



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ**

**І.М. Бондаренко, О.В. Бородин,
О.Б. Галат, В.П. Карнаушенко**

ТВЕРДОТІЛЬНА ЕЛЕКТРОНІКА

Харків 2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

І.М. Бондаренко, О.В. Бородин,
О.Б. Галат, В.П. Карнаушенко

ТВЕРДОТІЛЬНА ЕЛЕКТРОНІКА

Навчальний посібник

Харків 2020

УДК 621.396.67

*Рекомендовано до друку рішенням Вченої ради
Харківського національного університету радіоелектроніки
(протокол № 3/14-2 від 30.04.2020)*

Бондаренко І.М., Бородін О.В., Галат О.Б., Карнаушенко В.П.

Твердотільна електроніка: навч. посібник для студентів ЗВО. /
І.М. Бондаренко, О.В. Бородін, О.Б. Галат, В.П. Карнаушенко. – Харків:
ХНУРЕ, 2020. – 236 с.

ISBN 978-966-659-291-3

Викладено основні фізичні принципи функціонування напівпровідникових електронних компонентів, їхні електричні параметри та характеристики, режими роботи, приклади використання в електронних схемах.

Розглянуто найбільш поширені структури діодів, біполярних і польових транзисторів, тиристорів, світлодіодів та фотодіодів, наведені приклади щодо моделювання роботи напівпровідникових компонентів у пакетах прикладних програм систем автоматизованого проектування.

Матеріал підібрано на основі конспектів лекцій з відповідних дисциплін, що читались авторами для студентів Харківського національного університету радіоелектроніки.

Рекомендовано як навчальний посібник для студентів усіх форм навчання спеціальностей «Електроніка» та «Мікро- та наносистемна техніка».

Рецензенти:

І.В. Прасол, доктор техн. наук, доцент, професор кафедри БМІ ХНУРЕ,

О.Ю. Панченко, доктор фіз.-мат. наук, професор, завідувач кафедри ПЕЕА ХНУРЕ.

Іл.: 135. Бібліогр. наймен.: 16 назв.

ISBN 978-966-659-291-3

© І.М.Бондаренко, О.В. Бородін,
О.Б. Галат, В.П. Карнаушенко,
2020

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ	5
ВСТУП.....	6
1 ФІЗИЧНІ ОСНОВИ НАПІВПРОВІДНИКОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ	11
1.1 Загальні властивості напівпровідників	11
1.2 Елементи зонної теорії твердого тіла.....	14
1.3 Напівпровідники власні і домішкові	20
1.4 Електропровідність, електричні струми і поля в напівпровідниках.....	30
1.5 Нерівноважні електрофізичні процеси в напівпровідниках	36
1.6 Поверхневі явища.....	38
1.7 Фотоелектричні і термоелектричні явища в напівпровідниках	42
2 КОНТАКТНІ ЯВИЩА В НАПІВПРОВІДНИКАХ	48
2.1 Різновиди і технологія <i>p-n</i> -переходів	48
2.2 Рівноважний стан <i>p-n</i> -переходу	53
2.3 Вольтамперна характеристика <i>p-n</i> -переходу.....	60
2.4 Технічні властивості реального <i>p-n</i> -переходу	68
2.5 Вплив неелектричних факторів на властивості і характеристики <i>p-n</i> -переходів	72
2.6 Ємнісні властивості <i>p-n</i> -переходу.....	75
2.7 Контакти метал–напівпровідник. Гетероперехід	78
3 НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДІОДИ.....	83
3.1 Загальні властивості і різновиди діодів.....	83
3.2 Випрямляючі діоди.....	84
3.3 Високочастотні діоди	90
3.4 Стабілітрони.....	92
3.5 Варикапи.....	96
3.6 Імпульсні діоди	98
4 БІПОЛЯРНІ ТРАНЗИСТОРНІ СТРУКТУРИ.....	102
4.1 Побудова і принцип дії біполярних транзисторів	102
4.2 Схеми включення, характеристики транзистора.....	109
4.3 Еквівалентні схеми транзистора. Параметри.....	118
4.4 Частотні і шумові властивості транзисторів. Частотні властивості БТ ...	126
4.5 Різновиди транзисторів	133

5 ПОЛЬОВІ ТРАНЗИСТОРИ.....	146
5.1 Побудова і різновиди польових транзисторів	146
5.2 Польові транзистори з <i>p-n</i> -затвором.....	149
5.3 Характеристики, експлуатаційні властивості та параметри польових транзисторів з <i>p-n</i> -затвором	153
5.4 Принципи дії, характеристики польових транзисторів з ізолюваним затвором.....	163
5.5 Еквівалентна схема польових транзисторів. Частотні і шумові властивості	169
5.6 Порівняння біполярних і польових транзисторів.....	171
6 НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПРИЛАДИ 3 НЕГАТИВНИМ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИМ ОПОРОМ	173
6.1 Загальні властивості приладів з негативним диференціальним опором.....	173
6.2 Тунельні діоди.....	175
6.3 Лавино-пролітні діоди.....	182
6.4 Діоди Ганна	185
6.5 Тиристри	191
7 ПРИЛАДИ ТВЕРДОТІЛЬНОЇ ОПТОЕЛЕКТРОНІКИ	197
7.1 Джерела випромінювання. Світлодіоди, лазери.....	197
7.2 Фотоелектронні прилади.....	204
7.3 Оптрони	216
8 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ КОМПОНЕНТІВ	220
8.1 Моделі, засоби і технологія комп'ютерного моделювання напівпровідникових приладів.....	220
8.2 Методика формування файлу проекту дослідження напівпровідникового компоненту.....	221
8.3 Дослідження характеристик випрямляючих діодів засобами САПР	224
8.4 Дослідження характеристик польових транзисторів за допомоги САПР OrCAD	228
8.5 Дослідження температурних залежностей характеристик напівпровідникових компонентів засобами САПР	230
8.6 Дослідження частотних властивостей напівпровідникових компонентів	232
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА	235

