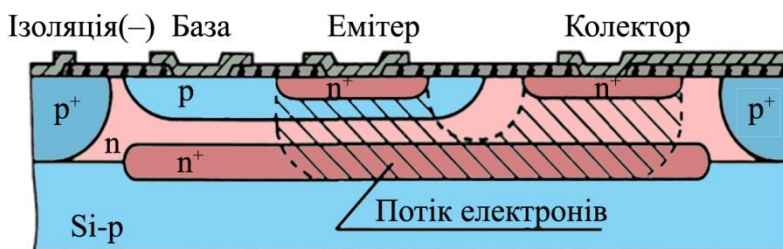


Рисунок 2.17 – Структура біполярного транзистора, виконаного за планарно-епітаксійною технологією заглибленим n^+ -шаром та ізоляцією обернено зміщеним *p-n*-переходом

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 зі значно легованого 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 $n^+p\text{-}n$ -транзистори, тому що в них неосновними носіями заряду в області бази є більш рухливі, ніж дірки електрони. Завдяки цьому такі транзистори мають кращі електричні параметри – вищі граничні частоти й швидкість. Транзистори $n^+p\text{-}n$ технологічніші, ніж $p\text{-}n\text{-}p$. Підвищену концентрацію домішки в області емітера позначають n^+ . Щоб забезпечити максимальне значення коефіцієнта інжекції емітера як легувальну речовину для нього використовують фосфор, що має максимальну розчинність у силіції та є донорною домішкою.

Сучасні біполярні $p\text{-}n\text{-}p$ -транзистори – дуже корисні елементи ІМС. Використовуючи в одній схемі $n\text{-}p\text{-}n$ - і $p\text{-}n\text{-}p$ -транзистори, створено, наприклад, логічні схеми з інжекційним живленням і двотактні підсилювачі з доповнювальною симетрією. Сучасні $p\text{-}n\text{-}p$ -транзистори з тонкою базою за параметрами не відрізняються від $n\text{-}p\text{-}n$ -транзисторів.

Усі виводи від областей транзистора розміщують в одній площині на поверхні кристала. Така структура біполярного транзистора називається планарною й дає можливість з'єднувати транзистори між собою та з іншими елементами напівпровідникової інтегрованої мікросхеми плівковими металевими провідниками або високолегованими областями, що виконують функції провідників. Конструкції й технологія виготовлення БТ дозволяють одночасно створювати діоди, резистори, конденсатори та інші елементи на основі емітерної, базової й колекторної областей або їх з'єднань.

Біполярні транзистори використовують у надзвичайно великому діапазоні частот і рівнів потужностей, цифрових та аналогових мікросхемах.

Планарно-епітаксійний $n^+p\text{-}n$ -транзистор із заглибленим n^+ -шаром (рис. 2.18) створюють за

допомогою двох дифузій – базової та емітерної – в рівномірно леговану область колектора n -типу. Концентраційні профілі домішок можуть мати вигляд, як на рисунку 2.18. Криві, зображені тонкими лініями, є концентраційними профілями домішок, уведених у напівпровідникову пластину двома дифузіями. Товста лінія – результативний концентраційний профіль домішок у кожній із трьох областей транзистора (Е, Б, К). Найбільш легованою є область емітера, а найменш – область колектора.

Підсилення в БТ відбувається завдяки тому, що незначні зміни напруги між базою та емітером спричиняють істотні зміни струму між емітером і колектором. Якщо p - n -перехід база – емітер поляризувати прямо (на базу щодо емітера подати позитивну напругу), то висота потенціального бар'єра знизиться, з області емітера в область бази буде інжектровано електрони. Більша частина електронного потоку з області емітера перетне базову область p -типу, епітаксійний шар n -типу, заглиблений шар n^+ -типу, знову епітаксійний шар n -типу та область n^+ -типу колектора.

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. 2.19). Напруги U_{BE} та U_{BC} створюють пряме й зворотне зміщення на p - n -переходах БЕ (BE) і БК (BC). Залежно від полярності напруг U_{BE} та U_{BC} транзистор може функціонувати в одному з чотирьох режимів: прямого зміщення переходів БЕ й ВС – режимі насичення; зворотного зміщення переходів БЕ та ВС – режимі блокування; прямого зміщення переходу БЕ й зворотного зміщення переходу ВС – активному режимі; зворотного зміщення переходу БЕ та прямого зміщення

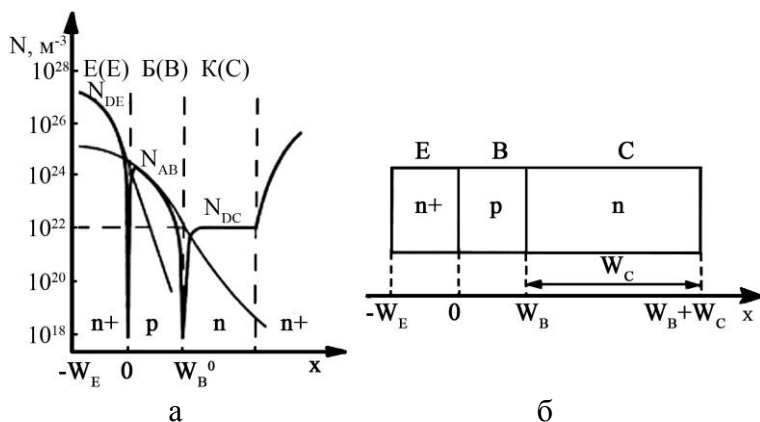


Рисунок 2.18 – Концентраційні профілі домішок в основних областях біполярного n^+p - n -транзистора (а); одновимірна модель біполярного транзистора (б)

переходу ВС – зворотно-активному режимі.

В активному режимі БТ діє як підсилювач сигналу, подібного на перехід база – емітер. За прямого зміщення p - n -переходу база – емітер в область бази дифундують електрони. Концентрація електронів значно менша, ніж дірок у базі; взаємним відштовхуванням електронів у базі нехтують.

Оскільки товщина області бази істотно 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 виникає в результаті рекомбінації дірок та електронів в ОПЗ між емітером і базою й струму основних носіїв заряду бази дірок, що інжектують із бази в емітер. Струм бази буде низьким порівняно зі струмом колектора, тому що рекомбінація в базі дуже повільна, а концентрація домішки

в ній значно менша, ніж відповідна концентрація домішки в емітері. Струм емітера I_E складається зі струмів бази й колектора. Співвідношення між струмами колектора та емітера обумовлене статичним коефіцієнтом передавання емітерного струму α_F , а підсилювальні властивості БТ – статичним коефіцієнтом підсилення транзистора β_F .

2.6.2 Польові транзистори

Польові транзистори (ПТ) із керувальним переходом – це прилади, в яких струмом керують перекриванням каналу між витоком і стоком області просторового заряду зворотно зміщеного p - n -переходу або переходу метал – напівпровідник.

Основні властивості транзисторів:

- вхідний опір має середнє значення між вхідними опорами МДН і біполярних транзисторів. Вхідний опір малопотужних біполярних транзисторів становить до 10^6 Ом, МДН-транзисторів – до 10^{15} Ом, ПТ із p - n -переходом – до 10^{11} Ом;

- нелінійна вольт-амперна характеристика;

- нульова напруга зміщення.

Особливості конструктивних рішень дали можливість виготовити польові транзистори з p - n -переходом із кращими параметрами, ніж у біполярних або МДН-транзисторів. Прикладами таких транзисторів є великострумовий вертикальний польовий транзистор із p - n -переходом і дуже малим значенням опору каналу у відкритому стані й польовий транзистор із переходом метал – напівпровідник на основі арсеніду галію, який функціонує в діапазоні надвисоких частот, що перевищують можливості біполярних і МДН-транзисторів.

Польовий транзистор із p - n -переходом.

Структуру n -канального ПТ із p - n -переходом

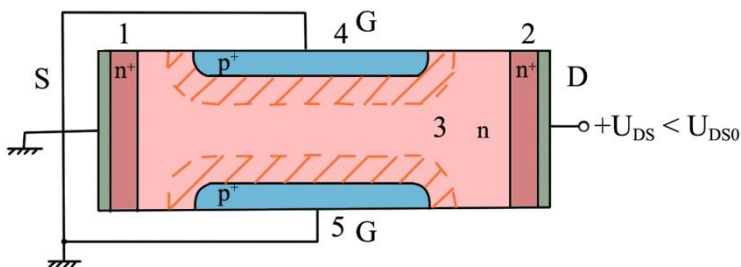
зображено на рисунку 2.19. Між двома високолегованими областями n^+ -типу витоку 1 та стоку 2 знаходиться область низьколегованого каналу n -типу 3.

Звуження в ньому створено двома областями p^+ -типу 4 і 5, названими заслонами. Міжнародні позначення областей: витоку – S, стоку – D, заслону – G. Зворотнє зміщення p - n -переходу заслін – канал створює товсті збіднені шари в слаболегованій області каналу.

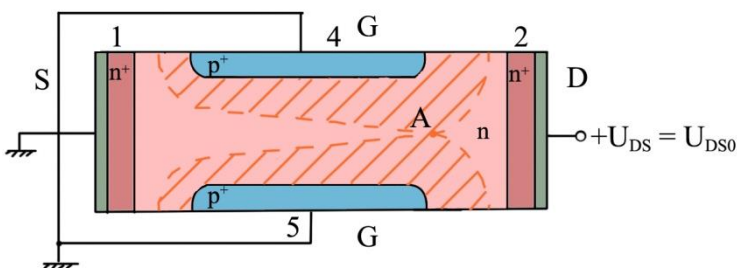
Товщина збідненого шару p - n -переходу за зворотного зміщення залежить від рівня легування областей p -типу заслону та n -типу каналу й зовнішньої напруги. Товщину збідненого шару, а відповідно товщину каналу під заслонами регулюють напругами заслін – витік і заслін – стік.

У польовому транзисторі, зображеному на рисунку 2.20 а, заслін і витік заземлені, а на стік подано позитивну напругу. Якщо напруга U_{DS} низька, то канал n -типу 3 між витоком 1 та стоком 2 можна еквівалентно змодельовати резистором. Через транзистор проходить струм I_D . Якщо збільшувати напругу на стоці й враховувати резистивний характер каналу, то струм I_D лінійно зростатиме (рис. 2.20).

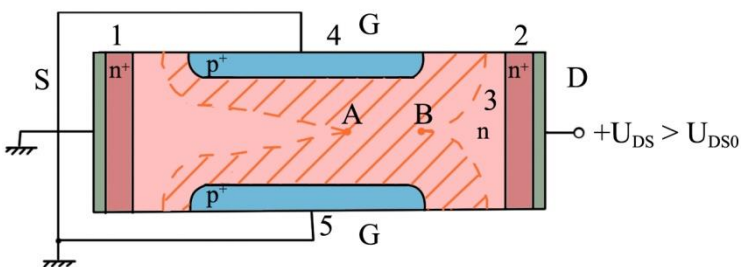
Уздовж осі витік – стік (SD) напруга на каналі зростатиме від нуля біля витоку до U_{DS} біля стоку. Відповідно вздовж p - n -переходу заслін – канал напруга зворотного зміщення й товщина збідненого шару p - n -переходу заслін – канал зростатиме від витоку до стоку. Площа поперечного перерізу каналу вздовж осі витік – стік зменшуватиметься. Подальше збільшення напруги U_{DS} спричинить ще помітніше зменшення площі поперечного перерізу каналу. Опір каналу та нахил вольт-амперної характеристики зростатиме, а струм каналу зменшуватиметься (рис. 2.20). За напруги $U_{DS} = U_{DS0}$ канал перекиється (рис. 2.19 б). У точці А збіднені області



a



б



в

Рисунок 2.19 – *N*-канальний польовий транзистор із керувальним *p-n*-переходом: а) канал відкритий, заслін і витік заземлені, а на стік подано позитивну напругу; б) канал перекритий за напруги $U_{DS} = U_{DS0}$; в) канал перекритий

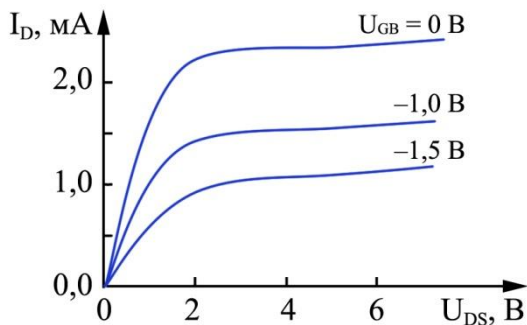


Рисунок 2.20 – Вольт-амперні характеристики n -канального польового транзистора з керувальним p - n -переходом

перекриваються між собою й канал зникає. Області витoku та стoku «ізолюються» одна від одної збідненими областями переходів. Струм стoku проходить через збіднений шар так, як у МДН-транзисторі в разі перекриття каналу.

Струм стoku за напруги U_{DS0} позначають I_{D0} . Якщо напругу U_{DS} збільшувати далі, то збіднені шари стануть ще товщими (рис. 2.19 в), але струм I_{D0} залишиться майже без змін, тому що основна частка зростаючої напруги U_{DS} падає на збіднену область між точками А й В. Польовий транзистор функціонує в області насичення.

Схемні позначення n - і p -канального ПТ із p - n -переходом зображено на рисунку 2.21. Напрями стрілок на заслонах свідчать про пряме проходження струму крізь керувальний p - n -перехід та відповідно тип заслону й транзистора. N -канальні ПТ мають кращі електричні параметри.

Розглянута структура ПТ із p - n -переходом (рис. 2.19) характерна для вертикальної конструкції транзистора. Вона може бути трансформованою в горизонтальну поверхневу конструкцію, якщо врахувати,

що ОПЗ нижнього заслону створюється зворотно зміщеним p - n -переходом, який ізолює канал від підкладки. У такому разі товщина ОПЗ ізолювального нижнього p - n -переходу залишатиметься постійною, а керувальна напруга на заслоні U_{GS} змінюватиме розміри ОПЗ лише верхнього p - n -переходу.

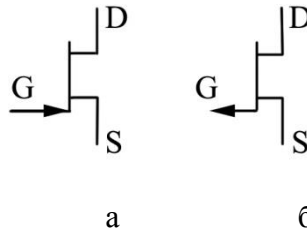


Рисунок 2.21 – Схемні позначення польового транзистора з керувальним p - n -переходом:

а) n -канального; б) p -канального

Параметри транзистора. Провідність каналу для n -канального транзистора за відсутності збідненого шару

$$G_0 = q\mu_n N_D d \frac{W}{L}. \quad (2.15)$$

Значення G_0 регулюють співвідношенням W/L . Провідність каналу в лінійній області характеристик визначають за формулою

$$g_C = \frac{\partial I_D}{\partial U_{DS}} \bigg|_{U_{GS}=\text{const}} = G_0 \left[1 - \left(\frac{U_{GS} - U_0}{U'_{GST}} \right)^{\frac{1}{2}} \right], \quad (2.16)$$

де U_{GS} і U'_{GST} для n -канального транзистора – від'ємні

величини.

Зі збільшенням негативної напруги U_{GS} провідність каналу g_c зменшуватиметься до значення напруги на заслоні $U_{GS} = U_{GST}$. Канал буде повністю перекритим, а g_c дорівнюватиме нулю.

Кругість характеристики або динамічну передавальну провідність розраховують за формулою

$$g_{ms} = \left. \frac{dI_D}{dU_{DS}} \right|_{U_{DC}=\text{const}} \quad (2.17)$$

Для лінійної області

$$g_{ms} = \frac{G_0 U_{DS}}{2U'_{GST}} \left(\frac{U'_{GST}}{U_{GS} - U_0} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Для області насичення

$$g_{m0} = G_0 \left[1 - \left(\frac{U_{GS} - U_0}{U'_{GST}} \right)^{\frac{1}{2}} \right].$$

Кругість характеристики в області насичення дорівнює провідності каналу в лінійній області.

Польовий транзистор з керувальним переходом метал – напівпровідник. Такі пристрої є основними активними елементами арсенід-галієвих мікросхем. Мета їх розроблення – підвищення швидкодії сучасних інтегрованих мікросхем. Цифрові арсенід-галієві мікросхеми належать до надвисокочастотних, а аналогові призначені для функціонування в діапазоні високих частот.

Переваги арсеніду галію порівняно із силіцієм:

більша рухливість електронів у слабких електричних полях ($0,4\text{--}0,5 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$); більша швидкість насичення в сильних полях ($2\text{--}10 \text{ м/с}$); більша ширина забороненої зони та як наслідок значно більший питомий опір нелегованого арсеніду галію, що дає можливість використовувати його як ізолювальну основу.

Недоліками арсеніду галію є мала рухливість дірок ($0,025 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$); короткий термін життя неосновних носіїв заряду (10^{-8} с).

Найоптимальніший активний елемент, що дозволяє реалізувати переваги арсеніду галію порівняно із силіцієм, – польовий транзистор із каналом n -типу й керувальним переходом метал – напівпровідник (МЕН-транзистор).

Структуру n -канального арсенід-галієвого МЕН-транзистора зображено на рисунку 2.22. Транзистор створюють на нелегованій арсенід-галієвій основі 1. Оскільки такі основи мають великий питомий опір, їх називають напівізолювальними. Провідність основи – p -типу. На її поверхні методом йонного легування формують сильнолеговані області 2 витоку й стоку n^+ -типу, а після – тонкий шар n -типу, що виконує функції каналу 3. Типова товщина шару каналу $3d - 0,1\text{--}0,2 \text{ мкм}$, концентрація донорів у каналі $N_D = (1\text{--}2) \cdot 10^{23} \text{ ат/м}^3$. Силіцій, селен, сірку та інші матеріали використовують як легувальні домішки. На поверхню над шаром 3 наносять металевий електрод 4 зі сплаву, наприклад титан – вольфрам, що слугує заслоном. Металеві електроди до областей витоку та стоку 5 виготовляють зі сплаву золото – германій. На всю іншу поверхню наносять діоксид силіцію.

Металевий електрод 4 заслону створює з шаром 3 каналу діод Шотткі, висота потенціального бар'єра якого становить близько $0,8 \text{ В}$. Провідний канал між витоком і стоком проходить у шарі 3 та обмежується зверху

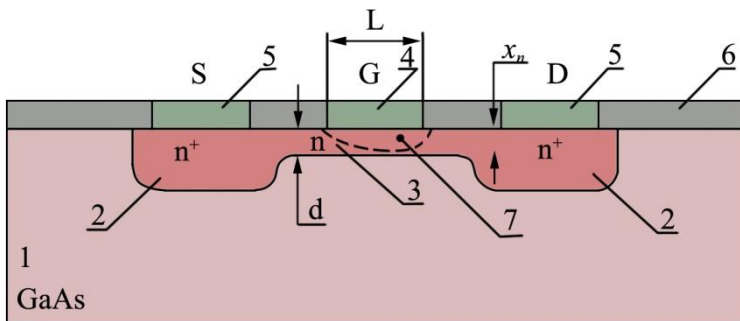


Рисунок 2.22 – Структура польового транзистора з керувальним переходом метал – напівпровідник (МЕН) на арсеніді галію: 1 – нелегована арсенід-галієва основа; 2 – сильнолеговані області витоку та стоку n^+ -типу; 3 – канал (n -типу); 4 – металевий електрод; 5 – металеві електроди областей витоку й стоку; 6 – шар діоксиду силіцію; 7 – збідена область

збіденою областю 7 бар'єра Шотткі, а знизу – основою 1.

Товщину каналу визначають за різницею між товщиною шару $3d$ і товщиною $(d - x_n)$ збіденої області 7 бар'єра Шотткі, а довжину каналу – за розміром заслону L . Відстань від витоку до стоку приблизно в 1–3 рази більша за довжину каналу L .

Принцип функціонування МЕН-транзистора такий, як польового з p - n -переходом. У його конструкції заслін розміщено на поверхні з однієї сторони каналу, тому одержані раніше аналітичні формули для ПТ з p - n -переходом адаптуємо до конструкції з одностороннім розміщенням заслону (рис. 2.22).

Основні параметри й характеристики. Між заслоном і витоком МЕН-транзистора подають керувальну напругу U_{GS} . Змінюючи U_{GS} , керують товщиною

збідненого шару $x_n(U_{GS})$ під заслоном та відповідно товщиною каналу

$$d_C(U_{GS}) = d - x_n(U_{GS}), \quad (2.18)$$

його провідністю та струмом стоку I_D . За порогової напруги U_{GST} межа збідненого шару 7 досягає напівізолювальної основи арсеніду галію й перекриває канал. Струм стоку дорівнюватиме нулю (рис. 2.23). За напруги на заслоні $U_{GS} = 0$ канал МЕН-транзистора можемо перекрити напругою перекриття каналу U_{DS0} , яку визначають із рівняння товщини збідненої області x_n за умови $x_n = d$,

$$d = \left[\frac{2\varepsilon_{GaAs}\varepsilon_0(U_{DS0} + U_0)}{qN_d} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2.19)$$

тобто

$$U_{DS0} = \left(\frac{qN_d d^2}{2\varepsilon_{GaAs}\varepsilon_0} \right) - U_0 \text{ при } U_{GS} = 0, \quad (2.20)$$

де U_0 – висота потенціального бар'єра Шотткі; ε_{GaAs} – діелектрична проникність арсеніду галію ($\varepsilon_{GaAs} = 10,9$).

