

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО -НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім.Ю.М.ПОТЕБНІ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОНІКИ, ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА
ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ**

**«ТВЕРДОТІЛЬНІ КОМПОНЕНТИ МІКРО-ТА
НАНОЕЛЕКТРОНІКИ»**

ПОСІБНИК

для здобувачів вищої освіти бакалавра спеціальності «Мікро- та наносистемна техніка» освітньої програми 153 «Мікро-та наносистемна техніка»

ЗАПОРІЖЖЯ

2022

ЗМІСТ

ВСТУП-----	6
1.ЗАДАЧІ ТВЕРДОТІЛОЇ ЕЛКСТРОНІКИ-----	7
1.1Основні співвідношення для розрахунку характеристик приладів твердоті лої електроніки-----	8
1.1.1Квазі рівні Фермі-----	10
1.2Електронно-дірковий перехід	
1.2.1Електронно-дірковий перехід та фізичні процеси в ньому-----	11
1.2.2P-n – перехід за відсутності зовнішньої напруги -----	13
1.2.3P-n- перехід під дією зовнішньої напруги -----	15
1.2.4Пряме вмикання p-n- переходу-----	16
1.2.5Зворотне вмикання p-n- переходу-----	18
1.3Властивості p-n –переходу	
1.3.1Товщина переходу-----	19
1.3.2Ємності переходу-----	21
1.3.3Реальна ВАХ p-n - переходу-----	23
1.3.4Генераційно-рекомбінаційні процеси в p-n- переходах-----	23
1.3.5Пробої p-n- переходу-----	24
1.3.6Різновиди електричних переходів та контактів-----	25
2.ДІОДНІ СТРУКТУРИ	
2.1Класифікація та система позначень діодів-----	31
2.1.1Випрямлювальні діоди-----	32
2.1.2Напівпровідникові стабілітрони-----	37
2.2Окремі види та призначення напівпровідникових діодів-----	41
2.2.1Універсальні діоди-----	41
2.2.2Імпульсні діоди та перехідні процеси в них-----	42
2.2.3Тунельні та обернені діоди-----	44
2.3Варикапи-----	47
2.4Діоди Ганна -----	50
2.5Діоди Шотткі -----	53
2.6Перехідні процеси в діодах-----	56а
2.6.1Перехідні процеси при великих напрузі та струмах-----	56а
2.6.2Процеси при малих напругах та струмах-----	56д

3.БІПОЛЯРНІ ТРАНЗИСТОРИ (БТ)

3.1Будова та принцип дії біполярних транзисторів

3.1.1Загальні відомості про біполярні транзистори-----	57
3.1.2Технології виготовлення БТ-----	57а
3.1.3Способи вмикання й режими роботи біполярних транзисторів-----	61
3.1.4Принцип дії біполярного транзистора в активному режимі-----	62
3.1.5Схема вмикання транзистора зі спільним емітером та спільним колектором-----	69

4.ХАРАКТЕРИСТИКИ БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРІВ

4.1Статичні характеристики і параметри БТ-----	72
4.1.1Статичні характеристики БТ у схемі зі спільною базою-----	74
4.1.2Статичні характеристики БТ у схемі зі спільним емітером-----	81
4.1.3Статичні характеристики БТ у схемі зі спільним колектором-----	85
4.1.4Вплив температури на статичні характеристики транзисторів-----	86

5.ПАРАМЕТРИ БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРІВ

5.1Граничні режими транзистора. Робочий діапазон температур-----	90
5.1.1Пробої транзистора-----	90
5.1.2Максимально– допустима потужність,що розсіюється колектором--	94
5.2Диференційні параметри БТ	
5.2.1Оцінка властивостей транзистора-----	95
5.2.2Фізичні параметри та еквівалентні схеми БТ-----	99

6.РОБОТА БІПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА У ДИНАМІЧНОМУ РЕЖИМІ

6.1Принцип дії підсилювального каскаду на БТ	
6.1.1Схема зі спільною базою-----	102
6.1.2Схема зі спільним емітером-----	105
6.2.Способи забезпечення режиму спокою транзисторного каскаду	
6.2.1Схема з фіксованим струмом бази-----	107
6.2.2Схема з фіксованим потенціалом бази-----	109
6.2.3Схема з температурною стабілізацією в емітерному колі-----	110
6.2.4Схема каскаду зі спільною базою та автоматичним зміщенням робочої точки-----	111

6.2.5	Оцінка транзисторних каскадів з точки зору температурної нестабільності-----	112
6.3	Динамічні характеристики БТ та їх використання -----	113
6.3.1	Параметри режиму підсилення та їх розрахунок за динамічними характеристиками транзисторного каскаду-----	115
7.	ДЕЯКІ РІЗНОВИДИ БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРІВ	
7.1	Частотні властивості біполярних транзисторів-----	119
7.1.1	Вплив ємностей переходів і розподільного опору бази на частотні властивості транзистора-----	123
7.2	Робота біполярного транзистора у ключовому режимі-----	125
7.3	Одноперехідний транзистор-----	129
7.4	Високочастотні малопотужні транзистори-----	131
7.5	Потужні транзистори-----	132
8.	ПОЛЬОВІ ТРАНЗИСТОРИ	
8.1	Польові транзистори з керувальними р-п-переходами-----	135
8.1.1	Статичні вхідні характеристики-----	142
8.1.2	Статичні прохідні (стокзатворні) характеристики-----	142
8.1.3	Статичні вихідні (стоківі) характеристики-----	143
8.1.4	Диференційні параметри польових транзисторів-----	146
8.2	Польові транзистори з ізольованим затвором (МДН - транзистори)-----	147
8.2.1	Ефект поля-----	147
8.2.2	МДН-транзистори з індукованим каналом-----	149
8.2.3	МДН-транзистора із вбудованим каналом-----	151
8.3	Залежність характеристик і параметрів польових транзисторів від температури-----	154
9.	ДИНАМІЧНИЙ РЕЖИМ РОБОТИ ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ	
9.1	Підсилювальні каскади на польовому транзисторі-----	157
9.2	Частотні властивості польових транзисторів-----	161

9.3 Потужні польові транзистори-----	164
9.3.1 Потужні МДН-транзистори-----	164
9.3.2 Біполярний транзистор з ізольованим затвором-----	168
9.3.3 Транзистори з статичною індукцією-----	172
10. ТИРИСТОРИ	
10.1 Будова, принцип дії та режими роботи тиристора-----	173
10.1.1 Загальні відомості-----	173
10.1.2 Диністорний режим-----	174
10.1.3 Триністорний режим-----	178
10.1.4 Симістори-----	180
10.2 Способи комутації тиристорів-----	181
10.2.1 Увімкнення тиристорів-----	181
10.2.2 Вимкнення тиристорів-----	183
11. ОПТОЕЛЕКТРОННІ НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПРИЛАДИ	
11.1 Загальні відомості-----	185
11.2 Випромінюючі діоди-----	185
11.3 Напівпровідникові фотоприймачі-----	188
11.3.1 Фоторезистори-----	188
11.3.2 Фотодіоди-----	189
11.3.3 Фотоприймачі з внутрішнім підсиленням-----	193
11.4 Оптрони та їх застосування-----	195
Список скорочень-----	198
Список літератури-----	200

ВСТУП

Дисципліна «Твердотілі компоненти мікро- та наноелектроніки» є предметом у циклі фундаментальних дисциплін. Детальний розгляд фізичних процесів у напівпровідникових структурах сприяє розвитку у студентів уміння вибрати елементи й режими їх застосування, грамотно експлуатувати напівпровідникову апаратуру.

Крім того, ця навчальна дисципліна може розглядатись як база для вивчення основ мікроелектроніки і мікросхемотехніки з огляду на аналогію процесів у напівпровідникових інтегральних схемах та дискретних напівпровідникових приладах.

У лекціях детально розглянуто властивості р-п- переходу, способи його виготовлення, параметри та характеристики діодних структур.

У наступних параграфах розглянуто структуру, принцип дії, параметри та характеристики біполярних транзисторів, наведено їх різновиди, приділено увагу його використанню в електронних пристроях.

Поданий аналіз основ роботи МОН - та МДН –транзисторів, їх основних характеристик й основ експлуатації в ключовому та підсилювальному режимах.

Розглянуто також різновиди тиристорів, параметри та характеристики напівпровідникових випромінювачів, фотоприймачів, сонячних елементів та оптопар.

При викладанні матеріалу в лекціях перед усім розглядаються фізичні процеси в структурі приладу, які є загальними як для інтегральних, так і для дискретних приладів, його особливості використання в медичному обладнанні.

Лекції з дисципліни «Твердотілі компоненти мікро-та наноелектроніки» призначені, насамперед, для студентів спеціальностей «Мікро- та носистемна техніка» і «Мікроелектронні інформаційні системи». Однак вони будуть, безперечно, корисними і для спеціальностей: «Електронні системи», «Програмне забезпечення автоматизованих систем» та «Автоматизація управління технологічними процесами».

1. ЗАДАЧІ ТВЕРДОТІЛОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

Одні електронні пристрої на напівпровідникових структурах сходять з історичної арени, інші - лише розпочинають свій триумфальний похід. Так, наприклад, сучасний комп'ютер складається з електровакуумного приладу (кінескоп), твердотілих елементів (транзистори, мікросхеми тощо) та мікропроцесора, який найближчим часом може бути реалізований на біочіпах.

Біомедична електроніка випадає з переліку класичної фізичної електроніки, оскільки вивчає фізичні ефекти в неживій і живій природі, які є основою нових класів електронних приладів. Особлива увага при використанні біологічних матеріалів електроніки (білки, ферменти, віруси, мікроби) приділяється технології виготовлення біопристроїв, оскільки це потребує складної апаратури, високих температур та виконання умов високої стерильності.

Основна задача твердотілої електроніки – мікромініатюризація та мінімальні топологічні розміри (МТР). За величиною МТР сучасну інтегральну електроніку поділяють на:

- мікроелектроніку (максимальне значення габаритних розмірів мікроелементів $h = 0,25 - 1,0$ мкм);
- субмікронну електроніку ($h = 0,75 - 1,0$ мкм);
- нанoeлектроніку (h - менше 100 нм).

Виготовлення пристроїв з такими габаритними розмірами мікроелементів потребує особливих видів технологій. На сьогодні до базових технологічних процесів слід віднести:

- стандартні планарно - епітаксійні процеси з використанням роздільної дифузії;
- КІД - технологія (колекторна ізолююча дифузія);
- БІД - технологія (базова ізолююча дифузія);
- Декаль - технологія (ізоляція повітряними зазорами);
- КНД – технологія (ізоляція матеріалом підкладки).

З підвищенням рівня мікромініатюризації домінуюче положення в мікроелектроніці займають МДН- та МОН – структури, базовим активним елементом якого виступає транзистор. Інерційність фізичних процесів в ньому обумовлена дифузією, дрейфом та рекомбінацією нерівноважних носіїв заряду, а також перезарядкою бар'єрної ємності. У цьому випадку при розробці ВЧ- та НВЧ - приладів необхідно "зжимати" до мінімуму прольотні відстані, а також зменшувати вклад паразитних RC- параметрів, що досягається зменшенням площі структури. Таким чином, мікромініатюризація в цілому сприяє підвищенню граничних частот активних елементів, а це вимагає використання нових літографічних процесів з короткохвильовим діапазоном УФ – і рентгенівського випромінювання.

2. ДІОДНІ СТРУКТУРИ

2.1 Класифікація та система позначень діодів

Напівпровідникові діоди – це електроперетворювальний напівпровідниковий прилад з одним електричним переходом та двома виводами.

Залежно від області використання розрізняють випрямлювальні, універсальні (високоомні), імпульсні, надвисокочастотні, тунельні обернені діоди, варикапи, стабілітрони, фото- та світлодіоди. За типом переходу розрізняють площинні та точкові діоди. Площинні діоди мають *p-n*-перехід, лінійні розміри якого, що визначають площу переходу, значно перевищують його товщину. До точкових належать діоди, лінійні розміри переходу яких менші товщини запірного шару.

Система позначень діодів, прямий струм яких не перевищує 10А, згідно з ГОСТ 10862-72 має 6 елементів.

Перший елемент – літера або цифра, яка визначає вихідний матеріал виготовлення. При цьому літера вживається для приладів, які призначено до використання в пристроях широкого застосування, а цифра – для діодів у пристроях спеціального застосування. Наприклад, Г або І –германій або сполуки, К або 2 –кремній або його сполуки, А або 3 –сполуки галію.

Другий елемент – літера, яка визначає підклас приладу. відрізняється від попередньої третім, четвертим та п'ятим елементами згідно з таблицею 4.1. Наприклад, Д- випрямлювальний, імпульсний або універсальний діод, С- стабілітрони, В – варикапи, ФД –фотодіоди, Л – світлодіоди, И(І) – тунельні, або обернені, діоди.

Третій елемент – цифра від 1 до 9, що вказує на призначення приладу.

Четвертий та п'ятий елементи (від 01 до 99) - порядковий номер розробки.

Шостий елемент – літера від А до Я - вказує на параметричну групу технологічного типу.

Стабілітрони мають свою особливу систему позначень (таблиця 2.1) .

Система позначень діодів, розроблених до 1964 р., має два або три елементи. Перший елемент – літера Д. Другий елемент – цифра, що вказує на класифікаційну групу діодів. Третій елемент – літера, що характеризує різновид діода в даній групі.

Таблиця 2.1

Елемент позначення	Напруга стабілізації		
	$U_{ст} < 19В$	$10В < U_{ст} < 99В$	$100В < U_{ст} < 199В$
Третій елемент: $P_{\max} \leq 0,3Вт$	1	2	3
$0,3Вт < P_{\max} \leq 5Вт$	4	5	6
$5Вт < P_{\max} \leq 25Вт$	7	8	9
Четвертий та п'ятий елементи	Від 01 до 99 (четвертий елемент вказує на ціле число, а п'ятий – на десяті частки напруги стабілізації)	Від 10 до 99 (позначають номінальну напругу стабілізації у вольтах)	Від 00 до 99 (позначають різницю між напругою стабілізації та 100В)

2.1.1 Випрямлювальні діоди

Випрямлювальні діоди (ВД) призначені для випрямлення змінного струму і складають найбільш поширений підклас діодів. Залежно від значення середнього випрямленого струму розрізняють:

ВД малої потужності ($I_{всер} \leq 0,3А$; третій елемент позначень – 1);

ВД середньої потужності ($0,3А < I_{всер} \leq 10А$; третій елемент позначень – 2); ВД силової ($I_{всер} > 10А$).

Робочі частоти ВД малої та середньої потужностей не

перевищують 20 кГц, силові діоди працюють на частоті 50Гц.

Оскільки допустима густина струму через p - n -перехід $j_{np,фч} \leq 2А/мм^2$, то для одержання названих значень $I_{всер}$ використовують площинні p - n -переходи, виготовлені сплавним або дифузійним способом. Велика ємність таких переходів не впливає істотно на роботу ВД у названому діапазоні частот.

З метою стабілізації параметрів ВД під час дії на них вологості, атмосферного тиску, забруднення, зміни температури діоди поміщають у металево-керамічний або металево-скляний корпус, який забезпечує ефективно відведення теплоти, що виділяється на p - n -переході.

У ВД малої потужності тепло розсіюється безпосередньо корпусом (діод 2Д207, КД108, Д226 тощо). У ВД середньої потужності тепло відводиться масивним гвинтом, за допомогою якого діод прикріплюється до шасі апаратури, яка виконує функцію радіатора. З метою запобігання електричного контакту між діодом і корпусом застосовують різноманітні ізоляційні прокладки, а також шайби з високою теплопровідністю. До таких діодів належать, наприклад, 2Д216, КД203, Д231. Для силових діодів потрібне примусове повітряне охолодження або таке що здійснюється спеціальними радіаторами.

Згадані діоди здатні випрямляти змінний струм порівняно невисокої напруги (до 500-700В). З метою випрямлення більш високої напруги використовують послідовне з'єднання діодів у спеціальних випрямлювальних стовпах та блоках, що виготовляються в уніфікованих корпусах і мають елемент позначення - літеру Ц.

ВАХ кремнієвих та германієвих діодів відрізняються одна від одної (рисунок 2.1).

Оскільки ширина ЗЗ у кремнію більша, ніж у германію, то зворотний струм германієвого діода більший, ніж кремнієвого при однакових конструкції та потужності. Повна відсутність ділянки насичення на зворотній гілці ВАХ кремнієвого діода пояснюється у п.3.1.3. У зв'язку з більшим $I_{3в}$ у германієвих діодів більш імовірний пробій у кремнієвих – лавинний.

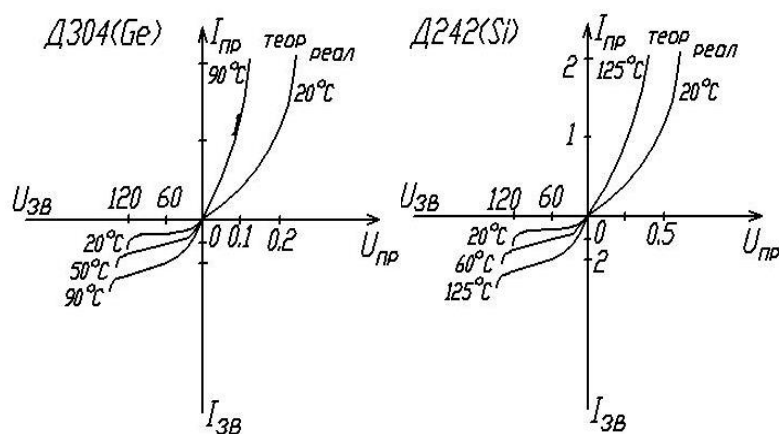


Рисунок 2.1. ВАХ випрямлювальних діодів

Для області малих значень U_{np} рівняння теоретичної ВАХ (2.19) під час використання перших двох членів розкладення в ряд Тейлора функції $\exp(U_{np} / \varphi_T)$ набуває вигляду:

$$I_{np} = I_s \frac{U_{np}}{\varphi_T}. \quad (2.1)$$

З (2.1) випливає, що крутизна прямої гілки ВАХ $S = \frac{dI_{np}}{dU_{np}}$ пропорційна до зворотного струму. Тому в германієвих діодів крутизна характеристики при малих U_{np} більша. Крім того, оскільки зворотний струм кремнієвого діода менший, його прямий струм, що і в германієвого діода, досягається при більших прямих напругах. Тому потужність, що розсіюється при однакових струмах, у германієвих діодів менша, ніж у кремнієвих.

Струм насичення і струм генерації діодів істотно залежать від температури навколишнього середовища. Для струму насичення справедлива при температурі T рівність:

$$I_s(T) = I_s(T_0)e^{(T-T_0)/a}, \quad (2.2)$$

де $I_s(T_0)$ – струм насичення при температурі T_0 ;

$a=0,09$ 1/К – для германію;

$a = 0,13$ 1/К – для кремнію.

Для приблизної оцінки можна вважати, що при зростанні температури на 10°C зворотний струм германієвих діодів збільшується вдвічі, а кремнієвих – в 2,5 рази. Незважаючи на те, що швидкість зростання I_{ze} кремнієвих діодів зі збільшенням температури більша, абсолютний температуру значно більший. Ця обставина призводить до того, що при збільшенні температури значення зворотної напруги, за якої відбувається тепловий пробій германієвих діодів, зменшується. В кремнієвих діодах, навпаки, зі зростанням температури пробій напруги лавинного пробою збільшується.

Це пояснюється тим, що в кремнію з підвищенням температури зростає теплове розсіювання рухомих носіїв, зменшується довжина їх вільного пробігу, і для того, щоб електрон протягом меншого шляху набув кінетичної енергії, достатньої для іонізації нейтральних атомів, треба мати більш прискорювальне поле.

Параметри випрямлювальних діодів

До цих параметрів належать:

постійна U_{np} , вимірена при даному постійному I_{np} ;

постійний I_{ze} , вимірений при даній постійній U_{ze} ;

середнє значення випрямленого струму $I_{всер}$ - усереднюється за період;

прямий R_{np} та зворотний R_{ze} опори діода при даних U_{np} та U_{ze} ;

диференційний опір діода $r_g = dU / dI$;

максимально допустима зворотна напруга $U_{ze\max}$;

максимально допустимий середній прями́й струм $I_{np\,сep\,max}$;

максимально допустима середня розсіювана потужність $P_{сep\,max}$ тощо.

Схема однопівперіодичного випрямляча з активним навантаженням допускає середню розсіювану потужність $P_{сep\,max}$ тощо. В цій схемі струм через діод та опір навантаження протікає тільки за час дії половини періоду змінної напруги U_2 . Як бачимо з рисунка 2..2, такий струм має пульсуючий характер і протікає в одному напрямку, змінюючись за величиною від максимального значення I_{2m} до нуля.

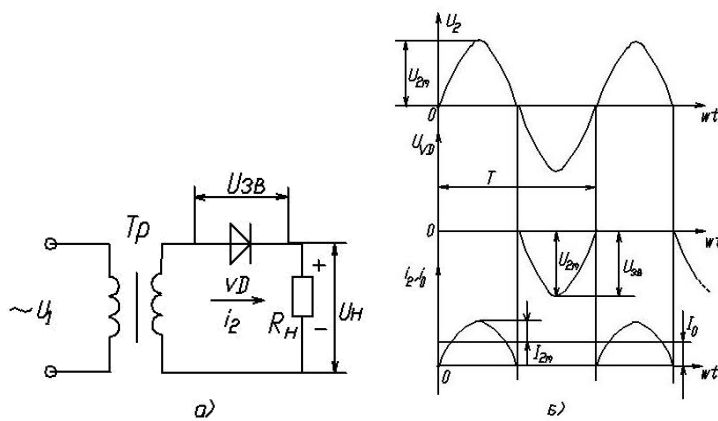


Рисунок 2.2 – Однопівперіодний випрямляч: а-схема випрямляча; б-графіки струмів і напруг

Показана на рис.2..2 б постійна складова випрямленого струму I_0 являє собою значення струму, який проходить за період через опір навантаження R_H . Користуючись графіком (рис. 2.2 б), можна записати рівність

$$I_0 T = \int_0^{\frac{T}{2}} i_2 dt \quad (2.3)$$

Якщо струм i_2 змінюється за синусоїдальним законом

$$i_2 = I_{2m} \cdot \sin wt, \text{ тоді}$$

$$\text{Звідки } I_0 = \frac{2I_{2m}}{\pi} = \frac{I_{2m}}{\pi} = 0,318I_{2m}. \quad (2.4)$$

Постійну складову випрямленої напруги U_0 на опорі R_H можна знайти за законом Ома

$$U I_2 T = \int_0^{\frac{T}{2}} I_{2m} \cdot \sin \omega t \cdot dt = I_{2m} \frac{\cos \omega t}{\omega} \Big|_0^{\frac{T}{2}} = 2 \frac{I_{2m}}{\omega} \cdot 0 = I_0 R_H = 0,318 I_{2m} R_H, \quad (2.5)$$

де $I_{2m} R_H = U_{2m}$,

тоді $U_0 = 0,318 U_{2m} = \frac{U_{2m}}{\pi}$.

Якщо замінити $U_{2m} = \sqrt{2} U_2$, отримаємо

$$U_0 = \frac{\sqrt{2} U_2}{\pi} \approx 0,45 U_2 \quad (2.6)$$

Якщо напруга мережі U_1 відома, то коефіцієнт трансформації трансформатора T_r , повинен дорівнювати

$$n = U_2 / U_M. \quad (2.7)$$

Із розглянутої роботи схеми випливає, що у від'ємний півперіод діод знаходиться під напругою, яка діє на зажимах вторинної обмотки трансформатора, тому найбільша зворотна напруга, прикладена до діода, дорівнюватиме

$$U_{зв} = U_{2m} = 3,14 U_0 \quad (2.8)$$

Підбираючи діод для роботи в однопівперіодній схемі, необхідно стежити за тим, щоб

$$U_{зв. доп.} \geq U_{зв} = 3,14 U_0 \quad (2.9)$$

де $U_{зв. доп.}$ – максимальна допустима зворотна напруга вибраного діода

Якщо нерівність (2.9) не виконується, необхідно або взяти ільш високою допустимою напругою, або ввімкнути кілька однотипних діодів послідовно. Кількість послідовдіод із бно з'єднаних діодів розраховується за формулою $k = U_{зв} / U_{зв. доп.}$, при цьому струм

$$I_{сер} \leq I_{сер. доп.} \geq I_0 \quad (2.10)$$

Якщо нерівність (2.10) не виконується, то необхідно підібрати діод з більш високим значенням $I_{сер. доп.}$ або ввімкнути кілька однотипних діодів паралельно один до одного.

Кількість діодів розраховують з формули

$$m = I_0 / I_{\text{сер. доп}} \cdot \quad (2.11)$$

2.1.2 Напівпровідникові стабілітрони

Стабілітронами називають діоди, які призначені для стабілізації рівня напруги в електронних схемах. З цією метою використовують діоди, ВАХ яких має ділянку зі слабкою залежністю напруги від струму, що проходить. Як стабілітрони використовують площинні кремнієві діоди, на зворотній гілці ВАХ яких ділянка стабілізації створюється внаслідок лавинного або тунельного пробію.

Низьковольтні стабілітрони ($U_{\text{см}} < 6\text{В}$) виготовляють із сильнолегованого кремнію (з великими концентраціями N_A та N_D), p - n -перехід у них вузький, у ньому тунельний пробій відбувається при невеликих напругах. Стабілітрони з $U_{\text{см}} > 8\text{В}$ виготовляють з малою концентрацією домішок, p - n -перехід у них широкий, і в ньому більш імовірним є лавинний пробій.