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

АЛП ВД – автоматизований лабораторний практикум з віддаленим доступом;
АПК ВД – апаратно-програмний комплекс з віддаленим доступом;
АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;
БТ – біполярний транзистор;
ВАХ – вольт-амперна характеристика;
ЕП – емітерний перехід;
ЕРС – електрорушійна сила;
ІМС – інтегральна мікросхема;
КП – колекторний перехід;
НПП – напівпровідниковий прилад;
ПЕОМ – персональна електронно-обчислювальна машина;
ПЗД – пристрій збору даних;
ПК – персональний комп'ютер;
ПТ – польовий транзистор;
САПР – система автоматизованого проектування;
СБ – режим із спільною базою;
СВ – режим із спільним витоком;
СЕ – режим із спільним емітером;
СЗ – режим із спільним затвором;
СК – режим із спільним колектором;
СС – режим із спільним стоком;
ФЕ – фотоелемент;
ФР – фоторезистор;
ФТ – фототранзистор.

ВСТУП

Перспектива сталого зростання економічного потенціалу держави безперечно пов'язана з проникненням електроніки в усі галузі життєдіяльності, техніки і науки. Особливо насиченими електронікою стають майже усі види виробництва та інформаційних технологій. Треба також зважити на вклад електроніки в розвиток військової техніки та навіть військових доктрин. Хоча ця галузь не може належати до гуманітарних, але насамперед з неї починався прогрес електроніки.

Історично так склалось, що початок становлення електроніки співвідносять з початком становлення та розвитку радіотехніки і радіофізики. Зараз можна у визначення електроніки вкладати не тільки те, що пов'язано з радіоелектронікою, а й з іншими її напрямками, враховуючи їхній високий рівень розвитку.

Електроніка – це галузь науки і техніки, що базується на явищах руху електронів у різних середовищах, взаємодії з ними і фізичними полями різної природи, та визначає основи створення приладів і засобів для формування, обробки, зберігання та передавання інформації і деяких станів енергії.

У зв'язку з існуванням у технічній термінології та літературі подвійного використання термінів «прилад», «пристрій», «засіб» у сполученні з прикметником «електронний», «радіотехнічний», «вимірювальний» та ін. конкретизуємо їхнє значення у подальшому викладенні. Зокрема, для слов'яномовного середовища є характерним застосування терміну «електронний прилад» для визначення виробу електроніки, що має завершений конструктив і може використовуватися самостійно, але, в основному, у сполученні з іншими приладами та електрорадіоелементами для формування та перетворення різної інформації, у тому числі, і у вигляді електричних, електромагнітних та інших сигналів. Наприклад, напівпровідниковий чи вакуумний діод є електронним приладом, який використовується в основному для випрямлення змінних струмів і, відповідно, напруг; детектування радіосигналів та ін. Діоди мають завершений для технічного застосування конструктив. Використовуються вони в електричному сполученні з резисторами, конденсаторами, індуктивними дроселями та трансформаторами для реалізації вказаних вище функцій. Тому діоди, транзистори тощо – це електронні прилади.

Електронним пристроєм прийнято вважати конструктивно завершений для технічного використання виріб, що реалізує електричне з'єднання електронних приладів та електрорадіоелементів відповідно до певного схемотехнічного рішення, призначений для виконання певних функцій, формування й обробки сигналів. Електронні пристрої більш спеціалізовані порівняно з електронними приладами. Тому їхня номенклатура більш динамічна, хоч також має універсальні різновиди, як, наприклад, генератори, підсилювачі, вторинні джерела живлення, аналогово-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі та ін. Вчасно відмітити, що в ході використання мікроелектронної технології їхнє створення електронні пристрої можуть реалізуватися у вигляді інтегральної мікросхеми. У такому вигляді вони стають електронними приладами.

Електронні засоби є функціонально завершеними видами або частинами електронної апаратури, що виконують технічно розповсюджені або спеціалізовані функції на відповідному рівні формування і обробки інформації для широкого використання.

На сьогодні напрямки електроніки можна пов'язувати з електронними явищами у відповідних середовищах або ж із галузями її використання. Так, відокремлюють твердотільну, вакуумну, плазмову, квантову електроніку та ін. Щодо напрямку використання існує розділення на радіоелектроніку, електроніку інформаційних засобів, оптоелектроніку, силову або енергетичну електроніку та ін.

Першу групу напрямків взагалі об'єднує так звана фізична електроніка, а другу – технічна. Зрозуміло, що технічна електроніка у кожному з її напрямків базується на фізичній електроніці.

Історія розвитку радіотехніки, телебачення, сучасної обчислювальної техніки – це в основному історія розвитку електронних приладів, включаючи мікроелектроніку. Тому не буде перебільшенням стверджувати, що вивчення електронних приладів і засобів є процесом одержання фундаментальних знань для різних професій на великий період їхнього розвитку. І найбільшого успіху досягатиме той, хто краще оволодіє сучасними і майбутніми досягненнями у розвитку приладів електроніки.

Зважаючи на широке використання електронних приладів, їх більш доцільно класифікувати за принципом функціонування та фізичними явищами, на яких вони базуються. У свою чергу, ці явища належать до двох великих груп – електронні явища у вакуумі та газовій плазмі і електронні явища в твердих тілах (середовищах). Відповідно, виділяють вакуумно-плазмову

електроніку та твердотільну електроніку. Однак, потрібно відмітити, що набуває помітного розвитку і електроніка, яка базується на електронних явищах під час хімічних перетворень, а також у біологічних середовищах. Їм відповідає становлення хемотроніки та біоелектроніки.