З урахуванням напруги на заслоні напруга перекриття каналу

$$U_{DS0} = \frac{qN_d d^2}{2\varepsilon_{GaAs}\varepsilon_0} - U_0 + U_{GS}. \quad (2.21)$$

Напруга на заслоні U_{GS} збільшує товщину області 7 і канал 3 може бути перекритим за напруги на стоці

$U_{DS0} = 0$. Напруга на заслоні U_{GS} , за якої буде перекрито канал 3 за умови $U_{DS0} = 0$, називається пороговою напругою U_{GST} . Визначимо її з виразу (2.21):

$$U_{GST} = -\left(\frac{qN_D d^2}{2\varepsilon_{GaAs}\varepsilon_0}\right) + U_0. \quad (2.22)$$

Позначимо $U_{GST} - U_0 = U'_{GST}$, тоді для МЕН-транзистора

$$U'_{GST} = -\left(\frac{qN_D d^2}{2\varepsilon_{GaAs}\varepsilon_0}\right). \quad (2.23)$$

Потрібну порогову напругу U_{GST} забезпечують вибраним значенням концентрації донорів у каналі N_D і товщиною d шару 3. Якщо $N_D = 1 \cdot 10^{23}$ ат/м³, $d = 0,2$ мкм, а висота потенціального бар'єра Шотткі $U_0 = 0,8$ В, то $U_{GST} = -1,96$ В. За товщини $d = 0,1$ мкм та тієї самої концентрації донорів N_D порогова напруга буде позитивною: $U_{GST} = +0,1$ В.

В арсенід-галієвих мікросхемах використовують МЕН-транзистори, для яких порогова напруга може становити в межах $-2,5$ – $0,2$ В. Якщо порогова напруга негативна ($U_{GST} < 0$) і $U_{GS} = 0$, то між витокom та стоком утворюється канал, і транзистор називають нормально відкритим за аналогією з МДН-транзистором з убудованим каналом. За напруги $U_{GST} > 0$ та $U_{GS} = 0$ канал перекриває збіднений шар 7 (рис. 2.23), а транзистор називають нормально закритим за аналогією з МДН-транзистором з індукованим каналом.

Характеристики залежності струму стоку від напруги U_{GS} для нормально відкритого транзистора 1 та

нормально закритого транзистора 2 зображено на рисунку 2.23. Для нормально відкритих МЕН-транзисторів керувальна напруга заслону може змінюватися від від’ємних значень, що перевищують порогове, до невеликих додатних (0,6 В). Під більшими позитивними напругами на заслоні відкривається перехід метал – напівпровідник і в його колі виникає небажаний струм заслону I_G (крива 3), тому струм стоку для нормально відкритих транзисторів обмежують величиною I_{Dmax1} .

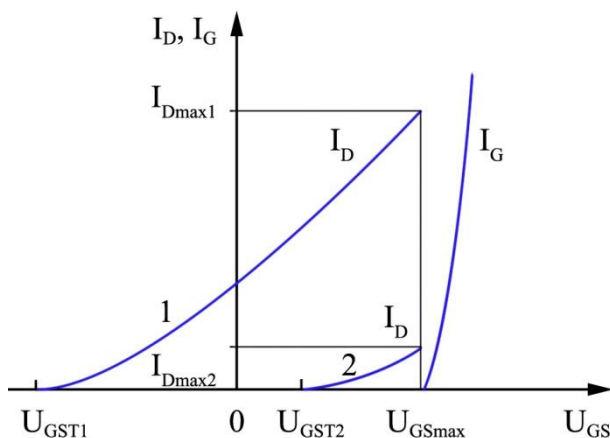


Рисунок 2.23 – Стоково-заслінні вольт-амперні характеристики МЕН-транзисторів

Для нормально закритих транзисторів напруга на заслоні позитивна й може змінюватися в межах U_{GST2} –6 В. Максимальний струм стоку обмежують значенням I_{Dmax2} .

Нормально закриті МЕН-транзистори є перспективними для використання в цифрових ІМС. На одному кристалі можна створювати нормально закриті та нормально відкриті транзистори. Для цього залежно від технології виготовлення мікросхем використовують або

різну товщину шару, або різний рівень легування області каналу.

Для каналів $L < 0,5$ мкм термін пробігу електронів через канал менший за середній термін вільного пробігу. Електрони рухаються крізь канал без розсіювання. Такий рух електронів називають балістичним. Паразитні ємності заслін – витік і заслін – стік МЕН-транзисторів малі порівняно з відповідними ємностями МДН-транзисторів. Дуже малі також ємності витік – основа та стік – основа. Відчутною для розрахунків швидкодії МЕН-транзисторів залишається ємність заслін – канал C_{GC} , обчислювання за величиною бар'єрної ємності переходу метал – напівпровідник. Ємність C_{GC} потрібно зменшити, необхідно зменшити площу заслону $S = WL$:

$$C_{GC} = \frac{\varepsilon_{GaAs} \varepsilon_0}{x_n} WL. \quad (2.24)$$

Підвищити швидкодію арсенід-галієвих цифрових мікросхем можна, збільшивши кругість, зменшивши термін пробігу електронів через канал і паразитні ємності. Робочі частоти сучасних МЕН-транзисторів сягають сотень гігагерців.

Конструкції транзисторів. Конструкцію МЕН-транзистора із самосуміщенням та ізоляцією заслону від областей витоку й стоку зображено на рисунку 2.24.

Селективним йонним легуванням силіцієм напівізолювальної арсенід-галієвої основи 1 створюють шар 2 із провідністю n -типу. Товщина шару 0,08 мкм. Концентрація донорів у шарі $(1-3) \cdot 10^{23}$ ат/м³. Цей шар виконуватиме функцію каналу.

Заслін каналу 3 створюють у формі короткої й досить широкої стрічки із силіциду вольфраму. Довжина заслону $L = (0,5-1)$ мкм. З обох сторін заслону формують

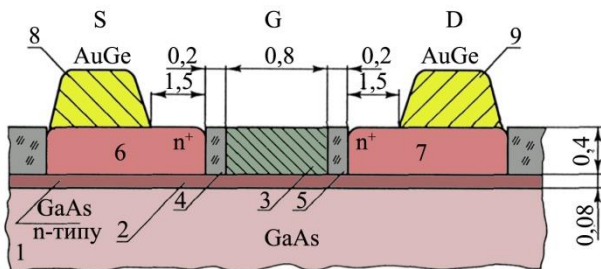


Рисунок 2.24 – Структура МЕН-транзистора із самосуміщенням та ізоляцією заслону від областей витоку й стоку: 1 – арсенід-галієва основа; 2 – шар із провідністю n -типу; 3 – заслін каналу у формі стрічки із силіциду вольфраму; 4, 5 – діелектричні ізолювальні області з діоксиду силіцію; 6, 7 – шари n^+ -типу; 8, 9 – контакти стоку та витоку

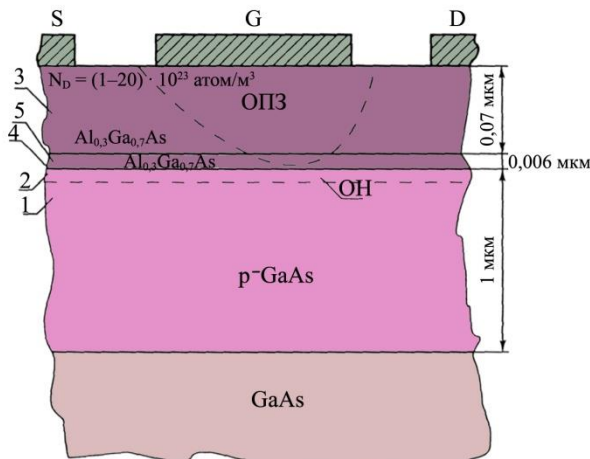


Рисунок 2.25 – Гетероструктурний ПТ з керувальним переходом метал – напівпровідник: 1 – нелегований шар GaAs; 2 – зона накопичення електронів; 3 – легований шар $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$; 4 – межа гетеропереходу; 5 – розділювальний шар нелегovanого $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$

діелектричні ізолювальні області 4 і 5 із діоксиду силіцію, що забезпечують самосуміщення областей витоку й стоку із заслоном і зменшують ємності заслін – стік (витік).

МЕН-транзистори аналогових мікросхем НВЧ-діапазону повинні не лише мати високі граничні частоти, а й забезпечувати великі робочі струми, тому необхідно, щоб ширина заслону в багато разів перевищувала його довжину.

Перспективним елементом цифрових надшвидкісних ІМС та аналогових ІМС НВЧ-діапазону є гетероструктурний польовий транзистор із керувальним переходом метал – напівпровідник (ГМЕН-транзистор), функції якого базуються на властивостях гетеропереходу між тонкими монокристалічними шарами з близькою кристалічною структурою й різною шириною забороненої зони. Найчастіше для створення таких транзисторів використовують гетероперехід між нелегованим арсенідом галію 1 і легованим донорами арсенідом галію-алюмінію 3 (рис. 2.25). В арсеніді галію поблизу межі поділу двох напівпровідників у зоні провідності утворюється область 2 із мінімальною енергією для електронів, у якій вони накопичуються. Межу області позначено на рисунку 1.9 штриховою лінією. Електрони в області 2 перебувають у потенціальній ямі і називаються двовимірним електронним газом. Електрони не можуть переходити через межу гетеропереходу в область 3, тому що цьому заважає потенціальний бар'єр, утворений розривом дна зони провідності. Двовимірний газ може переміщуватися вздовж межі гетеропереходу 4. Канал 2 ГМЕН-транзистора розміщений уздовж гетеропереходу в потенціальній ямі для електронів. У слабких електричних полях рухливість електронів в області 2 надзвичайно велика, особливо за низьких температур. Для кращого просторового розділювання двовимірного електронного газу й центрів

розсіювання в арсеніді галію-алюмінію 3 між шарами 1 і 3 вводять тонкий розділювальний шар нелегованого арсеніду галію-алюмінію 5.

Шари 1, 3, 5 наносять молекулярно-променевою епітаксією. Для заслону використовують алюміній. Між заслоном та шаром 3 арсеніду галію-алюмінію створюється перехід метал – напівпровідник. Збіднена область переходу знаходиться в областях 3, 5. Канал 2 нормально відкритого транзистора на рисунку 2.24 формується за напруги $U_{GS} < 0$ у шарі нелегованого арсеніду галію на межі гетеропереходу. За досить великих негативних напруг U_{GS} збіднена область заслону збільшуватиметься й зможе перекрити область накопичення (ОН) 2 електронів. Струм стоку дорівнюватиме нулю.

ГМЕН-транзистори мають кращі електричні параметри порівняно з МЕН-транзисторами.

2.7 Напівпровідникові прилади спеціального призначення

2.7.1 Стабілітрон

Стабілітроном називається напівпровідниковий діод, напруга на якому в зоні електричного пробиття в разі зворотного ввімкнення майже не залежить від струму в заданому діапазоні, який призначений для стабілізації напруги.

Стабілітрони функціонують у режимі електричного пробиття. У результаті дії сильного поля в області *p-n*-переходу зворотний струм різко зростає без істотних змін прикладеної напруги. Цю особливість ВАХ кремнієвого діода в зоні пробиття (рис. 2.26 а) використовують для стабілізації напруги, а також фіксації напруг і струмів у

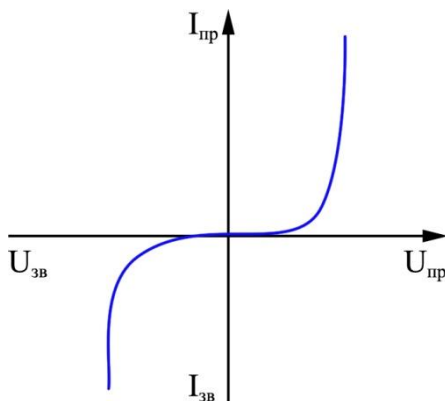


Рисунок 2.26 – Вольт-амперна характеристика кремнієвого стабілітрона

схемах. На цьому базується звідси інша назва кремнієвих стабілітронів – опорні діоди.

Пробиттям *p-n-переходу* називається явище різкого збільшення зворотного струму діода після досягнення зворотною напругою певного критичного значення.

Розрізняють такі види пробиття: електричне (тунельне й лавинне) та теплове.

Тунельне й лавинне пробиття обумовлені фізичними процесами, що відбуваються в *p-n*-переході в сильних електричних полях, а теплове – процесами в результаті нагрівання *p-n*-переходу з протіканням через нього зворотного струму.

Електричне пробиття є оборотним, тому дозволене функціонування напівпровідникових приладів в однодоменному режимі. Теплове пробиття є необоротним, тобто напівпровідниковий прилад унаслідок нього виходить із ладу.

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

На рисунку 2.26 наведена ВАХ стабілітрона. Оскільки реальна ВАХ в області пробиття має певний нахил, напруга стабілізації залежить від струму стабілізації $I_{ст}$. Максимальний струм стабілізації $I_{ст. max}$ обмежений дозволеною потужністю розсіяння P_{max} і можливістю переходу електричного пробиття в теплове, що є необоротним. Мінімальний струм стабілізації $I_{ст. min}$ відповідає початку стійкого електричного пробиття. За менших струмів у діоді виникають значні шуми, походження яких пов'язане з механізмом лавинного пробиття (шуми в передпробійній області використовували в спеціальних приладах – напівпровідникових генераторах шуму). Диференціальний опір $r_{диф}$ характеризує якість стабілізації та обумовлений кутом нахилу ВАХ в зоні пробиття (воно зростає із зростанням напруги стабілізації).

Здебільшого за допомогою стабілітронів стабілізують напругу. Схема найпростішого стабілізатора напруги зображена на рисунку 2.27. Стабілітрон приєднують паралельно до навантаження R_H , а в загальне коло додають обмежувальний резистор R , що є функціонально необхідним елементом.

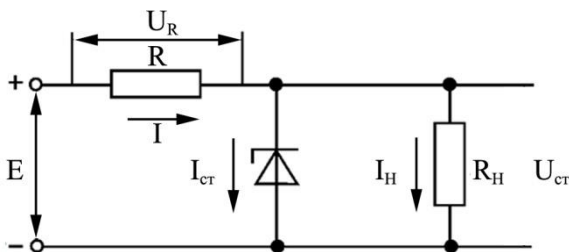


Рисунок 2.27 – Схема стабілізатора напруги

Для схеми, наведеної на рисунку 2.27, справедливе рівняння
$$I_{ct} = \frac{E}{K} - \frac{R - R_H}{RR_H} U_{ct}.$$

Відповідно до законів фізики принцип стабілізації напруги у цій схемі можна пояснити так. Підвищення напруги джерела живлення на величину ΔE приводить до збільшення загального струму в ланцюзі $I = I_{ct} + I_H$. Оскільки в результаті зміни струму, що проходить через стабілітрон, напруга на ньому залишається майже незмінною та дорівнює напрузі стабілізації, зміненою струму навантаження I_H можна знехтувати. Збільшення напруги джерела живлення на величину ΔE майже повністю відбудеться на обмеженому резисторі R . Зі зменшенням напруги джерела живлення на величину ΔE зменшується загальний струм у ланцюзі, що приводить до зменшення струму, який проходить через стабілітрон. Якщо це зменшення не виходить за межі стабілізації, то в разі збереження постійної напруги на навантаженні напруга на резисторі R зменшиться на величину ΔE . Отже, обмежувальний резистор R у розглянутій найпростішій схемі стабілізатора напруги є принципово необхідним. Зміна опору навантаження за незмінної напруги джерела живлення не змінить напруги на обмежувальному резисторі R , а спричинить зміну струму, що проходить через стабілітрон.

Крім стабілізації постійної напруги, стабілітрони використовувані в стабілізаторах як обмежувачі імпульсної напруги, схемах випростовування, як керовані ємності, шумові генератори, а також як елементи міжкаскадних зв'язків у підсилювачах постійного струму та імпульсних пристроях.

До основних параметрів стабілітронів належать:

1) напруга стабілізації – номінальне значення напруги на стабілітроні за заданого зворотного струму

стабілітрона в зоні пробиття. Напруга стабілізації приблизно дорівнює напрузі пробиття. У стабілітронах напругою стабілізації до 7 В використовують тунельне пробиття, а напругою стабілізації, більшою ніж 15 В, – лавинне пробиття. На сьогодні розроблені стабілітрони для стабілізування напруги до 100 В;

2) диференційний динамічний опір – $r_{ст}$, обчислений за співвідношенням

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

Для тунельного пробою диференційний динамічний опір p - n -переходу $r_{cm.m} = B \frac{U_{cm}}{I_{cm}}$, де B – коефіцієнт, що

враховує властивості матеріалу. Для лавинного пробиття

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

Величина диференціального опору залежить від напруги стабілізації. Мінімальне значення мають діоди з напругою стабілізації 70 В. Це можна пояснюється тим, що в цій зоні діють обидва механізми пробиття. Із переходом в зону лавинного пробиття, тобто зі збільшенням, і в зону тунельного пробиття, тобто зі зменшенням, диференційна провідність різко зростає). Водночас диференційний опір зменшується зі ростом струму стабілітрона. Чим менше значення r_{cm} , тим вищим ступінь стабілізації напруги;

3) опір постійному струму $R_{cm} = \frac{U_{cm}}{I_{cm}}$, що характеризує втрати в діоді в конкретній робочій точці;

4) критерій (коефіцієнт) якості стабілітрона Q – відношення статичного опору до диференційного за визначеного струму 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 лише нахил ВАХ, а й відношення останнього до величини напруги стабілізації. Для сучасних стабілітронів Q становить у межах 20–100.

5) температурний коефіцієнт напруги (ТКН) стабілізації показує залежність 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 пробиття тунельне, то ТКН негативний, а якщо лавинне – позитивний. Характер зміни ТКН для стабілітронів із різною напругою пробиття зображений на рисунку 2.28. Для зменшення ТКН застосовують послідовне ввімкнення двох або декількох стабілітронів з ТКН із різним знаком. У разі позитивного ТКН послідовно зі стабілітронів можна прямо вмикати *p-n*-перехід. Такий спосіб компенсації поширеними у прецизійних стабілітронах, у яких послідовно з основним *p-n*-переходом прямо ввімкнені два компенсувальних.

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.

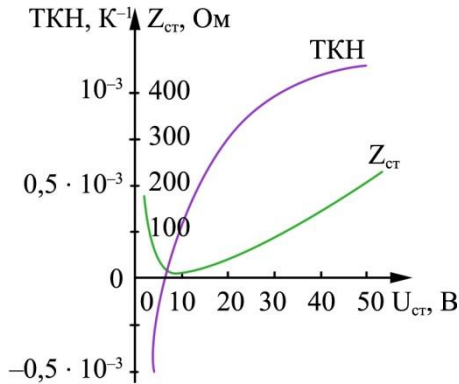


Рисунок 2.28 – Характер залежності температурного коефіцієнта напруги (TKH) стабілізації і динамічного опору від напруги стабілізації стабілітронів

На практиці середній TKH визначається за формулою

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

б) мінімальний ($I_{ст. \min}$) та максимальний ($I_{ст. \max}$) струми стабілізації.

Мінімальний струм стабілізації обмежується шумами стабілітрона. За низьких струмів пробиття нестійке, тому ефективна напруга шумів на стабілітроні досягає декількох сотень мікрвольт. Зі зростанням струму пробиття стає стійким і шуми зменшуються.

Максимальний струм стабілізації обмежується допустимою потужністю розсіювання стабілітрона. У сучасних стабілітронів він становить від десятків міліампер до десятків ампер.

Напівпровідникові стабілітрони, крім основного призначення, на сьогодні широко використовують для обмеження постійної та імпульсної напруг, як елементи міжкаскадного зв'язку в електронних схемах, керовані ємності, шумові генератори й т. д.

2.7.2 Тиристор

Тиристор – це напівпровідниковий прилад із чотиришаровою $p-n-p-n$ -структурою з трьома послідовними $p-n$ переходами, що характеризується двома стійкими станами в прямому напрямі й замикальними властивостями в протилежному.

Переваги: малі габарити та маса, висока експлуатаційна надійність, довгий термін експлуатації, широкий діапазон температур, можливість імпульсного керування. Тиристиори дозволяють одержати високий коефіцієнт корисної дії перетворення енергії, мають високу надійність, прості у використанні.

Тиристор передбачає два статичні стани: закритий, або стан низької провідності (проходить малий струм), і відкритий або стан високої провідності (проходить великий струм). У кожному з них він може перебувати скільки завгодно часу. З одного стану в інший прилад переходить порівняно швидко в результаті дії короткочасного зовнішнього сигналу. Тиристиори використовують у радіолокації, обладнаннях радіозв'язку, автоматиці, як керовані ключі, порогові елементи, перетворювачі енергії, тригери, що не споживають струм у початковому стані. Порівняно з біполярними транзисторами тиристиори можуть забезпечувати значно більший коефіцієнт підсилення струму вмикання, мати великий струм у відкритому стані й витримувати велику напругу в закритому, що важливо для досягнення високих

параметрів потужних пристроїв.

Тиристори класифікують за кількістю виводів, видом вихідної вольт-амперної характеристики (ВАХ) та способами вимикання й керування.

За кількістю виводів тиристори поділяють на такі типи:

1) діодні (диністори), що мають лише два виводи – анод і катод;

2) тріодні (триністори), що мають три виводи (два основні й один керувальний) – анод, катод і керувальний електрод;

3) чотириелектродні (тетродні), що мають чотири виводи (два вхідні й два вихідні).

За видом вихідної ВАХ тиристори поділяють на три типи:

1) що не проводять струму у зворотному напрямі;

2) що проводять струм у зворотному напрямі (тиристори зі зворотною провідністю, або тиристори-діоди);

3) симетричні (двопровідні тиристори, симістори, або тріаки), що можуть перемикатися у відкритий стан в обох напрямках.

За способом вимкнення виділяють тиристори, що вимикаються лише у вихідному анодному колі, й тиристори, які вимикаються за допомогою вхідного керувального кола (вимикальні тиристори).

За способом керування тиристори поділяють на тиристори з керувальним електродом, опто-, магніто- та фототиристори. Перші відкриваються зовнішнім електричним сигналом, другі – внутрішнім оптичним сигналом (випромінювач і фототиристор становлять в оптотиристорі єдину конструкцію), треті – магнітним полем.