Концентрація домішок впливає не лише на величину $U_{\text{проб}}(U_{\text{см}})$, а й на зміну

ВАХ. При напругах стабілізації від 6 до 8 В у стабілітронах може бути як лавинний, так і тунельний пробій.

Для стабілітронів з малою концентрацією домішок зростання температури спричинює збільшення числа вільних носіїв заряду і зменшення їх рухомості. Тому в таких стабілітронах при зростанні температури розвиток лавиноподібного процесу розмноження носіїв унаслідок ударної іонізації почнеться при більшій зворотній напрузі, тобто $U_{\text{проб}}$ збільшується. Такий випадок показано на рисунку 2.3.

У низьковольтних стабілітронах (з великою концентрацією домішок) зі зростанням температури зменшується ширина ЗЗ, зростає ймовірність тунельного пробію (переходу носія з ЗЗ однієї області в ЗП іншої області), який і відбувається при менших напругах, ніж це було при початковій температурі, тобто $U_{\text{проб}}$ зменшується.

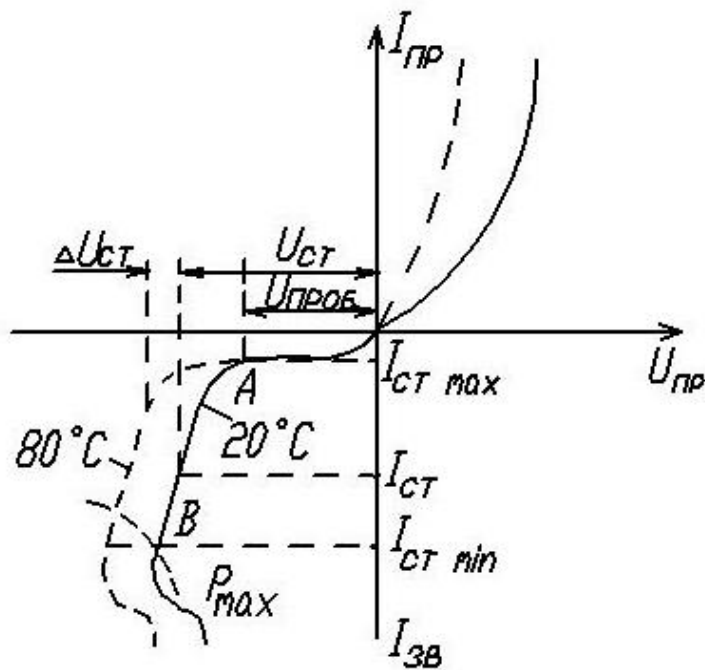


Рисунок 2.3 – ВАХ напівпровідникового стабілітрона та його зображення на схемах

Для стабілізації низьких напруг (біля одного вольт) використовують пряму гілку ВАХ діода при $U_{проб} > U_K$. В цьому режимі в кремнієвих діодах також спостерігається слабка залежність напруги від струму, що проходить. Такі прилади називають стабісторами, їх характеристика зображена на рисунку 2.4.

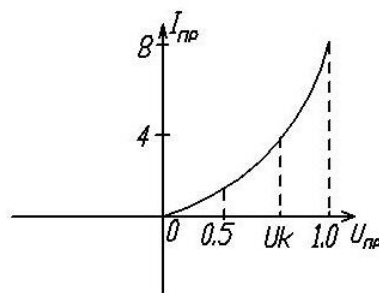


Рисунок 2.4 – Характеристика стабістора

До параметрів стабілітронів належать :

напруга стабілізації U_{cm} при даному струмі стабілізації;

мінімально допустимий струм стабілізації $I_{cm_{min}}$;

максимально допустимий струм $I_{cm_{max}}$;

максимально допустима потужність P_{max} , що розсіюється стабілітроном;

диференційний опір $r_{cm} = dU_{cm} / dI_{cm}$;

температурний коефіцієнт напруги стабілізації (ТКН), який визначається

відношенням відносної зміни напруги стабілізації ($\Delta U_{cm} / U_{cm}$) до абсолютної зміни температури при постійному I_{cm}

$$\alpha_{cm} = \frac{\Delta U_{cm}}{U_{cm} \Delta T} 100\% . \quad (2.14)$$

Із розглянутої температурної зміни ВАХ стабілітронів випливає, що низьковольтні стабілітрони ($U_{cm} < 6\text{В}$) мають від'ємний ТКН, високовольтні ($U_{cm} > 8\text{В}$) - додатний ТКН. Для зменшення температурної залежності U_{cm} послідовно зі стабілітроном під'єднують у прямому напрямі діод, який має ТНК протилежного знаку. Цей спосіб використовується в прецизійних стабілітронах типу Д818, які мають усередині одного корпусу кілька послідовно з'єднаних переходів.

Прикладом стабілітрона може бути КС 168А – стабілітрон кремнієвий, призначений для пристроїв широкого вживання, напругстабілізації 6,8В, допустима максимальна потужність не перевищує 0,3Вт. / Приклад стабістора: 2С107А – стабістор кремнієвий для спеціального вживання, напруга стабілізації $U_{cm} = 0,7\text{В}$, допустима потужність $P_{\max} < 0,3\text{Вт}$.

Конструкція стабілітронів аналогічна до конструкції випрямлювальних діодів, вибір типу корпусу залежить від потужності розсіювання. Сучасні стабілітрони (діоди в яких контролюють лавинний процес) мають напругу стабілізації кілька сотень вольт, струми – до десятків ампер.

Для того щоб отримати більшу напругу стабілізації, стабілітрони під'єднують послідовно, при цьому для компенсації розходження параметрів інколи необхідно під'єднати до них урівнюючі резистори. Паралельне вмикання стабілітронів також допустимі, але при цьому резистори під'єднуються послідовно.

Застосування стабілітронів розглянемо на прикладі найпростішого параметричного стабілізатора постійної напруги (рисунок 2.5). При збільшенні U_{ex} початково одразу зростає $U_{вых}$, робоча точка на ділянці стабілізації зміщується донизу, що означає зменшення опору стабілітрона. Струм через стабілітрон I_{cm} зростає, загальний струм у колі I зростає (струм навантаження майже не змінюється, бо напруга на кінцях стабілітрона майже постійна), збільшується падіння напруги на гасильному резисторі R_r , і відбувається такий перерозділ напруг між R_r та R_H , що збільшення U_{ex} в усталеному режимі компенсується збільшенням U_r , $U_{вых} = U_{ex} - U_r = \text{const}$.

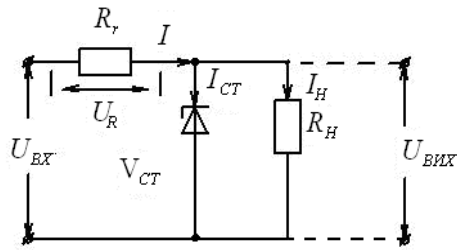


Рисунок 2.5 – Схема стабілізатора напруги

(струм навантаження майже не змінюється, бо напруга на кінцях стабілітрона майже постійна), збільшується падіння напруги на гасильному резисторі R_r , і відбувається такий перерозділ напруг між R_r та R_H , що збільшення $U_{вх}$ в усталеному режимі компенсується збільшенням U_r . Стабілітрон утримує незмінною вихідну напругу кола. Аналогічні процеси, тільки в зворотному напрямі, відбуваються при зменшенні вхідної напруги $U_{вх}$.

Форма вихідної напруги параметричного стабілізатора показана на рис. 2.6. Для стабілізації змінної напруги використовують два стабілітрони, які ввімкнені назустріч один одному (рис. 2.7 а). Форма його вихідної напруги показана на рис.2.7,б.

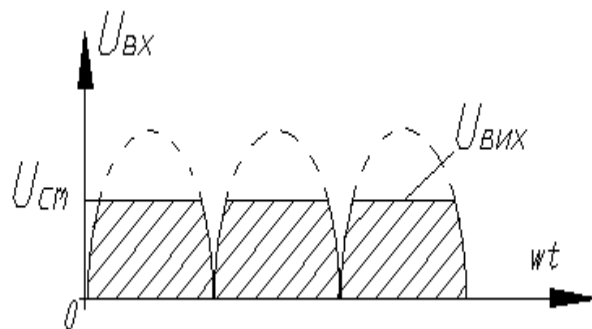


Рисунок 2..6 – Графік вихідної напруги

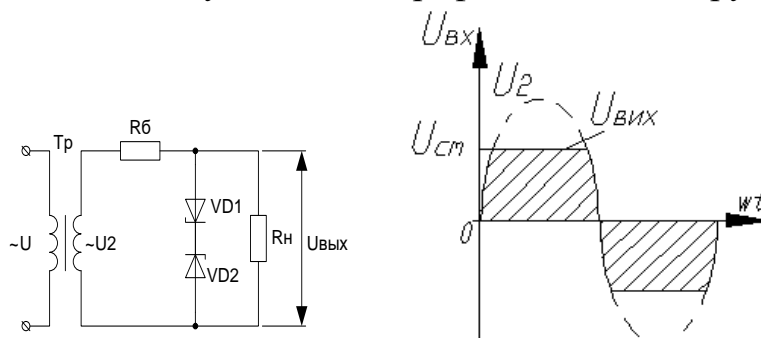


Рисунок 2..7 – Стабілізатор змінної напруги (а) і форма його вихідної напруги (б)

Для розширення діапазону стабілізованої напруги використовують додатково стабілітрони, стабістори або діоди, які

під'єднують послідовно з базовим стабілітроном, виконуючи необхідні умови при виборі цих елементів.

2.2 Окремі види та призначення напівпровідникових діодів

2.2.1 Універсальні діоди

До універсальних (високочастотних) діодів належать одноперехідні напівпровідникові прилади, що застосовують для випрямлення (при меншому електричному навантаженні), модуляції, детектування та інших нелінійних перетворювань електричних сигналів, частота яких не перевищує 1000 МГц. Третій елемент їх позначення – цифра 4.

На високих частотах можна вважати, що діод має односторонню провідність, якщо $Z_{зв} \gg Z_{np}$, де $Z_{зв}, Z_{np}$ - повні зворотний та прямий опори діода.

При прямому вмиканні діода ємність $C_{диф}$ зашунтована малим диференційним опором $r_{g_{np}}$ і можна вважати $Z_{np} = r_1 + r_{g_{np}}$. При зворотному вмиканні діода великий диференційний опір $r_{g_{зв}}$ зашунтований ємністю $C_{\bar{a}p}$, і тому на високих частотах $Z_{зв} = r_1 + 1/j\omega C_{\bar{a}p}$.

Тоді $Z_{np} = r_1 + r_{g_{np}}$; $Z_{зв} = \sqrt{r_1^2 + 1/\omega^2 C_{\bar{a}p}^2}$, і умовою односторонньої провідності є $\sqrt{r_1^2 + 1/\omega^2 C_{\bar{a}p}^2} \gg r_1 + r_{g_{np}}$, або остаточно

$$\frac{1}{\omega C_{\bar{a}p}} \gg r_{g_{np}} \sqrt{1 + \frac{2r_1}{r_{g_{np}}}}. \quad (2.15)$$

Виконання цієї умови можливе при зменшенні ємності p - n -переходу. Це стає можливим при застосуванні точково-контактного або мікросплавного способів його виготовлення. Тому універсальні діоди – це здебільшого точкові або мікросплавні діоди. Останні розраховані на більші допустимі струми і мають кращі характеристики при зворотному вмиканні.

ВАХ універсального діода (рисунок 2.8) не має ділянки насичення на зворотній гілці. Це пояснюється, зокрема, нагріванням унаслідок незадовільного відведення тепла й ударною іонізацією, що викликається неоднорідністю електричного поля у переході.

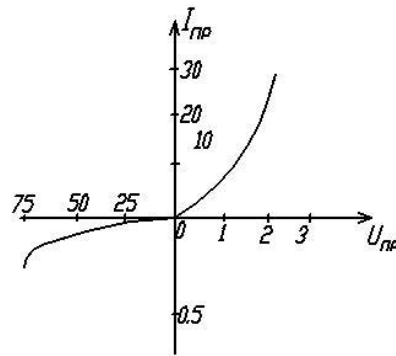


Рисунок 2.8 – ВАХ універсального діода

До параметрів універсальних діодів належать, крім перелічених у п.2.2.1, ємність діодів при заданій зворотній напрузі, а також діапазон робочих частот і температур.

2.2.2 Імпульсні діоди та перехідні процеси в них

Імпульсні діоди використовують як ключові елементи в пристроях імпульсної техніки. За конструкцією і характеристиками вони нагадують універсальні діоди. Крім високочастотних властивостей (мінімальної ємності $C_{бар}$), ці діоди повинні мати мінімальну тривалість перехідних процесів у момент вмикання та вимикання.

Перехідні процеси у діодах існують завжди й особливо виявляються при роботі з імпульсами малої тривалості або миттєвими перепадами напруг і струмів. Вони пов'язані з процесами накопичення та розсмоктування носіїв у базі діода.

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

Іншим способом зменшення часу відновлення зворотного опору бази є використання бази з нерівномірною концентрацією домішок. Це можна здійснити, наприклад, за допомогою дифузії акцепторів до НП n -типу. На рисунку 2.9 показано розподіл різниці концентрацій акцепторів та донорів і створення p - n -переходу у НП.

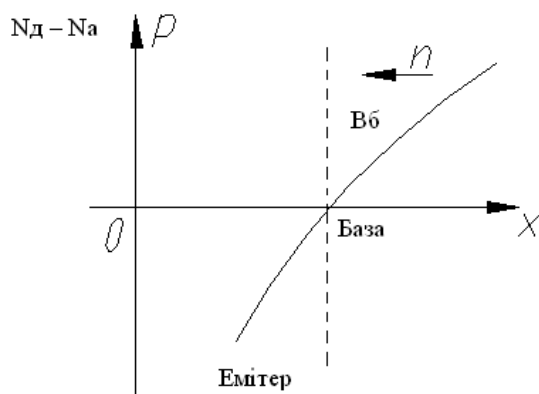


Рисунок 2.9 – Створення переходу дифузією акцепторів до НП n-типу

З рисунка видно, що концентрація домішок у базі при наближенні до p - n -переходу зменшується, тому нерівномірною буде й концентрація основних носіїв – електронів. Унаслідок цього електрони дифундують у бік p - n -переходу, залишаючи за собою некомпенсований заряд позитивних іонів. У базі виникає електричне поле E_{σ} , спрямоване в бік переходу. Під дією цього поля дірки, інжектвані до бази при вмиканні діода в пряму напрямі, накопичуються біля межі p - n -переходу. При перемиканні діода з прямого напрямку на зворотний ці дірки під дією поля p - n -переходу швидко виходять з бази до емітера, і час відновлення зворотногоопору зменшується. Діоди з такою технологією виготовлення називають діодами з накопиченням заряду.

Досить ефективним шляхом збільшення швидкодії імпульсних діодів є використання в них бар'єрів Шотткі. Як відомо, в таких діодах зовсім відсутня інжекція.

Основні спеціальні параметри імпульсних діодів: імпульсна пряма напруга U_{np} при даному імпульсі прямого струму; час усталення прямої напруги $t_{уст}$; час відновлення зворотного опору $t_{від}$. Останній параметр зашифровано в третьому елементі позначення діода (таблиця 2.2).

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

Таблиця 2.2

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

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

2.2.3 Тунельні та обернені діоди

Тунельними називають діоди, які мають на прямій гілці своєї ВАХ ділянку з негативним диференційним опором унаслідок тунельного ефекту.

Тунельний ефект полягає у тунельному проникненні електрона через p - n -перехід, тобто такому проникненні, коли електрон з ВЗ однієї області прямо потрапляє до ЗП іншої області. Це стає можливим, якщо товщина переходу дуже мала (менша 150 \AA) і якщо енергетичним рівням, заповненим електронами в одній області, відповідають такі самі вільні дозволені рівні в сусідній області. Ці умови в p - n -переходах з НП, які мають високу концентрацію домішок ($10^{19} - 10^{21} \text{ см}^{-3}$). Товщина p - n -переходів у цьому випадку має порядок 10^{-6} см , що зумовлює високу напруженість електричного поля переходу і забезпечує ймовірність тунельного ефекту. В таких НП атоми домішок внаслідок малої відстані взаємодіють між собою, і їх рівні розщеплюються в зони, які прилягають у НП p -типу до ВЗ, а в НП n -типу до ЗП. Такі напівпровідники називають виродженими, оскільки в них рівні Фермі розташовані в ЗП n -області і в ВЗ p -області.

Вигляд ВАХ тунельного діода можна пояснити за допомогою електричних діаграм (рисунок 2.10). На діаграмах рівні ВЗ та ЗП напівпровідників, що заповнені електронами, заштриховані.

При зовнішній напрузі $U = 0$ (рисунок 2.10,а) рівень Фермі всієї системи однаковий ($W_{\phi_n} = W_{\phi_p}$). Напроти зайнятих електронами рівнів p -області розміщуються зайняті рівні n -області. Тунельний перехід електронів неможливий, струм дорівнює нулю.

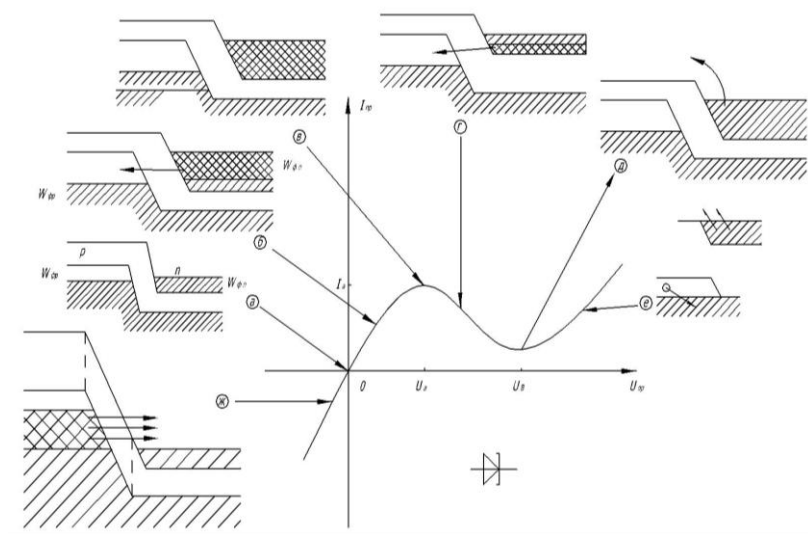


Рисунок 2.10 – ВАХ тунельного діода та її утворення

Під дією прямої U_{np} рівні Фермі зміщуються на величину $W = qU_{np}$ (рисунок 2.10,б), і напроти частини енергетичних рівнів, зайнятих електронами в n -області (подвійне штрихування), опиняться вільні рівні в p -області. Внаслідок цього відбувається тунельний перехід електронів з n -області до p -області й проходить прямий тунельний струм, величина якого пропорційна до площі перекриття вільних енергетичних рівнів ВЗ p -області й заповнених енергетичних рівнів ЗП n -області. Тунельний струм зростатиме доти, поки перекриття не стане максимальним (рисунок 2.10,в). Подальше зростання прямої напруги зменшує площу перекриття відповідних рівнів, і тунельний струм зменшується (рисунок 2.10,г). При певній прямій напрузі зайняті електронами енергетичні рівні ЗП n -області стануть напроти енергетичних рівнів ЗЗ p -області. Тунельний перехід електронів у цьому випадку стане неможливим і тунельний струм припиниться. В той самий час при прямих напругах у діоді відбувається, як правило, інжекція носіїв, що зумовлює проходження через нього дифузійного струму (рисунок 2.10Д,е), який при напрузі $U > U_e$ стає більшим, ніж тунельний струм.

Якщо діод увімкнути у зворотному напрямі, то рівні Фермі зміщуються так, як показано на рисунку 2.10,ж, і з'являється можливість тунельного переходу електронів із заповнених рівнів ВЗ p -області на вільні рівні ЗП n -області. Це приводить до проходження через діод великого зворотного тунельного струму.

P - n -переходи тунельних діодів одержують здебільшого способом сплавлення з германію, арсеніду галію та антимоніду галію. Оскільки для виготовлення таких діодів використовують вироджені НП, які за характером провідності наближаються до металів, то робоча температура приладів досягає 400°C .

Недоліком тунельних діодів є мала потужність із причини низьких робочих напруг (десяті частки вольт) і малих площ переходу.

За своїм призначенням тунельні діоди поділяються на підсилювальні (третьої елемент позначення – 1), генераторні (2) та перемикальні (3).

Приклади позначення тунельних діодів:

АИ201Г – діод тунельний генераторний, широкого застосування, з арсеніду галію, номер розробки 01, група Г.

ЗИ306Е – діод тунельний перемикальний, спеціального застосування, з арсеніду галію, номер розробки 06, група Б.

Тунельні діоди дозволяють будувати підсилювачі, генератори, змішувачі у діапазоні хвиль аж до міліметрових.

На тунельних діодах створюють і різноманітні імпульсні пристрої: тригери, мультівібратори з дуже малим часом перемикання.

Частковим випадком тунельних діодів є обернені діоди, у яких внаслідок тунельного ефекту провідність при зворотних напругах значно більша, ніж при прямих. *P-n*-переходи обернених діодів створюються напівпровідниками, що мають дещо меншу концентрацію домішок, і тому їх рівні Фермі збігаються з краями ЗП і ВЗ (рисунок 2.11,а). При вмиканні таких діодів у зворотному напрямі тунельні електрони з ВЗ *p*-області переходять на вільні рівні ЗП *n*-області, і через *p-n*-перехід тече великий зворотний струм. При прямому вмиканні діодів перекриття зон невідбувається, тунельний ефект не спостерігається, і прямий струм визначається лише дифузійним струмом. ВАХ оберненого діода показана на рисунку 2.11,б. Саме її форма дала назву даним діодам.

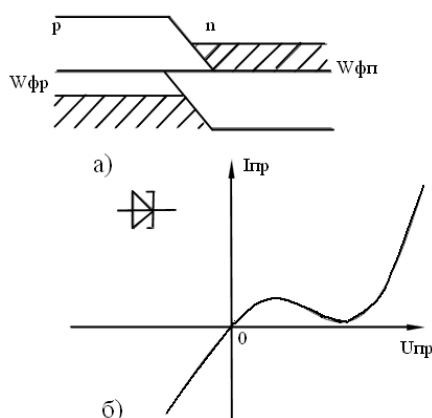


Рисунок 2.11 – Енергетична діаграма (а) та ВАХ (б) оберненого діода

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

2.3 Варикапи

Варикапи – це напівпровідникові діоди, у яких використовується залежність бар'єрної ємності *p-n*-переходу від зворотної напруги. Варикапи поділяються на підстроювальні (третій елемент позначення – 1) і варактори (третій елемент – 2).

Підстроювальні варикапи використовуються, наприклад, для електронного підстроювання резонансної частоти коливальних контурів (рисунок 2.12). На схемі рисунок 2.12 конденсатор *C* запобігає замиканню напруги зміщення через котушку індуктивності *L*. Ємність конденсатора значно перевищує бар'єрну ємність варикапа *V1*. Тому резонансна частота

контура дорівнює

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{V1}}}, \quad (2.16)$$

де C_{V1} -ємність варикапа.

Регулюючи напругу зміщення, яка подається на варикап з потенціометра R_2 через резистор R_1 , можна змінювати ємність приладу, а, отже, і резонансну частоту контура. Резистор R_1 запобігає можливості шунтування коливального контура при переміщенні повзунка потенціометра. Опір R_1 вибирають більшим, ніж резонансний опір контура.

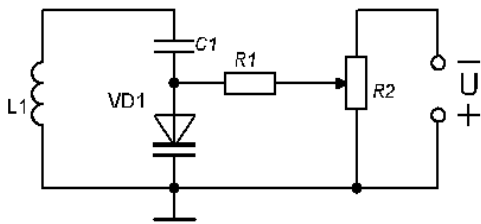


Рисунок 2.12 – Схема ввімкнення варикапа

Варикапи, які мають виражену нелінійну вольт-амперну характеристику, називають варакторами і використовують у пристроях параметричного підсилення і помноження частоти.

Основні параметри варикапів: номінальна ємність, виміряна при даній зворотній напрузі $U_{зв}$; максимально допустима зворотна напруга $U_{зв_{max}}$; добротність варикапа, яку визначають відношенням реактивного опору до опору втрат.

Розглянемо вплив параметрів еквівалентної схеми діодів на добротність варикапа.

Комплексний опір діода при зворотному вмиканні:

$$\dot{Z}_{зв} = r_1 + \frac{r_{g_{зв}}}{1 + j\omega C_{\text{бар}} r_{g_{зв}}}. \quad (2.17)$$

З формули (2.17) випливає, що реактивна складова опору діода

$$x_C = \frac{\omega C_{\text{бар}} r_{g_{зв}}^2}{1 + \omega^2 C_{\text{бар}}^2 r_{g_{зв}}^2}, \quad (2.18)$$

а активна –

$$R = \frac{r_{g_{зв}} (r_1 \omega^2 C_{\text{бар}}^2 r_{g_{зв}} + \frac{r_1}{r_{g_{зв}}} + 1)}{1 + \omega^2 C_{\text{бар}}^2 r_{g_{зв}}^2}. \quad (2.19)$$

З формул (2.18) та (2.19) можна записати вираз для добротності варикапа

$$Q = \frac{x_c}{R} = \frac{\omega C_{\text{бар}} r_{g_{36}}}{\omega^2 C_{\text{бар}} r_{g_{36}} r_1 + \frac{r_1}{r_{g_{36}}} + 1}. \quad (2.20)$$

В області низьких частот

$$\omega^2 C_{\text{бар}}^2 r_{g_{36}} r_1 \ll 1 + \frac{r_1}{r_{g_{36}}} \text{ і } Q \approx \omega C_{\text{бар}} r_{g_{36}}. \quad (2.21)$$

В області високих частот $\omega^2 C_{\text{бар}} r_{g_{36}} r_1 \gg 1 + \frac{r_1}{r_{g_{36}}}$ і тоді

$$Q = \frac{1}{\omega C_{\text{бар}} r_1}. \quad (2.22)$$

З виразів (2.21) та (2.22) випливає, що з метою збільшення добротності варикапа необхідно збільшувати зворотний опір його p - n -переходу і зменшувати опір бази.