Твердотільна електроніка на сьогодні подана в основному напівпровідниковими дискретними приладами та ІМС. Якраз ця елементна база найбільше використовується під час розробки та виробництва сучасної електронної апаратури. Такому стану відповідає рівень функціональних можливостей та експлуатаційних конструктивно-технологічних характеристик цих електронних приладів.

Насамперед, завдяки становленню і розвитку мікроелектроніки існуюча елементна база, представлена широким спектром ІМС, значно перевершує майже за всіма показниками вакуумно-плазмову елементну базу. Це призвело до майже повного витіснення останньої із технічного вжитку.

Поряд з ІМС твердотільна електроніка подана в елементній базі ще й напівпровідниковими приладами. Це напівпровідникові діоди, транзистори, тиристори, датчики та ін. Такі прилади за принципом дії та технологією створення схожі з відповідними елементами ІМС. Тому за конструктивно-технологічними ознаками та експлуатаційними характеристиками вони цілком сумісні з мікроелектронною елементною базою.

Історія становлення та розвитку твердотілої напівпровідникової електроніки починається дискретними напівпровідниковими приладами. Мікроелектроніка та її елементна база – ІМС історично і концептуально є вищим ступенем технічної напівпровідникової електроніки на сьогодні.

Зосередження на одному історичному аспекті становлення, коли йде мова про вступ до вивчення дисципліни, не завжди цілком достатньо і доцільно. Тому зробимо спробу поєднати історичний аспект з концептуальним. В основі концепції розвитку твердотільної електроніки лежить становлення знань про фізику явищ у твердотілих структурах та створення різновидів штучних структур, що характеризуються новими електрофізичними властивостями.

Історію становлення напівпровідникової електроніки можна було б починати з експериментального встановлення специфічних електрофізичних властивостей деяких твердотілих сполук, які за кількісною оцінкою електропровідності знаходились між провідниками і діелектриками. Тому такі матеріали стали називатися напівпровідниковими. Але перші напівпровідникові прилади стали з'являтися тільки на початку 20-х років XIX сторіччя. Це були в основному діодні структури на полікристалічних матеріалах. Водночас з'являється перша

теорія твердотілого випрямовувача, запропонована Шотки (1923 р.). Необхідно зазначити, що на період 1905–1940 років приходить бурхливий розвиток вакуумної електроніки, підсилювальних ламп, електронно-променевих приладів, фотоелементів та фотопомножувачів тощо. З урахуванням цього моменту можна зрозуміти не дуже великі досягнення у розвитку напівпровідникових приладів. Але знання в області фізики напівпровідників зростали. Разом з інтересом до створення твердотілого аналога підсилювальної вакуумної електронної лампи це зумовило початок бурхливого розвитку напівпровідникової електроніки з початку 50-х років XIX сторіччя. Найбільш важливим мабуть було створення У. Шоклі теорії електронно-діркового *p-n*-переходу та експериментального зразка площинного сплавного біполярного транзистора (разом з Д. Бардіном та У. Браттейном у 1952 р.). Якраз глибоке теоретичне розуміння властивостей *p-n*-переходів зумовило розробку і швидкий розвиток біполярних транзисторних структур і напівпровідникових приладів на їхній основі.

З розвитку фізики напівпровідників стало зрозуміло, що створення твердотілих електронних приладів для генерування та підсилення електричних сигналів можливе лише на базі монокристалічних напівпровідників. Тільки монокристали германію, кремнію мали відтворювані властивості, на яких могло базуватися функціонування напівпровідникових діодів і транзисторів, що мають експлуатаційні характеристики, кращі ніж у електровакуумних ламп. Згодом чітко визначились переваги кремнію, як матеріалу напівпровідникової електроніки, і почався розвиток кремнієвої технології.

Починаючи зі сплавного транзистора всі нові рішення у розвитку напівпровідникової електроніки не були випадковими і в основному теоретично передбачувались. Тому під час вивчення цієї області електроніки важливо враховувати значущість відповідно фундаментальних і теоретичних знань. Зокрема це стосується фізики напівпровідників, фізики і теорії *p-n*-переходів, структур метал–діелектрик–напівпровідник (контактних явищ взагалі). Менш ніж за десять років було запропоновано і розроблено велику кількість різновидів напівпровідникових діодів та біполярних транзисторів різного функціонального призначення. Потрібно зазначити, що спектр функціональних можливостей цих електронних приладів значно більш широкий, ніж у їхніх електровакуумних аналогів. Так, напівпровідникові діоди можна розробляти і використовувати не лише для випрямлення змінних струмів, а також для електронного перестроювання коливальних контурів, генерації та підсилення електричних коливань, вимірювання температури, реєстрації випромінювання

різного спектрального діапазону, перетворення сонячного світла в електричний струм чи напругу.

У 1960 р. Д. Канг і М. Аталла запропонували конструкцію польового МОН-транзистора, який став деякою мірою альтернативою існуючому біполярному.

Дискретні польові транзистори почали конкурувати також в енергетичній і НВЧ електроніці з біполярними.

За останні 40 років «епохальних» змін у транзисторній електроніці не сталося. Однак певний потенціал для таких змін накопичено. В першу чергу потрібно виділити появу гетероперехідних транзисторів біполярного і польового типів.

Навчальний посібник призначений для студентів спеціальностей 171 «Електроніка», 153 «Мікро- та наносистемна техніка» та ін. під час вивчення дисциплін, що пов'язані з основами твердотільної фізичної електроніки та мікроелектроніки.