Вищезазначені властивості фототиристорів дозволили спростити схеми, вилучивши з них підсилювачі

й релейні елементи, що є дуже важливим у промисловій електроніці, наприклад у високовольтних перетворювачах. Найчастіше фототиристори використовують для комутації світловим сигналом потужних електричних.

У разі вмикання диністора за схемою, наведеною на рисунку 2.29, 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, рис. 2.30).

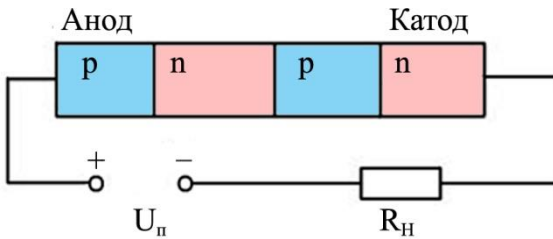


Рисунок 2.29 – Схема ввімкнення диністора

Зі збільшенням напруги джерела живлення, струм тиристора збільшується незначно доти, доки напруга не наблизиться до певного критичного значення, що дорівнює напрузі ввімкнення $U_{вв}$. За напруги $U_{вв}$ у диністорі створюються умови для лавинного розмноження носіїв заряду в області колекторного переходу. Відбувається зворотне електричне пробиття колекторного переходу (ділянка 2 на рис. 2.30). У n -області колекторного переходу утворюється надмірна концентрація електронів, а в p -області – дірок. Зі збільшенням цих концентрацій знижуються потенційні бар'єри всіх переходів диністора. Зростає інжекція носіїв через емітерні переходи. Процес лавиноподібний і супроводжується перемиканням колекторного переходу у відкритий стан. Струм зростає

відбувається одночасно зі зменшенням опорів усіх областей приладу. Тому збільшення струму через прилад неможливе без зменшення напруги між анодом і катодом.

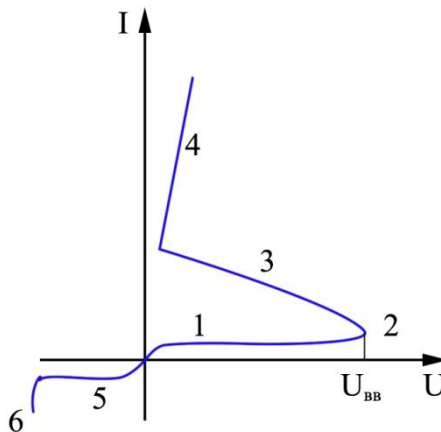


Рисунок 2.30 — Вольт-амперна характеристика диністора: 1 — зростання струму через p - n -переходи тиристора; 2 — колекторне пробиття; 3 — лавиноподібне збільшення струму; 4 — робочий режим; 5 — зворотне ввімкнення; 6 — електричне пробиття

На ВАХ цю ділянку позначено цифрою 3 (рис. 2.30). На ній прилад має негативний диференціальний опір. Напруга на резисторі зростає й відбувається перемикавання диністора. Після набуття колекторним переходом відкритого стану ВАХ має вигляд відповідної прямої гілки діода (ділянка 4 на рис. 3.30). Після перемикавання напруга на диністорі знижується до 1 В. Якщо далі збільшувати напругу джерела живлення або зменшувати опір резистора R , то буде спостерігатися зростання вихідного струму, як у звичайній схемі з діодом у разі прямого ввімкнення.

Зі зменшенням напруги джерела живлення відновлюється високий опір колекторного переходу. Час відновлення опору цього переходу може становити десятки мікросекунд. Із закритого стану у відкритий в електричному колі тиристор переводять зовнішньою дією на прилад. У тріодних тиристорах, що є найбільш поширеними, стан приладу регулюють у колі третього – керувального – електрода.

Триністор – це чотиришарова структура типу $p-n-p-n$ із трьома переходами (рис. 2.31), у якому p -шар виконує функцію анода, а n -шар – катоду, а керувальний електрод сполучений із p -шаром структури. Напруга живлення подається на тиристор так (рис. 2.32), що p_1-n_1 та p_2-n_2 відкриті, а перехід p_2-n_1 закритий. Опір відкритих переходів малий, тому майже вся напруга живлення $U_{пр}$ прикладена до закритого переходу P_2 , що має істотний опір. Зважаючи на це, тиристор дуже малий. Із підвищенням напруги U_{np} струм тиристора збільшується до певного критичного значення, що дорівнює напрузі перемикання $U_{пер}$. Після цього починається лавиноподібне збільшення струму через тиристор.

Вольт-амперна характеристика для різних струмів

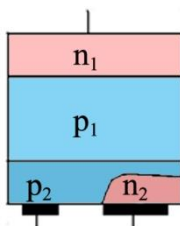


Рисунок 2.31 – Напівпровідникова структура тиристора

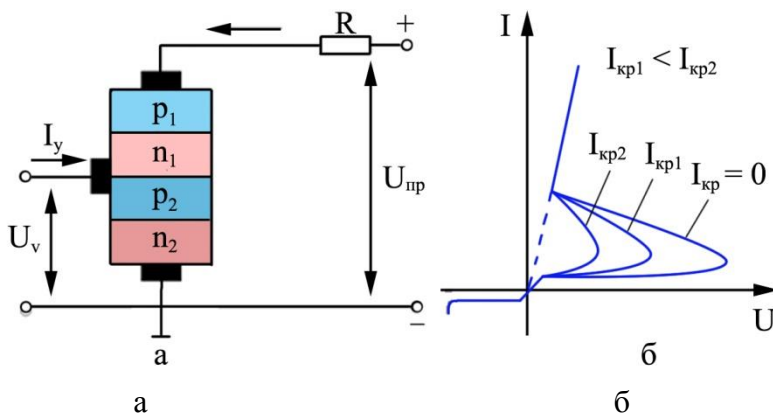


Рисунок 2.32 – Структурна схема (а) та вольт-амперна характеристика (б) триністора

керування зображена на рисунку 2.32 б.

Для зменшення напруги перемикачання на керувальний електрод подають напругу й струм керування $I_{кр}$, дозволяє тиристорі перемикатися під меншою напругою.

Симістор (тріак) – «двоспрямований триністор» (рис. 2.33). Особливістю тріаків є здатність проводити струм як від анода до катода, так і у зворотному напрямку. На відміну від триністорів тріаком можна керувати позитивним негативним струмом між закривом і Т1.

Нижче наведені робочі параметри тиристорів.

1 Напруга живлення ($U_{вв}$) – це така напруга, за якої тиристор переходить у відкритий стан.

2 Максимальна імпульсна зворотна напруга ($U_{зв. max}$) – це напруга, за якої починається електричне пробиття. Для більшості тиристорів $U_{вв} = U_{зв. max}$.

3 Максимально допустимий прямий середній за період струм (I_{max}).

4 Пряме падіння напруги на відкритому тиристорі

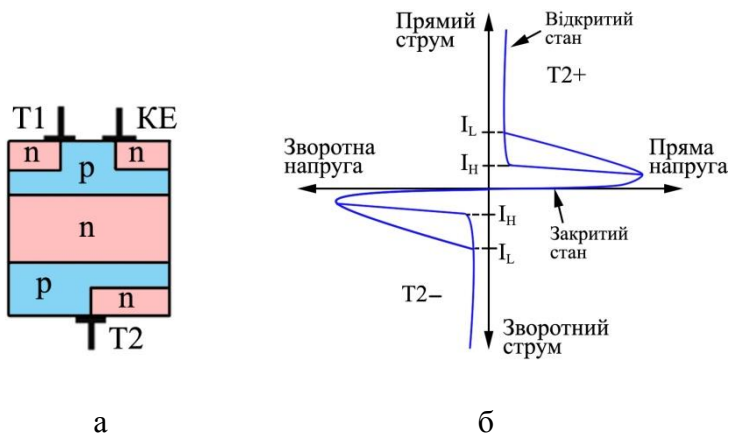


Рисунок 2.33 – Структура (а) та вольт-амперна характеристика (б) симістора

($U_{np} = 0,5-1B$).

5 Максимальний зворотний струм ($I_{зв. max}$) це струм, зумовлений рухом неосновних носіїв у результаті прикладання напруги зворотної полярності.

6 Струм утримання ($I_{утр}$) – це анодний струм, за якого тиристор закривається.

7 Час відмикання ($T_{відм}$) – це час, упродовж якого тиристор закривається.

8 Гранична швидкість наростання анодного струму ($V_{I max}$). Якщо анодний струм буде швидко наростати, то p - n -переходи навантажуватимуться струмом нерівномірно, що спричинить місцеве перегрівання і теплове пробиття.

9 Гранична швидкість наростання анодної напруги ($V_{U max}$). Якщо вона буде більшою, ніж паспортна, тиристор може мимовільно відкритися від електромагнітної перешкоди.

10 Керувальний струм відмикання ($I_{кр. min}$) – це струм, який необхідно подати, щоб тиристор відкрився без

«коліна».

11 Керувальна напруга відмикання ($U_{кр. \min}$) – це напруга, яку необхідно подати для відкриття тиристора без «коліна».

2.8 Напівпровідникові інтегральні мікросхеми (НІМС)

2.8.1 Типи конструкцій та структура НІМС

Напівпровідникові інтегральні мікросхеми мають попит завдяки їх масовому використанню в комп'ютерній техніці. Усі елементи і міжелементні з'єднання виконані всередині або на поверхні напівпровідника. НІМС виготовляють на основі планарної технології, всі елементи (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 1 000 мікросхем (рис. 2.34 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 площадки.

Корпус – частина конструкції НІМС, призначена для її захисту від зовнішнього впливу та з'єднання із зовнішніми колами за допомогою виводів. Кристал кріплять до основи корпусу (рис. 2.34 б) і, виконавши необхідні електричні з'єднання із зовнішніми виводами, герметизують.

Розрізняють чотири типи НІМС: планарно-дифузійні (однокристальні) на біполярних (БП) структурах; сумісні (з тонкоплівковими пасивними елементами); на основі структур метал – діелектрик – напівпровідник (МДН)); багатокристальні.

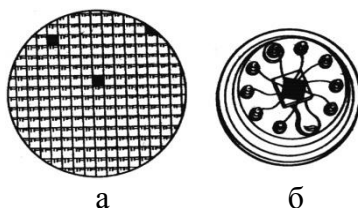


Рисунок 2.34 – НІМС: а) підкладка; б) з'єднання із зовнішніми виводами корпусу



Рисунок 2.35 – Структура й електрична схема планарно-дифузійної НІМС: 1–5 – точки підключення до електричного ланцюга

У планарно-дифузійних мікросхемах на біполярних структурах елементи є областями з різним типом електропровідності всередині монокристалічної напівпровідникової підкладки (рис. 2.35). Елементи ізолювані один від одного оборотно-зміщеним p - n -переходом або шаром діелектричного матеріалу, наприклад оксиду кремнію. Цифри ділянок структури (рис. 2.35) відповідають позначенням електричної схеми.

Сумісні мікросхеми – це сполучення НІМС із тонкоплівковими елементами на кремнієвій підкладці. Осадження тонких плівок проводять безпосередньо після всіх дифузійних операцій, за допомогою тонкоплівкової технології створюють резистори та конденсатори. Ці елементи в мікросхемі можуть бути виготовленими більш точними за номінальним значенням методами порівняно з дифузійним.

Мікросхеми на МДН-структурах виконують на основі польового транзистора з ізольованим закривом. В інтегральних мікросхемах ці транзистори використовують як активні й пасивні елементи, що забезпечує максимальну повторюваність і технологічність під час виготовлення мікросхем. Вони мають більш високий ступінь інтеграції порівняно з іншими типами напівпровідникових мікросхем.

Багатокристальні мікросхеми складаються з окремих компонентів, розміщених на загальній підкладці та з'єднаних між собою тонкоплівковими провідниками й дротовими виводами (рис. 2.36). Для герметизації загальну підкладку розміщують у корпусі. Виготовлення багатокристальних мікросхем потребує меншої кількості

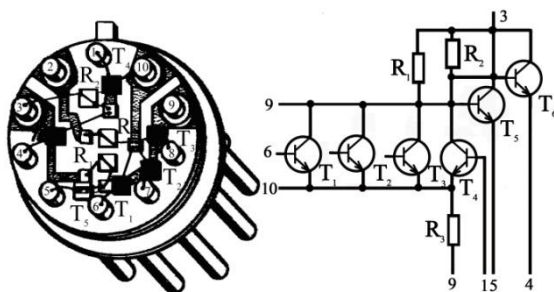


Рисунок 2.36 – Структура й електрична схема багатокристальної НІМС

технологічних операцій, тому що всі компоненти виконуються окремо. Проте ці мікросхеми в умовах масового виробництва коштують дорожче через складне автоматизування операції збирання. Багатокристалльні мікросхеми мають кращі робочі характеристики, ніж однокристалльні завдяки меншому впливу паразитних зв'язків.

2.8.2 Ізоляція елементів у НІМС

Як було зазначено вище, у напівпровідникових інтегральних мікросхемах елементи виконані всередині (у приповерхневому шарі) або на поверхні напівпровідникової підкладки – кремнієвої пластини товщиною 200–300 мкм. Площа підкладки – 1,5–6 мм². Порівняно з плівковими та гібридними НІМС мають найбільшу кількість високе число елементів в одиниці об'єму й найвищу надійність (найменшу інтенсивність відмов). Недолік НІМС – гірша якість пасивних елементів (резисторів, конденсаторів) і неможливість створення в напівпровіднику котушок індуктивності. Проте НІМС посідають провідне місце в мікроелектроніці, тому що саме на їх основі виготовляють великі й надвеликі інтегральні схеми.

Оскільки всі елементи формуються в єдиному напівпровідниковому кристалі, то важливо забезпечити їх елементів від кристала та один від одного. Застосовувані декілька способів ізоляції. Найбільш простим і дешевим із них є *ізоляція n - p -переходом*. У такому разі в кристалі, наприклад із кремнію типу p , методом дифузії роблять області типу n , названі «кишенями» (рис. 2.37). У «кишенях» потім формують необхідні пасивні й активні елементи, а n - p перехід між «кишенею» та кристалом в ІМС, що функціонує, перебуває під зворотною напругою.

Для цього на кристал постійно подаються декілька

вольтів від'ємного потенціалу. Кремнієвий n - p -перехід за зворотної напруги має дуже високий опір (декілька МОм), що відіграє роль ізоляції. Очевидно, що між будь-якими двома елементами опір ізоляції буде дорівнювати подвійному зворотному опору ізолювального n - p -переходу. Потрібно враховувати, що кожен такий перехід має бар'єрну ємність, тому між елементами виникає паразитний ємнісний зв'язок через ємності переходів.

У разі ізоляції діелектричним шаром (рис. 2.37 б) методом дифузії роблять кармани для подальшого формування в них елементів ІМС, але між «кишенею» та кристалом Si необхідний тонкий діелектричний шар SiO₂, що значно ускладнює виготовлення мікросхеми. Проте така ізоляція значно краща, ніж за допомогою n - p -переходу. Паразитна ємність між «кишенею» й кристалом істотно менша, тому що діелектричний шар у декілька разів товщий, ніж ізолювальний шар n - p -переходу.

Третій тип ізоляції – *комбінований*. У такому разі бокові сторони «кишень» ізолювані діелектричним шаром SiO₂, а низ від підкладки – n - p -переходом під зворотною напругою (рис. 2.37 в). У результаті такого методу паразитна ємність між елементами зменшується порівняно з ізоляцією n - p -переходом і досягається більша густина розміщення елементів, тому що відстані між ними значно зменшуються.

Поширена *ізоляція типу кремній на сапфірі*. На сапфіровій підкладці, що є гарним діелектриком, нарощують епітаксціальний шар кремнію (~ 1 мкм). Це можливо, тому що сапфір та кремній мають однакові кристалічні ґратки. Шар кремнію протравлюють так, що утворюються кремнієві «острівці» (рис. 2.37 г). У цих «острівцях» методом дифузії формуються необхідні

елементи, що ізолюються один від одного сапфіром, а зі сторін – повітряним шаром. Недоліком такого методу є рельєфна поверхня мікросхеми мають, що заважає виготовленню надійної системи мікроз'єднань елементів.

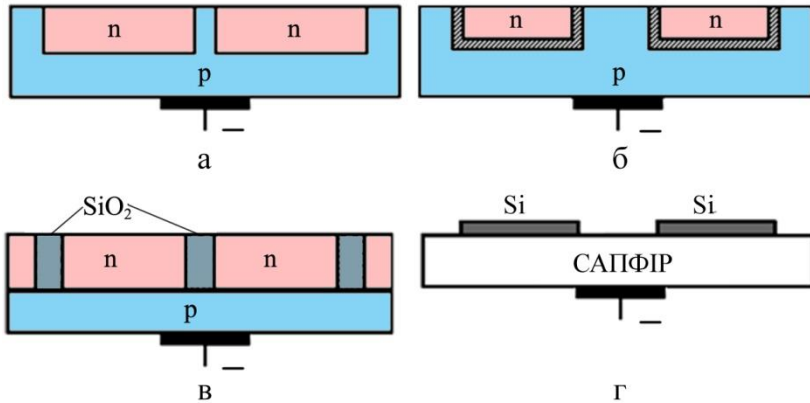
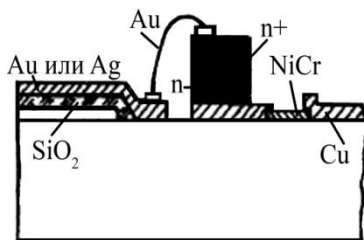


Рисунок 2.37 – Ізоляція елементів у НІМС:

а) *n-p*-переходом; б) діелектричним шаром; в) комбінована;
г) типу «кремній на сапфірі»

2.9 Плівкові й гібридні інтегральні мікросхеми

У плівкових інтегральних мікросхемах елементи є плівками різної конфігурації з різних матеріалів. Залежно від товщини використовуваних плівок та способу їх нанесення розрізняють тонкоплівкові та товстоплівкові інтегральні мікросхеми. Усі елементи плівкової ІМС і з'єднання між ними наносять у необхідній послідовності й конфігурації через трафарети на нагріту відполіровану підкладку (найчастіше керамічну). ІМС, у яких пасивні елементи (резистори, конденсатори) є плівками, а активні – напівпровідниковими приладами або кристалами мікросхем, називають **гібридними** (рис. 2.38).



а



б

Рисунок 2.38 – Структура гібридної ІМС (а), загальний вигляд товстоплівкової ІМС (б)

На сьогодні немає стабільних плівкових елементів (діодів, транзисторів) через значну складність виготовлення якісних монокристалічних напівпровідникових плівок. Наприклад, монокристалічні напівпровідникові плівки, одержані конденсацією у вакуумі, незважаючи на вжиті заходи, завжди містять небажані домішки, що призводять до нестабільності й зменшення терміну служби активних елементів.

Під час виготовлення гібридних ІМС активні елементи розміщують на платі з пасивними – тонкоплівковою або товстоплівковою ІМС. Активними елементами гібридної ІМС є дискретні напівпровідникові мініатюрні елементи (діоди й транзистори), а також діодні та транзисторні матриці. Активні елементи для гібридних ІМС використовують або безкорпусними, поверхня яких захищена за допомогою спеціальних покриттів (лаку, емалі, смоли, компаунду тощо), або в мініатюрних металевих корпусах.

Найбільш поширеною конструкцією товстоплівкової інтегральної мікросхеми є керамічна підкладка з пасивними й активними елементами з необхідною кількістю виводів, захищена зі сторони

електричної схеми металевим ковпачком і залита зі звороту ізолювальним компаундом (рис. 2.38).

Основні переваги товстоплівкових мікросхем – невеликі витрати на експлуатацію обладнання й можливість виготовлення резисторів великих номіналів. Недоліком мікросхем на товстих плівках є труднощі під час виготовлення конденсаторів великої ємності ($0,2 \text{ мкмФ/см}^2$ і більшої).

Перевагами гібридних ІМС є можливість створення широкого класу цифрових та аналогових мікросхем із коротким циклом їх розроблення; універсальність методу конструювання мікросхем, що дозволяє використовувати безкорпусні ІМС, МДН-прилади, діодні й транзисторні матриці як активні елементи; високий відсоток якісних мікросхем.

Для виготовлення та конструювання плівкових і гібридних мікросхем дуже важливі підкладки, тому що відіграють роль механічної опори, забезпечують тепловідведення та електричну ізоляцію елементів.

Підкладка – це заготівка для нанесення елементів гібридних і плівкових ІМС, міжелементних або міжкомпонентних з'єднань, а також контактних площинок.

Матеріал, геометричні розміри й стан поверхні обумовлюють якість елементів, що формують, надійність функціонування ІМС і мікрозбірок на різноманітних способах формування плівкових елементів, монтажу й складання, а також різноманітні функції, виконуваних гібридними ІМС, базуються неподібні та суперечливі вимоги до підкладок.

Матеріал підкладки повинен мати:

- високий питомий електричний опір ізоляції, низьку діелектричну проникність і 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 у малих товщинах;
- високий коефіцієнт теплопровідності для ефективного передавання теплоти від тепловиділювальних елементів та компонентів до корпусу (для ІМС) або елементам конструкції блока (для мікрозбірок);
- високу хімічну інертність до осаджених матеріалів для зменшення нестабільності параметрів плівкових елементів, зумовленої фізико-хімічними процесами на межі плівка – підкладка;
- значну фізичну й хімічну стійкість до високої температури в процесі нанесення тонких плівок, термооброблення під час формування товстих плівок і збирання ІМС;
- стійкість до хімічних реактивів упродовж електрохімічних та хімічних методів оброблення й формування плівкових елементів;
- мінімальне газовиділення у вакуумі для уникнення забруднення плівок, що наносяться;
- можливість якісного механічного оброблення (полірування поверхні, різання).