Для виконання першої умови варикапи виготовляють з кремнію. Для одержання малого опору бази для варикапа використовують структуру $p^+ - n - n^+$, в якій база складається з двох шарів: n і n^+ (рисунок 2.13). n -шар бази має малу товщину, тому при зворотному вмиканні весь p - n -перехід розміщується в цьому шарі. Опір бази в цьому випадку утворено лише сильнолегованою n^+ -областю, і тому він має малу величину. Ця структура, крім того, дозволяє значно збільшити зворотну напругу варикапа.

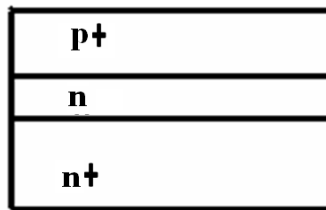


Рисунок 2.13 – Напівпровідникова структура варикапа

Якість варикапа визначається:

- ємністю та межами її можливого регулювання за допомогою прикладеної зворотної напруги;
- добротністю і частотним діапазоном;
- температурною стабільністю ємності і добротності.

Ємність варикапа

Для ємності варикапа можна записати $C = C_0 + C_v$, де C_v – ємність між електродами і виводами варикапа яка не залежить від прикладеної напруги;

C_0 – початкова ємність варикапа яка залежить від площі переходу Π і концентрації домішок у базі діоду N_d і становить від одиниць до десятків часток мікрофаради. Відносна зміна ємності шляхом зміни прикладеної зворотної напруги показана на рисунку 2.14

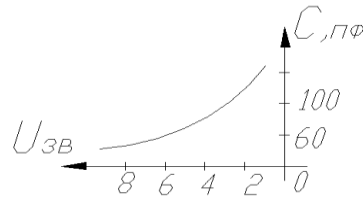


Рисунок 2.14 – Вольт-фарадна характеристика варикапа

ДІОДИ ГАННА

В 1963 році американський вчений Дж. Б. Ганн звернув увагу на те, що в однорідному напівпровіднику GaAs при прикладені напруги виникають електромагнітні коливання, тому його ще називають генератором НВЧ коливань або генератором Ганна. Його призначення - перетворення енергії джерела постійної напруги в енергію надвисокочастотних електромагнітних коливань.

Електрони нижньої долини – легкі електрони, мають рухливість μ_1 , електрони, які знаходяться в бокових долинах, називаються важкими електронами і мають рухливість μ_2 . Відношення між масами легких та важких електронів залежить від напруженості електричного поля. Якщо не спостерігається явище ударної іонізації, то концентрація в напівпровіднику буде незмінна:

$$n_0 = n_1 + n_2 .$$

При малих значеннях порогової напруги $U = E$ пор всі електрони знаходяться в нижній долині (струм визначається легкими електронами, діляночка 1 на ВАХ) :

$$I = gn_1 E.$$

При збільшенні напруженості електричного поля $U = E_{пор}$ електрони із верхньої долини переходять в бокові долини (діляночка 3 на ВАХ):

$$n_0 = n_1, \quad I = gn_2 E.$$

Для виникнення діляночки негативного диференційного опору на ВАХ необхідно, щоб відбувався одночасний перехід електронів із центральної долини в бокові долини (діляночка 2 на ВАХ). Практичну статичну ВАХ не вдається держати неперервною лінією внаслідок неоднорідності електронів біля аноду та катода, тому діляночка 2 зображена штриховою лінією.

Якщо на діод подавати постійну напругу, то електрони в напівпровіднику будуть всі легкими і струм визначається за формулою:

$$I_{\max} = gn_0 E \quad \text{при} \quad n_0 = n_1.$$

При збільшенні U $E_{\text{пор}}$ поблизу катода виникають легкі електрони, які рухаються швидше і мають менш негативний заряд відносно аноду, тому їх можна вважати некомпенсованими донорами; важкі електрони формують негативний заряд, який буде мати більш негативний заряд відносно аноду.

В середині домену виникає внутрішнє електричне поле, яке має теж направлення, що й зовнішнє поле. З ростом домену поле збільшується, а за його межами – зменшується. Внаслідок цього швидкість легких електронів зменшується, а важких – збільшується і може наступити момент, коли вони зрівняються:

$$V_1 = V_2$$

Ця швидкість визначається швидкістю від катода до аноду.

Домен формується біля катода і зникає біля аноду. При зникненні домену струм в діоді буде мінімальним. Виникнення і зникнення домену приводить до виникнення НВЧ коливань.

Загальний струм через діод Ганна визначається за формулою:

$$I = g (n_1 + n_2) E.$$

Параметри діоду Ганна:

- потужність НВЧ коливань в неперервному режимі до 100 мВт, в імпульсному – декілька сотен ватт;
- частота генерації 1-50 ГГц (30 Гц), НВЧ діапазон вище 300 МГц, частота генерації залежить від відстані між катодом і анодом;
- коефіцієнт корисної дії (1-30%, 24%);
- строк служби відносно малий, пов'язаний із перегрівом кристалу та зміною електричного поля,
- із-за наявності неоднорідностей створення домену, виникають частотні шуми. Рівень частотних і амплітудних шумів генераторів високий.

ДІОДИ ШОТТКІ

Основні математичні співвідношення для електричних характеристик контактів метал – напівпровідник отримав німецький вчений Вальтер Шотткі, внаслідок чого потенційний бар'єр на контакті метал-напівпровідник називається бар'єром Шотткі, діодом або НВЧ приладом Шотткі.

Для виготовлення діодів Шотткі використовуються підкладки із низькоомного кремнію n- типу з високоомним тонким епітаксійним шаром того ж кремнію.

На поверхню епітаксійного шару наноситься металевий електрод. Метал вибирається таким чином, щоб отримати випрямляючий контакт. Основним методом нанесення металу є його осад на монокристал напівпровідника при вакуумному випаровуванні. Для кращої адгезії метал осаджують на підігрітий монокристал (наприклад, оптимальна температура при нанесенні золота на кремній до 200°C).

Умовне позначення :

Ідеальні та реальні контакти Шотткі відрізняються за 3 ознаками :

- В ідеальному контакті немає тонкого діелектричного шару де б могло виникнути падіння напруги,
- Немає іонізованих атомів.
- В ідеальному контакті немає пасток, які б могли впливати на падіння напруги на контакті.

У напівпровідниках відстань від зони провідності до зони, коли електрон переходить в вакуум, позначається як електрична спорідненість χ (χ_i) (електрическое средство электрона), є постійною для кожного напівпровідника та вимірюється в В. Це можна визначити як робота, яку треба виконати, щоб електрон перейшов із металу в вакуум.

Під дією температури електрони будуть переходити із металу в напівпровідник і навпаки із приконтактної області напівпровідника в метал, залишаючи при цьому некомпенсований позитивний іон. Такий перехід приводить до теплової рівноваги, тобто вирівнювання рівнів Фермі та викривлення енергетичних зон на межі метал – напівпровідник

$$E_F(\text{me}) = E_F(\text{n-пр.}).$$

Такий потенційний бар'єр називається бар'єром Шотткі.

Оскільки до металу не можна прикласти позитивний потенціал, то діод Шотткі працює тільки при зворотньому включенні бар'єру.

На проходження струму через бар'єр впливають фізичні процеси – моделі переносу заряду в контакті метал – напівпровідник:

1. Діодна теорія (термоємісія над бар'єром).

Струм, що протікає через бар'єр визначається за формулою:

$$I = A^* R T^2 \exp(- \quad), \text{ де } A^* - \text{ постійна Річардсона.}$$

2. Дифузійна модель.

Струм виникає внаслідок дифузії електронів через бар'єр .

3. Тунельний механізм.

Відбувається викривлення енергетичних зон.

4. Рекомбінаційний струм.

Рекомбінаційний струм – це струм, який визначається рекомбінацією основних носіїв заряду.

5. Інжекція дірок із металевого контакту.

В діодах Шотткі такий механізм мало впливає на проходження струму через бар'єр, тому його не враховують.

У діода Шотткі нелінійна ВАХ.

Прилади Шотткі широко використовуються як цифрові логічні елементи або схеми, що виконують арифметичні операції в двоїчному коді; змінні конденсатори; польові транзистори з бар'єром Шотткі – МЕР транзистори; НВЧ – прилади.

3. ЕЛЕКТРОННО-ДІРКОВИЙ ПЕРЕХІД

3.1 Електронно-дірковий перехід та фізичні процеси в ньому

Р-n-переходи та способи їх виготовлення

Електронно-дірковий перехід між двома областями напівпровідника, одна з яких має електропровідність n-типу, а інша р-типу, називають електронно-дірковим, або р-n переходом (рис.3.1)

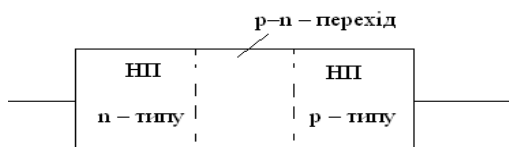


Рисунок 3.1 – Електронно-дірковий перехід

Електронно-дірковий перехід неможливо виготовити простим

з'єднанням пластин n- та р-типу, оскільки при цьому не вдається уникнути проміжного шару повітря, окислів або поверхових забруднень.

Ці переходи одержують вправленням або дифузією відповідних домішків у пластини монокристала напівпровідника, а також шляхом зростання р-n-переходу з розплаву напівпровідника з регульованою кількістю домішок.

Електронно-дірковий перехід є представником ширшого класу електронних переходів. Електричний перехід у напівпровіднику – це тонкий граничний шар між областями єдиного монокристала з різними характеристиками. Переходи створюються між областями напівпровідника з різними типами провідності (*p-n*-переходи або електронно-діркові переходи), між областями напівпровідника з електропровідністю одного типу, але з різною концентрацією домішок ($n^+ - n^-$ та $p^+ - p^-$ -переходи), між областями легованого та чистого напівпровідників (*p-i*-переходи), між областями напівпровідника з різною шириною забороненої зони (гетеро-переходи), між напівпровідником і металом тощо.

Електричні переходи створюються різними способами. Найбільш поширеними серед них є точково-контактний, сплавний, мікросплавний, дифузійний, дифузійно-сплавний, епітаксіальний способи.

Точково-контактний спосіб полягає у формуванні контакту металевої голки з поверхнею НП з наступним сплавленням за допомогою пропускання через них коротких імпульсів струму (рисунок 3.2,а).

Спосіб сплавлення здійснюється за допомогою вплавлення домішок у пластинку чистого НП, після чого матеріал домішок обпалюється. Переходи, що виготовляють цим способом, мають відносно велику площу контакту, велику ємність, а тому здатні пропускати великі струми і можуть застосовуватися в потужних напівпровідникових приладах (рисунок 3.2,б).

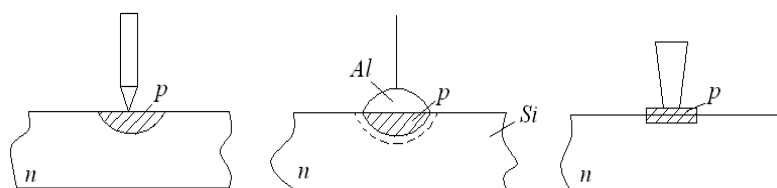


Рисунок 3.2 – Способи виготовлення р-n –переходів: а – точково-контактний; б – сплавний; в-мікросплавний

Мікросплавний спосіб зумовляє створення переходу навколо контакту металевої голки з плоским кінцем з поверхнею НП. У цьому випадку площа переходу в 2-3 рази більша, ніж площа точково-контактних переходів, але у сотні разів менша за площу сплавних переходів. Ємність мікросплавних переходів невелика, допустимий прямий струм через перехід у кілька разів

перевищує струм точкових переходів (рисунок 3.2,в).

Дифузійний спосіб полягає у введенні в НП домішок методом їх дифузії з газового або рідинного середовища при температурі, що приблизно дорівнює температурі плавлення НП. Дифузія здійснюється вздовж усієї поверхні напівпровідникової пластини або на певних її ділянках через спеціальні маски.

Дифузійно-сплавний спосіб є комбінацією сплавного та дифузійного способів. Спочатку здійснюється вплавлення домішок, а потім їх дифузія, яка забезпечує створення потрібного градієнта концентрації носіїв заряду.

Епітаксінний спосіб створення переходів полягає в нарощуванні монокристалічного шару НП з розплаву на напівпровідникову пластину, яка має таку саму кристалічну будову, як і нарощуваний шар.

Розрізняють несиметричні p - n -переходи - між напівпровідниками з концентраціями основних носіїв заряду (концентраціями домішок), що відрізняються між собою в 10^3 - 10^4 разів ($p_{p_0} \gg n_{n_0}$ або $p_{p_0} \ll n_{n_0}$), і симетричні – між напівпровідниками з приблизно однаковими концентраціями основних носіїв ($p_{p_0} \approx n_{n_0}$). Частіше на практиці застосовують несиметричні p - n – переходи.

Розрізняють також різкі та плавні p - n –переходи. Різким називають перехід, уздовж якого концентрація носіїв змінюється на відстані, меншій за дифузійну довжину цих носіїв.

$$\text{Дифузійна довжина дірок } L_p = \sqrt{\tau_p \cdot D_p} . \quad (3.1)$$

$$\text{Дифузійна довжина електронів } L_n = \sqrt{\tau_n \cdot D_n} .$$

У формулах (3.1) D_p , D_n - коефіцієнти дифузії відповідно дірок та електронів; τ_p , τ_n - середні тривалості життя носіїв. Інакше кажучи, дифузійною довжиною носіїв можна вважати відстань, яку вони проходять за час, що дорівнює середній тривалості їх життя.

Плавним називають перехід, уздовж якого концентрація носіїв (або домішок) змінюється на відстані, що перевищує дифузійну довжину.

Надалі розглядатимемо різкий перехід, оскільки саме він має односторонню провідність.

3.1.1 P - n - перехід за відсутності зовнішньої напруги

Нехай зовнішня напруга на різному переході $U = 0$ (рис. 3.3).

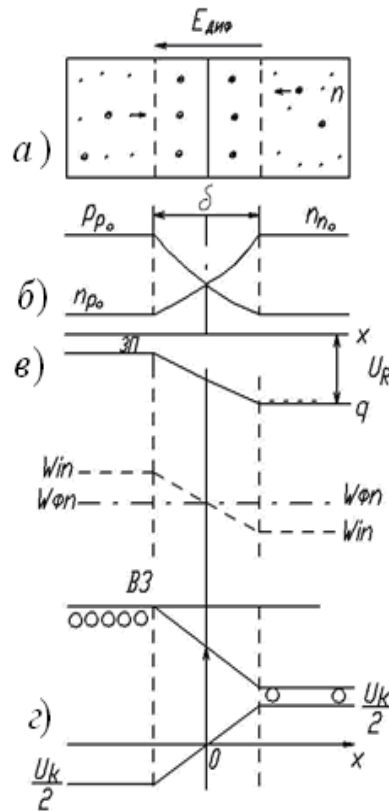


Рисунок 3.3 – P - n - перехід у рівноважному стані

Оскільки $p_{p0} \gg p_{n0}$ або $n_{p0} \gg n_{n0}$, як це впливає з визначення напівпровідників p - та n - типів, то різниця концентрацій носіїв однойменних зарядів зумовлює дифузію дірок з p -області до n -області, а електронів – з n -області до p -області. Густина загального дифузійного струму через перехід визначають за формулою

$$j_{\text{диф}} = j_{n\text{диф}} + j_{p\text{диф}} = q(D_n \frac{dn}{dx} - D_p \frac{dp}{dx}). \quad (3.2)$$

При контактному шарі напівпровідника p -типу внаслідок залишення його дірками створюється некомпенсований заряд заряд негативних іонів акцепторних домішок. У приконтатному шарі напівпровідника n -типу створюється некомпенсований заряд позитивних іонів донорних домішок (рисунок 3.3,а). Ці заряди є нерухомими, концентрація рухомих вільних носіїв біля контакту зменшується, а отже, опір переходу зростає, внаслідок чого p - n -перехід ще називають областю об'ємного заряду, або запірним шаром.

Накопичення об'ємних нерухомих зарядів у p - n –переході приводить до виникнення в ньому дифузійного електричного поля $E_{\text{диф}}$ (рисунок 3.3,а), яке має напрям, протилежний до напрямку дифузійного пересування дірок з p -області до n -області. За межами області об'ємного заряду напівпровідникові області p - та n - типів залишаються електрично нейтральними.

Електричне поле $E_{\text{диф}}$, як це бачимо з рисунка 3.3, гальмує рух основних

носіїв через p - n –перехід, але спричинює рух через нього неосновних носіїв (дірок з n -області, електронів з p -області). Інакше кажучи, дифузійне поле переходу приводить до виникнення дрейфового струму неосновних носіїв, протилежного дифузійному струмові основних носіїв. Явище виведення носіїв заряду з області, де вони є неосновними, через p - n -перехід під дією прискорювального електричного поля, називають екстракцією.

З появою дифузійного поля переходу $E_{\text{диф}}$ між n - та p -областями виникає різниця потенціалів, яку називають контактною. Враховуючи, що

$$E_{\text{диф}} = -\frac{dU_k}{dx}, \quad (3.3)$$

де U_k -контактна різниця потенціалів.

Визначимо загальну густину дрейфового струму через межу поділу p - та n -областей:

$$j_{\text{др}} = -q \frac{dU_k}{dx} (\mu_n n_{p_0} + \mu_p p_{n_0}). \quad (3.4)$$

У стані теплової рівноваги при $U=0$ (відсутності зовнішнього електричного поля або зовнішньої напруги) чим більша кількість основних носіїв залишатиме власні області, тим більша кількість неосновних носіїв буде екстрагувати через перехід під дією дифузійного поля до областей, де вони стають основними.

Отже, у відповідних областях системи двох напівпровідників створюватимуться постійні рівноважні концентрації: дірок p_{p_0} та електронів n_{p_0} у p -області; електронів n_{n_0} та дірок p_{n_0} у n -області. Дифузійний та дрейфовий струми в означеному режимі завжди компенсуватимуть один одного, тобто

$$j_{\text{диф}} + j_{\text{др}} = 0. \quad (3.5)$$

Це означає, що при зовнішній напрузі $U=0$ струм через p - n –перехід не протікає.

У момент установа режиму рівноваги контактна різниця потенціалів може бути обчислена за однією з наведених нижче формул:

$$U_k = \varphi_T \ln \frac{p_{p_0}}{p_{n_0}} = \varphi_T \ln \frac{p_{p_0} n_{n_0}}{n_i^2}; \quad (3.6)$$

$$U_k = \varphi_T \ln \frac{n_{n_0}}{n_{p_0}} = \varphi_T \ln \frac{n_{n_0} p_{p_0}}{p_i^2}, \quad (3.7)$$

де $\varphi_T = kT/q$ - температурний потенціал. При кімнатній температурі ($T=300\text{K}$) $\varphi_T = 0,026\text{В}$.

На енергетичній діаграмі вищезгадані процеси інтерпретуються таким чином. Оскільки потенціальна енергія електрона і потенціал зв'язані

співвідношенням $W = -qU$, то утворення некомпенсованих об'ємних зарядів спричинює опускання енергетичних рівнів n -області і підймання енергетичних рівнів p -області. Зміщення енергетичних діаграм областей закінчується, коли рівні Фермі W_{ϕ_n} та W_{ϕ_p} збігаються. При цьому на межі поділу ($x=0$) рівні Фермі областей проходять через середину забороненої зони, тобто у т. $x=0$ $W_{\phi_n} = W_{\phi_p} = W_i$. Як відомо, ця обставина характерна для НП з власною електропровідністю, опір яких порівняно з домішковими НП більший. Отже, опір на межі між двома НП, як і опір всього збідненого на носії заряду шару p - та n - кристалів.

Утворення потенціального бар'єра U_k у переході внаслідок зміщення енергетичних діаграм областей на величину qU_k обмежує дифузійне переміщення основних носіїв.

Рівняння (3.6) та (3.7) дозволяють визначити рівноважні концентрації неосновних носіїв p - та n -областей:

$$p_{n_0} = p_{p_0} e^{-\frac{U_k}{\varphi_T}}; \quad n_{p_0} = n_{n_0} e^{\frac{U_k}{\varphi_T}}. \quad (3.8)$$

3.1.2 P - n -перехід під дією зовнішньої напруги

Під дією зовнішньої напруги на різкий p - n -перехід через нього проходить струм, величина якого залежить від полярності підімкнення зовнішнього джерела напруги. Якщо плюс джерела підімкнено до p - області, а мінус - до n -області, то таке вмикання називають прямим. У протилежному разі йдеться про зворотнє вмикання p - n -переходу.

Пряме вмикання p - n -переходу

Вважатимемо, що до невідпрямлювальних контактів **а** і **в** (рисунок 3.4) прикладено пряму напругу U_{np} . Оскільки опір p - n -переходу значно перевищує опори нейтральних областей, то зовнішня напруга повністю падає на цьому переході. Результуюча напруженість у p - n -переході зменшується, оскільки зовнішнє електричне поле E_{np} має напрям, протилежний напрямку

$$E_{diff} \text{ (рисунок 3.4,а): } E_{p-n} = E_{diff} - E_{np}.$$

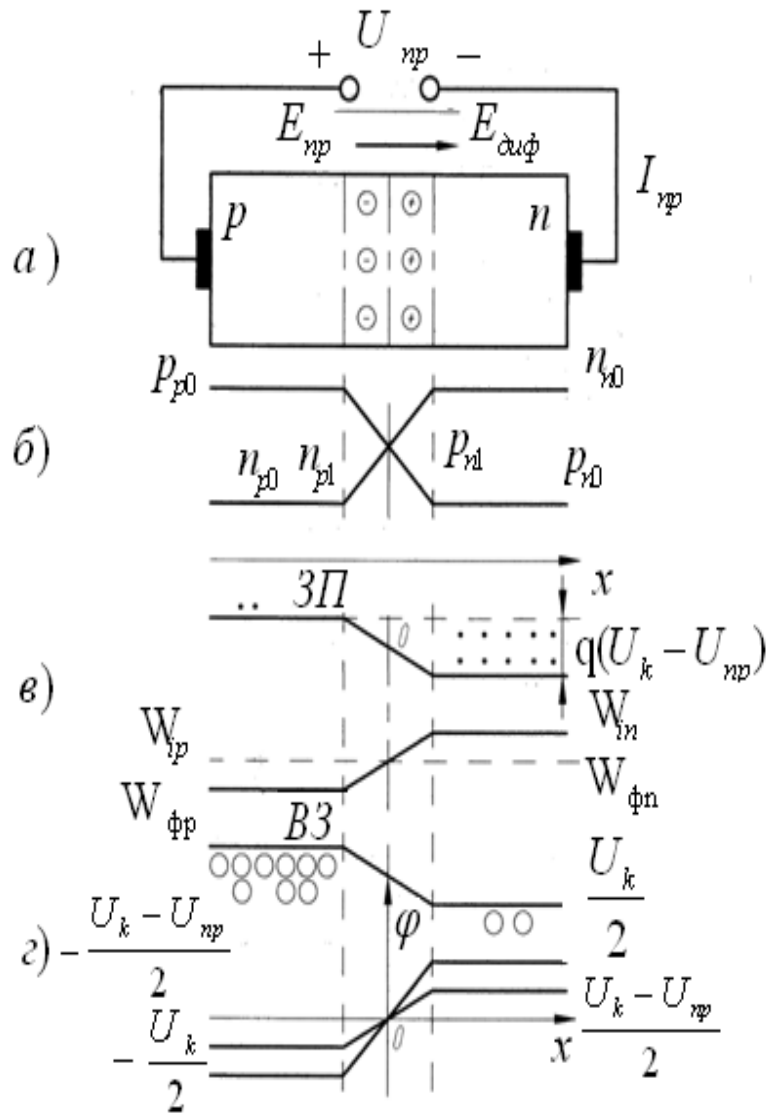


Рисунок 3.4 – Пряме вмикання р-п-переходу

Унаслідок цього зменшується потенціальний бар'єр переходу до значення $U_k - U_{np}$ (рисунок 3.4,в,г), зменшується також гальмувальна дія поля переходу на дифузійний рух основних носіїв, що приводить до зростання дифузійного струму через перехід. Дрейфовий струм при цьому не зазнає зміни, бо його величина, як це бачимо з формули (3.4), залежить від концентрації неосновних носіїв у нейтральних областях p - та n -кристалів. Ці концентрації, у свою чергу, залежать виключно від концентрації домішок у НП та від температури. Тому зменшення поля p - n -переходу, яке є прискорювальним для неосновних носіїв, приводить до зниження швидкості дрейфу цих носіїв, а їх концентрація залишається незмінною. Отже, умова термодинамічної рівноваги (3.5) порушується: $j_{diff} + j_{dr} > 0$, тобто виникає результуючий прямий струм через перехід. Величину цього струму визначають дифузійною складовою j_{diff} . Це струм основних носіїв. Унаслідок переважання дифузії над екстракцією біля меж p - n -переходу відбувається накопичення неосновних носіїв, концентрація яких зростає до величин n_{p1} і

p_{n_1} (рисунок 3.4,б):

$$p_{n_1} = p_{p_0} e^{-\frac{U_k - U_{np}}{\varphi_T}} = p_{n_0} e^{\frac{U_{np}}{\varphi_T}} ; \quad (3.9)$$

$$n_{p_1} = n_{n_0} e^{-\frac{U_k - U_{np}}{\varphi_T}} = n_{p_0} e^{\frac{U_{np}}{\varphi_T}} \quad (3.10)$$

де U_k - контактна різниця потенціалів; U_{np} - прикладена пряма напруга;

n_{p_1} і p_{n_1} - концентрації неосновних нерівноважних носіїв біля меж переходу.