1 ФІЗИЧНІ ОСНОВИ НАПІВПРОВІДНИКОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

1.1 Загальні властивості напівпровідників

Для застосування в електроніці будь-якої речовини насамперед важлива його здатність проводити електричний струм. Залежно від цієї здатності речовини розділяють на провідники, напівпровідники та діелектрики. Для кількісної оцінки цієї здатності вводять величину *питомої електричної провідності* чи *електропровідності* σ . Провідність σ і питомий опір речовини ρ – протипропорційні один одному:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}. \quad (1.1)$$

До провідників належать речовини з провідністю $\sigma > 10^4$ См/см (як одиницю довжини зручно застосовувати сантиметри через невеликі розміри зразків напівпровідникових матеріалів). Речовини, для яких $\sigma < 10^{-10}$ См/см, вважають діелектриками. Напівпровідники займають проміжне положення. Їхня питома провідність знаходиться в межах $10^{-10} \dots 10^4$ См/см.

Крім величини провідності, у напівпровідників є ще ряд характерних відмінних ознак:

- сильна залежність провідності від температури, при цьому з підвищенням температури провідність збільшується, а у провідників – зменшується;
- залежність провідності від різного роду зовнішніх впливів (освітлення, іонізуюче випромінювання тощо); провідники до таких впливів практично не чуттєві;
- висока чутливість до чужорідних домішок; при введенні домішок у напівпровідники, їх провідність, як правило, зростає, а у провідників – зменшується.

Напівпровідникові властивості проявляють багато речовин: хімічні елементи (германій – Ge, кремній – Si, миш'як – As, бор – B й ін.), неорганічні сполуки з двох і більш елементів (арсенід галію – GaAs, антимонід індію – InSb, телурид вісмуту – Bi_2Te_3 та ін.), а також багато органічних сполук. Найбільш широке застосування як технічні напівпровідникові матеріали знаходять германій і кремній.

Структура напівпровідників. Напівпровідниковими властивостями володіють речовини, що мають кристалічну, аморфну, рідку, склоподібну структури.

Відомо, що атом будь-якої речовини складається з позитивно зарядженого ядра і негативно заряджених електронів, які обертаються навколо нього. Орбіти електронів знаходяться на різній відстані від атомного ядра і групуються в електронні оболонки. Електрони зовнішньої оболонки, названі валентними, слабкіше зв'язані з ядром, ніж внутрішні електрони.

Взаємодія валентних електронів і забезпечує з'єднання атомів у кристали або інші структури.

Кристалічна структура відзначається тим, що створюючи її, атоми розташовуються в просторі у суворо закономірному порядку, утворюючи *упорядковані кристалічні* решітки. Ті місця в решітках, де знаходяться атоми, називаються вузлами.

Багато напівпровідників, у тому числі чотиривалентні германій і кремній, мають решітку алмазного типу. Кожен окремо узятий атом таких решіток оточений чотирма однаково віддаленими сусідніми атомами.

Між атомами в кристалі такого типу діють *парноелектронні* чи *ковалентні зв'язки*. Під час утворення ковалентних зв'язків відбувається взаємний обмін валентними електронами між сусідніми атомами. Кожен валентний електрон починає обертатися навколо ядер двох атомів (рис. 1.1, а).

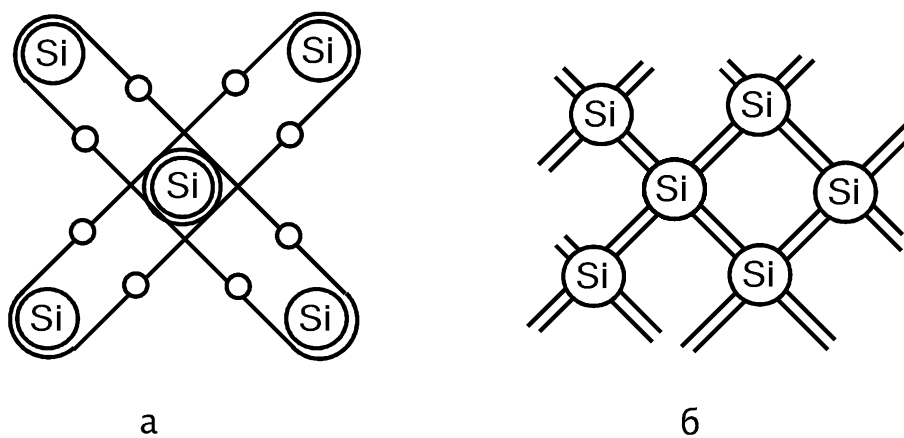


Рисунок 1.1 – Площинне зображення кристалічних ґрат

Атом набуває при цьому чотири парні електронні орбіти, на яких знаходяться чотири власних і чотири електрони найближчих сусідів, тобто всього вісім валентних електронів. Такі електронні оболонки, як відомо, найбільш стійкі. Тому ковалентні зв'язки відзначаються високою міцністю і для їхнього розриву потрібна значна енергія.

В ході розгляду фізичних процесів у напівпровідниках використовують площинне зображення кристалічних ґрат (рис. 1.1, б). Кожна лінія тут відповідає одному валентному електрону, що обертається навколо пари сусідніх атомів.

Напівпровідникові матеріали отримують у вигляді монокристалічних злитків, які вирощують із розплавів напівпровідників. У процесі їхнього вирощування виникають різного роду неоднорідності та *дефекти ґрат*. До них належать зміщення атомів у міжвузля, відсутність атомів у вузлах ґрат (вакансії), порушення правильності чергування площин ґрат (дислокації) тощо. До порушень ідеальної структури призводить також впровадження в решітку чужорідних домішок.