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

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

Останнім часом немає такого матеріалу для підкладок, що однаково відповідає всім вимогам. Багато

органічних матеріалів не можна використовувати як матеріал для підкладок, тому що плівкові елементи мікросхем виготовляють у вакуумі й за підвищених температур. Виняток – лавсан (полімерний матеріал). Зважаючи на зазначене, для виготовлення підкладок використовують здебільшого скло, кераміку, ситал і фотоситал.

Скло. Найкращими для підкладок є боросилікатні й алюмосилікатні сорти скла. Способом їх листового прокату одержують досить гладку поверхню без полірування. Останнє зменшує мікронерівності (менші ніж 10 нм), але воно значно дорожче, ніж листовий прокат. Крім того, в результаті полірування скляних підкладок можуть погіршитися їх поверхневі властивості. Недолік підкладок зі скла – мала теплопровідність, що не дозволяє використовувати їх у разі підвищеного нагріву. Для інтенсивного нагрівання доцільні скло «Пірекс», кварц і кварцове скло.

Кераміка. Керамічними матеріалами для підкладок тонкоплівкових та товстоплівкових мікросхем є кераміка на основі оксиду алюмінію, берилієва й кераміка «Полікор». Важлива перевага керамічних підкладок порівняно зі скляними – їх висока теплопровідність. Наприклад, кераміка на основі оксиду берилію має в 200–250 разів більшу теплопровідність, ніж скло. Проте навіть незначне додавання певних домішок (наприклад, оксиду алюмінію) різко зменшує теплопровідність кераміки. Недоліком кераміки є значна шорсткість поверхні. Мікронерівності необробленої кераміки можуть становити декілька тисяч ангстрем істотно зменшуючись у результаті полірування. Проте останнє може забруднити поверхню й змінити властивості кераміки. Значного зниження шорсткості досягають глазуруванням поверхні кераміки тонким шаром спеціального скла або оксиду

танталу, в процесі якого висока теплопровідність керамічної основи поєднується з гладкою поверхнею скляної глазурі.

Ситал. Ситал – склокерамічний матеріал, одержуваний способом термооброблення (кристалізації) скла. За своїми властивостями ситал перевершує скло, ефективно обробляється: його можна пресувати, витягувати, вальцювати й відливати центробіжним способом. Ситал витримує в повітряному середовищі різкі перепади температури від -60°C до $+700^{\circ}\text{C}$. Він має високий електричний опір, що зменшується з підвищенням температури. За електричною міцністю ситал не поступається кращим сортам вакуумної кераміки, а за механічною він удвічі – втричі міцніший за скло. Ситал хімічно стійкий до кислот, не пористий, дає незначне осідання, газонепроникний і має малу газовіддачу за високих температур.

Фотоситал. Фотоситал – склокристалічний матеріал, одержуваний способом кристалізації світлочутливого скла. Він складається з оксидів кремнію (75 %), літію (11,5 %), алюмінію (10 %) та калію (3,5 %) із невеликим додаванням азотнокислого срібла й двоокису церію. Фотоситал є стійким до кислот, має високу механічну та термічну стійкість, його теплопровідність у декілька разів більша, ніж ситалу.

2.8 Великі інтегральні мікросхеми (ВІС)

Основною тенденцією інтегральної мікроелектроніки є підвищення ступеня інтеграції мікросхем. Водночас 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 створення мікросхем. Збільшення ступеня інтеграції пов'язане зі зменшенням розмірів активних і пасивних елементів, удосконалюванням технології виготовлення та оброблення великих підкладок, використанням нових активних елементів, що мають технологічні та функціональні переваги й підвищену надійність. Збільшення кількості елементів і зростання функціональної густини обумовили створення мікросхем із високим ступенем інтеграції – великих інтегральних схем (ВІС).

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

Функціональна складність – середня кількість перетворень у мікросхемі, що припадають на одну змінну;

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=p} B_i \cdot N_{0i}}{n}, \quad (2.25)$$

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, що припадають на одиницю площі ВІС;

$$\varpi = \frac{N}{S} = \frac{10^k}{S}. \quad (2.26)$$

Функціональна густина – кількість перетворень з однією змінною, що припадають на одиницю площі ВІС;

$$\tau = \frac{F}{S}. \quad (2.27)$$

Інформаційна складність – середня кількість елементів у ВІС, що припадають на перетворення однієї змінної;

$$H = \frac{N}{F} = \frac{10^k \cdot n}{\sum_{i=p}^{i=1} B_i \cdot N_{0i}}. \quad (2.28)$$

Великі інтегральні схеми є складними мікросхемами. У їх об'ємі реалізуються блоки, вузли й радіoeлектронні пристрої загалом. Тому ВІС не мають широкої універсальності та використовувані здебільшого для конкретних типів апаратури.

Перехід до великих інтегральних схем потребує нових якісних змін у конструюванні радіoeлектронної апаратури. Виготовлення в єдиному технологічному процесі складного функціонального вузла дозволяє якнайкраще оптимізувати його параметри, завдяки розрахунку не окремих моментів, а вузла загалом. Об'єднання елементів у ВІС підвищує швидкодія вузлів, зменшує їх сприйнятливність до перешкод: скорочується затримка передавання сигналу, досягається гарний захист елементів від зовнішніх перешкод. Крім підвищення ступеня інтеграції в межах конструктивно оформленої мікросхеми, ВІС дає можливість одержувати більш високі якісні показники й велику надійність радіoeлектронних пристроїв за менших витрат.

Надійність ВІС підвищують способом зменшення кількості з'єднань у межах одного реалізованого вузла та технологічних операцій. Зниження вартості ВІС порівняно з вузлами на звичайних мікросхемах зумовлене прогресом технології, що дозволяє збільшувати ступінь інтеграції, і зменшенням обсягу монтажних робіт.

За видом оброблюваної інформації ВІС можна поділити на цифрові й аналогові. Перші використовують у пристроях оброблення інформації, до яких належать напівпровідникові запам'ятовувальні 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 використання в розробках апаратури розрізняють ВІС загального й спеціального призначення. Прикладами цифрових ВІС загального призначення є різні напівпровідникові запам'ятовувальні пристрої, регістри, дешифратори, підсистеми та спеціальні обчислювачі. Аналогові ВІС загального призначення – це підсистеми взаємного перетворення напруги на 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 належать підсилювальні тракти радіоприймальних і радіопередавальних пристроїв на фіксовані частоти, формувачі частот із послідовності, обумовленої частотами генераторів, що задають, чи зовнішньою тактовою частотою, інші підсистеми.

Найбільш поширені ВІС в обчислювальних системах із продуктивністю декілька мільйонів операцій у секунду, в яких використовують переважно

напівпровідникові й гібридні ВІС. Розвиток ВІС відбувається в напрямку збільшення ступеня, їх інтеграції та створення надвеликих інтегральних мікросхем (НВІС). Кількість функціональних елементів у них може становити кілька і навіть десятки тисяч. Багатокристалні НВІС можуть поєднувати в одному корпусі кілька кристалів ВІС та дискретних безкорпусних активних елементів, що утворюють, наприклад, усю електронну частину обчислювальної машини. Під час розроблення таких мікросхем виконують завдання не лише схемо-, а й системотехніки.

РОЗДІЛ 3

ФУНКЦІОНАЛЬНА МІКРОЕЛЕКТРОНІКА

Функціональна мікроелектроніка – це галузь електроніки, що дозволяє реалізовувати певні функції апаратури без використання стандартних базових елементів на основі фізичних явищ у твердих тілах. У такому разі локальному об'єму твердого тіла надаються властивості, потрібні для виконання конкретної функції. Функціональні мікросхеми виготовляють на основі не лише напівпровідників, а й таких матеріалів, як надпровідники, сегнетоелектрики, фотоматеріали та ін. Для перероблення інформації можна використовувати явища, не пов'язані з електропровідністю (наприклад, оптичні й магнітні явища в діелектриках, поширення ультразвуку тощо).

3.1 Оптиелектронні прилади

Оптиелектроніка – це галузь електроніки, присвячена теорії та практиці створення приладів і пристроїв, що базуються на перетворенні електричних сигналів на оптичні й навпаки.

В оптиелектроніці використовується діапазон довжин хвиль 0,2 мкм – 0,2 мм. Оптиелектронний прилад – це сукупність джерела та приймача випромінювання. Відмінністю та особливістю оптиелектронних приладів (ОЕП) від інших є те, що елементи в них оптично пов'язані, але електрично ізольовані один від одного. Завдяки цьому легко забезпечується узгодженість високої й низьковольтних і високочастотних ланцюгів.

Оптиелектроніка розвивається за двома незалежними напрямками – оптичним та електронно-оптичним. Перший базується на ефектах взаємодії

твердого тіла з електромагнітним випромінюванням (голографії, фотохімії, електрооптиці); другий – на принципі фотоелектричного перетворення з внутрішнім фотоефектом з одного боку, та фотолюмінесценцією – з іншого (заміні гальванічного й магнітного зв'язків оптичним, волоконних лініях зв'язку).

Для виготовлення активних і пасивних елементів оптичних мікросхем використовують напівпровідникові й плівкові матеріали, резистивні та провідні метали й сплави, діелектричні з'єднання, фоторезисти, дифузанти. На сьогодні номенклатура матеріалів оптоелектроніки досить широка. До них належать речовини високої чистоти, чисті метали та сплави зі спеціальними електрофізичними властивостями, дифузанти, різноманітні напівпровідникові з'єднання (порошки й монокристали), монокристалічні пластини з кремнію, арсеніду та фосфіду галію, фосфіду індію, сапфір, гранат, різні допоміжні матеріали: технологічні гази, фоторезисти, абразивні порошки та ін.

ОЕП мають такі переваги: можливість просторової модуляції світлових пучків і їх значного перетинання без 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 ґрунтується на використанні електромагнітного випромінювання оптичного діапазону. До основних груп оптоелектронних приладів належать такі:

- джерела випромінювання: світловипромінювальні діоди й лазери;

- приймачі випромінювання: фоторезистори, фотодіоди, фототранзистори, фототиристори, фотоприймачі з *p-n*-переходом;

- прилади, що керують оптичними сигналами:

модулятори, дефлектори, підсилювачі світла та ін.;

- прилади для відображення інформації: індикатори, цифрові табло, системи картинної логіки;
- прилади для оптичної ізоляції: оптрони;
- волоконно-оптичні лінії зв'язку;
- оптичні запам'ятовувальні пристрої.

Зазначені вище групи приладів генерують, перетворюють, передають і зберігають інформацію. Носіями останньої в оптоелектроніці є електрично нейтральні частинки – фотони, нечуттєві до впливу електричних та електромагнітних полів, які не взаємодіють між собою й створюють односпрямоване передавання сигналу, що забезпечує високу перешкодозахищеність і гальванічну розв'язку вхідних та вихідних ланцюгів. Оптоелектронні прилади функціонують у видимій, інфрачервоній та ультрафіолетовій частинах спектра.

До основних робочих характеристик оптоелектронних приладів належать:

1) вольт-амперна ($I = f(U)$) – залежність світлового, темного або фотоструму (при $\Phi = \text{const}$) від прикладеної напруги (рис. 3.2);

2) світлова або люкс-амперна ($I = f(E)$) – залежність фотоструму від світлового потоку, що падає, або освітленості (при $U = \text{const}$);

3) спектральна ($I = f(\lambda)$) – залежність фотоструму від довжини хвилі світлового потоку (при $U = \text{const}$);

4) частотна ($I_\Phi = f(F_\Phi)$) – залежність фотоструму від частоти модуляції світлового потоку (при $U = \text{const}$).

3.1.1 Фоторезистори та фотодіоди

Фоторезистори – це напівпровідникові резистори, що змінюють свій опір у результаті впливу світлового потоку (рис. 3.1). Залежно від спектральної чутливості

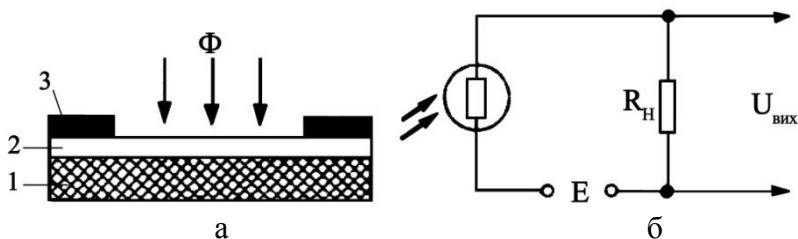


Рисунок 3.1 – Принцип будови (а) та схема ввімкнення (б) фоторезистора

фоторезистори поділяють на дві групи: для видимої частини спектра та для інфрачервоної частини спектра.

Для фоторезисторів використовують з'єднання Cd і Pb. Чутливі елементи виготовляють із моно- або полікристалів цих з'єднань.

Фоторезистори мають високу стабільність параметрів. Зміна фотоструму є достатньо точною характеристикою його стану. Під час довгої експлуатації спостерігається стабілізація фотоструму, водночас його величина може змінюватися на 20–30 %. Фоторезистори є чутливими до швидкої зміни температур. Зберігати їх варто за температури 5–35 °C та вологості, не більшої за 80 %.

До основних параметрів фоторезисторів належать:

1) темновий струм (I_T) – струм, що проходить через фоторезистор за робочої напруги через 30 с після зняття освітленості 200 лк;

2) світловий струм (I_c) – струм, що проходить через фоторезистор за робочої напруги й освітленості 200 лк від джерела світла з кольоровою температурою 2 850 К;

3) температурний коефіцієнт фотоструму (ТК I_Φ) – зміна фотоструму зі зміною температури фоторезистора на 1 °C;

4) робоча напруга (U_Φ) – напруга, яку можна

прикласти до фоторезистора в разі тривалої експлуатації без зміни його параметрів на більші за встановлені;

5) темновий опір (R_t) – опір фоторезистора за температури 20 °С через 30 с після зняття освітленості 200 лк;

6) питома чутливість (K_0) – відношення фотоструму до добутку величин світлового потоку, що падає на нього, та прикладеної напруги: $K_0 = I_\phi / (\Phi \cdot U_\phi)$, де Φ – світловий потік, лм;

7) постійна часу (τ) – час, упродовж якого фотострум змінюється в e разів у результаті його освітлення;

8) потужність розсіювання ($P_{роз}$) – максимально дозволена потужність, що фоторезистор може розсіювати за безперервного електричного навантаження й температури довкілля не змінюючи параметрів на більші за норму, встановлену технічними умовами;

9) опір ізоляції (R_i).

10) довгохвильова межа (λ).

Вольт-амперна характеристика фоторезистора ФСК-2 наведена на рисунку 3.2.

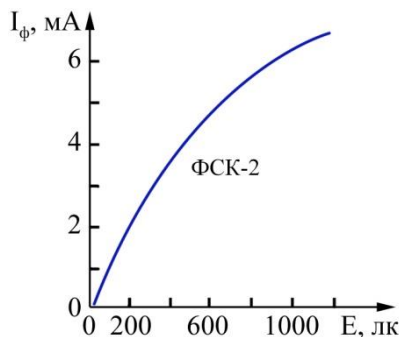


Рисунок 3.2 – Вольт-амперна характеристика фоторезистора ФСК-2

Висока інтегральна чутливість дозволяє іноді використовувати резистори без підсилювачів, а малі габарити – причинами попиту на них.

Основні недоліки фоторезисторів – їх інерційність і значний вплив температури, що призводить до великого розкиду характеристик.

Фотодіоди – це напівпровідникові діоди, в яких використовується внутрішній фотоефект. Світловий потік керує зворотним струмом фотодіодів. У результаті дії світла на електронно-дірковий перехід генеруються пари носіїв заряду, провідність діода зростає й збільшується зворотний струм. Такий режим функціонування називається фотодіодним (фотоперетворювальним) режимом. Другий режим – вентильний (фотогенераторний). На відміну від останнього для фотодіодного режиму необхідним є зовнішнє джерело живлення. Схема ввімкнення фотодіода для функціонування у фотодіодному режимі зображена на рисунку 3.3.

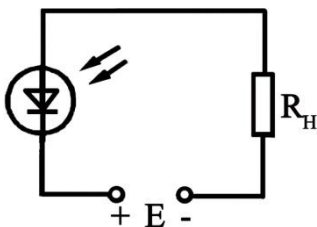


Рисунок 3.3 – Схема ввімкнення фотодіода для функціонування у фотодіодному режимі

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

Основні характеристики фотодіодів:

1) вольт-амперна ($I = f(U)$) – залежність світлового, темнового або фотоструму (при $\Phi = \text{const}$) від прикладеної напруги (рис. 3.4 а);

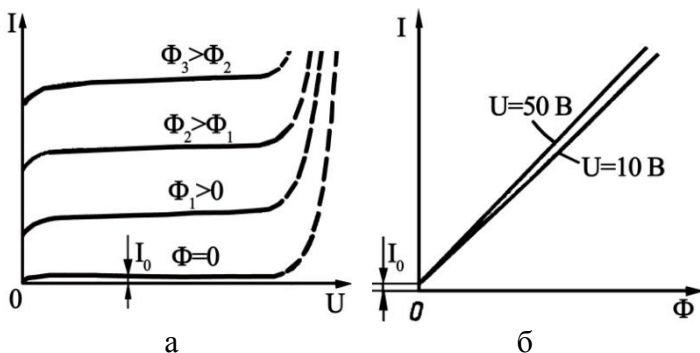


Рисунок 3.4 – Вольт-амперні характеристики для фотодіодного режиму (а) та енергетичні характеристики фотодіода (б)

2) енергетична ($I_\Phi = f(\Phi)$) – залежність фотоструму від світлового потоку (при $U = \text{const}$) – лінійна, на неї мало впливає напруга (рис. 3.4 б).

У лавинних фотодіодах лавинно розмножуються носії в n - p -переході, у результаті чого в десятки разів зростає чутливість. Фотодіоди з бар'єром Шотткі мають високу швидкодію. Фотодіоди з гетеропереходами функціонують як генератори ЕРС.

Германієві фотодіоди використовують як індикатори інфрачервоного випромінювання; кремнієві – для перетворення світлової енергії на електричну (сонячні батареї для автономного живлення різноманітної апаратури в космосі); селенові – для виготовлення фотоекспонетрів і світло-технічних вимірювань, тому що їх спектральна характеристика є близькою до спектральної характеристики ока людини.

3.1.2 Фототранзистори й фототиристри

Фототранзистори – це напівпровідникові прилади

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

Напруга живлення подається на емітер і колектор, його колекторний перехід є закритим, а емітерний – відкритим. База залишається вільною (рис. 3.5). Упродовж освітлення фототранзистора в його базі генеруються електрони й дірки. У колекторному переході розподіляються електронно-діркові, що досягли способом 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 й підсилення інжекції дірок з емітера в базу. Інжектвані в базу дірки, досягаючи колекторного

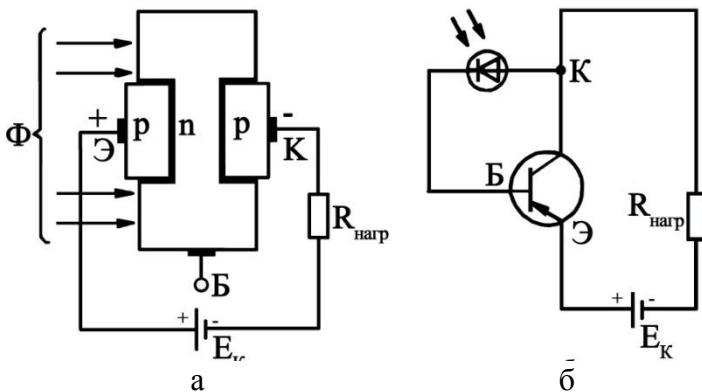


Рисунок 3.5 – Структурна схема біполярного фототранзистора з вільною базою (а) та схема його ввімкнення (б)

переходу, додатково збільшують струм колектора. Навіть невелика зміна прямої напруги емітера значно змінює струм колектора, тобто фототранзистор є підсилювачем.

Струм колектора освітленого фототранзистора досить великий; відношення світлового струму до темного сягає декількох сотень. Застосовують два варіанти ввімкнення фототранзисторів: діодне з використанням лише двох виводів (емітера і колектора) і транзисторне – з використанням трьох виводів, за якого на вхід подають не лише світловий, а й електричний сигнал.

В оптоелектроніці, автоматиці та телемеханіці фототранзистори служать для тих самих цілей, що й фотодіоди, але поступаються останнім за порогом чутливості та температурним діапазоном. Чутливість фототранзисторів зростає з інтенсивністю їх освітлення.

Фототиристор – це напівпровідниковий прилад із чотиришаровою p - n - p - n -структурою, що поєднує в собі властивості тиристора й фотоприймача та перетворює світлову енергію на електричну.

У разі відсутності світлового сигналу й керувального струму фототиристор закритий і через нього проходить лише темновий струм. Прилад відкривається світловим потоком, що надходить на бази p_2 та n_1 через «вікно» в його корпусі (рис. 3.6), і створює електронно-діркові пари. Це приводить до виникнення первинних фотострумів та утворення загального фотоструму. Згідно з цим у результаті надходження світлового потоку на бази p_2 і n_1 зростає емітерний струм, а коефіцієнт передавання струму α від емітера до колектора є функцією освітленості, що змінює струм p - n -переходів. Опір фототиристорів змінюється в межах від 0,1 Ом (у відкритому стані) до 10^8 Ом (у закритому); час перемикання становить 10^{-5} – 10^{-6} с.