Явище підвищення концентрації неосновних носіїв в p - та n - областях під дією зовнішньої прямої напруги називається інжекцією. Область, з якої інжектують носії, є емітером, а область, в якій інжекція здійснюється, називається базою. Унаслідок рекомбінації неосновних носіїв у p - та n -областях створюються градієнти їх концентрації (рисунок 3.4,б). Концентрації неосновних нерівноважних носіїв змінюються, отже, вздовж координати x за законами

$$p_n(x) = p_{n_0} + p_{n_0} (e^{\frac{U_{np}-1}{\varphi_i}}) e^{-\frac{x}{L_p}} ; \quad (3.11)$$

$$n_p(x) = n_{p_0} + n_{p_0} (e^{\frac{U_{np}-1}{\varphi_i}}) e^{\frac{x}{L_n}} . \quad (3.12)$$

З формул (3.11) і (3.12) можна одержати вираз для p_{n_1} та n_{p_1} (3.8), (3.9) на межі між p - та n - провідниками ($x=0$). Інклекція кількісно оцінюється рівнем інжекції δ_i , який визначають відношенням прирощення концентрації інжектованих носіїв до рівноважної концентрації основних носіїв

$$\delta_i = \frac{\Delta p_n}{n_{n_0}} = \frac{\Delta n_p}{p_{p_0}} .$$

При $\delta_i \ll 1$ рівень інжекції вважають низьким. При середньому ($\delta_i = 1$) та високому ($\delta_i \gg 1$) рівнях інжекції значна частина основних носіїв з метою компенсації зарядів інжектованих неосновних носіїв залишає нейтральні області НП і підходить до меж p - n -переходу. Внаслідок цього в цих областях виникає створене іонами домішкових атомів електричне поле. При низьких рівнях інжекції, властивих малопотужним напівпровідниковим приладам, що розглядаються нижче, це явище майже відсутнє. Під дією градієнта концентрації неосновні нерівноважні носії дифундують углиб НП, порушуючи електронейтральність кристала. Відновлення нейтрального стану НП відбувається за рахунок знаходження носіїв від зовнішнього джерела напруги. Це є причиною проходження струму в зовнішньому колі.

Зворотне вмикання p - n -переходу

Під час прикладення до p - n -переходу зворотної напруги $U_{зв}$ (рисунок 3.12) створюється електричне поле $E_{зв}$, яке збільшує результуюче поле переходу. Потенціальний бар'єр переходу здійснюється до величини

$U_k + U_{зв}$ (рисунок 3.5,в,г). Це приводить до зменшення дифузійного струму через перехід при незмінному дрейфовому. Термодинамічна рівновага в цьому випадку порушується на користь дрейфової складової: $j_{диф} + j_{др} < 0$. Тому через перехід і в зовнішньому буде проходити малий (порівняно з прямим струмом) струм неосновних носіїв. Оскільки процеси екстракції в цьому режимі, спричиняючи дрейф неосновних носіїв, переважають над процесами дифузії, то біля меж p - n -переходу відбувається зникання концентрації неосновних носіїв до певних значень p_{n1} та n_{p1} (рисунок 3.5,б). Ця концентрація збільшується в міру віддалення переходу згідно з законами:

$$p_n(x) = p_{n0} + p_{n0} \left(e^{\frac{U_{зв}}{\varphi_i}} - 1 \right) e^{-\frac{x}{L_p}}; \quad (3.13)$$

$$n_p(x) = n_{p0} + n_{p0} \left(e^{\frac{U_{зв}}{\varphi_i}} - 1 \right) e^{-\frac{x}{L_n}}. \quad (3.14)$$

$$E_{p-n} = E_{диф} + E_{зв}.$$

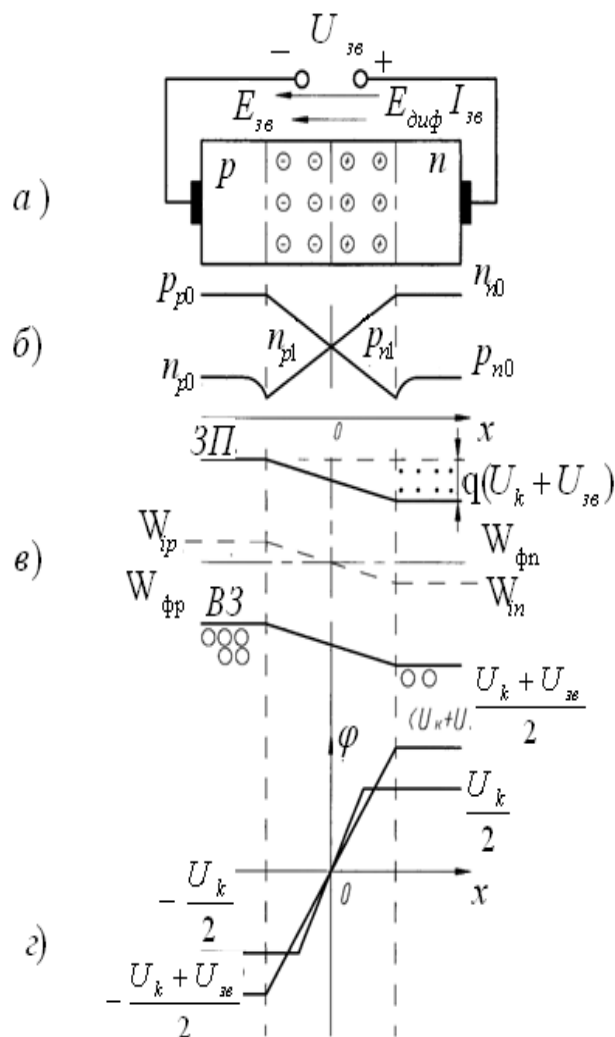


Рисунок 3.5 – Зворотнє вмикання p - n -переходу

3.3 ВЛАСТИВОСТІ p-n – ПЕРЕХОДУ

Параметри і ВАХ p-n-переходу

До параметрів p-n-переходу належать його товщина та ємності.

3.3.1 Товщина переходу

Розглянемо p-n-перехід з товщиною δ (рисунок 3.6). Ця величина складається з товщини переходу в p-області δ_p та товщини переходу в n-області і визначається формулою

$$\delta = \delta_p + \delta_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{q} \left(\frac{1}{N_D} + \frac{1}{N_A} \right) (U_R - U)}, \quad (3.15)$$

де $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ -Ф/м - електрична стала;

ε - відносна електрична проникність ($\varepsilon = 12$ для кремнію, $\varepsilon = 16$ для германію);

U_K - контактна різниця потенціалів; U - прикладена зовнішня напруга.

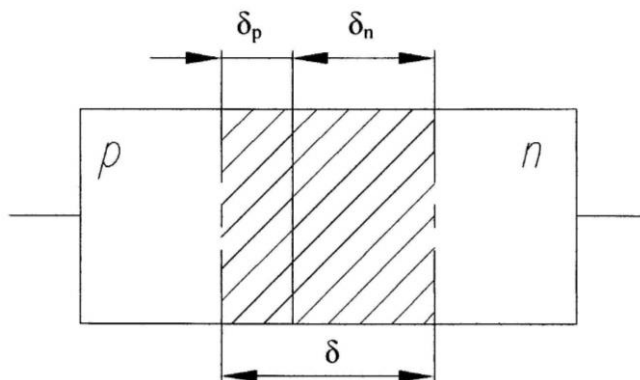


Рисунок 3.6 – P-n-перехід при $N_A > N_D$

З формули (3.15) випливає, що товщина переходу залежить від ступеня легування областей НП (від концентрацій домішок) і від прикладеної напруги.

Чим вища концентрація домішок областей N_A і N_D , тим вужчий перехід.

Для величин δ_p та δ_n існує закономірність

$$\frac{\delta_p}{\delta_n} = \frac{N_D}{N_A}, \quad (3.16)$$

тобто товщини p-n-переходу в області p і області n обернено пропорційні концентраціям домішок цих областей. Якщо $N_A \gg N_D$, тоді з (3.15) маємо

$$\delta = \delta_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{q} \frac{1}{N_D} (U_R - U)}. \quad (3.17)$$

Аналогічно при $N_A \ll N_D$,

$$\delta = \delta_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{q} \frac{1}{N_A} (U_R - U)}. \quad (3.18)$$

З формули (1.15) випливає, що збільшення прямої зовнішньої напруги U на переході ($U_K - U$) приводить до зменшення його товщини, Фізично це зумовлено тим, що при прямому ввімкненні основні носії заряду змушені рухатися в напрямку від невідпрямлювальних контактів до збідненого шару переходу, збагачуючи його. Опір переходу зменшується, сам перехід звужується (рисунок 3.7,а).

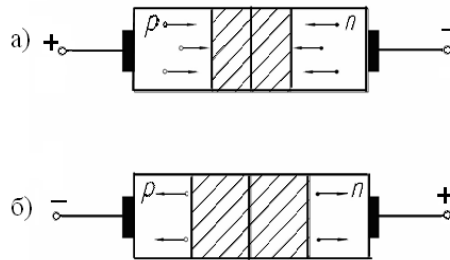


Рисунок 3.7 – Вплив напруги U на товщину переходу

Збільшення зворотної напруги на переході ($U_K + U$) приводить до збільшення його товщини. В цьому випадку основні носії заряду зміщуються в різні сторони від p - n -переходу, і збіднений шар ще більше збіднюється на рухомі носії, його опір збільшується, а перехід розширюється (рисунок 1.7,б).

3.3.2 Ємності переходу

Залежно від фізичної природи заряду, що змінюється в переході, розрізняють бар'єрну та дифузійну ємності.

Бар'єрну (зарядову) ємність визначають зміною некомпенсованого заряду іонів при зміні товщини запертого шару під дією зовнішньої напруги. Ідеальний p - n -перехід нагадує плоский конденсатор, пластинами якого є нейтральні низькоомні області НП. Отже, при використанні формули бар'єрна ємність дорівнює

$$C_{бар} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0\Pi}{\delta} = \Pi \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0 q N_A N_D}{2(N_A + N_D)(U_K - U)}}. \quad (3.19)$$

З (3.19) випливає, що бар'єрна ємність збільшується при зростанні N_A і N_D , а також при зростанні прямої напруги. При зростанні зворотної напруги бар'єрна ємність зменшується. Характер залежності $C_{бар} = f(U)$ показано на рисунку 3.8.

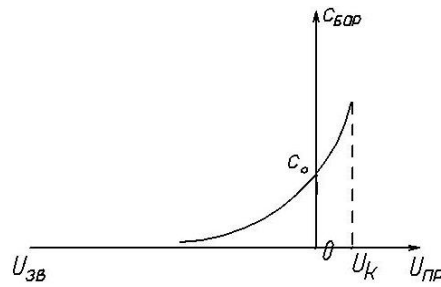


Рисунок 3.8 – Вольт-фарадна характеристика р-п-переходу

Дифузійна ємність зумовлена здебільшого процесами інжекції. Зміну заряду неосновних носіїв стосовно рівноважного рівня біля переходу при зміні прямої напруги можна розглядати як прояв деякої ємності

$$C_{\text{диф}} = \frac{dQ_{\text{інж}}}{dU_{\text{пр}}}, \quad (3.20)$$

де $Q_{\text{інж}}$ - величина інжектваного заряду.

Величина цієї ємності може бути розрахована за формулою

$$C_{\text{диф}} = \frac{q\Pi}{\varphi_T} (L_n n_{p_0} + L_p p_{n_0}) e^{\frac{U_{\text{пр}}}{\varphi_T}}. \quad (3.21)$$

Як правило, при прямому ввімкненні р-п-переходу враховують лише дифузійну ємність, тому що бар'єрна ємність становить одиниці пікофарад, а дифузійна – десятки нанофарад.

Ємності переходу враховують при складанні його еквівалентної схеми (рисунок 3.9). На схемі r_1 - розподільний опір p - та n - областей, r_n - поверхневий опір (для струмів поверхневого витоку), $r_g = \varphi_T / I_{\text{пр}}$ - диференційний опір переходу.

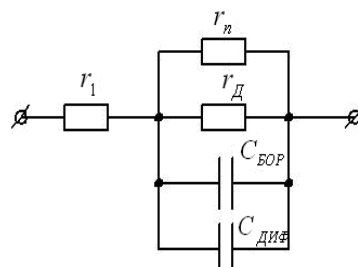


Рисунок 3.9 – Еквівалентна схема р-п-переходу

Для кімнатної температури ($T=300\text{K}$) справедлива формула Шоклі

$$r_g = \frac{26}{I_{np}}, \quad (3.22)$$

де I_{np} подають у міліамперах.

При прямому вмиканні p - n -переходу $C_{диф} \gg C_{бар}$ $r_{g_{np}} \approx r_1$, тому еквівалентна схема набуває вигляду - рисунок 3.10,а. При зворотному $C_{диф} \ll C_{бар}$ $r_{g_{зв}} \gg r_1$, і спрощена еквівалентна схема переходу має вигляд - рисунок 3.10,б.

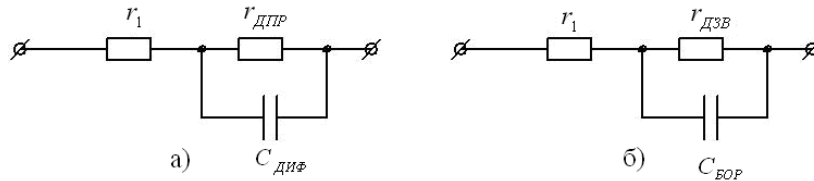


Рисунок 3.10 – Еквівалентна схема p - n -переходу: а) при прямому вмиканні ; б) при зворотному вмиканні

3.3.3 Реальна ВАХ p - n -переходу

Під час розгляду теоретичної ВАХ p - n -переходу не враховувалися термогенерація носіїв у запірному шарі, поверхневі струми витоку, падіння напруги на опорах нейтральних областей НП, а також явище пробоя при певних зворотних напругах. Тому реальна ВАХ переходу істотно відрізняється від теоретичної (рисунок 3.11).

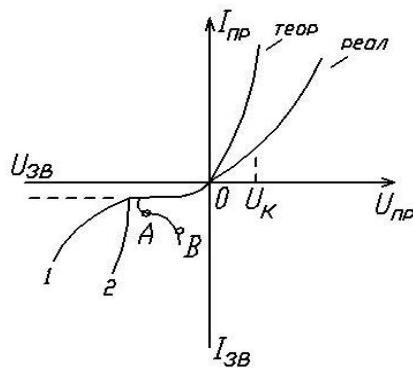


Рисунок 3.11 – Різниця між реальною та теоретичною ВАХ p - n -переходу

Генераційно -рекомбінаційні процеси в p - n –переходах

ГЕНЕРАЦІЯ- це процес створення пари електрон –дірка під дією зовнішнього фактора.

РЕКОМБІНАЦІЯ – це процес зникнення пари електрон-дірка і створення нейтрального атома.

При включенні діода в зворотньому напрямку із-за теплової генерації носії різного знаку розтягуються полем в різні напрями і не можуть рекомбінувати в $p-n$ -переході. Тому процес генерації не урівноважується процесом рекомбінації. Зворотній струм, обумовлений генерацією нерівноважних носіїв заряду в $p-n$ -переходах називається генераційним струмом. При включенні діода в прямому напрямку частина нерівноважних носіїв заряду не може подолати потенційний бар'єр, але близько до середини $p-n$ -переходу проходить їх рекомбінація.

Пробої $p-n$ – переходу

При деяких досить великих $U_{зв}$ на зворотній гілці реальної ВАХ з'являється ділянка пробою $p-n$ -переходу. Явище пробою полягає в різному зростанні зворотного струму. Існує 4 різновиди пробою: лавинний, тунельний, тепловий та поверхневий.

При **лавинному** пробої (рисунок 3.11, крива 2) відбувається ударна іонізація нейтральних атомів збідненого шару НП неосновними носіями заряду, що розвивають під час вільного пробігу достатню кінетичну енергію. Іонізація приводить до лавинного помноження вільних носіїв і до зростання $I_{зв}$. Оскільки умовою лавинного пробою є те, що довжина вільного пробігу електрона має бути значно меншою від товщини $p-n$ -переходу ($L_n \ll \delta$), такі пробої найбільш імовірні для широких переходів, коли НП леговано невеликою кількістю домішок.

Тунельний пробій (рисунок 3.11, крива 1) виникає у вузьких $p-n$ -переходах (при великих концентраціях домішок у НП), коли напруженість зовнішнього електричного поля в кремнію досягає 10В/см, а в германію - $3 \cdot 10^5$ В/см. Під дією сильного поля валентні електрони вириваються з ковалентних зв'язків, створюються пари "електрон-дірка", зростає $I_{зв}$. Для дуже вузьких переходів величини напруг пробою можуть бути невеликими.

Тепловий пробій (рисунок 3.11, крива 3) спричинюється явищем самоперегріву НП. Воно полягає в тому, що збільшення $I_{зв}$ приводить до зростання температури в переході; це, у свою чергу, зумовлює додаткову термогенерацію носіїв, зростає струм і, нарешті, перехід перегрівається, кристалічна решітка руйнується. Тому пробій такого виду є необоротним і стає можливим при порушенні режиму охолодження. Ділянка АВ з негативним диференціальним опором зумовлена тим, що збільшення кількості носіїв заряду веде до зменшення опору $p-n$ -переходу і спад напруги на ньому.

Поверхневий пробій може виникнути в місцях виходу p - n -переходу на поверхню НП, в яких створюється додатковий електричний поверхневий заряд, що значно спотворює картину поля в переході. Якщо товщина переходу біля поверхні менша від товщини переходу в глибині НП, то поверхневий пробій відбувається при менших напругах, ніж звичайно. Цю особливість необхідно враховувати при виборі захисних покриттів напівпровідникових приладів.

3.3.4 Різновиди електричних переходів та контактів

Крім p - n -переходів, у напівпровідникових приладах використовують й інші переходи та контакти. Розглянемо деякі з них.

Гетеро- переходи

Гетероперехід створюється двома НП, які відрізняються шириною забороненої зони. До таких переходів належать переходи германій-арсенід галію, арсенід галію – миш'яковий індій, германій-кремній. Розрізняють n - p - та p - n -гетеропереходи (на першому місці ставиться буква, що означає тип електропровідності НП з більш вузькою ЗЗ).

Енергетична діаграма n - p - гетеропереходу германій n -типу ($\Delta W_n = 0.72eV$) - арсенід галію p - типу ($\Delta W_n = 0.72eV$) наведена на рисунку 3.12.

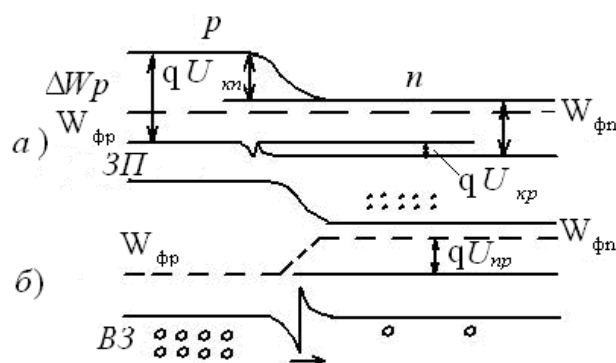


Рисунок 3.12 – Енергетична діаграма n - p - гетеропереходу в стані рівноваги (а) і при прямому вмиканні(б)

При відсутності зовнішньої напруги ($U=0$) і з'єднанні напівпровідників відбувається перерозподіл носіїв заряду, внаслідок чого вирівнюються рівні Фермі p - та n -областей і виникають потенціальні бар'єри: для електронів n -області - qU_{kn} , для дірок p -області- qU_{kp} , причому $U_{kn} > U_{kp}$ (рисунок 3.12,а).

Оскільки бар'єри для електронів і дірок відрізняються, то під дією зовнішньої прямої напруги гетероперехід забезпечує односторонню ефективну інжекцію дірок з матеріалу, що має більшу ширину ЗЗ (рисунк 3.12,б). Цю особливість називають явищем над інжекції, що робить гетероперехід ефективним інжектором.

$P^+ - p -$ та $n^+ - n -$ переходи

$P^+ - p$ -переходи ($n^+ - n$ -переходи) - це контакти двох НП одного типу електропровідності, але з різною концентрацією домішок. Знаком “+” позначають НП з більшою концентрацією акцепторів чи донорів.

У таких переходах носії з області більшої концентрації переходять до області з меншою концентрацією. Внаслідок цього в області з більшою концентрацією домішок створюється деяка кількість іонізованих атомів домішок, а з протилежного боку переходу зростає надлишок основних носіїв. Виникає дифузійне електричне поле і контактна різниця потенціалів:

$$\text{для } p^+ - p \text{ - переходу } U_k = \varphi_T \ln \frac{P^+_{p_0}}{P_{h_0}},$$

$$\text{для } n^+ - n \text{ - переходу } U_k = \varphi_T \ln \frac{n^+_{n_0}}{n_{n_0}}.$$

Оскільки в таких переходах не створюється шар з малою концентрацією носіїв заряду й опір переходів істотно не відрізняється від опорів нейтральних областей, залишаючись низькоомним, то такі переходи не мають випрямлювальних властивостей. В $p^+ - p$ - та $n^+ - n$ -переходах відсутня інжекція неосновних носіїв заряду з низькоомної області до високоомної. Якщо, наприклад, до $n^+ - n$ -переходу підімкнути джерело зовнішньої напруги плюсом до n -області, а мінусом – до n^+ -області, то з n^+ -області в n -область будуть переходити електрони, які залишаються основними носіями. При зміні полярності зовнішньої напруги з n^+ -області до n -області повинні інжекувати дірки. Проте їх концентрація настільки мала, що це явище не відбувається. Невипрямлювальні та неінжектуючі переходи використовують в омичних контактах напівпровідникових приладів.

$P - i$ та $n - i$ -переходи

P

Ці переходи займають проміжне положення між звичайними $p-n$ -переходами та описаними в попередньому пункті контактами. Створюються $p-i$ та $n-i$ -переходи між двома пластинами, одна з яких має домішкову (електронну або діркову) електропровідність, а друга – власну.

В p - i -контактах внаслідок різниці концентрацій носіїв у областях відбувається інжекція дірок з p -області до i -області, а електронів з i -області до p -області. Внаслідок малої величини електронної інжекційної складової потенціальний бар'єр на межі переходу створюється нерухожими негативними іонами акцепторів p -області, надлишковими дірками i -області, які дифундують до неї через перехід. Оскільки $p_{p_0} \gg p_i$, то запірний шар в i -області значно товщій, ніж в p -області.

Контакти металу з напівпровідниками

Уперше утворення потенційного бар'єра в приконтактній області металу і напівпровідника було виявлено в 1930р. німецьким фізиком В. Шотткі. По імені вченого контакт метал – напівпровідник n -типу, що випрямляє, називають переходом Шотткі.

Властивості таких контактів визначають співвідношенням робіт виходу електронів з металу (W_{om}) та з НП (W_{op} або W_{on}). Електрони переходять з матеріалу, що має меншу роботу виходу, до матеріалу з більшою роботою виходу.

Найважливішою особливістю переходу Шотткі порівняно з p - n -переходом є відсутність інжекції неосновних носіїв заряду. Ці переходи працюють тільки на основних носіях. Звідси випливає, що в приладах, у яких використовують перехід Шотткі, відсутня дифузійна ємність, зв'язана з нагромадженням і розсмоктуванням неосновних носіїв. Відсутність дифузійної ємності істотно підвищує швидкодію приладів. Не менш важливою особливістю таких приладів є значно менша пряма напруга. Це пояснюється тим, що під час проходження навіть невеликого початкового струму через контакт із великим опором на ньому виділяється теплова енергія, що сприяє додатковій термоелектронній емісії та зростанню числа носіїв заряду, що беруть участь в утворенні прямого струму. Для порівняння на рисунку 3.13 наведені ВАХ переходу Шотткі та p - n -переходу.

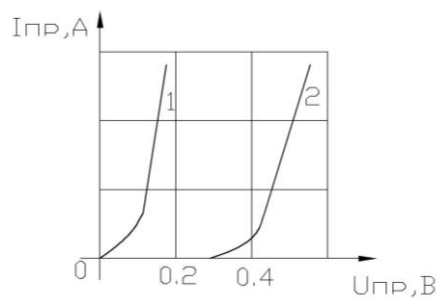


Рисунок 3.13 – ВАХ переходу Шотткі (1) та p - n -переходу

Якщо при з'єднанні металу з НП n -типу співвідношення робіт виходу $W_{on} > W_{om}$ або $W_{om} > W_{op}$, то приконтактний шар НП збагачується на основні носії заряду, його опір зменшується і не залежить від полярності зовнішньої наруги. Такий контакт має практично лінійну ВАХ і є невідпрямлювальний.