Якість напівпровідникових приладів (НПП) значною мірою залежить від кількості дефектів і домішок у кристалі. Тому їхня концентрація нормується технічними умовами на напівпровідникові матеріали. Особливо високі вимоги висувають до матеріалів, які використовують для виробництва інтегральних мікросхем (ІМС).

Концентрація дефектів чи домішок визначається їхньою кількістю в 1 см^3 і має розмірність $1/\text{см}^3$ (см^{-3}).

Аморфна структура характеризується тим, що порядок у розташуванні існує тільки для сусідніх чи суміжних атомів, так званий ближній порядок. З відстанню ця погодженість розташування зменшується і через $5\text{--}10\text{\AA}$ зникає. У таких речовин немає далекого порядку розташування атомів. Напівпровідникові властивості в аморфному стані спостерігаються у германії, кремнії, телурі, селені та інших елементах, а також хімічних сполуках.

Рідкі напівпровідники – речовини, що мають напівпровідникові властивості в рідкому стані. Розташування найближчих сусідніх атомів не є в таких структурах цілком хаотичним, тобто ближній порядок частково зберігається. Цей порядок зникає лише поступово при достатньому підвищенні температури. Розплавлені телур, свинець, багато оксидів металів і ін. матеріали належать до рідких напівпровідників.

Скловидні напівпровідники є переохолодженими рідинами, тобто рідини з дуже високою в'язкістю. Прикладом можуть служити халькогенідні стекла, такі, як As_2S_3 , As_2Se_3 , As_2Te_3 . Склоподібні напівпровідники мають широкий діапазон властивостей, що і забезпечує їхнє практичне використання.

Найбільше застосування в електроніці знаходять кристалічні напівпровідники.

Запитання й завдання для самоперевірки

1. На які групи поділяють речовини за їхньою здатністю проводити електричний струм?
2. Що таке питома електрична провідність чи електропровідність?

3. Як кількісно відрізняються провідності провідників, напівпровідників і діелектриків?
4. Які відмітні ознаки напівпровідників, крім провідності?
5. Які структури можуть мати речовини з напівпровідниковими властивостями?
6. Яка структура називається кристалічною?
7. Що таке кристалічні решітки?
8. Який зв'язок між атомами в кристалі називається ковалентним?
9. Чому ковалентний зв'язок відрізняється міцністю?
10. Що таке «дефекти» кристалічних решіток?

1.2 Елементи зонної теорії твердого тіла

Більш повне розуміння властивостей напівпровідників дає зонна теорія твердого тіла.

Енергетичний спектр атома. Відповідно до положень цієї теорії електрони одиночного атома будь-якої речовини можуть мати тільки визначені значення енергії або знаходитися на визначених дискретних енергетичних рівнях (ці рівні часто називають «дозволеними»). Сукупність усіх цих рівнів утворює *енергетичний спектр електронів атома* (рис. 1.2, а, електрони позначені точками; W – енергія електронів).

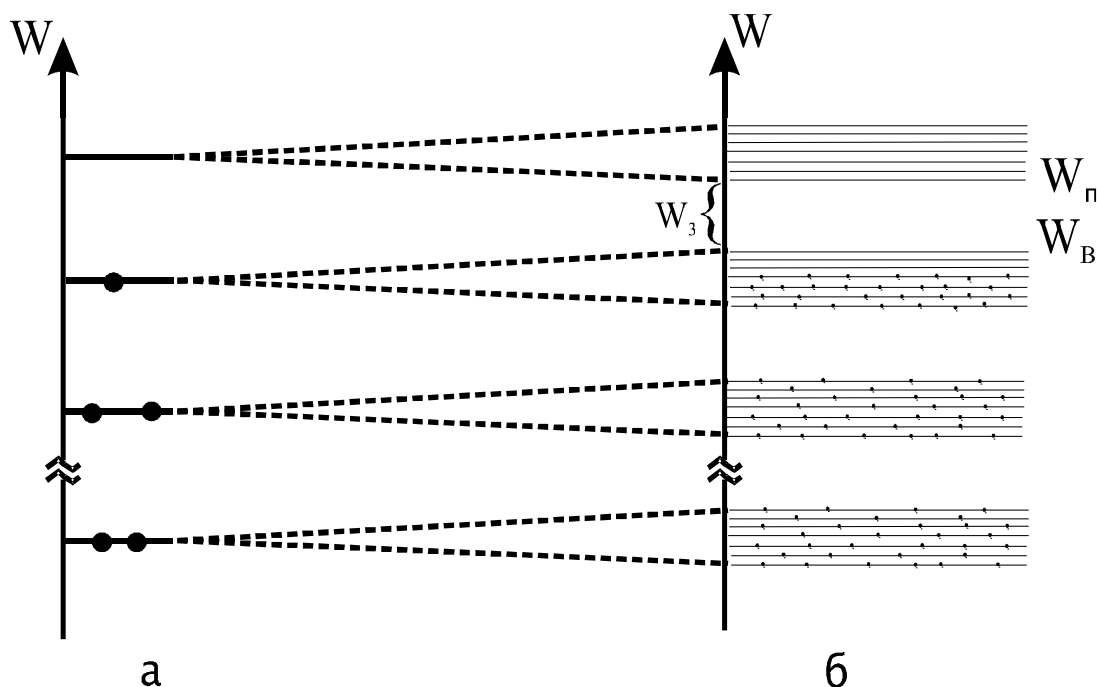


Рисунок 1.2 – Енергетичні спектри одиночного атома (а) і кристалічних ґрат (б)

Енергетичний рівень електрона визначає і його просторове положення в електронній оболонці атома. Чим вищий рівень, тим далі від ядра знаходиться електрон.