Зі світлової характеристики $I_{np} = f(\Phi)$ при

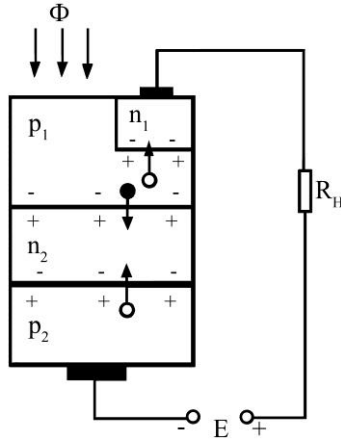


Рисунок 3.6 – Структура фототристора

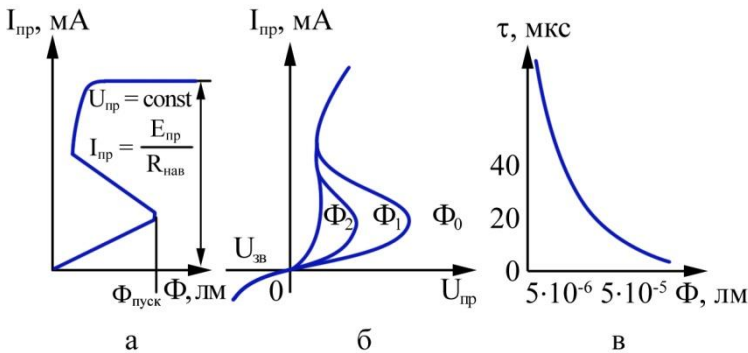


Рисунок 3.7 – Характеристики фототристора: а) світлова; б) вольт-амперна; в) залежність часу від світлового потоку

$U_{пр} = \text{const}$ (рис. 3.7 а) можна зробити висновок, що після ввімкнення фототристора струм через нього зростає до $I_{пр} = E_{пр}/R_{нав}$ і більше не змінюється, тобто має два стабільних стани й може бути використаним як елемент пам'яті. Вольт-амперна характеристика $I_{пр} = f(U_{пр})$ при

$\Phi = \text{const}$ ($\Phi_2 > \Phi_1 > \Phi_0$) свідчить про те, що зі збільшенням світлового потоку напруга та час увімкнення зменшуються.

Перевагами фототиристорів є висока навантажувальна здатність за малої потужності керувального сигналу; можливість одержувати необхідний вихідний сигнал без додаткових каскадів підсилення; наявність пам'яті, тобто підтримка відкритого стану після зняття керувального сигналу; велика чутливість; висока швидкодія.

Вищезазначені властивості фототиристорів дозволяють спростити схеми, усунувши з них підсилювачі і релейні елементи, що є дуже важливим у промисловій електроніці, наприклад високовольтних перетворювачах. Найчастіше фототиристори використовують для комутації світловим сигналом потужних електричних.

3.1.3 Оптирони

Оптрон — напівпровідниковий прилад, у якому конструктивно об'єднані джерело та приймач випромінювання, пов'язані між собою оптичним зв'язком. У джерелі випромінювання електричні сигнали перетворюються на світлові, що діють на фотоприймач і створюють у ньому знову електричні. Якщо оптрон має лише один випромінювач та один приймач випромінювання, його називають *оптопарою*, або елементарним оптроном (рис. 3.8).

Принцип функціонування оптронів базується на подвійному перетворенні енергії. У випромінювачі енергія електричного сигналу перетворюється на світлову, а у фотоприймачі оптичний сигнал змінює струм, напругу або опір. Призначення окремих елементів оптрона й види перетворення енергії наведені на узагальненій структурній

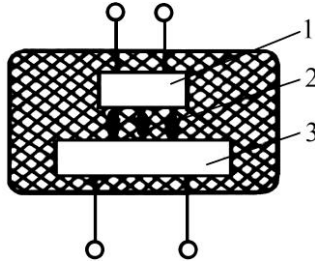


Рисунок 3.8 – Принцип будови оптопари:
1 – випромінювач; 2 – оптичний прозорий клей;
3 – фотоприймач

схемі оптрона (рис. 3.9). Вхідний пристрій забезпечує узгодження джерела випромінювання з попередніми електронними елементами за струмом і напругою та оптимізацію його режиму функціонування. Джерело випромінювання перетворює електричний сигнал на світловий, тому до нього поставлені високі вимоги за ККД, швидкодією, спрямованістю випромінювання й постійністю електричних та оптичних параметрів.

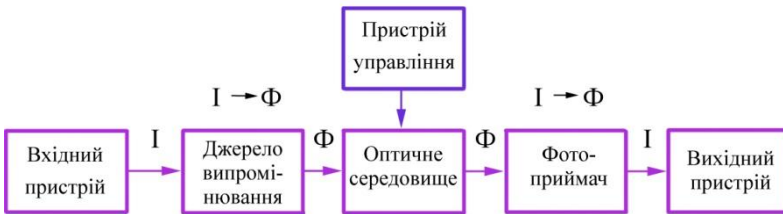


Рисунок 3.9 – Узагальнена структурна схема оптрона

Оптичне середовище сполучає випромінювач і фотоприймач, забезпечуючи механічну цілісність конструкції. Для максимально повного передавання енергії оптичний канал повинен мати високе пропускання без

спотворення форми сигналу й мінімальне розсіювання випромінювання в сторони, а також захищати елементи оптрона від зовнішніх світлових впливів. Значно розширити функціональні можливості оптронів дозволяє використання керованого оптичного каналу. Дія пристрою управління змінює параметри оптичного середовища або чутливість фотоприймача.

Оптрони з відкритим оптичним каналом, у яких джерело та приймач випромінювання пов'язані через повітряний зазор, незамінні для зчитування інформації з перфослів, що пересуваються в цьому зазорі. Використовуючи як оптичне середовище електрооптичні або магнітооптичні матеріали, можна керувати параметрами оптронів за допомогою електричного чи магнітного поля. Якщо властивості оптичного каналу змінюються в результаті зовнішніх механічних впливів, такі прилади матимуть попит як різноманітні давачі положення, пересування, вібрації, прискорення, рівня й виду рідини.

Електрооптичні матеріали – це органічні або неорганічні діелектрики, в яких виникає електрооптичний ефект, тобто показник заломлення таких матеріалів залежить від прикладеної напруги. Водночас здебільшого зазначені лінійні або квадратичні (електрооптичні ефекти також поділяються на лінійні та квадратичні) .

Лінійний електрооптичний ефект (ефект Поккельса) спостерігається лише у твердих кристалах без центра симетрії: сегнетоелектриках, наприклад в ніобіті й танталаті літію, кристалічних солях група дигідрофосфату калію KN_2PO_4 , і перовскитів (титанаті барію BaTiO_3 та твердих розчинах на його основі).

Квадратичний електрооптичний ефект (ефект Керра) характерний для кристалів із центром симетрії, а

для ізотропних рідин, наприклад нітробензолу й сірковуглецю.

Магнітооптичні матеріали – це матеріали, які здатні обертати площину поляризації світла, якщо пройшло через зразок або відбилосся від нього, використовувані для керування світловими потоками.

Вимоги до оптичних матеріалів оптронів: високі коефіцієнт заломлення n і питомий опір ρ ; ефективна адгезія з кристалами Si та GaAs; еластичність; механічна міцність.

Основний матеріал – полімерні оптичні клеї, що мають такі характеристики: $n = 1,4\text{--}1,6$; $\rho = 10^{14}\text{--}10^{16} \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $\Delta T = -60\text{--}(+120)^\circ\text{C}$. Прозорі – ферит-гранати $(\text{YBi})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, ферити – шпінелі: MeFe_2O_4 , де Me – Ni^{2+} , Co^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Mg^{2+} , Li^+ , Cu^{2+} .

Для ефективного функціонування оптрона всі його елементи повинні бути узгодженими за спектральними, електричними та експлуатаційними характеристиками.

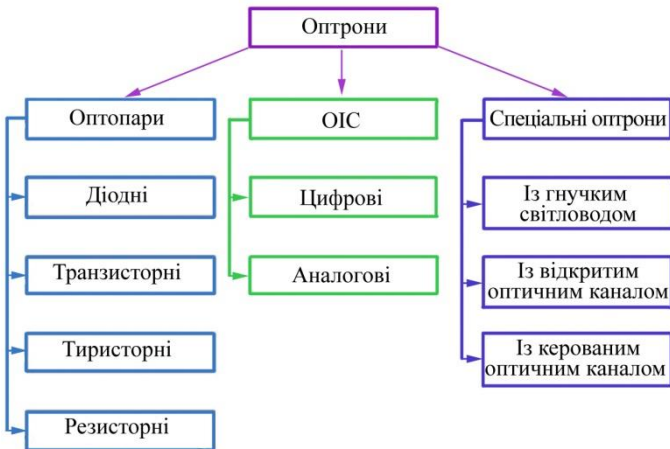


Рисунок 3.11 – Загальна класифікація оптронів

За ступенем складності й типом оптичного каналу виділяють три групи оптронів: оптопари, оптоелектронні інтегральні мікросхеми, спеціальні оптрони (рис. 3.11).

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

На сьогодні промисловість виготовляє різні типи оптопар (резисторну, діодну, транзисторну, тиристорну, зі складеним транзистором і діодно-транзисторну), схеми яких зображені на рисунку 3.12.

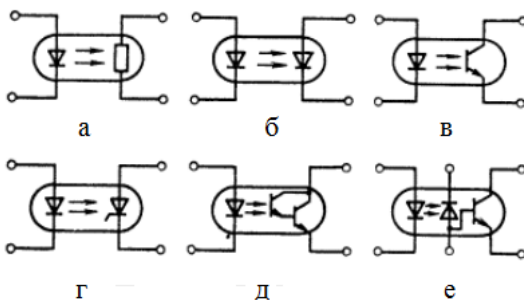


Рисунок 3.12 – Схеми оптопар: а) резисторної; б) діодної; в) транзисторної; г) тиристорної; д) із складеним транзистором; е) діодно-транзисторної

Як елементу електричного кола оптопарі властиві чотири групи параметрів, або характеристик:

1) входні (номінальний струм $I_{\text{вх. ном}}$, напруга $U_{\text{вх}}$, ємність $C_{\text{вх}}$);

2) вихідні (максимально дозволені 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) передатні (коефіцієнт передавання за струмом $K_1 = I_{\text{вих}}/I_{\text{вх}}$, час зростання вихідного струму $t_{\text{зр}}$, затримки

$t_{\text{зат}}$, швидкодія оптрона t);

4) параметри, що характеризують ізоляцію (максимально дозволена напруга між входом та виходом $U_{\text{із}}$, опір ізоляції $R_{\text{із}}$ і прохідна ємність $C_{\text{пр}}$).

Згідно з результатами аналізу параметрів основних типів оптопар найбільш швидкодійними є діодні оптрони, а діодно-транзисторні забезпечують найбільшу напругу й опір ізоляції; оптопари зі складеним транзистором характеризуються максимальним коефіцієнтом передавання за струмом, але значно поступаються діодним за швидкістю; транзисторні посідають проміжне місце між діодно-транзисторними оптопарами та зі складеним транзистором; тиристорні незамінні для комутації сильнострумних силових кіл; резисторні є дуже інерційними, тому доцільні лише для комутації слабострумних кіл у пристроях із низькою швидкістю.

Оптоелектронна інтегральна мікросхема (ОІМС) складається з однієї або кількох оптопар та електрично з'єднаних із ними одного чи кількох узгоджувальних або підсилювальних пристроїв. Залежно від галузі використання ОІМС поділяють на цифрові, розроблені для високошвидкісного передавання цифрової інформації по електрично ізольованих колах, і аналогові, призначені для оброблення неперервних сигналів.

Спеціальні оптрони відрізняються від інших приладів будовою оптичного каналу. В оптронах із гнучким світловодом випромінювання передається оптичним кабелем, в результаті чого джерело й фотоприймач стають віддаленими один від одного на значну відстань. Оптрони з відкритим і керованим оптичним каналом використовують як основу для побудови різноманітних давачів та схем, що перемикаються, наприклад оптоелектронних безконтактних кнопок.

Оптопари поділяють на чотири групи: резисторні (фоторезистор – світлодіод); тиристорні (фото тиристор – світлодіод); транзисторні (фото транзистор – світлодіод); діодні (фотодіод – світлодіод).

Елементну основу оптронів становлять джерела й приймачі випромінювання та оптичне середовище між ними.

До джерел випромінювання поставлені такі вимоги: спектральне узгодження з вибраним фотоприймачем; висока ефективність перетворення енергії електричного струму на енергію випромінювання; переважна спрямованість випромінювання; висока швидкодія; простота та зручність збудження й модуляції випромінювання.

Вимоги до приймачів випромінювання: малі габарити та маса; довгий термін експлуатації й надійність; стійкість до механічних і кліматичних впливів; технологічність; низька вартість.

Резисторні оптопари. Джерелом випромінювання в резисторній оптопарі є світлодіод, надмініатюрна лампа розжарювання або електролюмінесцентний конденсатор, приймачем – фоторезистор із селеніду кадмію (CdSe) для видимого випромінювання чи із селеніду або сульфіді свинця (PbSe, PbS) для інфрачервоного. Резисторна оптопара може функціонувати як за постійного, так і за змінного струму в разі узгодженості джерела випромінювання й фоторезистора за спектральними характеристиками.

Конструкція резисторної оптопари наведена на рисунку 3.13. Як джерело світла в ній використаний світлодіод 1, як фотоприймач – фоторезистор 3 у формі спресованої таблетки. Для зменшення ємнісного зв'язку між джерелом світла та фотоприймачем розміщений прозорий електростатичний екран 4. Внутрішня частина оптрона

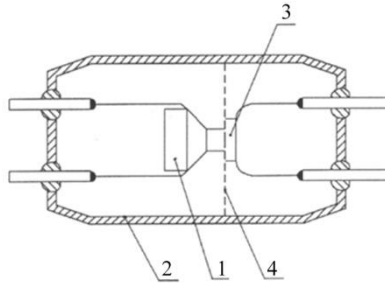


Рисунок 3.13 – Будова резисторного оптрона:
1 – світлодіод; 2 – металевий корпус; 3 – фоторезистор;
4 – електростатичний екран

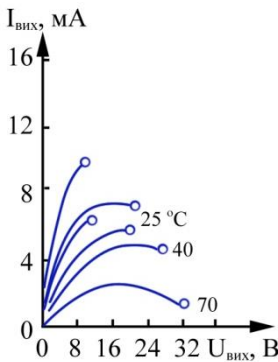


Рисунок 3.14 – Вихідна вольт-амперна характеристика діодної оптопари

заливається оргсклом або епоксидною смолою, що захищають прилад від впливу зовнішнього середовища й відіграють роль світловода. Герметичний металевий корпус 2 зовні нагадує корпус простого транзистора. Проте оптичне середовище в оптроні може створюватися не лише з прозорого компаунду на основі полімерів. Для одержання високої розв'язки виходу та входу використовують волоконні світловоди – нитки з прозорого діелектрика. Світловий промінь від джерела випромінювання потрапляє на торець світловоду й після багаторазового відбиття від

стінок виходить з іншого кінця світловоду, зазнавши малого згасання. За допомогою волоконного світловоду можливе передавання сигналу керування на великі відстані з високою електричною розв'язкою та перешкодостійкістю. Температурна залежність вихідної вольт-амперної характеристики діодної оптики зображена на рисунку 3.14.

Основні параметри й характеристики оптичних пристроїв:

1) максимальний струм ($I_{\text{м. вх}} = 10\text{--}16\text{ мА}$, $I_{\text{м. вих}} = 0,2\text{--}7\text{ мА}$) та напруга ($U_{\text{м. вх}} = 2,5\text{--}6\text{ В}$, $U_{\text{м. вих}} = 20\text{--}250\text{ В}$) на вході й виході;

2) вихідний опір під час нормального функціонування ($R_{\text{вих}} = 200\text{ Ом} \text{--} 10\text{ кОм}$);

3) темновий вихідний опір $R_{\text{Т}} = 10^6\text{--}10^7\text{ Ом}$ (темновий струм за відсутності вхідного струму);

4) час вимкнення ($\sim 100\text{--}200\text{ мс}$);

5) фотоЕРС (до $0,8\text{ В}$);

6) коефіцієнт передавання струму – відношення вихідного струму до вхідного ($k = 0,1\text{--}1\text{ \%}$).

Резисторні оптичні пристрої використовують: для автоматичного регулювання підсилення, керування безконтактними розділювачами напруги, формування та модуляції різноманітних сигналів, слабкопотужних схем комутації в складних пристроях візуального відображення інформації, виконаних на електролюмінесцентних індикаторах, мнемосхемах. Промисловість також випускає резисторні оптичні пристрої призначені для комутації сигналу, що містять декілька фоторезисторів.

Діодні оптичні пристрої. У діодних оптичних пристроях фотоприймальним елементом є фотодіод на основі кремнію, а випромінювачем – інфрачервоний випромінювальний діод. У результаті опромінення фотодіода світлом у ньому генеруються пари носіїв зарядів

– електронів і дірок. Інтенсивність генерації пропорційна силі світла й вхідному струму відповідно. Вільні електрони та дірки розділяються електричним полем переходу фотодіода, заряджаючи *p*-область позитивно, а *n*-область – негативно. На вихідних виводах оптопари з’являється фотоЕРС (генераторний режим). Якщо до фотодіода оптопари прикладена зворотна напруга, більша ніж 0,5 В, електрони й дірки, генеровані випромінюванням, збільшують зворотний струм фотодіода (фотодіод ний режим функціонування). Значення зворотного фотоструму майже лінійно зростає зі збільшенням сили світла випромінювального діода. Структура діодної оптопари наведена на рисунку 3.15.

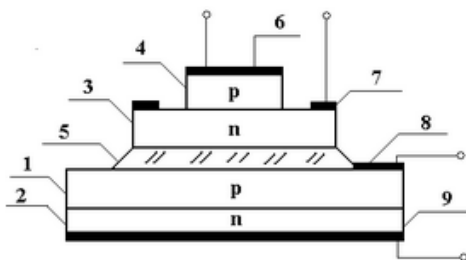


Рисунок 3.15 – Структура діодної оптопари: 1, 2 – *p*- і *n*-області фотодіода; 3, 4 – *n*- та *p*-області СД; 5 – світловод на основі селенового скла; 6, 7 – контакти СД; 8, 9 – контакти фотодіода

Основні робочі параметри діодних оптопар: статистичний коефіцієнт передавання струму K_I – відношення різниці вихідного та вихідного темнового струмів до вхідного, виражене у відсотках ($K_I = I_{\text{вих}}/I_{\text{вх}} = 1\text{--}2,5\%$); фотоЕРС (0,7–0,8 В); вхідна зворотна напруга (0,5 В).

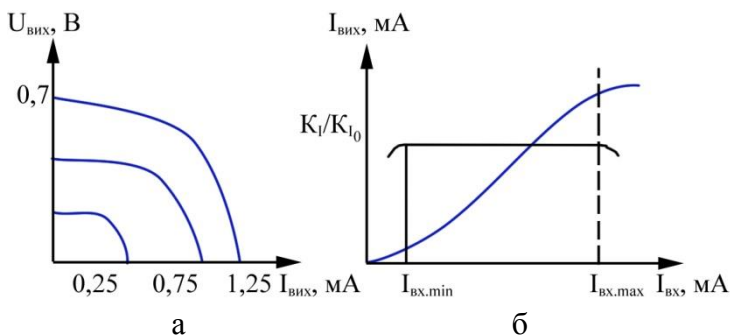


Рисунок 3.16 – Характеристики діодної оптопари:
а) вольт-амперна; б) передатна

Робочі характеристики діодної оптопари репрезентовані на рисунку 3.16. У разі використання діодних оптопар в електронних схемах потрібно враховувати ряд їх властивостей: максимальну швидкодію фотоприймачів на p - і n -структурах; низькі темнові струми у вихідному ланцюзі; високий опір гальванічної розв'язки. Діодні оптопари мають попит як оптоелектронні імпульсні трансформатори, елементи узгодження периферійних ліній із центральним процесором ЕОМ, а також низьковольтного блоку з високовольтним; у схемах захисту від перевантаження.

Транзисторні оптопари. Транзисторну оптопару виготовляють із фотоприймальним елементом на основі фототранзистора. Здебільшого в оптопарах використовують фототранзистори зі структурою n - p - n на основі кремнію, чутливі до випромінювання з довжиною хвилі близько 1 мкм. Випромінювачами зазвичай служать звичайно арсенідогалієві чи діоди на потрібному з'єднанні, максимум спектрального випромінювання яких знаходиться поблизу області найбільшої чутливості фототранзистора.

Специфічними для транзисторних оптопар є такі параметри: вихідна залишкова напруга $U_{\text{зал}}$ – напруга на вихідних виводах оптопари в разі відкритого фототранзистора (0,4–1,5 В); час увімкнення (1–50 мкс), час вимкнення (1–100 мкс).

Вольт-амперна характеристика й температурна залежність коефіцієнта передавання від струму транзисторної оптопари зображені на рисунку 3.17. Передатна характеристика за струмом відхиляється від лінійної залежності, при чому тим істотніше, чим вищі підсилювальні властивості самого транзистора та більший вхідний струм. За великих вхідних струмів (крива 2) зазначена залежність аналогічна залежності для діодної оптопари, а за малих (крива 1) значно відрізняється. Характер розглянутих залежностей пояснюється видом залежності випромінювальної здатності випромінювача й коефіцієнта передавання фототранзистора від температури та струму.

Транзисторні оптопари поширені в аналогових і ключових комутаторах сигналів, схемах узгодження сенсорних електронних систем із вимірювальними блоками, гальванічної розв'язки в лініях зв'язку, оптоелектронних реле, для комутації великих струмів.

Тиристорні оптопари. У тиристорних оптопарах як приймальний елемент використовують кремнієвий фототиристор.

Специфічними для тиристорних оптопар є такі параметри: вихідна залишкова напруга $U_{\text{зал}}$ – напруга на вихідних виводах оптопари в разі відкритого фототранзистора (1,4–1,8 В); час увімкнення (10 мкс) та час вимкнення (35 мкс).