Найчастіше як метал для омичних контактів на кремнію використовують алюміній, силіциди металів (платини, нікелю), евтектику золото-кремній. Важливою характеристикою омичного переходу є питомий опір контакту.

Омичні контакти

Омичні контакти також мають лінійну ВАХ і забезпечують з'єднання НП з металевими струмопровідними елементами (виводами) напівпровідникових приладів. Крім лінійності ВАХ, контакти такого типу повинні мати малий опір і забезпечувати відсутність інжекції з металу до НП.

Ці вимоги задовольняються введенням між робочим напівпровідниковим кристалом і металом області НП з підвищеною концентрацією домішок (рис. 3.14).

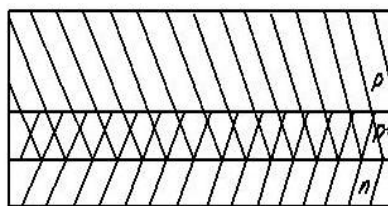


Рисунок 3.14 – Омичний контакт

Контакт між НП одного типу електропровідності (p та p^+) є невідпрямлювальним і низькоомним. Метал вибирають із міркувань забезпечення малої контактної різниці потенціалів. Для цього можна, наприклад, ввести домішки, якими леговано напівпровідник.

У цьому випадку при сплавленні металу з НП в приконтактній області утворюється тонкий шар виродженого НП, що відповідає структурі, зображеній на рисунку 3.14.

РОБОТА ВИХОДУ- це робота, яку повинен виконати електрон, щоб перейти із середовища в вакуум.

-робота виходу із металу менше роботи виходу із напівпровідника

-робота виходу із металу більше роботи виходу із напівпровідника

Існують 3 види омічних контактів:

- тунельний,
- контакт Шоткі,
- контакт Мотта.

Якщо робота виходу із металу менше роботи виходу із напівпровідника, то електрони в прикордонній області будуть переходити із металу в напівпровідник. Прикордонна область буде заряджатись основними носіями заряду – електронами. Опір такого шару буде малий - цей шар називають омічним контактом Шоткі.

Якщо робота виходу з напівпровідника менша ніж із металу, то в прикордонній області електрони будуть переходити із напівпровідника в метал. Виникає контактна різниця потенціалів, яка називається випрямляючим контактом або бар'єром Шоткі.

В омічних контактах, в яких вплив бар'єру на потік носіїв заряду буде малий внаслідок використання високолегованих областей, називаються тунельними омічними контактами

Якщо використовувати напівпровідники, у яких в прикордонній області різко змінюється концентрація основних носіїв заряду, то виникає омічний контакт Мотта.

4. Основні співвідношення для розрахунку характеристик приладів твердотілої електроніки

РІВНЯННЯ МАКСВЕЛА ДЛЯ ІЗОТРОПНОГО СЕРЕДОВИЩА

В Ізотропному середовищі параметри приладів не залежать від напрямку струму.

Для розрахунку явищ переносу заряду в твердому тілі можна скористатися ФСР (ФУНДАМЕНТАЛЬНОЮ СИСТЕМОЮ РІВНЯНЬ) – їх 5:

1.ДИФУЗІЙНО-ДРЕЙФОВІ РІВНЯННЯ

2.РІВНЯННЯ НЕПЕРЕРВНОСТІ. Рівняння неперервності показують, що концентрація змінюється безперервно.

3.РІВНЯННЯ ФЕРМІ

В рівноважному стані функція розподілу вільних часток за енергіями залежить тільки від енергії електрона і області низьких енергій.

4. РІВНЯННЯ МАКСВЕЛЛА

5. РІВНЯННЯ ПУАССОНА

Якщо не розглядати вплив зовнішніх магнітних полів, а власне магнітне поле мале, то достатньо розглянути лише рівняння Пуассона.

4.1 КВАЗІРІВНІ ФЕРМІ

В нерівноважному стані при штучній зміні концентрації носіїв заряду електронів і дірок розподіл вільних носіїв заряду не відповідає термодинамічній рівновазі. Тому в нерівноважному стані розподіл вільних електронів на енергетичних рівнях характеризується своїм квазірівнем Фермі, а для дірок - квазірівнем Фермі для дірок, які мають теж смислове значення у нерівноважному стані, що й рівні Фермі у термодинамічній рівновазі. Чим більше нерівноважні концентрації електронів і дірок відхиляються від своїх рівноважних значень, тим більше відрізняються квазірівні Фермі для електронів і дірок від положення рівня Фермі в умовах термодинамічної рівноваги.

4.2 ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ДІОДАХ

Перехідні процеси в напівпровідникових діодах пов'язані з двома явищами, які відбуваються при швидкій зміні напруги на діоді або струму через діод. Перше з них – це накопичення носіїв заряду в базі діода при його прямому включенні та їх розсмоктування при зменшенні напруги. Оскільки електричне поле невелике в базі діода, то рух носіїв заряду в базі визначається законами дифузії і відбувається повільно. Тому накопичення носіїв заряду в базі та їх розсмоктування впливають на властивості діода в режимі переключення. Друге явище, яке відбувається в діодах при переключенні, за заряд та розряд бар'єрної ємності, що також відбувається не миттєво і тому впливає на властивості діодів.

При порівнянню великій густині прямого струму через діод відбувається значне накопичення носіїв заряду в базі, а заряд та розряд бар'єрної ємності є другорядними. При малих густинах струму перехідні процеси в діодах визначаються зарядом та розрядом бар'єрної ємності, накопичення носіїв заряду в базі практично не впливає.

4.3 ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ ПРИ ВЕЛИКИХ НАПРУЗІ ТА СТРУМАХ

Робота діода в схемі з генератором напруги

При цьому режимі всі процеси відбуваються при включенні діода на генератор напруги, тобто при включенні діода в коло з малим повним опором в порівнянні з опором діода.

При подачі на діод прямої напруги струм через діод встановлюється не відразу, оскільки з плином часу відбувається накопичення в базі інжектованих через $p-n$ -перехід неосновних носіїв та зменшення в зв'язку з цим опору бази. Цей процес *модуляції опору бази* відбувається не миттєво, оскільки накопичення дірок в базі діода пов'язано з відносно повільним процесом дифузії їх від $p-n$ -переходу в глибину бази.

При накопиченні дірок та зменшення опору бази відбувається переросподіл усієї зовнішньої напруги між опором бази та $p-n$ -переходом; падіння напруги на базі діода зменшується, а на $p-n$ -переході збільшується і приводить до збільшення рівня інжекції. При довготерміновому проходженні прямого струму процес інжекції дірок урівноважується процесом їх рекомбінації. Виникає деякий урівноважений стан, що характеризується розподілом дірок в базі, при якому їх концентрація перевищує рівноважну близько $p-n$ -переходу і знижується, наближаючись до рівноважної при віддаленні від нього в глибину бази.

Гradient концентрації дірок біля $p-n$ -переходу збільшується зі збільшенням напруги на $p-n$ -переході при постійній напрузі на діоді та при зменшенні напруги на базі діода. Однак треба відмітити, що опір бази зменшується не тільки внаслідок збільшення концентрації неосновних носіїв (дірок), а й внаслідок збільшення концентрації основних носіїв (електронів). Концентрація електронів й час життя дірок. Окрім того, число накопичених дірок залежить від геометрії бази.

При переключенні діода з прямої напруги на зворотну в початковий момент спостерігається великий зворотній струм, обмежений послідовним опором бази діода. Джерело живлення разом з опором бази в цей час можна вважати генератором струму для $p-n$ -переходу.

Після переключення діода на зворотну напругу починається процес розсмоктування неосновних носіїв, накопичених в базі. Внаслідок обмеження зворотного струму концентрація дірок в базі біля $p-n$ -переходу не може миттєво зменшитися до рівноважного значення. Поки концентрація дірок в базі біля $p-n$ -переходу перевищує рівноважне значення, на $p-n$ -переході

зберігається пряме падіння напруги .

Після зменшення концентрації дірок в базі біля р-n- переходу до нуля величина зворотного струму починає зменшуватися з часом, що свідчить про зменшення градієнту концентрації дірок біля р-n- переходу . З плином часу всі накопиченні в базі дірки проходять через р-n- перехід або рекомбінують в базі діода, внаслідок чого зворотній струм зменшиться до стаціонарного значення струму насичення. В цей час закінчується поновлення зворотного опору діода.

Процес розсмоктування накопичених носіїв відбувається значно повільніше процесу їх накопичення, тому саме процес розсмоктування і визначає частотні властивості більшості діодів.

Робота діода в схемі з генератором струму

Ця робота діода відповідає включенню діода в схему з великим опором, яке і визначає величину струму в колі з діодом. Розглянемо процеси, які відбуваються в діоді при проходженні через діод імпульсу прямого струму прямокутної форми.

В перший момент проходження через діод імпульсу прямого струму на діоді падає відносно велика напруга, яка в подальшому зменшується внаслідок зменшення опору базової області діода, пов'язаного з накопиченням нерівноважних носіїв в базі.

Після закінчення процесу накопичення неосновних носіїв в базі величини напруг на діоді, на базі діода та на р-n- переході досягають встановлених значень. Розподіл дірок в базі в цей час також відповідає деякому урівноваженому значенню. Залишкова напруга на діоді зменшується до нуля після рекомбінації усіх нерівноважних носіїв в базовій області діода.

Процеси при малих напругах та струмах

Робота генератора в схемі генератором напруги.

При прикладенні до діода малої прямої напруги ефект модуляції опору бази діода внаслідок малого рівня інжекції дуже малий. Тому опір діода в

даному випадку має ємнісний характер. В перший момент напруга на р-n - переході близька до нуля, а струм через діод обмежений лише опором бази діода. При помірному заряді бар'єрної ємності напруга на р-n- переході та струм через діод наближаються до деяких встановлених значень, які визначаються активною складовою опору р-n---переходу.

В момент переключення діода напруга на бар'єрній ємності не може змінитися миттєво, воно досягає певного значення лише через деякий час. Струм через діод також залежить від часу, що характерно для ємнісного опору.

Робота діода в схемі з генератором струму.

В перший момент пропускання імпульсу через діод увесь струм складає ємнісна складова. Тому напруга на діоді в перший момент визначається падінням напруги на опорі бази діода. При заряді бар'єрної ємності збільшується і напруга на діоді.

При виключенні діода на ньому деякий час зберігається залишкова напруга, зменшується з часом. Залишкова напруга в даному випадку пов'язана з тим, що бар'єрна ємність залишається ще зарядженою. При розряді цієї ємності через активний опір р-n---переходу діода зменшується напруга на ємності та залишкова напруга на діоді.

5.ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ БТ

ДИФУЗІЙНІ ТРАНЗИСТОРИ

Основним методом виготовлення високочастотних БТ являється метод, в основу якого покладено дифузію домішок, тому вони називаються дифузійними.

Акцепторні домішки проникають на більшу глибину, оскільки коефіцієнт дифузії у них більший, а донорні домішки створюють більшу концентрацію біля поверхні. Різниця концентрацій таким чином створює n-p-n – структуру.

Дифузійний транзистор має ряд переваг, оскільки дифузійна технологія дозволяє точно контролювати глибину залягання переходів, тобто отримувати базу транзистора дуже малої величини. Концентрація домішок в базі, якщо

знехтувати невеликою їх кількістю близько емітерного переходу, зменшується в сторону колекторного переходу, що створює в базі електричне поле, яке сприяє руху носіїв заряду від емітера до колектора і відповідно зменшує час прольоту носіїв через базу.

СПЛАВНО-ДИФУЗІЙНІ ТРАНЗИСТОРИ

Для виготовлення германієвих транзисторів з робочими частотами в десятки-сотні мегагерц використовують технологію, де область бази та колекторний перехід отримують методом дифузії, а емітерний перехід – вплавленням.

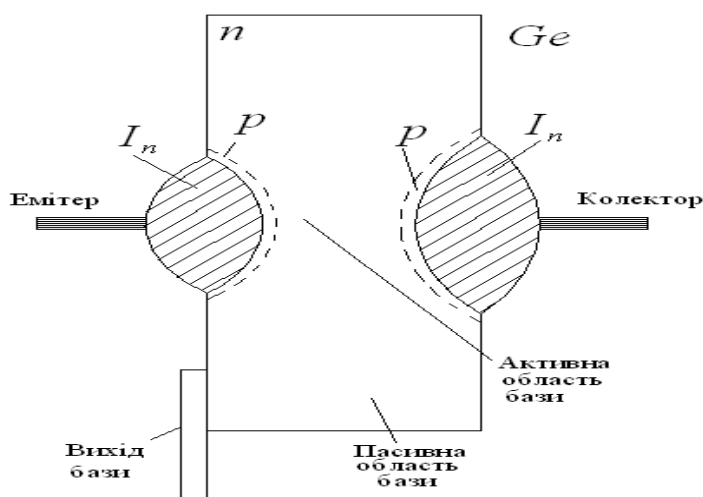


Рис. 5.1 Сплавно-дифузійний транзистор.

Дифузія домішок відбувається із емітерного навіску, який знаходиться у розплавленому стані. Транзистори, виготовлені за допомогою такого методу, називаються сплавно – дифузійними.

Для виготовлення таких транзисторів на основі германію р – типу в емітерний навісок вводиться сурма, яка має більший коефіцієнт дифузії, і індій, у якого коефіцієнт дифузії малий. При вплавленні такого навіску сурма дифундує із нього на значно більшу глибину, а індій – на малу. Внаслідок різної розчинності концентрація індію в рекристалізованій області значно більша, ніж сурми. Таким чином утворюється розподіл домішок близький до ідеального для дрейфового транзистора.

ТРАНЗИСТОРИ «МЕЗА»

В пластину напівпровідника проводиться дифузія речовини, яка змінює тип електропровідності основного матеріалу. Потім проводиться шліфування однієї сторони так, що утворюється структура р-п; на пластинку випаровуванням в вакуумі наносяться полоски для утворення емітерного та базового контактів. Для кремнієвих транзисторів, наприклад, емітерний контакт виготовляють із алюмінію, а базовий – із золота. Після цього проводиться впалення. Транзистор, виготовлений таким способом, ще не має високих частотних властивостей, оскільки механічним шляхом важко отримати малу площу колектора, а відповідно, і малу його ємність. Тому проводиться травлення частини кристалу, при цьому область його біля контактів емітера та бази захищається. Після травлення утворюється столообразна структура.

Перевагами транзистора «меза» є хороший тепловідвід від колектора, оскільки контакт його з виводом відбувається на великій площі. Столообразна структура має велику механічну прочність, а пластинка напівпровідника – великий розмір, що полегшує її монтаж.

Транзистори «меза» можуть мати граничні частоти за струмом 500 МГц, а ємність колектора 1 пФ.

Однак при виробництві таких транзисторів виникають труднощі з виготовленням бази, якщо поверхня оброблена погано.

ПЛАНАРНІ ТРАНЗИСТОРИ

Відмінність планарних транзисторів в тому, що покриття пластини напівпровідника шаром окису, нанесення фоторезиста, його засвічення, травлення та дифузія повторюються щоб отримати базову та емітерну області. Частіше планарну технологію використовують при виготовленні кремнієвих транзисторів, оскільки у цьому випадку шари SiO_2 простим методом – окисленням вихідної пластини.

При планарній технології значно покращуються параметри транзисторів, особливо частотні характеристики. Це обумовлено тим, що у цьому випадку можна проводити селективну дифузію, тобто вводити домішки тільки в невелику обмежені області. Оптичні методи, які застосовуються при фотолітографії, дають можливість краще і з більшою точністю суміщати ці області. Таким чином стало можливим виготовляти транзистори з товщиною бази в долі мікрметра і розмірами переходів в одиниці мікрметрів. Робочі частоти планарних транзисторів сягають до 10 ГГц.

КОНВЕРСІЙНІ ТРАНЗИСТОРИ

Технологічно конверсійні транзистори нагадують сплавно-дифузійні транзистори. Для їх виготовлення використовують германій, до якого вводять одночасно два типи домішок – донорну та акцепторну (мідь). Мідь відрізняється високим коефіцієнтом дифузії в германії, завдяки цьому при вплавленні емітера відбувається дифузія міді з германію в емітерний навісок. Таким чином із шару, що прилягає до емітера, акцепторна домішка зникає, змінюється тип електропровідності, тобто відбувається конверсія. Такий спосіб дає змогу отримати тонкі базові шари з великою площею, відповідно і потужні високочастотні транзистори.

6. СОНЯЧНІ ЕЛЕМЕНТИ

Напівпровідниковий фотоелемент (сонячний елемент) – це напівпровідниковий прилад з випрямляючим електричним переходом, який служить для безпосереднього перетворення світлової енергії в електричну.

Фотоелемент працює без зовнішніх джерел живлення бо сам являється джерелом електричної енергії.

При освітленні фотоелемента внаслідок поглинання квантів світла в р-п – переході та в областях, що близько прилягають до нього, відбувається генерація нових носіїв заряду. Дифузійне електричне поле, яке виникає в р-п-переході, проводить розподіл нерівноважних носіїв заряду. Іншими словами, з точки зору енергетичної діаграми р-п –переходу нерівноважні електрони скочуються з потенційного бар'єру та попадають в п-область, а дірки – в р-область. Внаслідок накопичення цих носіїв заряду між областями виникає додаткова різниця потенціалів - фото- е.р.с.

Ця складова фото-е.р.с. є основною в фотоелементах, але існують і інші. При освітленні напівпровідника з'являється градієнт концентрації електронів і дірок, які дифундують від освітленої поверхні в глибину напівпровідника. Але коефіцієнти дифузії електронів і дірок відрізняються, тому виникає друга складова фото-е.р.с. Окрім цього, при наявності на освітленій поверхні напівпровідника пасток захвату носіїв одного знаку виникає третя складова фото-е.р.с. внаслідок дифузії в глибину напівпровідника заряду другого знаку.

ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА КОНСТРУКЦІЯ СОНЯЧНОГО ЕЛЕМЕНТА

Фотоелементи широко використовуються у вигляді сонячних батарей, які служать для перетворення сонячного світла в електричну енергію. Для цієї мети використовують кремнієві фотоелементи.

Електронно – дірковий перехід в монокристалічній пластині кремнію з електропровідністю р-типу створюють дифузією фосфору або сурьми. При великій концентрації донорів в приповерхневому шарі кремнію провідність п-області стає високою. Тому не випрямляючий контакт до цієї області можна виготовити у вигляді кільця або рамки, залишивши поверхню кристалу доступною до освітлення.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ПАРАМЕТРИ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Вольт-амперні характеристики.

Крапки перетину ВАХ з вісю напруг відповідає значенням фотое.р.с. або напругам холостого ходу при різній освітленості.

Крапки перетину ВАХ з вісю струмів відповідають значенням струмів

короткого замикання, які залежать від площі випрямляючого електричного переходу фотоелемента.

За ВАХ при різній освітленості фотоелемента можна вибрати оптимальний режим роботи фотоелемента, тобто оптимальний опір навантаження, при якому буде виділятися максимальна потужність. Оптимальному режиму роботи фотоелемента відповідає найбільша площа прямокутника з вершиною на ВАХ при даній освітленості.

Світлові характеристики фотоелемента.

Світлові характеристики фотоелемента – це залежність фото-е.р.с. та струму короткого замикання від світлового потоку або освітленості фотоелемента. Сублінійність світлових характеристик пов'язана зі зменшенням висоти потенційного бар'єру при накопиченні збиткового заряду електронів в n -області і дірок в p -області.

Спектральні характеристики фотоелемента.

Спектральна характеристика фотоелемента – це залежність струму короткого замикання від довжини падаючого світла. Вони аналогічні спектральним характеристикам фотодіодів, виготовлених на основі того ж напівпровідника. Максимум спектральної характеристики кремнієвих фотоелементів майже відповідає максимуму спектрального розподілу енергії сонячного світла. Тому саме кремнієві фотоелементи використовують для створення сонячних батарей.

КОЕФІЦІЄНТ КОРИСНОЇ ДІЇ (ККД):

К.к.д. - це відношення максимальної потужності, яку можна отримати за допомогою фотоелемента, до повної потужності променевого потоку, що падає на робочу поверхню .

7.ТЕРМІСТОРИ , БОЛОМЕТРИ, ПОЗИСТОРИ

ТЕРМІСТОРИ.

Термістор – це напівпровідниковий прилад (резистор), у якого використовується залежність опору напівпровідника від температури.

Зменшення опору напівпровідника зі збільшенням температури може бути обумовлено 3 причинами:

- збільшення концентрації носіїв заряду;
- **збільшення їх рухливості;**
- **фазові перетворення напівпровідника.**

1 – характерне для термісторів, виготовлених із матеріалів монокристалів ковалентних напівпровідників (кремній, германій, карбід кремнію, сполуки A^3B^5). Такі напівпровідники мають від'ємний температурний коефіцієнт опору в діапазоні температур, що відповідають домішковій електропровідності, коли не всі домішки іонізовані, коли концентрація носіїв заряду змінюється внаслідок іонізації власних атомів напівпровідника. В обох випадках залежність опору напівпровідника визначається зміною концентрації носіїв заряду, оскільки температурні зміни рухливості дуже малі.

2– термістори виготовлені із окисних напівпровідників – окисів металів перехідної групи таблиці Менделєєва з переважним іонним зв'язком між атомами. Для металів перехідної групи характерна наявність незаповнених електронних оболонок та змінна валентність. При створенні окисла в певних умовах в однакових кристалографічних положеннях з'являються іони з різними зарядами. Електропровідність таких матеріалів пов'язана з обміном електронами між сусідніми атомами, тому ці електрони (дірки) можна вважати вільними носіями заряду, а концентрацію – постійною в робочому діапазоні температур термістора.

Внаслідок сильної взаємодії носіїв заряду з іонами рухливість носіїв заряду в окисному напівпровіднику стає малою та експоненційно зростає з ростом температури. Таким чином температурна залежність опору термістора із окисного напівпровідника така ж як і у термісторів із ковалентних напівпровідників, однак коефіцієнт температурної чутливості в цьому випадку характеризує зміну рухливості носіїв заряду, а не зміну концентрації.

3- в окислах ванадію V_2O_4 , V_2O_3 при температурі фазових перетворень (68 та - 110⁰C) спостерігається зменшення питомого опору на декілька порядків, Це явище може бути використано для створення термісторів з великим негативним температурним коефіцієнтом опору в діапазоні температур, що відповідають фазовому перетворенню.

ПАРАМЕТРИ ТЕРМІСТОРІВ

1. Номінальний опір термістора – це опір при певній температурі (20^0). Термістори виготовляють з допустимим відхиленням від номінального значення 20, 10, та 5%. Номінальний опір для різних типів термісторів коливається від декількох Ом до декількох сотен Ом.

2. Коефіцієнт температурної чутливості- B - це коефіцієнт в показнику експоненти температурної характеристики термістора. Його значення залежить від матеріалу термістора і майже постійне для різних типів термісторів (знаходиться в межах від 700 до 1500К) .

3. Температурний коефіцієнт опору термістора – показує відносну зміну Опору термістора при зміні температури на один градус.

Значення температурного коефіцієнта опору при кімнатній температурі для різних термісторів знаходиться в межах: $-(0,8 - 6,0) 10^{-2} K^{-1}$.

4. Коефіцієнт розсіювання термістора H – чисельно рівний потужності, яка розсіюється термістором при різниці температур термістора та навколишнього середовища на один градус, тобто чисельно рівний потужності, яку треба виділити в термісторі, щоб нагріти його на один градус.

5. Максимально - допустима температура термістора – це температура, при якій не відбувається необратимих змін параметрів та характеристик термісторів. Вона визначається не тільки властивостями термістора а й його конструктивними особливостями.

6. Максимально допустима потужність розсіювання термістора – це потужність, при якій термістор, що знаходиться в стані спокійного повітря при температурі $20^0 C$, розігрівається при проходженні струму до максимально допустимої температури. При зменшенні температури навколишнього повітря, а також при роботі термістора в середовищі, що забезпечує кращий тепло відвід, потужність розсіювання може перевищувати максимально допустиме значення.

7. Коефіцієнт енергетичної чутливості термістора G - чисельно рівний потужності, яку необхідно підвести до термістора для зменшення його опору на 1% :

$$G = H \backslash TCR.$$

8. Постійна часу термістора – це час, протягом якого температура термістора зменшиться в на 63% (в e - разів) по відношенню до різниці температур термістора та навколишнього середовища. Для різних типів термісторів постійна часу знаходиться в межах від 0,5 до 140с.

БОЛОМЕТРИ.

НАПІВПРОВІДНИКОВИЙ БОЛОМЕТР – це прилад, який служить для індикації та визначення теплового випромінювання (оптичного або інфрачервоного діапазону частот електромагнітного випромінювання).

За звичай болометри складаються з двох плівкових термісторів (товщиною до 10 мкм). Один із термісторів являється активним, тобто безпосередньо на нього діє вимірюване випромінювання. Другий термістор – компенсаційний, який служить для компенсації можливих змін температури навколишнього середовища.

ПАРАМЕТРИ БОЛОМЕТРІВ:

- опір активного термістора болометра при кімнатній температурі;
- робоча напруга;
- чутливість при певній частоті модуляції променевого потоку, рівна відношенню корисного сигналу, що знімається з болометра на вхід підсилювача, до потужності випромінювання, що падає на болометр;
- поріг чутливості, чисельно рівний потужності випромінювання, яка викликає сигнал, еквівалентний рівню власних шумів болометра, тобто поріг чутливості визначається мінімальною потужністю випромінювання, яку при даних умовах здатний зареєструвати болометр;
- постійна часу, що характеризує теплову інерційність активного термістора;
- рівень власних шумів.