Відповідно до принципу Паулі, що є одним з основних принципів зонної теорії, на одному рівні може знаходитися не більше двох електронів. При температурі абсолютного нуля за шкалою Кельвіна ($T=0\text{K}=-273^{\circ}\text{C}$) електрони заповнюють нижні рівні спектра. На верхніх із зайнятих рівнів знаходяться валентні електрони, число яких дорівнює номеру групи елементів із таблиці Менделєєва.

З підвищенням температури чи за інших зовнішніх впливів, наприклад, під час освітлення, електрони можуть переходити з низьких на більш високі енергетичні рівні. При цьому рівень, куди переходить електрон, має бути вільним, а електрон має отримати визначену «порцію» енергії. Якщо вихідний рівень відповідає енергії W_1 , а рівень, на який переходить електрон W_2 , то необхідне збільшення енергії під час переходу має бути $\Delta W=W_2-W_1$. Під час зворотного переходу електрон має виділити енергію ΔW . У таких переходах, як правило, беруть участь валентні електрони, що займають зовнішні електронні оболонки і сприймають першими зовнішні впливи.

Енергію електронів вимірюють в одиницях, названих *електрон-вольтами (eV)*. За 1 eV приймають енергію, що отримує електрон під час проходження їм різниці потенціалів у 1 В.

Енергетичний спектр кристалів. У ході об'єднання атомів у кристалічні решітки кожний з дозволених рівнів їх спектра розщеплюються на ряд близько розташованих підрівнів. Вони утворюють *дозволені зони* (рис. 1.2, б). Завдяки цьому принцип Паулі залишається справедливим і для кристалів. Кількість підрівнів у дозволених зонах дорівнює числу атомів у кристалі. Тому кожна пара електронів може зайняти свій власний рівень.

В результаті енергетичний спектр кристала є системою дозволених і *заборонених зон*, що чергуються.

Дозволена зона, у якій знаходяться валентні електрони, називається *валентною зоною*, та що знаходиться вище дозволеної зони – *зоною провідності*.

Валентна зона – це сукупність дозволених рівнів валентних електронів, що займають свої місця в ковалентних зв'язках між атомами кристалічної решітки. Число дозволених рівнів у цій зоні цілком відповідає числу валентних електронів. У протилежність цьому зона провідності є сукупністю дозволених рівнів, що можуть бути зайняті електронами, які перейшли в простір між вузлами решітки, тобто після розриву ковалентних зв'язків. Оскільки такі

електрони можуть брати участь в електропровідності, звідси і впливає назва зони провідності.