За відсутності вхідного сигналу, що відповідає неопромінену стану базової n -області, через фототиристор протікає невеликий струм витоку (темновий

струм), що значно залежить від температури. У разі її підвищення на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ він приблизно подвоюється.

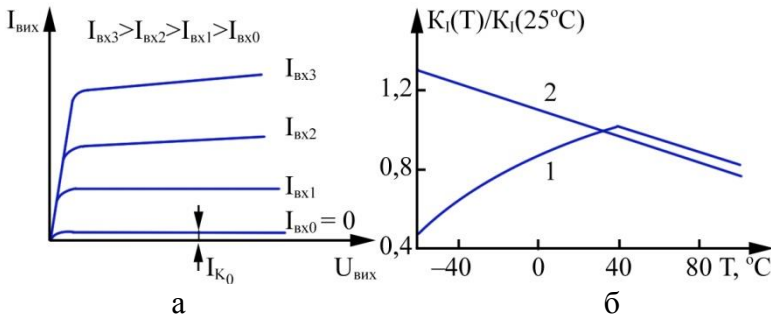


Рисунок 3.17 – Вихідні характеристики (а) та температурна залежність коефіцієнта передавання від струму (б) транзисторної оптопари

На рисунку 3.18 зображене сімейство вихідних вольт-амперних характеристик тиристорної оптопари. Параметром сімейства є вхідний струм через випромінювальний діод. За певного значення вхідного струму характеристика «випростовується», що відповідає ввімкненому стану фототиристора. Час увімкнення оптопари залежить від вхідного струму.

Переваги оптронів:

- можливість забезпечення ідеальної електричної (гальванічної) розв'язки між входом і виходом. Для цих приладів немає будь-яких принципових фізичних або конструктивних обмежень на досягненню високих напруг та опорів розв'язки, прохідну ємність;

- можливість реалізації безконтактного оптичного управління електронними об'єктами й зумовлені цим різноманітність і гнучкість конструкторських рішень керувальних ланцюгів;

- односпрямованість поширення інформації по

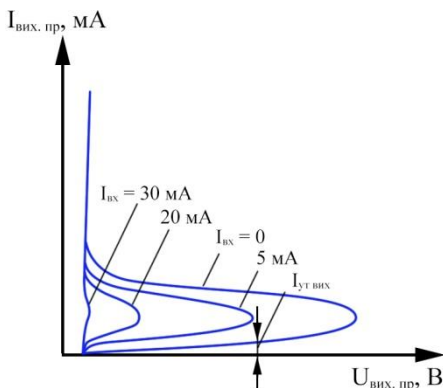


Рисунок 3.18 –
Вихідні вольт-амперні
характеристики
тиристорної оптопари

оптичному каналу, відсутність зворотної реакції приймача на випромінювач;

- широка частотна смуга пропускання оптрона, відсутність обмеження на низькі частоти (що властиво імпульсним трансформаторам);

- можливість передавання по ланцюгу, як імпульсного сигналу, так і постійної складової;

- можливість керування вихідним сигналом оптрона способом впливу (зокрема, неелектричного) на матеріал оптичного каналу, а отже, створення різноманітних давачів приладів для передавання інформації;

- можливість створення функціональних мікроелектронних пристроїв із фотоприймача, характеристики яких при висвітленні змінюються за складним заданим законом;

- несприйнятливість оптичних каналів зв'язку до впливу електромагнітних полів, що в «довгих» оптронах (із протяжним волоконно-оптичним світловодом між випромінювачем та приймачем) захищає їх від перешкод і витоку інформації, а також унеможливорює взаємні наведення;

- фізична й конструктивно-технологічна сумісність

з іншими напівпровідниковими та мікроелектронними приладами.

Недоліки оптронів:

- значна споживана потужність, обумовлена необхідністю подвійного перетворення енергії (електрика – світло – електрика) і невисокими ККД цих переходів;

- істотна чутливість параметрів та характеристик до впливу підвищеної температури й проникаючої ядерної радіації;

- більше або менше помітна тимчасова деградація (погіршення) параметрів;

- порівняно високий рівень власних шумів, обумовлений, як і два попередніх недоліки, із фізичними особливостями світлодіодів;

- складність реалізації зворотних зв'язків, спричинена електричною роз'єднаністю вхідних та вихідних ланцюгів;

- конструктивно-технологічна недосконалість унаслідок застосування гібридної непланарної технології (необхідності поєднання в одному приладі декількох окремих кристалів із різних напівпровідників, розміщених у різних площинах).

Оптрони використовують у схемах зв'язку блоків апаратури, між якими є значна різниця потенціалів; для захисту вхідних ланцюгів вимірювальних пристроїв від перешкод і наведень; для оптичного безконтактного керування потужнострумовими й високовольтними ланцюгами; у схемах запуску потужних тиристорів та управління електро механічними релейними пристроями; для конструювання «довгих» оптронів (приладів із протяжним гнучким волоконно-оптичним світловодом); у схемах модуляції, автоматичного регулювання й підсилення сигналів.

На основі оптронів виготовляють оптронні давачі: вологості та газові, чистоти оброблення поверхні предмета, швидкості його переміщення й т. д.

Досить специфічним є використання таких приладів в енергетичних цілях, тобто функціонування діодного оптрона в фотовентильному режимі. В останньому фотодіод генерує електричну потужність у навантаження, а оптрон певною мірою подібний до малопотужного вторинного джерела живлення.

Універсальність оптронів є причиною того, що їх галузями використання стали комп'ютерна й вимірювальна техніка, автоматика, зв'язкова та радіотехнічна апаратура, автоматизовані системи управління, медична електроніка, пристрої візуального відображення інформації.

3.1.4 Світловипромінювальні діоди

Світловипромінювальний діод (світлодіод) – напівпровідниковий пристрій, що випромінює некогерентне світло з пропусканням через нього електричного струму (ефект, відомий як електролюмінесценція).

Випромінюване світло традиційних світлодіодів лежить у вузькій ділянці спектра, а його колір залежить від хімічного складу напівпровідника. Світлодіоди – це малоінерційні джерела випромінювання, що функціонують під прямою напругою.

Матеріали для світлодіодів повинні мати ширину забороненої зони, більшу за 1,7 еВ. Германій і кремній непридатні для цього, тому що ширина забороненої зони в них значно менша. Для сучасних світлодіодів використовують здебільшого арсенід галію GaAs, фосфід галію GaP та карбід кремнію SiC. Унесення в напівпровідник домішок дозволяє одержувати світіння

різних кольорів. Використовують також світлодіоди змінного кольору з двома випромінювальними переходами, один із яких має максимум спектральної характеристики в червоній частині спектра, а другий – у зеленій. Колір світіння такого світлодіода залежить від співвідношення струмів через переходи.

Основні параметри світлодіодів є: яскравість – відношення сили світла до площини поверхні, що світиться ($10\text{--}1\,000$ Кд на см^2); постійна пряма напруга ($2\text{--}3$ В); колір світіння й довжина хвилі, які відповідають максимальному світловому потоку; максимальний постійний прямий струм ($1\text{--}10$ мА); діапазон температур довкілля, за яких світлодіод може нормально функціонувати ($-60\text{--}(+70)$ °С); швидкодія (10^{-8} с).

Сучасні світлодіоди можуть випромінювати на довжині хвилі від інфрачервоної до близького ультрафіолету. Водночас розроблені методи поширення смуги випромінювання й конструювання білих світлодіодів.

Світловипромінювальні діоди є основою більш складних приладів:

- *лінійної світлодіодної шкали* – інтегральної мікросхеми із від 5 до 100 світлодіодних структур (сегментів), розміщених послідовно, використовуюваної для відображення інформації, що постійно змінюється;

- *цифро-літерного світлодіодного індикатора* – інтегральної мікросхеми з декількох діодних структур, розміщених так, щоб за відповідної комбінації сегментів одержувалося зображення літери або цифри;

- *багатоелементного блоку* – електронної системи одержання складних зображень (до її складу входять до 10^4 світлодіодів).

3.1.5 Волоконно-оптичні лінії зв'язку

Волоконна оптика – це галузь оптоелектроніки, що вивчає фізичні явища в оптичних волокнах і прилади й системи компонентами на основі оптичних волокон.

Оптоволокно (оптичне волокно) – це скляна або пластикова нитка, використовувана для перенесення світла всередині себе завдяки повному внутрішньому віддзеркаленню.

Конструктивно ОВ складається з трьох частин (рис. 3.19): *центральної* – осердя з показником заломлення n_1 ; *оболонки* з показником заломлення n_2 ($n_2 < n_1$); *захисного покриття*.

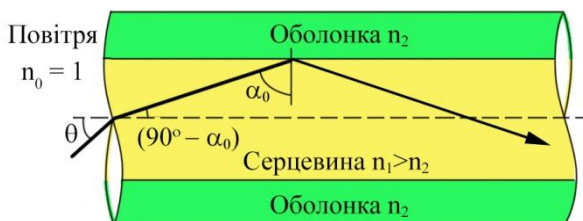


Рисунок 3.19 – Конструкція оптоволокна та хід у ньому світлових променів

Показник заломлення осердя може бути постійним або змінюватися його розподіл уздовж діаметра поперечного перетину ОВ називають профілем показника заломлення.

Залежно від закону, за яким змінюється показник заломлення осердя n_1 , ОВ поділяють на:

- ОВ зі *ступінчастими профілями* показників заломлення: постійним показником заломлення в осерді

$n_1 = \text{const}$ і різким зменшенням показника заломлення на межі осердя та оболонки ($n_2 \ll n_1$);

– ОВ із *градієнтними профілями* показників заломлення, у яких профіль показника заломлення постійно змінюється в осерді (як функція відстані від осі) $n_1 = f(d)$.

Ядро та оптичну оболонку можуть виготовляти з одного матеріалу (наприклад, чистого кварцового скла). Показник заломлення змінюють підбором спеціальних домішок для введення у чистий розплав кварцу (рис. 3.20).

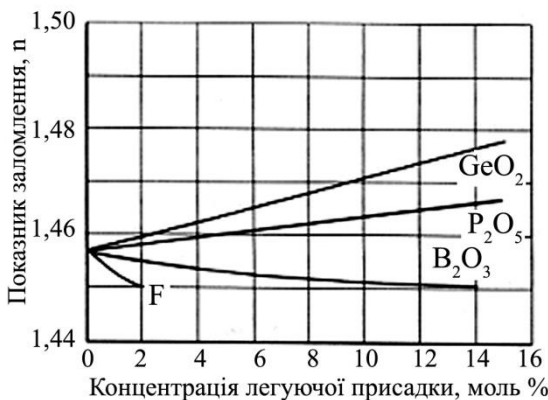


Рисунок 3.19 – Показники заломлення кварцового скла з різними легувальними домішками

Навколо оптичної оболонки для запобігання впливу зовнішніх факторів на властивості оптоволокна (вологи, подряпин, мікротріщин) наносяться захисні шари полімеру (наприклад, акрилату). У реальних ОВ показник заломлення n_1 становить $\sim 1,48$, а $n_2 - \sim 1,46$.

Виокремлюють *декілька типів оптичних волокон* із різними властивостями, що відрізняються один від одного залежністю коефіцієнта заломлення від радіуса

центрального волокна: одномодові оптоволокна; багатомодові оптоволокна; оптоволокна з градієнтним показником заломлення; оптоволокна зі ступінчастим профілем розподілу показників заломлення. На рисунку 3.21 схематично зображене багатомодове оптоволокно.

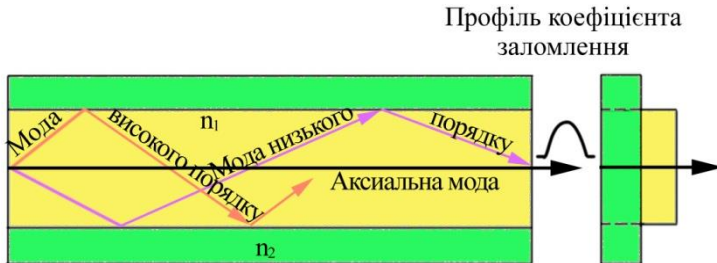


Рисунок 3.21 – Багатомодове оптоволокно

Мода – це одна з можливих траєкторій, за якою може розповсюджуватися світло у волокні. Чим більше мод, тим істотніше дисперсійне спотворення форми сигналу.

Якщо розглянути одномодове волокно, то в ньому смуга пропускання перебуває в діапазоні 50–100 ГГц · км. У цьому методі волокно сприймає меншу частину світла на його вході, проте спотворення сигналу й втрати амплітуди мінімальні.

Обладнання для роботи з одномодовим волокном значно дорожче. Діаметр центральної частини одномодового волокна становить 3–10 мкм. Саме кількість мод у волокні визначає його інформаційну ємність.

До розпливання імпульсів і їх наїзду один на одного призводить модова дисперсія. Вона залежить від довжини хвилі світла та діаметра центральної частини волокна. Для мультимодового волокна кількість мод N :

$$N = \frac{2\pi^2 d^2 A^2}{\lambda^2},$$

де d – діаметр центральної частини (ядра);
 A – чисельна апертура волокна; λ – довжина хвилі.

Волокно з діаметром центральної частини волокна 50 мкм підтримує 1 000 мод.

Чим більша довжина хвилі, тим менші кількість мод і спотворення сигналу. Різні довжини хвиль розповсюджуються по волокну з різною швидкістю навіть для однієї й тієї самої моди.

На відміну від багатомодового волокна в одномодовому випромінювання наявне не лише всередині ядра.

До основних переваг оптичних волокон можна належать такі:

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

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. 3.22). Сигнал передається по ОВ завдяки віддзеркаленню світлової хвилі від межі осердя та оболонки, що мають різні показники заломлення n_1 і n_2 .

На сьогодні для проектування й фізичної реалізації ВОЛЗ використовують багатожильні кабелі. Світло ($\lambda \cong 1\,350\text{--}1\,500\text{ нм}$) уводиться в ОВ діаметром $D < 100\text{ мкм}$ за допомогою світловипромінювального діода або напівпровідникового лазера.

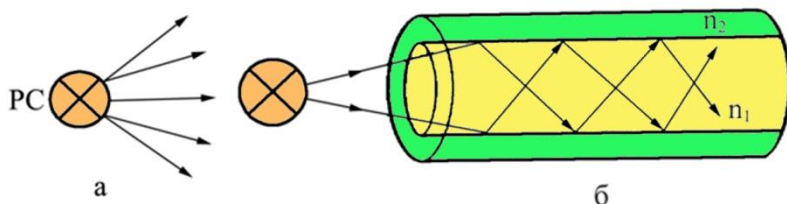


Рисунок 3.22 – Процес передавання сигналів:
а) радіозв'язок; б) волоконно-оптичний зв'язок

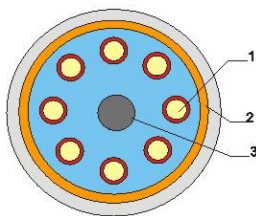


Рисунок 3.23 – Перетин восьмижильного оптичного кабелю: 1 – оптичне волокно; 2 – сталева оплатка; 3 – сталевий трос

Кабель може містити багато волокон, наприклад 8, як на рисунку 3.23. У центрі кабелю поміщається сталевий трос, використовуваний для прокладання кабелю. Із зовнішньої сторони кабель захищений від пацюків сталеву оплаткою та герметизований еластичним полімерним покриттям. Додатково для прикладу можна навести рисунок поперечного перерізу підводного оптичного кабелю (рис. 3.24).

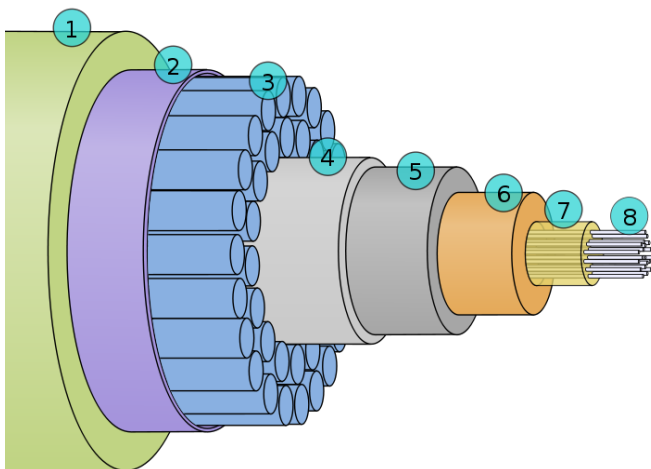


Рисунок 3.24 – Поперечний переріз підводного оптоволоконного кабелю: 1 – поліетилен; 2 – стрічка «мілара»; 3 – переплетені металеві (сталеві) проводи; 4 – алюмінієвий водний бар'єр; 5 – полікарбонат; 6 – мідна або алюмінієва труба

Джгут, сплетений із тисяч оптичних волокон, називається *світловодом*. Його діаметр – до декількох десятків міліметрів.

З'єднувачі для оптичних волокон мають конструкцію, зображену на рисунку 3.25. Їх виготовляють із кераміки. Втрата світла в з'єднувачі може становити 10–20 %, але якщо з'єднувати оптичні волокна методом зварювання, вона не перевищуватиме 1–2 %. Крім з'єднувачів і зварювання, широковикористовується також техніка механічного зрощення волокон із втратами близько 10 %.

Використовуючи ОВ, можна побудувати фрагмент мережі, еквівалентний за характером зв'язків кабельному сегменту або хабу. Схема такого фрагмента мережі

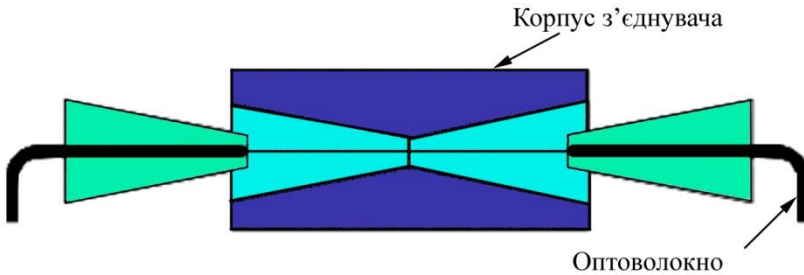


Рисунок 3.25 – Схема оптичного рознімача

зображена на рисунку 3.26. Базовим елементом цієї субмережі є прозорий циліндр, на один із торців якого підмикаються вихідні волокна всіх передавачів інтерфейсів пристроїв, що становлять субмережу. Сигнал з іншого торця через волокна надходить на вхід фотоприймачів інтерфейсів.

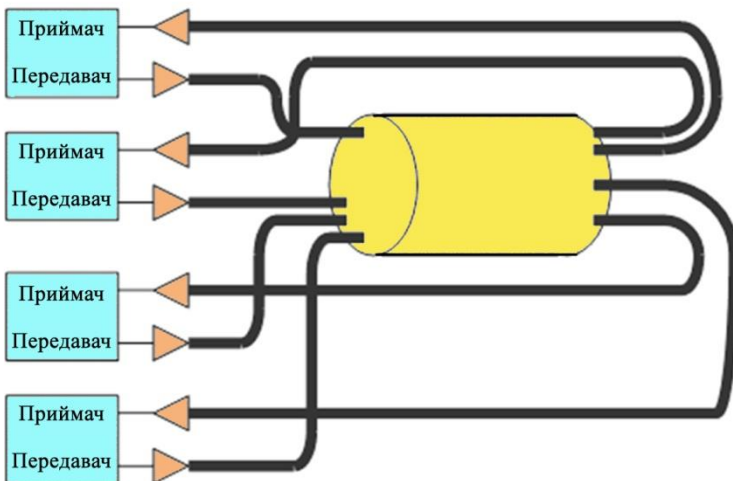


Рисунок 3.26 – Схема пасивного оптоволоконного хаба

Хімічне парофазове осадження (MCVD) є найпоширенішим методом виробництва заготовок оптоволоконних кабелів. MCVD винайдений та описаний у 1974 році американським фізиком Джоном Макчеснеєм на базі лабораторій «Бела» (AT & T Bell Labs).

Метод MCVD. Цей один із найбільш перевірених способів виготовлення заготовок. Сам процес досить простий для опанування. Саме цей метод поширений для проведення різних експериментів і досліджень. У разі його застосування можлива зміна цілого ряду параметрів, наприклад виду волокна (одномодове чи багатомодове), його остаточного діаметра числової апертури й профілю показника заломлення. Ці параметри змінюються в результаті регулювання (за допомогою комп'ютера) витрати пари двоокису кремнію та різних домішок. Завдяки цьому можна виготовляти оптичне волокно відповідно до певних технічних умов.

Метод MCVD (Modified Chemical Vapour Deposition) у перекладі означає «модифіковане хімічне парофазове осадження». Він передбачає (рис. 3.27) осадження дуже чистого діоксиду кремнію (для виготовлення осердя завжди додають певні домішки) на внутрішній стороні скляної трубки, а потім – усадження трубки в результаті підвищення температури (за допомогою полум'я, газу або струмів надвисокої частоти). Насамкінець трубка стискається й перетворюється на суцільний скляний стрижень діаметром 30–40 мм і завдовжки близько 1 000 мм.