ПОЗИСТОРИ.

Позистори – це напівпровідникові резистори з позитивним температурним коефіцієнтом опору.

Позистори виготовляють на основі титанату – барієвої кераміки, питомий опір якої значно зменшено внаслідок введення домішок.

Різде збільшення питомого опору титанату барію відбувається за рахунок тетрагонально – кубічного фазового перетворення, тобто в діапазоні температур вище точки Кюрі, коли титанат барію переходить із сегнетоелектричного до параелектричного становища.

Інколи для виготовлення позисторів використовують монокристалічний кремній, германій або інші напівпровідникові матеріали. Принцип дії їх оснований на зменшенні рухливості носіїв заряду при збільшенні температури внаслідок збільшення їх розсіювання на теплових коливаннях атомів кристалічної решітки.

8.Інтегральні схеми

ІНТЕГРАЛЬНА МІКРОСХЕМА - це мікроелектронний виріб, який виконує певну функцію перетворення та обробки сигналу і має не менше 5 елементів, що нероздільно зв'язані та електрично з'єднані між собою так, що пристрій розглядається як єдине ціле.

ІМС – це мікроелектронний пристрій, який має велику кількість елементів та компонентів, що виконують функціональні обробку сигналів і являє собою одне ціле при прийманні та експлуатації.

Основними параметрами ІМС є :

- густина (плотність) упаковки – це число елементів електронної схеми в одному кубічному сантиметрі об'єму ІМС;
- ступінь інтеграції визначається кількістю елементів, що входять до складу ІМС: до 10 елементів - мала, від 10 до 100 – середня, від 100 до 1000 – вища, більше 1000 - зверхвелика.

ІМС за технологічними особливостями бувають:

- біполярні ІМС;
- МДН –ІМС.

За конструктивно-технологічними особливостями бувають:

- Напівпровідникові ІМС;
- Гібридні ІМС.

Напівпровідникова ІМС - це ІМС, всі елементи якої та міжелементні з'єднання виконані в об'ємі і на поверхні напівпровідника.

Гібридна ІМС – це ІМС, пасивні елементи якої виконані нанесенням різних плівок на поверхню діелектричної підкладки із скла, кераміки або ситалу, а активні елементи – навісні напівпровідникові прилади без своїх корпусів.

Елементами ІМС називають МС або частину МС, які не можуть складати собою одне ціле при прийманні або експлуатації.

Компоненти виконують функції радіо- або електроелементів-, але не можуть бути використані як самостійна частина.

ІМС поділяються:

- на напівпровідникові і плівкові.

В плівкових ІМС на діелектричну пластину наносяться плівки, в яких формуються всі елементи. Такі ІМС виготовляють за допомогою тонко- та товсто плівкової технологій. Якщо товщина плівки до 1мкм – тонко плівкова

технологія, 2мкм – товсто плівкова технологія.

ІМС складаються із активних та пасивних елементів. До активних елементів відносяться : діоди, транзистори; до пасивних: резистори, конденсатори.

БІПОЛЯРНИЙ ТРАНЗИСТОР.

Структура БТ в ІС відрізняється від структури дискретного транзистора ізоляцією підкладки, значно меншими розмірами.

ДІОД.

Цей активний елемент використовується в логічних схемах.

ДИФУЗІЙНІ РЕЗИСТОРИ.

Дифузійні резистори, як і інші резистивні елементи, характеризують наступні параметри: діапазон номінальних значень опору, допуски за опором, температурний коефіцієнт опору, допустима потужність розсіювання та максимальна напруга.

ПЛІВКОВІ РЕЗИСТОРИ.

Основою плівкового резистора є резистивна плівка із металу (хром, тантал, паладій, металевого сплаву (нихром) або металокераміки (кермет). Резистивну плівку певної конфігурації наносять на діелектричну підкладку гібридної ІМС або на окислений кристал напівпровідникової ІМС.

ДИФУЗІЙНІ КОНДЕНСАТОРИ.

Як конденсатори ІМС часто використовують бар'єрну ємність електронно – діркового переходу, зміщеного у зворотньому напрямку. Такий пасивний елемент зручно формувати одночасно з формуванням транзисторної структури або використовувати безпосередньо електронно – діркові переходи транзисторних структур.

МДН – КОНДЕНСАТОРИ.

Як діелектрик у такого конденсатора використовують шар двоокису кремнію, яким покритий кристал напівпровідника. Однією обкладкою конденсатора є шар металу, нанесеного на поверхню шару двоокису кремнію, другою обкладкою – є сильно легована область напівпровідника.

ПЛІВКОВІ КОНДЕНСАТОРИ.

Плівкові конденсатори формують на діелектричній підкладці ГІМС. Як діелектрик такого конденсатора використовують різні матеріали, але найбільше – моноокис кремнію.

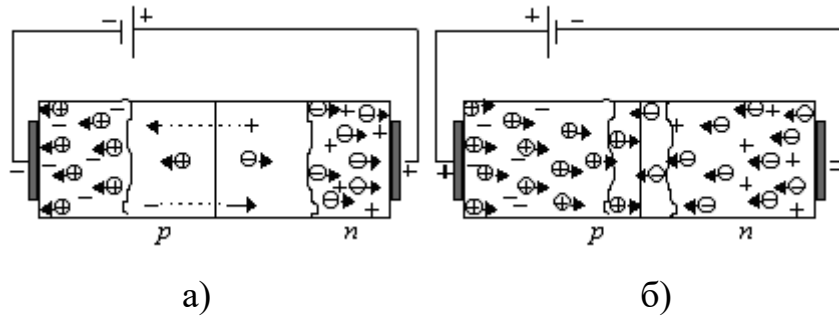
Дисципліна «Твердотілі компоненти мікро-та наноелектроніки» є курсом спеціального профілю для підготовки бакалаврів зі спеціальності 153 «Мікро-та наносистемна техніка» В навчальному посібнику викладено основні короткі теоретичні відомості про твердотілі структури, надано основні формули для розрахунку параметрів та характеристик діодних-, транзисторних-, та оптоструктур і елементів інтегральних схем. Розглянуто, як приклад, розрахунок параметрів та характеристик твердотілих структур за вихідними даними.

1 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ТА ХАРАКТЕРИСТИК ДІОДНИХ ТА ТВЕРДОТІЛИХ СТРУКТУР

1.1 Малопотужні діоди

Напівпровідниковим діодом називають напівпровідниковий прилад з одним електричним р-п переходом та двома зовнішніми виводами, в якому використовують ті чи інші властивості р-п переходу.

Малопотужні діоди відрізняються від інших значенням теплового опору R_T (100- 130 °C/Вт) та середнім значенням струму, що випрямляється за період $I_{впр} < 400\text{мА}$.



а) зворотня напруга,
б) пряма напруга

Рисунок 1.1 - Принцип роботи р-п переходу

У більшості діодів малої та середньої потужності допустимий прямий струм, як правило, не перевищує точку інверсії, а у силових потужних діодів допустимий струм може бути вище цієї точки [1].

Як приклад, розглянемо розрахунок параметрів та характеристик малопотужного кремнієвого діода.

Вихідні дані:

- Коефіцієнт теплової дифузії $D_0 = 10,5 \text{ см}^2/\text{с}$
- Енергія іонізації акцепторів $\Delta E_{\text{акт}} = 3.66 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ Дж}$
- Постійна Больцмана $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ Дж/К}$
- Питомий опір $\rho_n = 4.2 \text{ Ом} \times \text{см}$
- Градієнт концентрації $a = 2.886 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$
- Рухливість дірок $\mu_p = 480 \text{ см}^2/\text{Вс}$
- Кімнатна температура $T_w = 300\text{К}$
- Концентрація електронів у власному напівпровіднику $n_i = 1.6 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$
- Заряд електрона $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Кл}$
- Діелектрична постійна $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ Ф/м}$
- Ширина забороненої зони $\Delta E_g = 1.11 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ Дж}$
- Діелектрична проникливість 11,8
- Площа перерізу напівпровідника $A_{\text{пер}} = 0.283 \text{ мм}^2$
 $\phi_t = 0.0259 \text{ В}$

Напруга пробою плавного р-п переходу

$$U_{np} = 60 \cdot \left(\frac{\Delta E_g}{1,1 \cdot q \cdot} \right)^{1,2} \cdot \left(\frac{a}{3 \cdot 10^{20}} \right)^{-0,4} \quad (1.1)$$

$$U_{np} = 154,73 \text{ В}$$

Максимальна зворотня напруга плавного р-п переходу:

$$U_{max} = 0.5 U_{np} \quad (1.2)$$

$$U_{max} = 77.36 \text{ В}$$

Контактна різниця потенціалів плавного р-п переходу:

$$\varphi_k = \varphi_t \cdot \left(1.61 \cdot \text{Log} \left(\frac{3\varepsilon\varepsilon_0 \cdot \varphi_t \cdot a^2}{qn_i^3} \right) + 0.8 \right) \quad (1.3)$$

$$\varphi_k = 0.604 \text{ В}$$

Ширина ОПЗ при U_{max} і при нульовій U_0 :

$$\delta(U) = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot \varepsilon\varepsilon_0 \cdot (\varphi_k - U)}{q \cdot a}} \quad (1.4)$$

$$\delta(-U_{max}) = 5.959 \times 10^{-6} \text{ м}$$

$$\delta(0) = 1,179 \times 10^{-6} \text{ м} .$$

Бар'єрна ємність при U_{max} :

$$C_{бар} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 A_{per}}{\delta(-U_{max})} \quad (1.5)$$

$$C_{бар} = 4,95 \text{ пФ} .$$

Побудуємо ВАХ діода .

Зворотня гілка ВАХ:

- Коефіцієнт дифузії неосновних носіїв D_p заряду та їх час життя τ_p :

$$D_p = \frac{k \cdot T_w}{q} \cdot \mu_p \quad (1.6)$$

$$D_p = 12.42 \text{ см}^2/\text{с} .$$

$$\tau_p = \frac{L_p^2}{D_p} \quad (1.7)$$

$$\tau_p = 8.052 \times 10^{-6} \text{ c .}$$

- Струм насичення:

$$I_s = q \cdot n_i^2 \cdot \frac{D_p \cdot A_{per}}{C_b L_p} \quad (1.8)$$

$$I_c = 1.199 \times 10^{-13} \text{ .}$$

- Генераційний стум:

$$I_g(U) = \frac{A_{per} \cdot q \cdot n_i}{2\tau_p} \cdot \sqrt[3]{\frac{12\epsilon\epsilon_0 \cdot (\phi_k - U)}{q \cdot a}} \quad (1.9)$$

$$I_g = 2,68 \times 10^{-16} \text{ A .}$$

- Загальний зворотній струм:

$$I_1(U) = I_s \left(\exp\left(\frac{U}{\phi_t}\right) - 1 \right) - I_g(U) \quad (1.10)$$

- Загальна зворотня щільність струму:

$$J_1(U) = \frac{I_1}{A_{per}} \quad (1.11)$$

За формулою (1.10) побудуємо зворотню гілку ВАХ.

Таблиця 1.1 - Дані вольтамперної характеристики

U(V)	0	-10	-20	-30	-40	-50
I(mkA)	0	-0,761	-0,929	-1,046	-1,139	-1,217

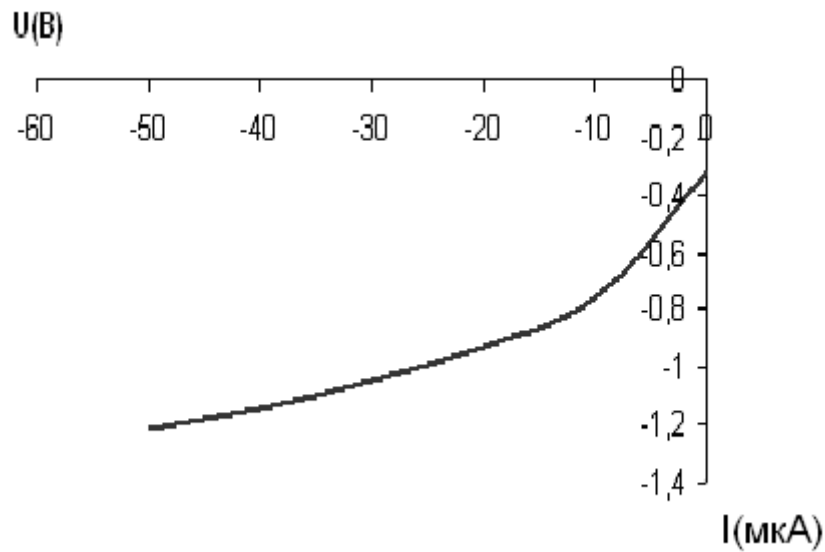


Рисунок 1.2 - Вольтамперна характеристика діода (зворотня гілка)

1.2 Надвисокочастотні діоди

Надвисокочастотний напівпровідниковий діод (НВЧ- діод) - це напівпровідниковий діод, який використовують для обробки надвисокочастотного сигналу. Це - детекторні, тунельні, лавино-прольотні, параметричні діоди, а також діоди Ганна, діоди Шоткі. До діапазону НВЧ прийнято відносити частоти від 0.3 до 330ГГц: дециметрові хвилі ($\lambda=10^2..10$ см, $f= 0.3..3$ ГГц), сантиметрові хвилі ($\lambda=10..1$ см, $f = 3..30$ ГГц), міліметрові хвилі ($\lambda = 10..1$ мм, $f = 30...300$ ГГц) [1, 2].

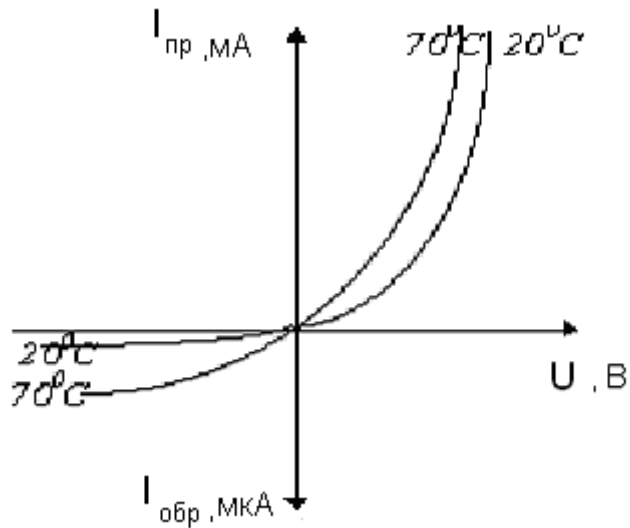


Рисунок 1.3 - Вольтамперна характеристика діода

Розглянемо розрахунок деяких параметрів діоду.

Вихідні дані :

- Власна концентрація $n_i = 1.79 \times 10^6 \text{ см}^{-3}$
- Температура $T_0 = 300 \text{ К}$
- Постійна Больцмана $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ Дж/К}$
- $L_n = 1,6 \times 10^{-19} \text{ м}$
- Концентрація акцепторної домішки $N_a = 1.5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$
- Концентрація донорної домішки $N_d = 2 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$

Контактна різниця потенціалів:

$$\varphi_k = \frac{kT}{l} L_n \frac{N_a N_d}{n_i^2} = 2.5 \cdot 10^{-2} L_n (9.3 \cdot 10^{19}) = 1.14 \text{ В} \quad (1.12)$$

Ширина p-n переходу:

$$l_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0\varphi_k}{l} \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right)} = \sqrt{165 \cdot 10^7 \cdot 3,5 \cdot 10^{-9}} = 2,3 \cdot 10^{-6} \text{ м} \quad (1.13)$$

Бар'єрна ємність:

$$C_{\bar{o}} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{l_0} \cdot \sqrt{\frac{\varphi_k}{|U|}} = 7.82 \cdot 10^{-9} \text{ Ф} \quad (1.15)$$

Гранична частота:

$$f = \frac{1}{2\pi C_0} = 2 \cdot 10^{10} \text{ Гц} \quad (1.16)$$

Тепловий опір

$$R_T = \frac{l_0}{\lambda S} = \frac{2.3 \cdot 10^{-3}}{55 \cdot 16 \cdot 10^{-15}} = 261.3 \quad (1.17)$$

Максимальна напруга:

$$U_{\max} = \frac{T_{n \max} - T_0}{R_T \cdot I_{3\beta}} = 22 \text{ В} \quad (1.18)$$

1.3 Високочастотні діоди Шоткі

Перехідний шар, в якому існує дифузійне контактне електричне поле, створений в результаті контакту між металом і напівпровідником називають **переходом Шоткі**.

Діоди Шоткі відрізняються від діодів на р-п - переходах відсутністю інжекції неосновних носіїв. Це означає, що у них відсутня дифузійна ємність, пов'язана з накопиченням та розсіюванням неосновних носіїв в базі, що суттєво підвищує швидкодію діодів. Робочі частоти лежать у межах 3...15 ГГц. Не менш важливою особливістю діодів Шоткі є значно менша пряма напруга, ніж напруга на р-п - переході.

При ідеальному контакті металу з напівпровідником відбувається дифузія електронів із матеріалу з меншою роботою виходу електронів у матеріал з більшою роботою виходу. *Робота виходу* - це енергія, необхідна для переходу електронів з рівня Фермі до верхньої вільної зони.

В результаті дифузії електронів і перерозподілу зарядів порушується електрична нейтральність прилягаючих до межі розділу областей, виникає контактне електричне поле і контактна різниця потенціалів:

$$\varphi_{\text{кон}} = (A_M - A_N) / q, \quad (1.19)$$

де A_M, A_N – робота виходу електронів з напівпровідника.

Діод з бар'єром Шоткі виготовляється з арсеніду галія n-типу з контактом нікелю. Для роботи діода в дециметрових і сантиметрових діапазонах довжин хвиль, тобто до частот біля 12 ГГц він закріплюється в стандартному коаксіальному корпусі [1-3].

Як приклад розглянемо розрахунок деяких параметрів діодів Шоткі.

Вихідні дані:

- Температура $T = 300 \text{ К}$

- Висота бар'єру $\phi_b = 0.8 \text{ eV}$
 - Заряд електрона $q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
 - Постійна Больцмана $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
- Ефективна постійна Річардсона $A = 8,7 \times 10^4 \text{ А / м}^2 \times \text{К}^2$

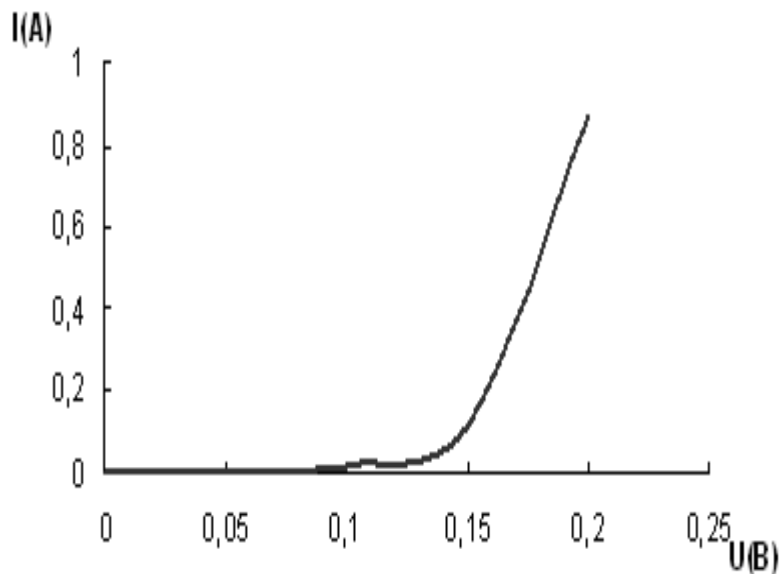
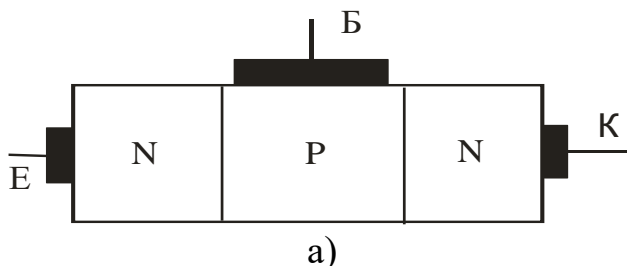


Рисунок 1.4 - Вольтамперна характеристика діода Шоткі (пряма гілка)

2 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ТА ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРНИХ ТВЕРДОТІЛИХ СТРУКТУР

2.1 Біполярний транзистор

Транзистори - це напівпровідникові прилади, які призначені підсилювати сигнал та мають три виводи або більше. Транзистори можуть мати різне число переходів між областями з різною електропровідністю. Найбільш поширені транзистори з двома р-п переходами. Ці транзистори називають біполярними, тому що їх робота пов'язана з використанням носіїв заряду обох знаків.



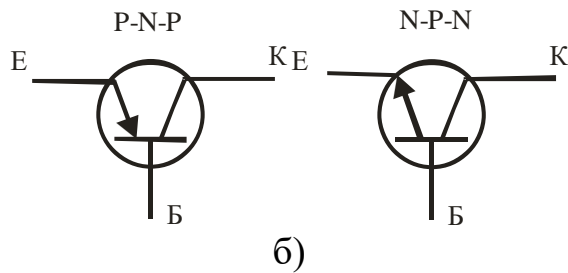


Рисунок 2.1 -Схематичне зображення плоского транзистора:
а) умовне, б) на схемах

Середня область транзистора називається базою, одна крайня область -емітером, друга - колектором. Таким чином, транзистор має два р-п переходи емітерний - між емітером і базою та колекторний - між базою і колектором. Відстань між ними повинна бути мала, не більше одиниць мікрометрів, тобто область бази повинна бути дуже тонкою. Окрім цього, концентрація домішок в базі завжди значно менша, ніж у колекторі та емітері. Це являється умовою для стабільної роботи транзистора [1, 3, 4].

Розглянемо, як приклад, розрахунок деяких параметрів транзистора.

Вихідні дані:

- Заряд електрона, $e = 1,6 \times 10^{-19}$ Кл,
- Власна концентрація, $n_i = 8 \times 10^6$ см,
- Концентрація домішкових атомів області бази, $N_B = 10^{13}$ см⁻³
- Кімнатна температура $T_w = 300$ К
- Концентрація домішкових атомів області колектора,
 $N_K = 2 \times 10^{16}$ см⁻³
- Концентрація домішкових атомів області емітера,
 $N_e = 3 \times 10^{17}$ см⁻³
- Рухливість зарядів колектора, $\mu_K = 1800$ см²/В×с
- Рухливість зарядів емітера, $\mu_E = 1461$ см²/В×с

Розрахуємо потенціал транзистора:

$$\varphi_T = \frac{k \cdot T}{g} = \frac{1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1.6 \cdot 10^{-19}} = 0.026V \quad (2.1)$$

Потенціал колектора:

$$\begin{aligned}\varphi_{KK} &= \varphi_T \ln \frac{N_B \cdot N_K}{n_i^2} = \\ &= 0,026 \cdot \ln \frac{10^{13} \cdot 2 \cdot 10^{16}}{(8 \cdot 10^6)^2} = 1,33B\end{aligned}\tag{2.2}$$

Потенціал колектора-емітера:

$$\begin{aligned}\varphi_{KE} &= \varphi_T \ln \frac{N_B \cdot N_E}{n_i^2} = \\ &= 0,026 \cdot \ln \frac{10^{13} \cdot 3 \cdot 10^{17}}{(8 \cdot 10^6)^2} = 1,32B\end{aligned}\tag{2.3}$$

Коефіцієнт дифузії емітера:

$$D_E = \varphi_{KE} \cdot \mu_E = 1,32 \cdot 1100 = 1461\tag{2.4}$$

Коефіцієнт дифузії колектора:

$$D_K = \varphi_{KK} \cdot \mu_K = 1,33 \cdot 1800 = 2392\tag{2.5}$$

Генераційний струм переходу емітера та колектора:

$$\begin{aligned}I_{OE} &= \frac{g \cdot n_i^2 \cdot S_E \cdot D_E}{h_E \cdot N_E} = \\ &= \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot (8 \cdot 10^6)^2 \cdot 0,4 \cdot 1461,9}{0,1 \cdot 10^{18}} = 6 \cdot 10^{-9} A\end{aligned}\tag{2.6}$$

$$\begin{aligned}I_{OK} &= \frac{g \cdot n_i^2 \cdot S_K \cdot D_K}{h_K \cdot N_K} = \\ &= \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot (8 \cdot 10^6)^2 \cdot 0,4 \cdot 2392,2}{0,1 \cdot 10^{18}} = 2,5 \cdot 10^{-9} A\end{aligned}\tag{2.7}$$

2.2 МДН – транзистор

МДН - транзистор - польовий транзистор з ізолюючим затвором, в якому ізоляційний шар поміж кожним металевим затвором та каналом є діелектрик.

Існують два різновиди МДН - транзисторів: з індуктованим каналом і з вбудованим каналом. В МДН - транзисторах з індуктованим каналом провідний канал між сильнолегованими областями витоку і стоку не існує, отже помітний струм стоку з'являється тільки при визначеній полярності та при визначеній величині напруги на затворі відносно витоку, яку називають пороговою напругою [1-5].