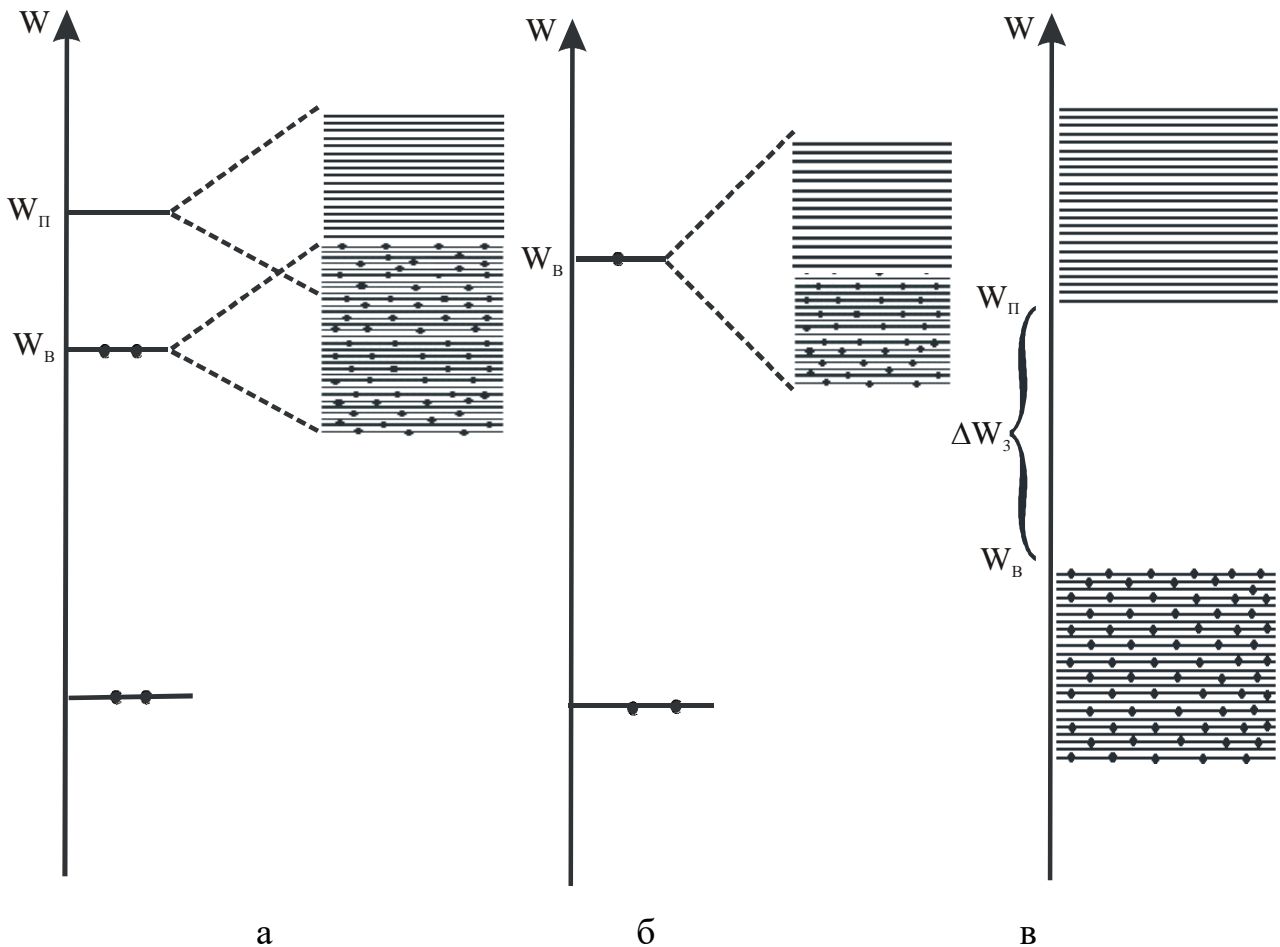


Рисунок 1.3 – Зонні діаграми провідників (а, б) і напівпровідників (в)

Електричні властивості твердого тіла визначаються структурою саме цих двох зон, а також розділяючою їх забороненою зоною. Тому під час аналізу цих властивостей розглядають тільки ці три зони. Їх графічне подання називають *зонною діаграмою*. Найважливішими параметрами зонної діаграми є верхній рівень («стеля») валентної зони W_B , нижній рівень («дно») зони провідності W_Π , а також ширина забороненої зони $\Delta W_3 = W_\Pi - W_B$ (рис. 1.2,б).

При розгляді процесів у кристалах враховують, що кожен рівень зонної діаграми відповідає визначеному атому кристалічних решіток. Отже, під час переходу електрона з одного рівня на інший відбувається його переміщення в просторі кристала. Звідси впливають такі закономірності:

- для того, щоб електрон брав участь у створенні електричного струму, він має знаходитися в дозволеній зоні з вільними рівнями;
- через велику кількість атомів, що входять до кристалічної решітки, різниця енергій ΔW між найближчими рівнями в дозволеній зоні невелика.

Отже, переходи електронів між рівнями дозволеної зони можуть відбуватися при відносно невеликих збільшеннях їхньої енергії (менше 10^{-3} еВ).

Кристалічна структура і зонна діаграма провідників. У процесі утворення кристала провідника кожен атом такого матеріалу, перш ніж зайняти своє стаціонарне місце в одному з вузлів кристалічних ґрат, іонізується, тобто втрачає усі свої валентні електрони. Валентні електрони утворюють так званий *електронний газ*, що рівномірно заповнює простір між вузлами кристалічної решітки.

Електронний газ у кристалі провідника виконує двояку роль. По-перше, він є своєрідним «цементом», що додає кристалу фізичну стабільність, міцність. Це забезпечується завдяки електростатичній взаємодії між негативно зарядженим електронним газом і позитивно зарядженими іонами, що займають місця у вузлах кристалічної решітки. Такий тип зв'язку між атомами кристалічних решіток називається *електронним*, чи *металевим зв'язком*. По-друге, наявність у кристалі електронів, які вільно переміщуються з місця на місце, обумовлює можливість протікання в них електричного струму, тобто є причиною електропровідності кристала провідника.

Для провідників характерна відсутність забороненої зони ΔW_3 на зонній діаграмі. У деяких із них це відбувається в результаті того, що зона провідності і валентна зона перекриваються (рис. 1.3, а). У результаті перекриття утворюється загальна дозволена зона, рівні якої зайняті електронами тільки частково. В іншому випадку (рис. 1.3, б) перекриття зон відсутнє, однак валентна зона сама по собі виявляється частково вільною.

З точки зору провідності провідників обидві зонні діаграми рівноцінні, тому, обмежившись для простоти другою з них, розглянемо поведження електронів провідника в зовнішньому електричному полі. При цьому вважатимемо, що його температура повільно зростає, починаючи від абсолютного нуля за шкалою Кельвіна.

При $T = 0\text{K}$ електрони займають найнижчі рівні валентної зони (ці рівні на рис. 1.3 позначені точками). Найбільш високий із заповнених рівнів називають *рівнем Фермі* W_F . Під час прикладення електричного поля на кристал валентні електрони зазнають силового впливу з боку цього поля. Їхня енергія зростає, і вони отримують можливість переходити на вільні, дуже близько розташовані рівні з енергією $W > W_F$. Оскільки переміщення по рівнях еквівалентно руху електрона в просторі, то в кристалі провідника виникає електричний струм. Отже, він має провідність навіть при температурі, рівній абсолютному нулю.

Під час розігріву кристала картина трохи змінюється. При $T > 0\text{K}$ атоми решітки роблять коливальні теплові рухи біля своїх стаціонарних положень. Середня енергія цих теплових коливань W_T дорівнює добутку постійної Больцмана k на температуру T :

$$W_T = k T. \quad (1.2)$$

Частина цієї енергії передається валентним електронам, і вони починають переходити на вільні рівні верхньої частини валентної зони. Такі переходи еквівалентні переміщенню електронів у просторі між вузлами ґрат. Якщо зовнішнього електричного поля немає, то ці переміщення носять неупорядкований хаотичний характер і нагадують броунівський рух молекул газу.

Якщо кристал провідника помістити в зовнішнє електричне поле, то на хаотичний рух електронів накладається їхнє упорядковане переміщення або дрейф у напрямку, протилежному напрямку поля. У кристалі виникає струм, названий *дрейфовим струмом*.