Отже, такий скляний стрижень одержує остаточний профіль, що матиме готове волокно. Потрібний час залежно від розміру заготівки становить від чотирьох до восьми годин, упродовж яких осаджується скло, що стане оболонкою волокна, а також скло, яке перетвориться на світлопровідне осердя

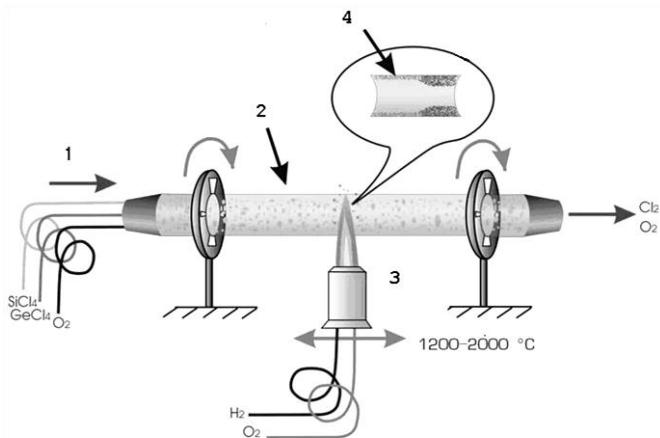


Рисунок 3.27 – Виготовлення волокна методом MCVD:

- 1 – подавання газів; 2 – опорна трубка із синтетичного кварцу; 3 – киснево-водневий пальник;
4 – маса майбутнього осердя

Для одномодових і багатомодових волокон процес осадження однаковий. Як домішку до осердя волокна найчастіше використовують германій, що сприяє збільшенню показника заломлення. Оксид фосфору необхідний для зниження температури процесу до потрібної.

Спочатку трубка з надчистого високоякісного діоксиду кремнію або синтетичного кварцу SiO_2 промивається в кислотній ванні, а потім затискається в пристрої, що нагадує токарний верстат. У ньому трубка може обертатися навколо своєї центральної осі. Киснево-водневий газовий пальник рухається вздовж трубки назад і вперед, значно й рівномірно нагріваючи її.

Вхідний кінець трубки через газонепроникну сполучну муфту приєднаний до комплексного пристрою подавання газів. Надзвичайно важливо, щоб цей пристрій

був абсолютно герметичним. Це потрібно, щоб запобігти потраплянню всередину забруднюючих речовин і забезпечити точне дозування газів.

Із резервуарів надходять хімічні реактиви SiCl_4 та GeCl_4 , що способом нагрівання переводяться з рідкої фази в газоподібну й подаються в трубку разом із киснем. Під час процесу точно контролюється кількість хімічних речовин, що надходять у трубку.

Домішки та SiCl_4 окиснюються в зоні нагрівання безпосередньо над пальником за температури 1 000–1 400 К. Утворений дрібний порошок – це оксиди кремнію і германію SiO_2 й 2GeO . Вони несуться потоком газу вздовж трубки, потім відбувається їх осадження, а пари хлору випаровуються. Коли тепло від пальника досягає порошку, то він плавиться й перетворюється на суцільний прозорий шар двоокису кремнію (з домішками або без них).

Коли пальник доходить до кінця трубки, вона змінює напрям і пальник швидко рухається вздовж трубки у зворотному напрямку до початкової точки, щоб забезпечити осадження нового шару порошку. Під час осадження (осердя та оболонки) вводиться неоднакова кількість різних домішок. Способом послідовного осадження одного шару діоксиду кремнію за іншим і ретельного дозування домішок можна одержати оптичне волокно з різними профілями показника заломлення. Водночас потрібно запобігати потраплянню в систему забруднюючих речовин.

Основною перевагою процесу MCVD є те, що структуру й властивості світловоду можна задати ще в заготівці, а потім зберегти в готовому волокні. Порівняні розміри та профіль показника заломлення заготівки передаються готовому волокну в процесі витягування.

Метод зовнішнього парофазового осадження

OVD. Альтернативним способом виготовлення оптичного волокна традиційно вважають метод зовнішнього парофазового осадження (Outside Vapour Deposition – OVD). Його винахідниками, як і оптичного волокна, є група вчених компанії «Corning»: Роберт Маурер, Дональд Кек та Петер Шульц. Хімічні аспекти цього методу здебільшого подібні до попереднього. OVD значно складніший за MCVD. Але загальна кількість волокна виготовленого першим методом на сьогодні більша, ніж другим. Це пояснюється тим, що в разі масового виготовлення OVD значно ефективніший, ніж MCVD. Виділяють три етапи процесу виготовлення методом OVD: 1 – осадження; 2 – спікання; 3 – витягування волокна.

Метод осьового парофазового осадження VAD розроблено в Японії компанією «Corning» для того щоб не втратити патенту на OVD і налагодити безперервне виготовлення заготовок для оптичного волокна. VAD винайшла група японських вчених корпорації «NTT» на чолі з Татсуо Ізаоєм, який у 2001 році за це відкриття був нагороджений премією імені Тіндала.

Метод VAD аналогічний OVD: осадження є не внутрішнім, а зовнішнім процесом, у результаті якого утворюється пориста заготовка, що потім зневоднюється й спікається. Під час застосування VAD кварцовий порошок осаджується в осьовому, а не в радіальному напрямі, що ускладнює модифікацію профілю показника заломлення, але полегшує виготовлення більш довгих заготовок. Заготовка повільно протягується доверху, водночас проходячи через обладнання. Сировину SiCl_4 , GeCl_4 або POCl_3 як і в разі застосування OVD, уводять за допомогою киснево-водневого газового пальника. Дуже малі частинки скломаси, утворені в результаті реакції гідролізу в полум'ї, осаджуються на торцевій поверхні вже осадженої заготовки, використовуваної як підкладка для подальшого

нарощування. Пориста заготівка рухається в осьовому напрямку, нарощуючи масу впродовж руху. Вона зневоднюється й перетворюється на прозорий твердий стрижень.

3.2 Магнітоелектронні компоненти

Магнітоелектроніка – галузь електроніки, присвячена теорії на практиці створення пристроїв, що ґрунтуються на явищах електромагнетизму й магнітної індукції, таких як намагнічування, перемагнічування, розмагнічування осердь імпульсним або безперервним струмом, виникнення ЕРС у провіднику, який рухається в результаті дії магнітного поля. Магнітоелектроніка пов'язана з появою нових магнітних матеріалів, що мають малу намагніченість насичення, та з розробленням технологічних методів виготовлення тонких магнітних плівок. На перемагнічування тонкоплівкового елемента, товщина якого не перевищує товщини одного домену, потрібна енергія, в 10–20 разів менша, і час, у 10–30 разів менший, ніж на перемагнічування феритового осердя.

Найбільш цікавими є тонкоплівкові металеві магнітні матеріали в мікроелектронних запам'ятовувальних пристроях (ЗП), у яких як елементи пам'яті використовують магнітні плівки. На тонких плівках можуть бути виконані не лише елементи пам'яті ЕОМ, а й логічні мікросхеми та магнітні підсилювачі. Досить широкі перспективи розроблення функціональних приладів відкривають нові матеріали – магнітні напівпровідники. До них належать магнетики неметалевої природи електропровідності з'єднання магнітних і немагнітних елементів (халькогеніди європію, халькогенідні шпінелі хрому, сильнолеговані ферити, германіди феромагнітних металів).

Розрізнять декілька груп сучасних магнітних елементів: магніторезистори, магніодіоди, магніотранзистори, магніотиристори, перетворювачі Холла.

Магніторезистори – це напівпровідникові резистори, в яких електричний опір залежить від магнітного поля, що впливає на резистор. Зміну електричного опору в результаті дії поперечного магнітного поля називають магніторезистивним ефектом.

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

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

Магніодіоди – це напівпровідникові діоди з p - n -переходом, у яких вольт-амперна характеристика змінюється в результаті дії магнітного поля. Конструктивно магніодіод є p - n -переходом із невиспостовувальним омічним контактом, між якими знаходиться область високоомного напівпровідника (рис. 3.28 а). Відмінність від лише тільки в тому, що магніодіод виготовляється з базою, довжина якої d у декілька разів більша, ніж довжина дифузійного зміщення носіїв L (кілька мм), тоді як у звичайних діодах $d < L$. Напруга падає не на p - n -переході, як у звичайному напівпровідниковому діоді, а на високоомній базі.

Зі збільшенням індукції поперечного магнітного поля й відхиленням траєкторії носіїв заряду до поверхні напівпровідника опір бази значно збільшується. Зростає загальний опір діода, зменшується прямий струм, спостерігається *магніодіодний ефект*. Вольт-амперні

характеристики магнітодіодів свідчать про те, що з підвищенням магнітної індукції прямий струм зменшується (рис. 3.28 б). Великий опір бази приводить до того, що магнітодіоди мають значно більшу пряму напругу, ніж звичайні.

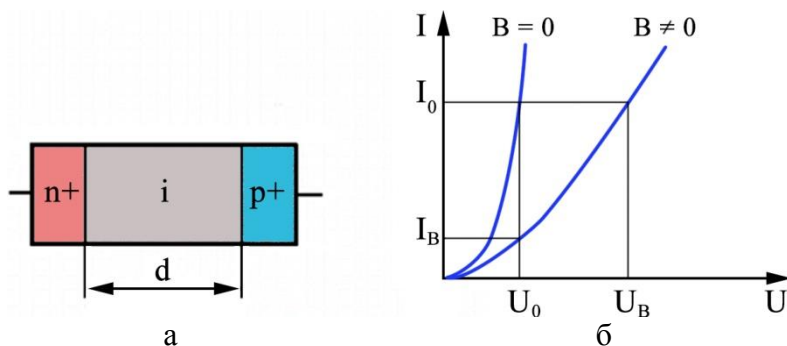


Рисунок 3.28 – Конструкція (а) і вольт-амперна характеристика (б) магнітодіода

Основним параметром магнітодіода є його магнітна чутливість – відношення змінної напруги U до магнітної індукції й струму живлення I :

$$\gamma = \frac{U}{IB}. \quad (3.1)$$

Розрізняють два типи магнітної чутливості; зокрема, вольтову γ_U – зміну напруги на магнітодіоді зі зміною магнітного поля на 1 мТл і за постійного значення струму через магнітодіод, розраховувану за формулою

$$\gamma_U = \left(\frac{\Delta U}{\Delta B} \right)_{I=const}. \quad (3.2)$$

Струмова магніточутливість γ_I обумовлена зміною струму через магніодіод зі зміною магнітного поля на 1 мТл та за постійної напруги:

$$\gamma_I = \left(\frac{\Delta I}{\Delta B} \right)_{U=\text{const}}. \quad (3.3)$$

Магніодіоди широко використовувані в безконтактних кнопках і клавішах для введення інформації; як давачі визначення положення предметів, що рухаються; для зчитування магнітного запису інформації; вимірювання й контролювання неелектричних величин. На основі магніодіодів конструюють безконтактні реле струму та маніодіодні підсилювачі з коефіцієнтом підсилення кілька сотень для струмів до 10 А. Схема на магніодіодах також може замінювати колектор в електродвигуні постійного струму.

Магнітотранзистори – це транзистори, в яких вихідний струм визначають за магнітним потоком, що проходить через них, а інші характеристики й параметри змінюються в результаті впливу магнітного поля. Цікавою особливістю таких транзисторів є те, що їх вихідний струм чутливий і до світлового потоку. Отже, є можливість подвійного безконтактного керування вихідним сигналом – магнітним потоком і світлом, що значно розширює функції магнітотранзистора.

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

1 *Одноперехідні магнітотранзистори* – транзистори, що функціонують на основі модуляції опору бази носіїв заряду, які інjektуються з емітера й мають S-подібну вхідну характеристику (рис. 3.29). Форма кривої 1

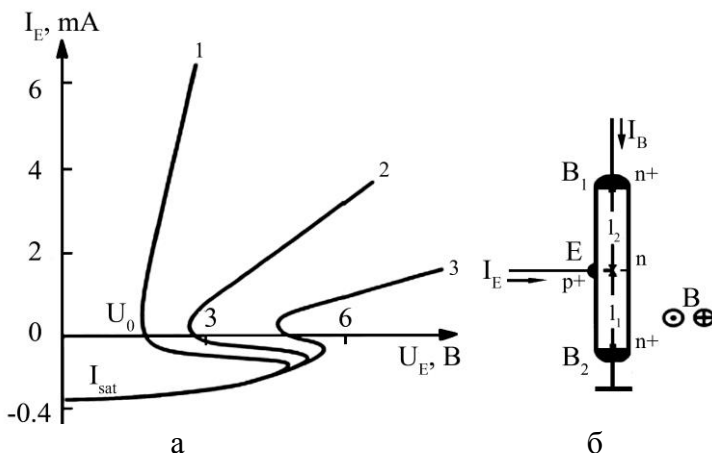


Рисунок 3.29 – Вхідна характеристика ОПТ:
1 – $B = 0$; 2 – $B = 0,3$ Тл; 3 – $B = 0,6$ Тл

свідчить про те, що чим довший час життя інжекттованих носіїв у базі, тим глибше вони проникають у неї та тим менше значення залишкової напруги U_0 . Якщо транзистор помістити в магнітне поле, на інжекттовані носії починає діяти сила Лоренца, що відхиляє їх до стінок бази або навпаки (залежно від напрямку магнітного поля). Оскільки швидкість рекомбінації носіїв біля стінок бази значно більша, ніж у її об'ємі, це призведе до зміни часу життя інжекттованих носіїв і відповідно U_0 .

Магнітна чутливість для ОПТ γ становить близько $2 \cdot 10^3$ В/АТл.

Залежність U_0 від індукції магнітного поля B застосовують для створення датчиків магнітного поля, що функціонують на постійному струмі, а також виготовлення на основі цих датчиків генераторів із частотним виходом. Такі генератори дозволяють значно спростувати з'єднання датчиків з ЕОМ і мікромініатюризувати вимірювальні пристрої.

2 *Одноколекторні магніотранзистори* – вертикальні біполярні транзистори (області емітера, бази й колектора розміщені одна за одною в напрямку від поверхні в глибину напівпровідника), в яких у результаті дії магнітного поля викривлюється траєкторія носіїв заряду емітера, що приводить до збільшення ефективної довжини бази та відхилення частини носіїв від колектора (рис. 3.30). Збільшення γ таких транзисторів відбувається завдяки зменшенню ширини колектора. Реальні розміри колектора й емітера однакові – $0,6 \times 0,6 \text{ мм}^2$, а відстань між ними l становить $0,8 \text{ мм}$. Найбільшої магніточутливості досягають увімкненням ОКТ як двополюсника (ланцюг емітер – колектор) за вимкненої бази. У такому разі під струмом $I_{e-k} = 0,6 \text{ мА}$ магніточутливість $\gamma = 2 \cdot 10^4 \text{ В/АТл}$.

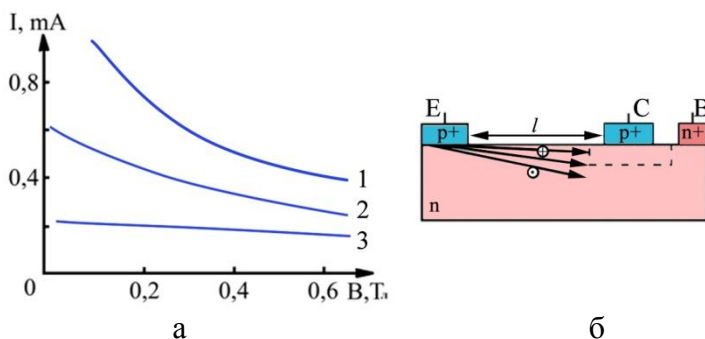


Рисунок 3.30 – Вхідна характеристика (а)
та схематичне зображення руху носіїв заряду (б)
в одноколекторному магніотранзисторі: 1 – 25 В; 2 – 20 В;
3 – 15 В

3 *Двоколекторні магніотранзистори* – біполярні транзистори, в яких колектори K_1 і K_2 розміщені симетрично щодо емітера. За відсутності магнітного поля струм емітера поділяють на дві однакові частини, що

потрапляють на колектори (рис. 3.31). Траєкторії електронів для такого варіанта зображені суцільними лініями. Оскільки потенціали колекторів однакові, топадіння напруги між колекторами $\Delta U = 0$ і відповідно вихідна напруга $U = 0$. Якщо на транзистор почне діяти поперечне магнітне поле (вектор магнітної індукції B якого буде спрямованим перпендикулярно до площини креслення), то в результаті впливу сили Лоренца електрони колекторного струму відхилятимуть. Їх траєкторії зображені штрихованими лініями (рис. 3.31).

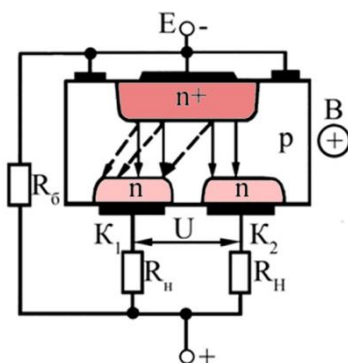


Рисунок 3.31 – Структура й схема ввімкнення ДКТ

На колектор K_1 буде потрапляти більше електронів, тому 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 індукованого) змінюється в результаті дії магнітного поля (рис. 3.32). Вони мають попит як такі, що виконують функції давача Холла.

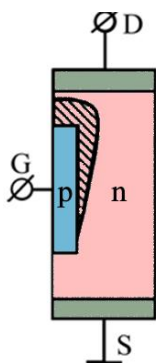


Рисунок 3.32 – Структура ПМТ із p - n -переходом: D – сток; S – витік; G – джерело

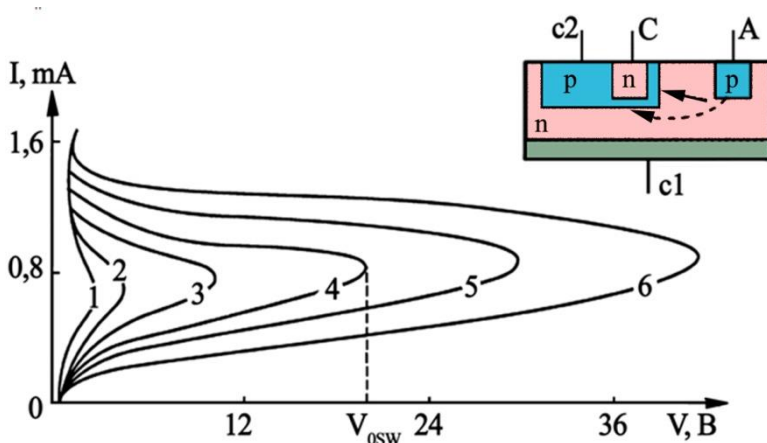


Рисунок 3.33 – ВАХ Si-магнітотристора, відстань між p -областями якого – 100 мкм: 1 – $B = -1$ Тл; 2 – $B = -0,8$ Тл; 3 – $B = -0,4$ Тл; 4 – $B = 0$; 5 – $B = 0,4$ Тл; 6 – $B = 0,8$ Тл

Магнітотристори – це напіпровідникові тристори типу p - n - p - n , у яких напругу ввімкнення можна змінювати, впливаючи зовнішнім магнітним полем. За відсутності магнітного поля магнітотристори мають певну середню напругу ввімкнення. Збільшуючи

напруженість магнітного поля в конкретному напрямку, можна підвищувати напругу ввімкнення, а в протилежному – знижувати, тобто змінювати ВАХ магнітотиристора (рис. 3.33). Емітер відіграє роль анода (А), керувальних електродів (с1, с2).

3.3 Прилади хемотроніки

Хемотроніка (йоніка) – розділ електроніки, змістом якого є теорія й практика електрохімічних перетворювачів для нових типів керувачі, інформаційних, обчислювальних і вимірювальних пристроїв. Першими електрохімічними приладами були гальванічні елементи й акумулятори, потім – електролітичні конденсатори, але їх зазвичай вони звичайно не розглядають у хемотроніці.

На початку розвитку зазначеного розділу електроніки створені прилади, що є аналогами діодів і тріодів, проте в них рухливими носіями заряду були йони в рідких електролітах, а не електрони. На їх основі вдалося здійснити випростування й посилення. Оскільки маса йонів у багато разів більша, а рухливість у багато разів менша, ніж маса та рухливість електронів, прилади хемотроніки дуже інерційні й придатні лише для дуже низьких частот. Ця їх властивість є істотним недоліком. Але варто мати на увазі, що в багатьох системах, наприклад, пристроях автоматики, процеси порівняно повільні, тому низькочастотність не має значення.

Виготовляють багато різних приладів хемотроніки, теорія яких складна, тому що в них проходять комплексні фізико-хімічні процеси. Далі розглянуті найбільш типові пристрої. Здебільшого вони мають герметичний корпус, у якому є електроліт та електроди. Матеріали певних електродів і корпуси не повинні вступати в хімічну взаємодію з електролітом. Значна частина приладів

хемотроники – концентраційні електрохімічні перетворювачі або перетворювачі дифузійного типу. Їх функціонування ґрунтується на зміні концентрації активних компонентів електроліту. Останній міститься їх у двох видах – окисненому й відновленому. Крім того, в електроліті є пасивний (індиферентний) компонент, що не бере участі в хімічних реакціях, а лише збільшує його провідність. Розподіл активних компонентів залежить від декількох процесів, що проходять в електроліті: дифузії, конвекції та міграції.

Дифузія – це поширення йонів унаслідок різниці концентрацій. *Конвекція* – переміщення самого розчину завдяки різниці густини. *Міграція* (аналог дрейфу носіїв заряду) – переміщення йонів у результаті дії електричного поля або поля, створеного різницею потенціалів на електродах. Головну роль зазвичай відіграє дифузія.

Найпростіший електрохімічний прилад – симетрична плоска електрохімічна комірка (рис. 3.34) – має електроди однакової площі з того самого матеріалу. Їх вольт-амперна характеристика також симетрична (рис. 3.35 а). У несиметричній комірці площі електродів різні й вольт-амперна характеристика несиметрична (рис. 3.35 б), а отже, така комірка має випростовувальні властивості. Останні можна одержати і за однакової площі електродів, якщо поділити весь обсяг електроліту на дві

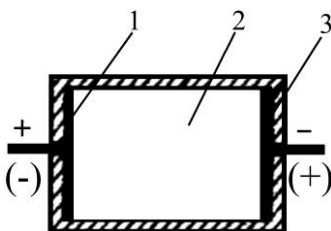


Рисунок 3.34 – Найпростіша електрохімічна комірка

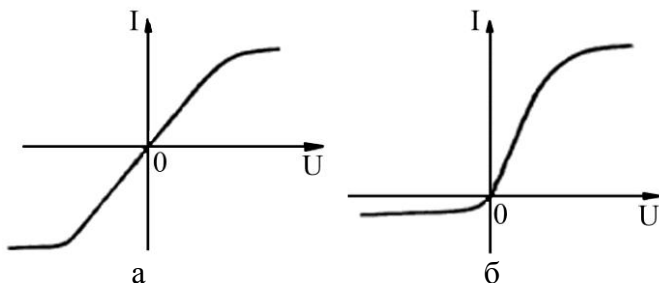


Рисунок 3.35 – Вольт-амперні характеристики симетричної (а) та несиметричної (б) електрохімічних комірок

різні частини за допомогою дифузійного бар'єра. Таким бар'єром може бути пористий або суцільний переділ із тонкою щільною чи капіляром, що з'єднує відсіки.