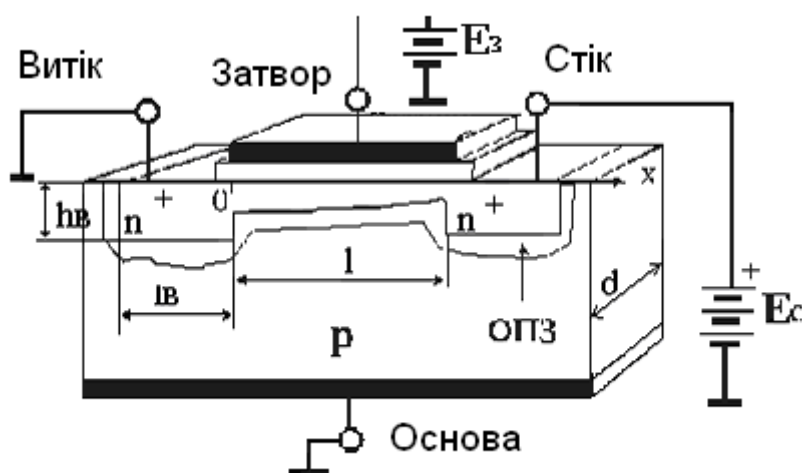


Рисунок 2.2 - МДН транзистор с індуктованим n каналом
Розглянемо, як приклад, розрахунок деяких параметрів транзистора.
Вихідні дані:

- Довжина каналу $l = 5 \times 10^{-6}$ м
- Ширина каналу $d = 5 \times 10^{-4}$ м
- Товщина шару діелектрика $d_0 = 1.2 \times 10^{-7}$ м
- Рухливість дірок $\mu_n = 4 \times 10^{-2}$ м²/Вс
- Порогова напруга $U = -1.8$ В
- Напруга на стоці $U = 4$ В
- Напруга на затворі $-5.6 \dots -15.6$ В, шаг 0,5 В
- Діелектрична проникливість $\epsilon = 4$ Ф/м
- Діелектрична постійна $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ Ф/м

Розрахуємо крутизну вольт амперної характеристики $I_c(U_з)$ в області насичення:

$$S_{нас} = \frac{\epsilon \partial \epsilon_0 \mu d}{d_0 l} (U_з - U_n) = 2,1 \cdot 10^{-3} \frac{A}{B} \quad (2.8)$$

Ємність затвору відносно витоку і стоку:

$$C_3 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_0 l d}{d_0} = 7.38 \cdot 10^{-9} \Phi \quad (2.9)$$

Частотна межа:

$$f_{\max} = \frac{S_{\text{нас}}}{2\pi C_3} = 4.58 \cdot 10^8 \text{ Гц} \quad (2.10)$$

Постійна часу заряду ємності затвору:

$$\tau = \frac{C_3}{S_{\text{нас}}} = 6.25 \cdot 10^{-11} \text{ с} \quad (2.11)$$

Розрахуємо значення струму I_c при значеннях напруги на затворі від -5,6В до -15,6 з шагом 0,5В:

$$I_c = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_0 \mu d}{d_0 l} \left((U_3 - U_n) U_c - \frac{U_c^2}{2} \right) \quad (2.12)$$

2.3 Польовий транзистор з керуючим р-п переходом

Польовий транзистор з керуючим р-п переходом являє собою тонку пластину напівпровідникового матеріалу з двома р-п переходами в центральній частині і з омичними контактами по краях.

Чинність цього приладу основана на залежності товщини р-п переходу від доданої до нього напруги. Оскільки збіднений шар майже повністю позбавлений рухомих носіїв заряду, його провідність практично дорівнює нулю. Обмежуючи з бокових сторін струмопровідний канал (напівпровідником пластини), збіднений шар, що утвориться завдяки цьому визначає перетин або ефективну товщину. У залежності від електропровідності напівпровідника канал може бути n- типу або р- типу [2-4].

Як приклад, розглянемо розрахунок деяких параметрів транзистора

Вихідні дані

- Концентрація домішки, $N = 1.5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$
- Рухливість електронів, $\mu_n = 1500 \text{ см}^2/\text{В} \times \text{с}$
- Заряд електрона, $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Кл}$

- Діелектрична проникливість, $\varepsilon = 11,8$
- Діелектрична постійна, $\varepsilon = 8,85 \times 10^{-12} \text{ Ф/м}$
- постійна Больцмана $k = 8,62 \times 10^{-5} \text{ еВ}$
- Термін переходу, $t_{\text{пер}} = 0,8 \text{ нс}$
- Напруга на затворі, $U_3 = 39 \text{ В}$
- Розміри напівпровідникового транзистора:
Товщина, $W = 23 \text{ мкм}$
Довжина, $l = 12 \text{ мкм}$
Ширина, $d = 3 \text{ мкм}$

Розрахуємо опір каналу:

$$R_k = \frac{l}{e \mu_n W d N} = 4,83 \cdot 10^2 \text{ Ом} \quad (2.13)$$

Питомий опір:

$$\rho = e n \mu_n = 3,6 \text{ Ом} \cdot \text{см} \quad (2.14)$$

Розрахуємо напругу відсічки:

$$U_{\text{від}} = \frac{W^2}{\varepsilon \rho \mu_n l} = 85,4 \text{ В} \quad (2.15)$$

Граничну частоту визначаємо за формулою:

$$f_{\text{гр}} = \frac{1}{2\pi t_{\text{пер}}} = 2,01 \times 10^5 \text{ Гц} \quad (2.16)$$

Розрахуємо струм стоку при напрузі на стоці 20 В за формулою:

$$I_c = \frac{1}{R_k} \left(U_c + \frac{U_c^{2/3} + U_3^{3/2}}{U_{\text{омс}}} \right) \quad (2.17)$$

Крутизну розрахуємо за формулою:

$$S = \frac{1}{R_k} \left(\frac{1}{3} U_{\text{омс}} - U_3 \left(1 - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{U_3}{U_{\text{омс}}}} \right) \right) =$$

$$= 6,71 \cdot 10^{-4} \text{ А/В} \quad (2.18)$$

Розраховуємо струм насичення за формулою:

$$U_{нас} = \frac{1}{R_k} \left(\frac{1}{3} U_{отс} - U_3 \left(1 - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{U_3}{U_{отс}}} \right) \right) \quad (2.19)$$

3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ТА ХАРАКТЕРИСТИК ТИРИСТОРА

Тиристор – це напівпровідниковий пристрій з двома стійкими станами: стан з низькою провідністю та з високою провідністю.

Тиристори знайшли застосування у різноманітних пристроях автоматики і обчислювальній техніці. Вони можуть виконувати функції перетворювача струму будь-якої форми, ключа генератора і як запам'ятовуючий пристрій.

До параметрів тиристора відносяться:

- Повторююча напруга $U_{повт}$ ($\approx 0,75 U_{проб}$);
- Напруга включення $U_{вкл}$ (від 10 до 2500 В);
- Струм включення $I_{вкл}$;
- Відпираючий струм управління $I_{у\text{ вип.}}$;
- Час затримки t_3 ;
- Час включення $t_{вкл}$;
- Максимально допустима швидкість наростання прямої напруги $(dU/dt)_{max}$;
- Максимально допустима швидкість наростання прямого струму $(dI/dt)_{max}$.

Повторююча напруга визначається за формулою:

$$U_{повт} = k \inf(U_{пер}, U_{проб}), \quad (3.1)$$

де \inf - менше із значень $U_{пер}$ і $U_{проб}$;

$k = 0,8$ для вітчизняних силових пристроїв.

Знаючи $U_{повт}$, можна визначити напругу переключення при max допустимій температурі структури тиристора ($125^{\circ}C$):

$$U_{пер} = \frac{U_{повт}}{0,8}. \quad (3.2)$$

Для визначення товщини підкладки необхідно розрахувати ширину об'ємного заряду $W_{но}$ при напрузі пробою:

$$W_{но} = 0,52 \sqrt{\rho U}, \quad (3.3)$$

де ρ - питомий опір, Ом·см.

Отже: $S_m = 0,1S_a$ (3.4)

Площа структури $S_{стр}$ з урахуванням шунтировки та зони керування:

$$S_{стр} = S_a + S_{унр} + S_m \quad (3.5)$$

Діаметр цієї структури:

$$d = 2\sqrt{\frac{S_{стр}}{\Gamma}} \quad (3.6)$$

Тиристор має S – образну ВАХ.

$$I = f(E_{np}) \quad (3.7)$$

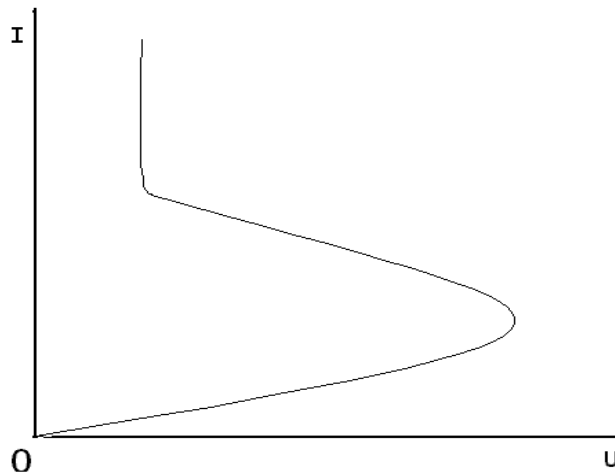


Рисунок 3.1 - Вольтамперна характеристика тиристора

Розрахунок характеристик проводиться за формулою:

$$U_A = U_1 - U_2 + U_3 \quad [1-6] \quad (3.8)$$

4 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ТА ХАРАКТЕРИСТИК ОПТОСТРУКТУР

Оптоелектроніка являє собою розділ науки і техніки, присвячений питанням генерації, перенесення, перетворення, запам'ятовування і зберігання інформації на основі використання електричних і оптичних методів і засобів.

Оптоелектронний пристрій визначається як пристрій чутливий до електромагнітного випромінювання у видимій ІК або УФ областях.

4.1 Фотодіод

Фотодіодом називають напівпровідникові пристрої, основані на внутрішньому фотоефекті, що використовують односторонню провідність р–п - переходу.

Параметри фотодіода:

- ВАХ р – п переходу при освітленні;

$$j = js(e^{cu/KT} - 1) - j_f \quad (4.1)$$

- Вольтова чутливість

$$S_U = \frac{U}{\Phi} \quad (4.2)$$

- Струмова чутливість;
- Пороговий потік

$$\Phi_{пор} = [2c(I_T + I_\phi) \nabla f]^{1/2} \quad (4.3)$$

де ∇f - полоса пропускання.

- Виявляюча спроможність

$$D^* = \frac{1}{\Phi_{пор}} \quad (4.4)$$

- Світловий струм

$$I_{св} = I_f + I_t \quad (4.5)$$

$$I_f = j_f S; I_t = j_t S, \quad (4.6)$$

де S – густина фото чутливої площини.

- ККД приймача

$$ККД = \frac{P_{ЕЛ.ПОТ}}{P_{НАД.ВИПР}} \cdot 100 \% \quad (4.7)$$

$$\text{де } P_{ЕЛ.ПОТ} = I_{св} \cdot U. \quad (4.8)$$

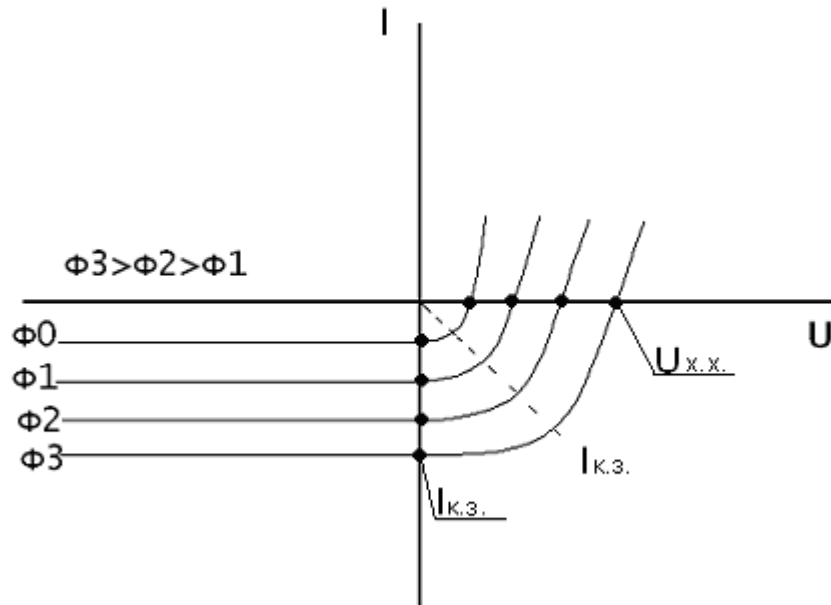


Рисунок 4.1 – Вольтамперна характеристика фотодіода
4.2 Світлодіод

Світлодіод – пристрій, який має високу направленість випромінювання, високу швидкодію, технологічну сумісність з мікроелектронними пристроями, володіє високою надійністю і довговічністю.

Формула для кількісного визначення струму:

$$\frac{U_p}{U_t} = - \frac{pn - ni^2}{\tau_{n0}(p + p_1) + \tau_{p0}(n + n_1)}, \quad (4.9)$$

де p_1, n_1 - концентрація носіїв у зонах, коли рівень Фермі проходить крізь рівень ловушок;

τ_{n0}, τ_{p0} - час життя неосновних носіїв в напівпровіднику.

$$n_1 = p_1 = n_i; \quad (4.10)$$

$$p = n = n_i \exp \frac{qU}{2KT}; \quad (4.11)$$

$$\frac{U_p}{U_t} = - \frac{n_i}{\tau_{p0} + \tau_{n0}} \left(\exp \frac{qU}{2KT} - 1 \right). \quad (4.12)$$

Як приклад, запишемо абсолютну величину щільності рекомбінаційного струму:

$$j_{рек} = \frac{q\sigma_{mi}}{\tau_{po} + \tau_{no}} \cdot \left(\exp \frac{qU}{2KT} - 1 \right) \Rightarrow$$

$$j_{рек} = \frac{q\sigma_{mi}}{\tau_{vo} + \tau_{no}} \cdot \frac{KT}{q(\varphi_{лом} - U)} \left(\exp \frac{qU}{2KT} - 1 \right). \quad (4.13)$$

Визначимо φ_K – величину потенційного бар'єру по формулі:

$$\varphi_K = \frac{KT}{e} \ln \frac{N_a \cdot N_d}{n_i^2} \quad (4.14)$$

$$\varphi_K = \frac{1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1.6 \cdot 10^{-19}} \ln \frac{10^{12} \cdot 10^8}{1.21 \cdot 10^{14}} = 0.35B.$$

Ширину ОПЗ – σ – находимо, як ($\varepsilon = 10,9$)

$$\sigma = \left(\frac{2\varepsilon\varepsilon_0\varphi_K}{e} \cdot \frac{N_a + N_d}{N_a \cdot N_d} \right)^{1/2} = 2.05 \cdot 10^{-4} \text{ м.} \quad (4.15)$$

Тоді рекомбінаційний струм:

$$j_{рек} = 3.6 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{258.75 \cdot 10^{-4}}{(0.35 - U)} \cdot (\exp 19.3U - 1)$$

$$j_{рек} = \frac{931.5 \cdot 10^{-6}}{(0.35 - U)} (\exp 19.3U - 1) \quad (4.16)$$

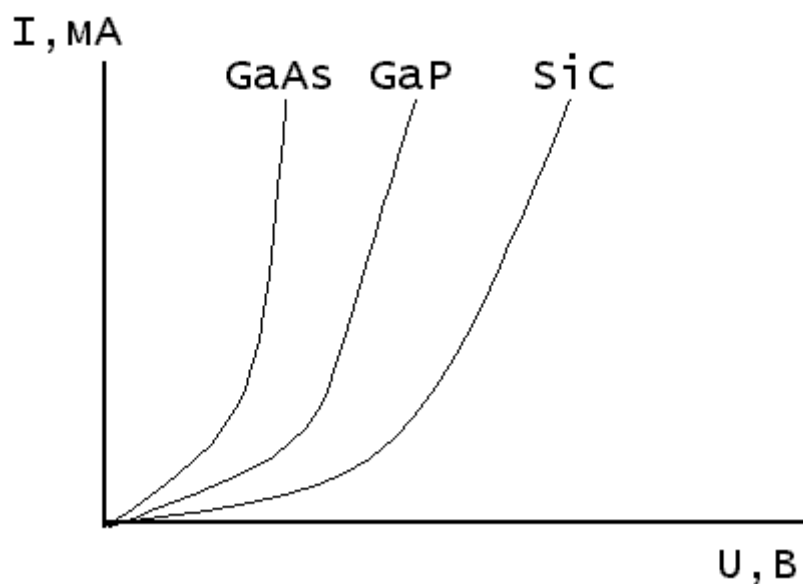


Рисунок 4.2 - Вольтамперна характеристика світлодіода

4.3 Фототранзистор

Фототранзистор – це фотогальванічний приймач випромінювання, фоточутливий елемент якого має структуру транзистора, що забезпечує підсилення сигналів.

Основні параметри:

- Струм у вихідному ланцюзі фототранзистора

$$I_{\phi N} = \left(\frac{L_N}{I} - L_N \right) \cdot I_{\phi} = K_{ice} \cdot I_{\phi}, \quad (4.17)$$

де K_{ice} – коефіцієнт підсилення у схемі зі спільним емітером.

- Інтегральна струмова чутливість фототранзистора з освітлювальною областю бази в K_{ice} раз більше, ніж чутливість „фотодіода”, утворюваного переходом база – колектор.

$$S_{iT} = K_{ice} \cdot S_{iD} \quad (4.18)$$

Як приклад, розглянуто розрахунок бар'єрних опорів транзисторної структури при $m = 12,5 \text{ мкм}$, $\kappa = 1$.

Параметри структури з ізоляцією р – n переходом

$$x_{je} = 2.0 \text{ мкм},$$

$$x_{jn} = 9.0 \text{ мкм},$$

$$x_{jk} = 3.0 \text{ мкм}$$

$$C_{\text{бічне}} = 420 \text{ нФ/мкм}^2,$$

$$C_{\text{бічн}} = C_{gn} = 42 \text{ нФ/мкм}^2,$$

$$C_{ge} = 150 \text{ нФ/мкм}^2,$$

$$C_{gk} = 65 \text{ нФ/мкм}^2,$$

Для топології транзистора емітерна ємність дорівнює:

$$C_{e\delta} = C_{ge} 3m^2(k+2) + C_{\text{бічн}}(10+2k)mx_{je} \quad (4.19)$$

$$C_{e\delta} = 150 \cdot 3(12,5)^2(1+2) + 420(10+2 \cdot 1) \cdot 12,5 \cdot 2,0 = 336937,5 \approx 34 \text{ мкФ}.$$

Ємність колектора має вигляд:

$$C_{k\delta} = C_{eg} \left[7m^2(k+4) + \pi x_{jk} m(11+k) \right] \quad (4.20)$$

$$C_{k\delta} = 65 \left[7(12,5)^2(1+4) + 3,14 \cdot 3 \cdot 12,5(11+1) \right] = 447313,75 \approx 45 \text{ мкФ}.$$

Ємність переходу колектор – підкладка з врахуванням бічної ізолюючого переходу:

$$C_{nk} = C_{gn} \left[7m^2(k+4) + 4(x_{jm} + m^2) + 2m(k+11)(x_{jn} + m) \right] + C_{\text{бічн}} \pi x_{jn} \left[m(k+15) + 4x_{jn} \right] \quad (4.21)$$

$$C_{nk} = 42 \left[7(12,5)^2(1+4) + 4(9+12,5)^2 + 2 \cdot 12,5(1+11)(9+12,5) \right] + 42 \cdot 3,14 \cdot 9,0 \cdot \left[12,5(1+15) + 4 \cdot 9,0 \right] = 578245,5 + 280113,12 = 858358,62 \approx 86 \text{ мФ}$$

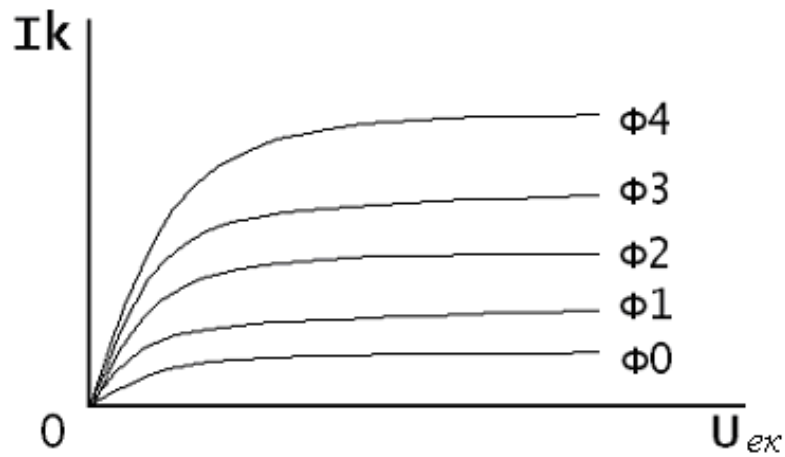


Рисунок 4.3 - Вольтамперна характеристика фототранзистора

4.4 Оптрони

Оптроном називається оптоелектричний пристрій, до якого входить джерело випромінювання та приймач з тим чи іншим видом оптичного та електричного зв'язку між ними, конструктивно об'єднаних і розташованих в одному корпусі.

Розрахунок передавальної характеристики оптрону починається з оцінки спектральної погоджуваності елементів і матеріалів [3-7].

$$\chi_{\text{созл}} = S(\lambda_{\text{изл}}) / S_0 \quad (4.22)$$

$$\chi_{\text{созл}} = 3 \cdot (3) / 10 = 0.9 \quad (4.23)$$

де S , S_0 – світлопропускання середовища і вакууму.

Оцінка коефіцієнта передачі струму K_i :

$$K_i = I_{\text{вих}} / I_{\text{вх}}, \quad (4.24)$$

де $I_{\text{вих}} = 96 \text{ A}$, $I_{\text{вх}} = 20 \text{ A}$.

$$K_i = 96 \text{ A} / 20 \text{ A} = 4,8.$$

Критерієм якості інформаційних оптронів ϵ :

$$Q_{\text{ін}} = K_i / t_{\text{век}} (\text{векл}) \quad (4.25)$$

$$Q_{ін} = 4,8 / 15 \text{ мкс} = 3,46$$

Узагальненим критерієм якості управляючого оптрона є:

$$Q_y = P_{ком \max} / P_{вх} \quad (4.26)$$

$$Q_y = 120 \text{ Вт} / 56 \text{ Вт} = 2,14$$

де $P_{ком \max}$ – максимальна потужність комутуючого ланцюга,

$P_{вх}$ – необхідна для керування вхідна потужність.

Для діодних і транзисторних оптронів цей вираз має вигляд:

$$Q_y = K_i U_{вых \max} / U_{вх} \quad (4.27)$$

$$Q_y = 4,8 \cdot 920 \text{ В} / 506 \text{ В} = 8,72$$

Для високошвидкісного переключення:

$$Q'_y = Q_y / t_{вк(викл)} = 8,72 / 15 \text{ мкс} = 0,58. \quad (4.28)$$

Критерій якості енергетичного оптрону – це коефіцієнт корисної дії:

$$Q_e = P_{вих \max} / P_{вв} \quad (4.29)$$

$$Q_e = 145 \text{ Вт} / 68 \text{ Вт} = 2,13$$

де $P_{вих \max}$ – максимальна потужність, яка може бути віддана фотоприймачам при навантаженні.



Рисунок 4.4 - Вольтамперна характеристика оптрона

5 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ТА ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОТРАНЗИСТОРА НА ГЕТЕРОПЕРЕХОДАХ

Якщо n- і p-область переходу виготовлені з різних напівпровідників, то такий перехід називається **гетеропереходом**.

Гетеропереходами можуть бути переходи Ge-Si, Ge-GaAs, GaAs-InP.

Параметри фототранзистора на гетеропереходах [3, 5-8]:

- ВАХ фототранзистора;
- Енергетичні характеристики;
- Спектральні характеристики;
- Пороговий потік Φ_n ;
- Виявляюча здібність D ;
- Коефіцієнт підсилення по фотострумові

$$K_{\text{нос.}\phi} = \frac{1}{1 - h_{21B}}. \quad (5.1)$$

- Вольтова чутливість h_{13}^e
- Тонова чутливість;
- Струмова чутливість з загальним емітером

$$h_{23}^e = \frac{\nu I^e \text{ общ.к.}}{\nu \Phi}. \quad (5.2)$$

Як приклад, розрахунок параметрів фототранзистора проведено на гетеропереходах з вихідними даними:

$$\begin{aligned} \chi_1(\text{GaAs}) &= 4.69 \text{ eV} \\ \chi_2(\text{Ge}) &= 4.78 \text{ eV} \\ \varphi_0 &= 0.09 \text{ eV} \\ p_0 &= 10^{14} \text{ см}^{-3} \\ j_0 &= 10^{-12} \text{ A} \\ n_0 &= 10^{15} \text{ см}^{-3} \end{aligned}$$

Діелектрична постійна:

$$\text{в p-області} \quad \varphi_1 = \frac{2\pi e^2 p_0}{\chi_1} (Lp - x)^2, \quad (5.3)$$

$$\text{в n-області} \quad \varphi_2(x) = \frac{2\pi e^2 n_0}{\chi_2} (x - Ln)^2. \quad (5.4)$$

На межі гетеропереходу при $x=0$ повинна виконуватися умова нерозривності нормальної складової електричної індукції:

$$\chi_1 \left. \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} \right|_{x=0} = \chi_2 \left. \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} \right|_{x=0}, \quad (5.5)$$

$\varphi_1(x)$ та $\varphi_2(x)$, $x=0$, знаходимо

$$\varphi_1(0) = \frac{2\pi e^2 p_0}{\chi_1} L^2 p, \quad (5.6)$$

$$\varphi_2(0) = \frac{2\pi e^2 p_0}{\chi_2} L^2 n, \quad (5.7)$$

$$Ln / Lp = p_0 / n_0. \quad (5.8)$$

Повна контактна різниця потенціалів на межі гетеропереходу:

$$\varphi_0 = \varphi_1(0) + \varphi_2(0). \quad (5.9)$$

Знайдемо товщину шарів об'ємного заряду

$$Ln = \sqrt{\frac{\chi_1 \chi_2 p_0 \varphi_0}{2\pi e^2 n_0 (n_0 \chi_2 + p_0 \chi_1)}} = \sqrt{\frac{4,69 \cdot 4,78 \cdot 0,09 \cdot 10^{15}}{2 \cdot 3,14 \cdot 1^2 \cdot 10^{14} (10^{14} \cdot 4,78 + 10^{15} \cdot 4,69)}} = 0,4 \cdot 10^{-7} \text{ см.}$$

$$Lp = \sqrt{\frac{\chi_1 \chi_2 p_0 \varphi_0}{2\pi e^2 p_0 (n_0 \chi_2 + p_0 \chi_1)}} = \sqrt{\frac{4,69 \cdot 4,78 \cdot 0,09 \cdot 10^{15}}{2 \cdot 3,14 \cdot 1^2 \cdot 10^{15} (10^{14} \cdot 4,78 + 10^{15} \cdot 4,69)}} = 0,13 \cdot 10^{-7} \text{ см.}$$

Розрахуємо товщину об'ємного заряду

$$L = L_n + L_p = 0,53 \cdot 10^{-7} \text{ см.} \quad (5.10)$$

ВАХ гетеропереходу

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right] \quad (5.11)$$

При $I_0 = \text{const}$, $I = I_0$ – зворотнє зміщення.