Електрохімічні діоди мають відношення площ електродів до декількох сотень і такий самий коефіцієнт випростовування. На відміну від напівпровідникових електрохімічні діоди функціонують під дуже низькими напругами – від 0,005 до 0,050 В, можуть бути дуже малих розмірів, мають низький рівень власних шумів, прості у виготовленні, дешеві й мають високу надійність. Проте вони придатні лише для низьких та інфранизьких частот.

Хемотронні діоди з дифузійним бар'єром можна використовувати як інтегратори струму, тобто лічильники кількості електрики. Під час протікання струму змінюються концентрація компонентів електроліту та його колір. Зважаючи на це, можливе візуальне визначення кількості електрики, але похибка становитим не менше ніж 10 %. Якщо в діод увести додатковий електрод, то можна розрахувати кількість електрики за струмом у ланцюзі додаткового електрода. В електрохімічних давачах тиску є три чи чотири електроди, а частину корпуса роблять у формі гнучкої мембрани. Зовнішній тиск передається через

неї на електроліт, що починає рухатися. Так на один з електродів потрапляє більше йонів. Струм цього електрода зростає, і за ним можна робити висновок про тиск. Такі давачі доцільні лише для вимірювання змінного тиску. Подібно до них функціонують електрохімічні мікрофони, використовувані зокрема для підвідного акустичного зв'язку – гідрофони.

Велику групу приладів хемотроніки становлять **електрокінетичні перетворювачі**. Вони базуються на використанні електрокінетичного руху. Це рух позитивних або негативних частинок рідкої речовини в результаті дії дією електричного поля.

Як уже зазначали, рух йонів у результаті дії поля називається *міграцією*. Рух в електричному полі більших частинок, ніж йони, має назву *електрофорез*. Рух рідини через пористий переділ чи капіляр у результаті дії поля – *електроосмос*. Функціонування електрохімічного приладу на основі електрофорезу або електроосмосу називається насосним режимом. Але можливий інший – генераторний – режим. Він полягає в тому, що в результаті дії тиску рідина проходить через пористий переділ і тоді між його протилежними сторонами виникає різниця потенціалів. Принцип функціонування електрокінетичного приладу в генераторному режимі репрезентований на рисунку 3.36.

Пористий переділ (2), на якому з двох сторін є електроди 1 і 7 у формі металевих сіток, поділяє прилад на дві камери (3 та 6), заповнені електролітом. Зовнішній тиск може бути переданим на електроліт через гнучкі мембрани 4 і 5. Тиск на одну з мембран викликає проштовхування рідини через пористий переділ у результаті чого на електродах з'являється різниця потенціалів. Такий прилад служить для вимірювання змінного тиску. На його основі можна виготовляти електрокінетичні мікрофони, гідрофони, віброметри для

визначення змінних переміщень (вібрацій) та акселерометри – пристрої для вимірювання прискорень. Діапазон робочих частот у них становить від 0,1 Гц до 10^5 Гц.

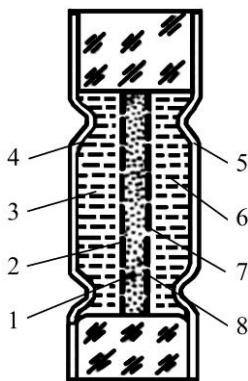


Рисунок 3.36 – Схема будови електрокінетичної комірки:
 1, 7 – електроди у формі металевих сіток;
 2 – пористий переділ; 3, 6 – камери, заповнені електролітом; 4, 5 – гнучкі мембрани

Цікавими електрохімічними приладами для накопичення електричного заряду є *йонікси (йоністори)* – еквіваленти конденсаторів надвеликої ємності. Срібний і вугільний електроди розділені твердим електролітом, таким як рубідій – йодид срібла $RbAg_4I_5$ або сульфід – йодид срібла Ag_3SI . Під час протікання струму на поверхні вугільного електрода, що є конденсатором, питома ємність йоніксів може досягати 10 Ф/см^2 , тобто бути втричі вищою, ніж в оксидних (електролітичних) конденсаторів. Прилади зберігають заряд 1–2 роки з його зменшенням лише на 3–5 %. Основним недоліком йоніксів є низька робоча напруга, не більша за 0,5 В. Крім того, це інфранизькочастотні прилади, тому що вже на частоті

20 Гц їх ємність зменшується в 100 разів. Робочі температури в них – від -60 до $+175$ °С. Для більш високих напруг йонікси з'єднують послідовно. Наприклад, для одержання ємності 5 Ф за робочої напруги 5 В необхідно послідовно з'єднати 10 йоніксів ємністю 50 Ф. Така батарея може використовуватися як джерело струмів й давати, наприклад, струм 1 мА впродовж 5 000 с зі зниженням напруги від 5 В до 4 В.

Особлива група електрохімічних приладів – *візуальні електрохімічні індикатори (ВЕІ)*. Найпростіший приклад – два електроди в електроліті в невеликому скляному балончику. Електроліт повинен змінювати свій колір у результаті подавання напруги на електроди. Напруга, яка подається, може бути постійною, змінною або імпульсною, але обов'язково низькою. На основі ВЕІ створюють матричні індикаторні панелі. У них розміщують дві взаємно перпендикулярні системи електродів – паралельні металеві смуги. Подавання напруги та ту чи іншу пару електродів (смуг) спричиняє зміну кольору електроліту. Основні переваги електрохімічних індикаторів: низький рівень керувальних сигналів, мала потужність (100 мВт – 100 мкВт), великий динамічний діапазон (до 80 дБ) і ресурс (до 90 000 годин), можливість функціонування роботи на низьких та інфранизьких частотах. Розроблені різні типи електрохімічних індикаторів, щогна тих чи інших фізико-хімічних процесах в електролітах.

3.4 Акустoeлектроніка

Акустoeлектроніка – галузь електроніки, присвячена теорії й практиці створення пристроїв, функціонування яких базується на акустoeлектронній взаємодії, що служать для перетворення та оброблення

сигналів. Це можуть бути тимчасові (затримка сигналів, вимірювання їх тривалості), частотні й фазові (перетворення частоти та спектра, фазовий зсув), амплітудні (підсилення й модуляція), складні (кодування та інтегрування) перетворення. Усі вони використовуювані в радіолокації, далекому зв'язку, автоматичному управлінні, обчислювальній техніці й ряді інших галузей електроніки.

Виникнення в металі чи напівпровіднику струму або електрорухомої сили в результаті дії ультразвукових хвиль називають *акустоелектричним ефектом*. Акустоелектричний ефект зумовлений впливом або об'ємних ультразвукових хвиль у товщі звукопроводу, або поверхневих акустичних хвиль – пружних хвиль, що поширюються по вільній поверхні твердого тіла чи вздовж межі твердого тіла з іншим середовищем і загасають із віддаленням від них. Останнім часом мають попит акустоелектронні прилади на поверхневих акустичних хвилях: лінії затримки, смугові фільтри, резонатори, давачі. Їх принцип функціонування зображений на рисунку 3.27. Як звукопровід 1 використовують пластину, стрижень або провід із п'єзоелектричного матеріалу (ніобату літію LiNbO_3 , п'єзокварцу SiO_2 , германату вісмуту $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, п'єзокераміки та ін.) із полірованою поверхнею, на якій розміщені електромеханічні перетворювачі – вхідний 2 і вихідний 3. Такі перетворювачі називають зустрічно-штирьовими (ЗШП) та виготовляють як гребінчасті електроди з тонкої металевої плівки (0,1–0,5 мкм).

До вхідного ЗШП під'єднане джерело електричного сигналу, тому у звукопроводі виникає поверхнева акустична хвиля, у вихідному перетворювачі, до якого під'єднане навантаження, – електричний сигнал.

Основними параметрами перетворювачів на поверхневих акустичних хвилях є: внесене загасання,

вхідний і вихідний опір, частотна вибірковість, смуга частот, що пропускаються. Усі вони залежать здебільшого від пристрою ЗШП. Звичайний ЗШП не є односпрямованим. У приладі, зображеному на рисунку 3.37, лише 50 % енергії, випромінюваної вхідним ЗШП, надходить до вихідного ЗШП. Решта випромінювані в інших напрямках, губляться. Інакше кажучи, розглянутий найпростіший акустoeлектронний прилад вносить велике загасання. Тому важливою проблемою під час створення високоефективних акустoeлектронних компонентів є зменшення внесеного загасання способом раціонального конструювання ЗШП. Також необхідно, щоб електричні сигнали перетворювалися на акустичні й навпаки в конкретній смузі частот. Це особливо важливо для смугових фільтрів і широкосмугових ліній затримки.

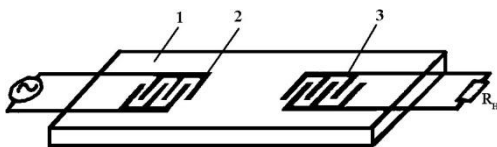


Рисунок 3.37 – Принцип будови акустoeлектронного приладу на поверхневих акустичних хвилях

Геометричні розміри й форма вхідного ЗШП обумовлюють ефективність перетворення електричного сигналу на акустичну хвилю. Для кожної частоти найбільш ефективно перетворення забезпечується за визначених розмірів ЗШП. Кількість штирів ЗШП обумовлює порівняну смугу частот, що пропускаються. Найширшу смугу матиме ЗШП із двох штирів. Чим більше штирів, тим менша ширина смуги пропускання.

Функціонування перетворювачів на поверхневих акустичних хвилях погіршується через вторинні явища, до яких належить, наприклад, відображення хвиль від меж

звукопроводу й електродів. Останнє є основною причиною спотворення вихідного сигналу та погіршення параметрів приладу. Шкідливим варто також вважати пряме проходження електричного сигналу з входу на вихід і його передавання об'ємною акустичною хвилею. Зниженням загасання й зменшенням відображення в особливих конструкціях ЗШП досягають односпрямованого передавання.

Лінії затримки на поверхневих акустичних хвилях здебільшого спричиняють загасання 0,5–1,5 дБ. Верхня частота, на якій функціонують такі лінії, досягає 2 ГГц. Відносна смуга пропускання може бути дуже різною – від часток відсотка до 100 %. Тривалість затримки залежно від відстані між ЗШП і конструкції становить від одиниць до сотень мікросекунд. Затримка може бути фіксованою чи регульованою. На торці звукопроводу зазвичай наносять звукобирні покриття, щоб зменшити відображення хвиль.

Динамічний діапазон ліній затримки – 80–120 дБ. Для ефективного функціонування лінії затримки важлива температурна стабільність її параметрів. Температурний коефіцієнт затримки (ТКЗ), близький до нуля, одержують або використанням спеціального матеріалу для звукопроводу (наприклад, кремнію з домішкою фосфору), або виготовленням звукопроводу із двох частин, які мають ТКЗ різного знака, що створює взаємну компенсацію. Діапазон робочих температур ліній затримки становить десятки градусів. Для збільшення часу затримки шлях хвилі роблять у формі спіралі чи ламаної лінії або з'єднують послідовно кілька ліній затримки. Регульовані лінії затримки мають декілька ЗШП, розміщених на різних відстанях. Умикаючи той чи інший ЗШП, можна змінювати час затримки.

3.5 Компоненти кріотроніки

Кріогенна електроніка (кріотроніка) – галузь електроніки, що вивчає застосування електронних явищ, які відбуваються в різних речовинах за низьких температур. Розвиток кріоелектроніки здебільшого пов'язаний із тим, що за температури, нижчих за визначену (критичну), у певних речовинах спостерігається надпровідність, тобто їх електричний опір фактично дорівнює нулю. Явище надпровідності було відкрите у 1911 р. голландським фізиком Х. Камерлінгом-Оннесом. На основі квантової фізики його вперше пояснили в 1957 р. американські вчені Д. Бардін, Л. Купер, Д. Шриффер і радянський академік Н. Н. Боголюбов. Перехід від кінцевого значення опору до надпровідності відбувається стрибкоподібно за критичної температури. Але стан надпровідності зникає внаслідок дії на надпровідник магнітного поля визначеної напруженості або перевищення силою струму в надпровіднику певного максимального значення.

Найпростіший, історично перший кріогенний перемикальний прилад – *кріотрон*. являє собою надпровідник 1 (рис. 3.28 а), що можна переводити зі стану з нульовим опором у стан із кінцевим, впливаючи магнітним полем. Поле створюється струмом, що протікає в іншому – керувальному – надпровіднику 2, виготовленому з металу з вищою критичною температурою, ніж у керованого провідника 1. Більш досконалим є плівковий кріотрон (рис. 3.28 б), у якому перпендикулярно одна до одної розміщені керована 1 і керувальна 2 плівки, розділені шаром діелектрика 3. Товщина плівок – близько 1 мкм, ширина – 1–10 мм. Керувальна плівка вужча. Обидві плівки перебувають у надпровідному стані, але, якщо пропустити через керувальну плівку струм, не менший від

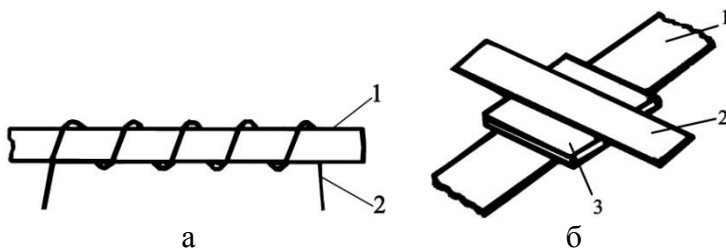


Рисунок 3.38 – Дротовий (а) та плівковий (б) кріотрони

певного критичного значення, то магнітне поле цього струму порушить надпровідність керованої плівки на ділянці перетинання плівок, і тоді опір керованої плівки стане більшим за нуль. Можливі інші конфігурації кріотронів.

Основне призначення кріотронів – перемикальні елементи швидкодійної ЕОМ. Два кардинально різних стани керованого провідника відповідають знакам 0 і 1. Час перемикання (переходу кріотрона з одного стану в інший) становить малі частки мікросекунди. Тому швидкодія ЕОМ на кріотронах дуже висока. Також важливо, що на керування кріотроном необхідна дуже мала потужність.

Плівкові кріотрони переважно малого розміру – на площі в 2 см^2 можна розмістити тисячі кріотронів. Саме плівкові кріотрони використовували в мікроелектронних пристроях.

На велику увагу заслуговує одержання 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 в надпровідному стані. Оскільки опір надпровідного кільця та втрати на нагрівання дорівнюють нулю, струм у кільці наявний десятки днів майже без

послаблення. На цьому явищі ґрунтується функціонування запам'ятовувальних пристроїв, у яких відсутність струму відповідає нулю, а наявність – одиниці. Для запам'ятовування знаків 0 і 1 у надпровідному замкнутому контурі також можна використовувати струми різних напрямків.

Особливий інтерес викликають кріогенні прилади, функціонування яких базується на ефекті, відкритому в 1962 році англійським ученим Б. Джозефсоном. Суть ефекту Джозефсона: якщо два надпровідники розділені дуже тонким шаром діелектрика (менше 1 нм), то через нього може протікати постійний струм, хоча спадання напруги на цій ділянці дорівнюватиме нулю. У такому разі через тонкий шар діелектрика протікає своєрідний тунельний струм. У результаті дії магнітного поля з визначеною напруженістю, якщо струм перевищить певне граничне значення, ефект Джозефсона зникне, тобто струм узагалі припиниться. Отже, ґрунтуючись на ефекті Джозефсона можуть функціонувати кріогенні перемикальні елементи. Час перемикання джозефсонівських елементів дуже малий (до 10^{-11} с). На таких елементах можуть виготовляти надшвидкодійні ЕОМ із малим споживанням потужності й великою кількістю арифметичних операцій (декілька мільярдів за секунду).

Варто відзначити, що наднизькі температури також застосовують у різних радіоелектронних пристроях для зниження втрат у них. Створено, наприклад, коливальні системи (резонатори) з надвисокою добротністю, що становить сотні тисяч і навіть мільйонів, коаксіальні кабелі з винятково малим загасанням, резонансні фільтри з надвисокою вибірковістю. Дуже важливо й те, що за низьких температур знижується рівень власних шумів. Це сприяє підвищенню чутливості радіоприймальних

пристроїв і дозволяє ідентифікувати дуже слабкі сигнали, наприклад від космічних об'єктів. За звичайних температур приймання таких сигналів надзвичайно складне, тому що вони значно слабкіші ніж власні шуми вхідної частини радіоприймального пристрою.

Основним недоліком усіх кріогенних пристроїв є необхідність забезпечення для їх функціонування наднизьких температур. До останнього часу для цього використовували рідкий гелій, температура переходу з газоподібного стану в рідкий якого – 4 К. Холодильні установки для підтримки такої низької температури складні й громіздкі. Це обмежує практичне використання кріогенної апаратури. Нові перспективи в кріоелектроніці зумовило відкриття високотемпературної надпровідності. У 1987 році було встановлено, що певні речовини, зокрема металооксидні з'єднання на зразок кераміки, можуть ставати надпровідниками за значно вищих температур. Це означає, що для таких надпровідників замість дорогого рідкого гелію можна використовувати рідкий азот, критична температура якого – 77 К. Рідкий азот поширений і порівняно дешевий, тому в електроніці більш ефективним є використання високотемпературних надпровідників.

Список літератури

1. High-entropy film alloys: electrophysical and magnetoresistive properties / Yu. Berezhnyak, L. Odnodvoret, D. Poduremne, I. Protsenko, Yu Shabel'nyk. – Chapter 2 in Springer Book “Nanooptics, Nanophotonics, Nanostructures, and Their Applications”. – Springer Proceedings in Physics 210. – P. 17–34.
2. Болюх В. Ф. Основи електроніки і мікропроцесорної техніки : навч. посіб. / В. Ф. Болюх, В. Г. Данько. – Харків : НТУ «ХП», 2011. – 257 с.
3. Крилик Л. В. Матеріали електронної техніки : навч. посіб. / Л. В. Крилик, О. О. Селецька. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 120 с.
4. Радіотехніка : енциклопедичний навчальний довідник / за ред. Ю. Л. Мазора, Є. А. Мачуського, В. І. Правди. – Київ : Вища школа, 1999. – 838 с.
5. Осадчук В. С. Напівпровідникові перетворювачі інформації : навч. посіб. / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця : ВНТУ, 2004. – 208 с.
6. Осадчук В. С. Волоконно-оптичні системи передачі : навч. посіб. / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця : ВНТУ, 2005. – 225 с.
7. Мікроелектроніка і наноелектроніка. Вступ до спеціальності / Ю. М. Поплавко, О. В. Борисов, В. І. Ільченко та ін. – Київ : НТУУ «КПІ», 2010. – 160 с.
8. Прищепа М. М. Мікроелектроніка. Частина І. Елементи електроніки / М. М. Прищепа, В. П. Погребняк. – Київ : Вища школа, 2004. – 431 с.
9. Проценко І. Ю. Технологія та фізика тонких металевих плівок / І. Ю. Проценко. – Суми : СумДУ, 2000. – 148 с.

10. Проценко І. Ю. Технологія одержання і фізичні властивості плівкових матеріалів та основи мікроелектроніки (практикуми) : навч. посіб. / І. Ю. Проценко, Л. В. Однорець. – Суми : Сумський державний університет, 2011. – 231 с.
11. Проценко І. Ю. Наноматеріали і нанотехнології в електроніці : підручник / І. Ю. Проценко, Н. І. Шумакова. – Суми : Сумський державний університет, 2018. – 155 с.
12. Розорінов Г. М. Високошвидкісні волоконно-оптичні лінії зв'язку : навч. посіб. / Г. М. Розорінов, Д. О. Соловійов. – 2-ге вид., переробл. і допов. – Київ : Кафедра, 2012. – 344 с.
13. Сенько В. І. Електроніка і мікросхемотехніка. Т. 1. Елементна база електронних пристроїв / В. І. Сенько, М. В. Панасенко, Є. В. Сенько. – Київ : Обереги, 2000. – 300 с.
14. Стахів П. Г. Основи електроніки: функціональні елементи та їх застосування / П. Г. Стахів, В. І. Коруд, О. Є. Гамола. – Львів : Новий світ-2000, 2003. – 128 с.
15. Основи електроніки з елементами мікроелектроніки : навч. посіб. / П. Г. Стахів, В. І. Коруд, О. Є. Гамола та ін. – Львів : Магнолія-2006, 2010. – 225 с.
16. Швець Є. Я. Матеріали і компоненти електроніки : навч. посіб. / Є. Я. Швець, І. Ф. Червоний, Ю. В. Головка. – Запоріжжя : ЗДІА, 2011. – 278 с.

Навчальне видання

Однодворець Лариса Валентинівна,
Пазуха Ірина Михайлівна

МАТЕРІАЛИ І КОМПОНЕНТИ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

Навчальний посібник

Дизайн обкладинки І. М. Пазухи
Редактор О. В. Федяй
Комп'ютерне верстання І. М. Пазухи

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 11,39. Обл. вид. арк. 12,46.

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007
Свідцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.