При $I_0 \neq \text{const}$, $I = I_0$ – пряме зміщення.

$$I = 10^{-12} \left[\exp\left(\frac{-1,6 \cdot 10^{19} \cdot U}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}\right) - 1 \right] =$$

$$= 10^{-12} \left[\exp(-3,86 \cdot 10^7 \cdot U) - 1 \right]. \quad (5.12)$$

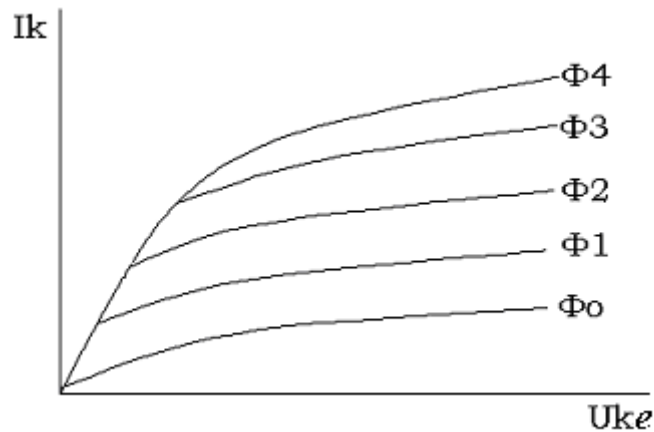


Рисунок 5.1 - Вольтамперна характеристика фототранзистора

6 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ТА ХАРАКТЕРИСТИК ПРИСТРОЇВ НА ПРИЛАДАХ З ОБ'ЄМНИМ ЕФЕКТОМ

6.1 Генератор на надгратці

Надграткою називається періодична структура, що складається з тонких чередуючих в одному напрямку шарів напівпровідників.

Розглянемо приклад розрахунку їх основних параметрів за вихідними даними:

- GaAs з $N_d = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$

- енергія іонізації $E_d = (1,43-0,005)eV$
- ефективна густина $E_c - N_c = 4,7 \cdot 10^{17} \text{ (см}^{-3}\text{)}$
- ефективна густина $E_v - N_v = 7 \cdot 10^8 \text{ (см}^{-3}\text{)}$

Визначаємо енергію Фермі для області температур:

$$e^{-\frac{(E_c - E_d)}{kT}} > \frac{N_c}{2N_d}, \quad (6.1)$$

$$E_F = \frac{(E_c + E_d)}{2 - \frac{kT}{2} \cdot \ln \frac{qN_c}{N_d}} \quad (6.2)$$

де q - фактор виродження = 2

E_c – енергія електронів у зоні провідності

E_d – енергія іонізації донорів

$$E_F = \frac{1,43 + 1,425}{2} - \frac{1,38 \cdot 10^{23} \cdot 298}{1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 2} \cdot \ln \frac{2 \cdot 4,7 \cdot 10^{17}}{2 \cdot 10^{16}} = 1,378(eV)$$

$$E_c - E_F = 1,43 - 1,478 = 0,052 \text{ (eV)}$$

$$kT = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 298 / 1,608 \cdot 10^{-19} = 0,025 \text{ (eV)}$$

$0,052 > 0,025$ - напівпровідник не вироджений

Для не виродженого напівпровідника

$$n = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot N_c \cdot \Phi_{\frac{1}{2}} \cdot \xi, \quad (6.3)$$

де $\Phi_{\frac{1}{2}} \cdot \xi$ - інтеграл Фермі – Дірака порядку $\frac{1}{2}$.

$$\xi = \frac{E_F - E_c}{kT} = -2,08. \quad (6.4)$$

Знайдемо табличне значення $\Phi_{\frac{1}{2}} \cdot \xi$ для $\xi = -2,08$

$$\Phi_{\frac{1}{2}} \cdot \xi = 0,12, \quad \text{тоді}$$

$$n = \frac{2}{\sqrt{\Pi}} \cdot 4,7 \cdot 10^{17} \cdot 0,12 = 0,636 \cdot 10^{17} (\text{см}^{-3}).$$

Далі знаходимо змінювання концентрації електронів із змінням температури

T_s – температура насичення

$$T_s = \frac{E_c - E_d}{K \cdot \ln \cdot \frac{N_c}{N_d}} \quad (6.5)$$

T_i – температура, при якій настає власна провідність

$$T_i = \frac{E_d}{K \cdot \ln \left[\frac{N_c N_v}{(N_d)^2} \right]}. \quad (6.6)$$

Загальна енергія дорівнює:

$$E = \int_{\nu \min}^{\nu \max} h \nu d\nu, \quad (6.7)$$

тоді енергія фотона

$$E_{\phi} = \left(\frac{E}{n_{cp}} \right) \quad (6.8)$$

Частота коливань

$$f = \frac{V_{\partial p}}{L}. \quad (6.9)$$

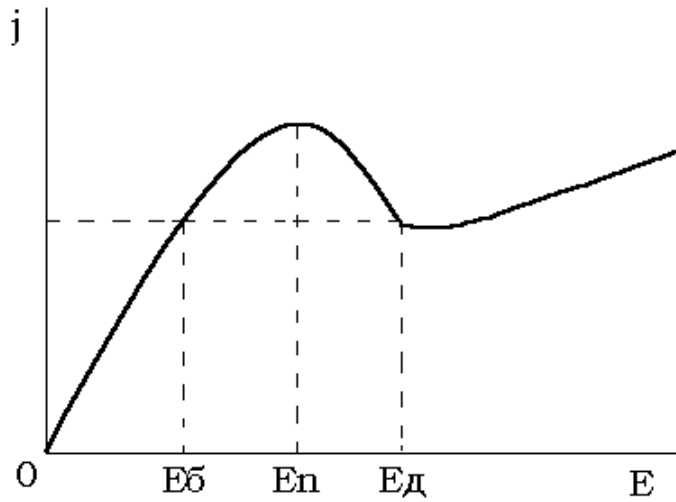


Рисунок 6.1 – Залежність $j = f(E)$ [1, 4-7]

6.2 Розрахунок та проектування плазменного підсилювача

Параметри:

- густина струму;
- робоча частота;
- період коливань;
- час життя носіїв заряду;
- генеруєма потужність.

Густину струму можна розрахувати за формулою:

$$J = q(n_1\mu_1 + n_2\mu_2)E, \quad (6.10)$$

де q - заряд електрону,
 μ_1 - рухливість „легких” електронів,
 μ_2 - рухливість „важких” електронів,
 n_1, n_2 - концентрація електронів,

$$n_1 + n_2 = n_0, \quad (6.11)$$

E – напруженість.

$$J = 1,60218 \cdot 10^{19} \cdot (2 \cdot 10^{14} \cdot 400 + 1 \cdot 10^{14} \cdot 1500) \cdot 5 = 18,43 \text{mA},$$

$$J = 1,60218 \cdot 10^{19} \cdot (2 \cdot 10^{14} \cdot 400 + 1 \cdot 10^{14} \cdot 1500) \cdot 10 = 36,85 \text{mA}.$$

Робоча частота визначається:

$$f = \nu / L, \quad (6.12)$$

де ν - швидкість насичення,
L - довжина кристалу.

$$f = 60 / 22 = 2,72 \text{ГГц}.$$

Період коливань:

$$T = 1 / f < (2...3), \quad (6.13)$$

де t- робоча частота

$$T = 1 / 2,72 = 0,37.$$

Час життя носіїв заряду

$$\tau' = \frac{(2...3)\varepsilon\varepsilon_0}{qn_0\mu} \quad (6.14)$$

$$\tau' = \frac{2 \cdot 8,85418 \cdot 10^{-12}}{1,60218 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 10^{16} \cdot 1,25993 \cdot 10^{-7}} = 8,79548 \cdot 10^{-3} (\text{с}).$$

Генеруєма потужність

$$P = \frac{E^2 \nu^2}{Z f^2}, \quad (6.15)$$

де ν – швидкість насичення;
f – робоча частота;
Z – повний опір

$$P = \frac{60^2 \cdot 60^2}{1 \cdot 10^3 \cdot (2,72)^2} = 175,18 \text{Вт}.$$

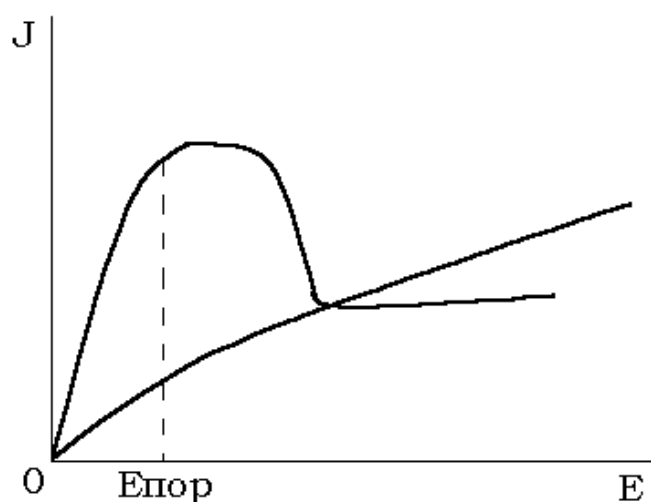


Рисунок 6.2 – Залежність $J = f(E)$ [1, 3-9]

7 РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ МІКРОСХЕМ

7.1 Класифікація резисторів

- за характером змінення опору;
- за способом монтажу;
- за способом захисту;
- за матеріалом резистивного елемента;
- за призначенням.

7.2 Тонкоплівковий резистор

Тонкоплівкові резистори являються елементами гібридних тонкоплівкових мікросхем, а також узгоджувачими елементами в мікрозбірках, де вони присутні у вигляді резистивних матриць (резистивних „збірок”) на окремій мініатюрній підкладці.

Кожна марка резистивних сплавів характеризується заданими значеннями питомого опору R [Ом], допустимою питомою потужністю розсіювання P_0 [Вт/см²], температурним коефіцієнтом опору α [К⁻¹] і коефіцієнтом старіння $g_{ст}$.

Резистори поділяють на дві групи і для кожної групи вибирають свій матеріал [4-6].

Приклад розрахунку резисторів першої групи

1. Визначаємо діапазон p_0 , у якому можна вести розрахунок:

$$0,02R_{\max} < p_0 < R_{\min} \Rightarrow 15 < p_0 < 500 \quad (7.1)$$

2. Відносна температурна похибка:

$$\gamma_{RT} = \alpha_R (T^0 \text{ max } C - 20) \quad (7.2)$$

$$\gamma_{RT} = 0,0002(150 - 20) = 0,026$$

3. Відносна похибка старіння:

$$\gamma_{Rcc} = \frac{S \cdot t_{\text{експ}}}{t_{\text{випр}} \cdot 100} = \frac{0,5 \cdot 5000}{1000 \cdot 100} = 0,025, \quad (7.3)$$

де $t_{\text{випр}}$ – час випробування, за який визначено коефіцієнт старіння S ;
 $t_{\text{випр}} = 1000$ годин.

4. Відносна похибка контактування:

$$\gamma_{Rk} = 0,01 - 0,03 \Rightarrow \gamma_{Rk} = 0,01. \quad (7.4)$$

5. Відносна похибка форми:

$$\gamma_{\text{кф}} = \gamma_R - \gamma_{Po} - \gamma_{RT} - \gamma_{Rk} - \gamma_{Rcc} \quad (7.5)$$

$$\gamma_{\text{кф}} = 0,25 - 0,1 - 0,026 - 0,025 - 0,01 = 0,039$$

6. Розрахуємо коефіцієнт форми резистора:

$$K\phi = \frac{R_H}{P_o} = 0,50 / 500 = 1,9 \quad (7.6)$$

7. Знаходимо ширину резистора по міцності:

$$b_{\text{min } p} = \sqrt{\frac{P_H \cdot \rho_0}{P_o \cdot R_H}} \quad (7.7)$$
$$b_{\text{min } p} = \sqrt{\frac{1,41 \cdot 10^{-6}}{10 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{500}{450}} = 0,0086(\text{мм})$$

8. Визначаємо основний розмір по заданій точності:

$$b_{\min \gamma} = \frac{\Delta b + (\Delta \ell / K\phi)}{\gamma_{K\phi}} \quad (7.8)$$

$$b_{\min \gamma} = \frac{0,02 + 0,02/1,9}{0,039} = 0,78(\text{мм}),$$

де $\Delta \ell = \Delta b = 0,02$.

9. Вибір основного розміру:

$$b > \{b \min p, b \min \gamma\} \Rightarrow b = 0,78 \text{ мм}. \quad (7.9)$$

10. Визначення довжини резисторів:

$$\ell = b \cdot K\phi = 0,78 \cdot 1,9 = 1,48(\text{мм}). \quad (7.10)$$

11. Перевірка проведених розрахунків:

$$Rp = \rho_0 \cdot \frac{\ell}{b} = 500 \cdot \frac{1,48}{0,78} = 0,50 \text{ Ом} \Rightarrow \quad (7.11)$$

розрахунок виконано точно.

7.2 Проектування інтегральних резисторів

Методика розрахунку інтегральних резисторів полягає у наступному:

1. Знаходиться оптимальне значення питомого поверхневого опору

$$R_{\text{ср}} = R_0.$$

$$R_1, R_2, \dots, R_m, (R_0), R_{m+1} \dots R_N$$

$$R_i = R_0 \frac{\ell_i}{a_i} \quad (7.12)$$

Сумарну площину резисторів можна показати сумарним числом квадратів, яке зводиться до \min .

$$S \sum = R_0 \sum_1^m \left(\frac{1}{R_i} \right) + \frac{1}{R_0} \sum_{m+1} R_i \rightarrow \min. \quad (7.13)$$

2. Вибір марки резистивного сплаву визначається за значенням R_0 .
Оптимальне значення $R_{сл}$:

$$R_0 = \sqrt{\frac{\sum_1^N Ri}{\sum_{Ri}^N \left(\frac{1}{Ri}\right)}}. \quad (7.14)$$

3. Потужність P_i , розсіювану резистором, можна визначити:
Для резисторів 1-ї групи:

$$P_i = P_0 \cdot S_i = P_0 a_i \cdot \ell_i = P_0 \frac{R_0}{R_i} \cdot \ell_i^2, \quad (7.15)$$

для резисторів 2-ї групи:

$$P_i = P_0 \cdot S_i = P_0 a_i \ell_i = P_0 \frac{R_i}{R_0} \cdot a_i^2. \quad (7.16)$$

⇒ нові значення критичних розмірів з увагою на потужність розсіювання.

Для резисторів 1-ї групи:

$$\ell_i = \sqrt{\frac{P_i R_i}{P_0 R_0}}. \quad (7.17)$$

для резисторів 2-ї групи:

$$a_i = \sqrt{\frac{P_i R_0}{P_0 R_i}}. \quad (7.18)$$

Температурна похибка

$$\gamma_{t0} = \alpha |t^0_{пред} - t^0_{ком}| \max \quad (7.19)$$

$$\gamma_{тех} = \frac{\Delta \ell}{\ell_i} + \frac{\Delta \alpha}{\alpha_i} + \gamma_{R_0} \quad (7.20)$$

$$\frac{R_i}{R_0} = \frac{\ell_i}{\alpha_i} \Rightarrow$$

⇒ нові значення критичних розмірів.

(7.21)

Для резисторів 1-ї групи:

$$\ell_i = \frac{\left(\Delta\alpha \cdot \frac{R_i}{R_0} + \Delta\ell \right)}{(\gamma_{техн} - \gamma_{Ro})}.$$
(7.22)

Для резисторів 2-ї групи:

$$\alpha_i = \frac{\left(\Delta\alpha \cdot \frac{R_0}{Ri} + \Delta\ell \right)}{(\gamma_{техн} - \gamma_{Ro})}.$$
(7.23)

4. Розрахунок великих розмірів:

Для резисторів 1-ї групи:

$$\ell_i = \frac{R_i}{R_0} \cdot \alpha_i.$$
(7.24)

Для резисторів 2-ї групи:

$$\alpha_i = \frac{R_0}{R_i} \cdot \ell_i.$$
(7.25)

7.3 Розрахунок конденсаторів для інтегральних схем

Конденсатор на основі р-п-переходу – це напівпровідниковий пристрій, дія якого основана на використанні залежності ємності від зворотної напруги.

Параметри конденсаторів:

- бар'єрна і дифузійна ємність;
- добротність конденсатора;
- температурний коефіцієнт;
- залежність зворотної напруги від ємності р-п-переходу [1, 4-9].

Приклад розрахунку конденсаторів:

1. Товщина збідненого шару:

$$W = \left[\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon U}{qN_a} \right]^{1/2} \quad (7.26)$$

де $N_a = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ – концентрація акцепторів;
 U - зворотня напруга;

$$\begin{aligned} W &= \left[2 \cdot 8.849 \cdot 10^{-12} \cdot 12 \cdot 5 / 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{16} \right]^{1/2} = \\ &= \left[1061.88 \cdot 10^{-12} / 1.6 \cdot 10^{-3} \right]^{1/2} = 25.72 \cdot 10^{-4} (\text{м}) \end{aligned}$$

Ємність конденсатора з площею обкладинок $A = 129 \text{ мм}^2$.

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon A}{W} \quad (7.27)$$

$$C = \frac{1.06 \cdot 10^{-10} \cdot 129 \cdot 10^{-6}}{25.72 \cdot 10^{-4}} = 5.32 \cdot 10^{-9} \text{ Ф.}$$

Питома ємність конденсатору з площею р-п-переходу:

$$C_0 = \frac{C}{S}, \quad C_0 = \frac{5.32}{0.25} = 21.28 \text{ Ф} \quad (7.28)\text{і}$$

Добротність конденсатору:

$$Q = \frac{1}{2\pi f C R_n} \quad (7.29)$$

де f - робоча частота,
 R_n – об'ємний опір матеріалу напівпровідника.

$$Q = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 10^6 \cdot 5,32 \cdot 10^{-12} \cdot 30} = \frac{1}{10022,88 \cdot 10^{-6}} = 99,7(\text{Ом}).$$

Температурний коефіцієнт ємності заданого конденсатору:

$$TKE = \frac{1}{3} \left[2TK(\varepsilon_n) - \frac{\Delta\varphi_0}{\Delta\varphi_0 - U} TK(\Delta\varphi) \right], \quad (7.30)$$

де $TK(\varepsilon_n) \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$,
 $TK(\Delta\varphi) \approx -6 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$,
 $\Delta\varphi_0 = 0,7 \text{ В}$.

$$\begin{aligned} TKE &= \frac{1}{3} \left[2 \cdot 2 \cdot 10^{-4} - \frac{0,7}{0,7 - 5} \cdot (-6 \cdot 10^{-3}) \right] = \\ &= \frac{1}{3} \left[4 \cdot 10^{-4} \cdot 0,103 \cdot (-6 \cdot 10^{-3}) \right] = \\ &= \frac{1}{3} \left[4 \cdot 10^{-4} - 0,98 \cdot 10^{-3} \right] = -1,007 \end{aligned}$$

Знаходимо залежність ємності р-п-переходу від зворотної напруги:

$$C_U = C_0 \left[\frac{\varphi_K}{(\varphi_K + U)} \right]^{\frac{1}{n}}, \quad (7.31)$$

де C_U – ємність при зворотній напрузі $U = 5 \text{ В}$,
 $C_0 = 21,28 \text{ Ф}$,
 $\varphi_K = 0,7 \text{ В}$ – контактний потенціал типу конденсатора.

$$C_U = 21,28 \cdot 10^{-12} \left[\frac{0,7}{0,7 + 5} \right]^{\frac{1}{2}} = (21,28 \cdot 0,122^{\frac{1}{2}}) = 7,46(\text{nФ}).$$

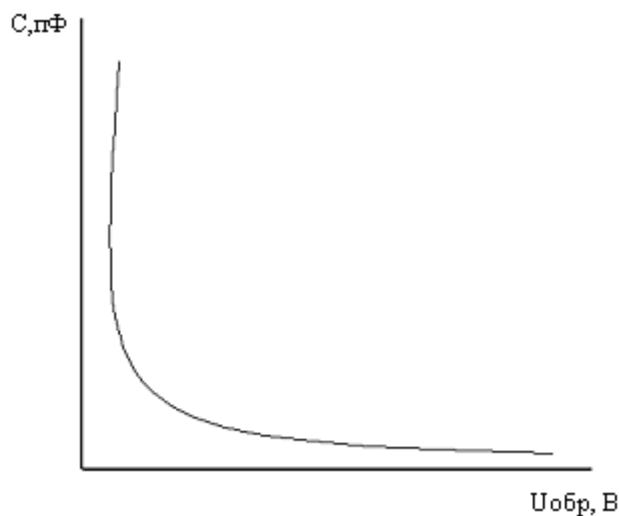


Рисунок 7.1 - ВФХ конденсатору на основі р-п-переходу

ЛІТЕРАТУРА

1. Гуртів В.А. Твердотільна електроніка. К.: Техносфера, 2017. 408 с.
2. Жеребцов І.П. Основи електроніки. К.: Енергоатом вид., 2015. 128с.
3. Ніконова З.А., Небеснюк О.Ю. Твердотільна електроніка: Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни: «Твердотільна електроніка». Запоріжжя: 2018. 35с.
- 4 .Ніконова З.А. Твердотільні компоненти мікро – та наноелектроніки : конспект лекцій «Твердотільні компоненти мікро – та наноелектроніки » для студ. спец. 153 «Мікро – та наносистемна техніка». Запоріжжя: ІННІ ЗНУ, 2020. 95с.
- 5 Готра З.Ю. Фізичні основи електронної техніки. Львів: Бескид Біт. , 2017. 55с.
- 6 Баранський П.І. Напівпровідникова електроніка: довідник. Київ :Наукова думка, 2018. 358с.
- 7 Калніболотський Ю.М. Розрахунок та конструювання мікросхем. Київ: Вищ. школа, 2016. 121с.
- 8 Тугов Н.М. Напівпровідникові прилади . К.: Енергія, 1990. 166с.
- 9 Викулін І.М. Фізика напівпровідникових приладів, Харків: Радіо і зв'язок, 1990. 542с.
- 10 Матвійків М.Д. Елементна база електронних апаратів: підручник. Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2017р. 428с.
- 11.Швец С.Я Твердотільна електроніка: Інтерактивний лабораторний практикум з твердотільної електроніки. Запоріжжя : 2013. 95с.
- 12.Ніконова З.А., Небеснюк О.Ю., Ніконова А.О. Твердотільна електроніка : Навчальний посібник до курсового проекту з дисципліни: «Твердотільна електроніка». Запоріжжя: 2011. 100с.
- 13.Ніконова З.А., Небеснюк О.Ю. Твердотільна електроніка: конспект лекцій «Твердотільна електроніка». Запоріжжя: 2014. 95с.
14. Гусев В.Г. Електроніка . Київ: Вища школа, 1991.79с.
15. ТеоховВ.А. Задачник з електронних пристроїв . К.: Енергоатом вид., 1983. 288с.
16. Ляшко М.Н. Задачі та вправи з електроніки. Київ: Вища школа, 1992. 89с.
17. Степаненко І.П. Основи теорії транзисторів. К.: Енергія, 1997. 480с.
18. V.V. Odinson, G.Ya. Pavlov. New processing equipment for innovative technologies micro, nano - and radio electronics. Technology and de-signing in the electronic equipment, 2011. v.3. PP. 41 - 43.
19. Green M. A. Third generation photovoltaics: solar cells for 2020 and beyond . Physic, 2012. Vol. E 14. PP. 65 - 70.

Інформаційні ресурси:

1. Наукова бібліотека Запорізького національного університету. URL: <http://library.znu.edu.ua/>
2. Система електронного забезпечення навчання ЗНУ. URL: <https://moodle.znu.edu.ua/>
3. Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського. URL: <http://www.nbuv.gov.ua/>
4. AnyLogic: імітаційне моделювання для бізнесу URL: <https://www.anylogic.com/>