У дрейфовому струмі беруть участь практично усі валентні електрони провідника. Їхня концентрація (Концентрація – це кількість часток в одиниці об'єму. Вимірюється в $1/\text{см}^3$ (см^{-3})) велика і тому провідники мають високу провідність. Легко зрозуміти тепер і ефект зниження провідності провідників при підвищенні температури.

Із зростанням температури кристала підсилюються теплові коливання атомів решітки, що заважає спрямованому дрейфу електронів. Як бачимо, зонна теорія переконливо пояснює основні властивості провідників. Аналогічно можна пояснити властивості напівпровідників.

Зонна діаграма напівпровідників відрізняється тим, що валентна зона та зона провідності відділені одна від одної забороненою зоною шириною $\Delta W_z > 0$. Інша особливість в тому, що при температурі $T=0\text{K}$ рівні валентної зони напівпровідника цілком заповнені, а зона провідності цілком вільна (рис. 1.3, в). У кристалічній структурі це відповідає положенню, коли зайняті всі ковалентні зв'язки (рис. 1.1, б).

Якщо при $T=0\text{K}$ кристал напівпровідника помістити в електричне поле, то струму не буде. У валентній зоні немає вільних рівнів, а для переходу валентних електронів у зону провідності енергії зазвичай використовуваних полів недостатньо. Отже, у цьому випадку провідність напівпровідника дорівнює нулю, і він поводить себе як ізолятор.

З підвищенням температури зростає енергія теплових коливань решітки (1.2) і частина цієї енергії, як і в кристалі провідника, передається валентним електронам. Ті з них, що отримали збільшення енергії більш ніж ширина

забороненої зони ΔW_3 , переходять на вільні рівні зони провідності. У кристалі напівпровідника з'являється електронний газ, і він набуває кінцевої провідності. При цьому чим вища температура, тим більша енергія теплових коливань решітки і тим більше число електронів може бути «закинуте» у зону провідності.

Цим обумовлено ефект збільшення провідності напівпровідників із зростанням температури. Однак загальне число вільних носіїв у напівпровіднику, навіть під час сильного розігріву, завжди виявляється значно меншим кількості вільних електронів у кристалі провідника. Тому провідність напівпровідників істотно менша, ніж провідників.

Зонна діаграма діелектрика відрізняється від зонної діаграми напівпровідника шириною забороненої зони. У діелектриків вона така велика, що навіть під час їхнього нагрівання до температури плавлення, енергії теплових коливань решітки виявляється недостатньо для переходу валентних електронів у зону провідності. Тому діелектрики не проводять струм за будь-яких температур. Такими властивостями володіють матеріали із шириною забороненої зони більше 5 еВ. Речовини з меншою шириною забороненої зони належать до напівпровідників. Ширина забороненої зони германію – 0,72 еВ, кремнію – 1,12 еВ, арсеніду галію – 1,42 еВ.

Запитання й завдання для самоперевірки

1. Що називають енергетичним спектром електронів одиночного атома?
2. Якому правилу підкоряється розподіл електронів по дозволених рівнях?
3. На верхньому чи нижньому дозволених рівнях знаходяться валентні електрони атома?
4. Яку енергію має отримати електрон, щоб перейти на більш високий дозволений рівень?
5. Дайте визначення одиниці енергії – «електрон-вольт».
6. Що називають енергетичним спектром електронів кристала?
7. Що таке дозволени енергетичні зони?
8. Яка кількість рівнів у дозволених зонах?
9. Що таке принцип Паулі для електронів кристала?
10. Яку енергетичну зону називають «валентною»?
11. Яка енергетична зона називається «зоною провідності»?
12. Яку енергетичну зону називають «забороненою зоною»?
13. Яку частину енергетичного спектра називають «зонною діаграмою»?

14. Який зв'язок існує між окремим атомом кристала й окремим рівнем дозволеної зони?
15. У якій зоні має знаходитися електрон для того, щоб він міг брати участь в електропровідності?
16. Яка кристалічна структура типових провідників–металів?
17. Що таке електронний газ у кристалі?
18. Чим забезпечується міцність кристала провідника?
19. Який тип зв'язку між атомами кристала називається «електронним» чи «металевим»?
20. Чому кристал провідника добре проводить електричний струм за будь-якої температури?
21. Які особливості зонної діаграми провідників?
22. Як змінюється розподіл електронів по дозволених рівнях провідників під час підвищення температури?
23. Який рівень на зонній діаграмі провідників називають рівнем Фермі?
24. Чим визначається енергія теплових коливань кристалічних ґрат?
25. Що таке концентрація?
26. Чи залежить концентрація електронів в електронному газі провідника від температури?
27. Нарисуйте та поясніть зонну діаграму напівпровідникового кристала.
28. Поясніть, як розподілені електрони в дозволених зонах зонної діаграми напівпровідника при температурі абсолютного нуля $T = 0\text{K}$.
29. Поясніть за допомогою зонної діаграми, чому при $T = 0\text{K}$ напівпровідник поводить себе як ізолятор.
30. Як змінюється розподіл електронів у дозволених зонах зонної діаграми напівпровідника під час підвищення температури?
31. Чому, з погляду зонної діаграми, електропровідність напівпровідників менше, ніж провідників?
32. Чим відрізняється зонна діаграма діелектриків від зонної діаграми напівпровідників?
33. Які значення ширини забороненої зони в діелектриках? Порівняйте із шириною забороненої зони напівпровідників – германію та кремнію?

1.3 Напівпровідники власні та домішкові

Електропровідність напівпровідників сильно залежить від кількості та роду домішок у кристалі. За цією ознакою всі напівпровідникові матеріали підрозділяються на власні та домішкові.

Власний напівпровідник – це напівпровідник з ідеальними кристалічними решітками, цілком вільний від будь-яких домішок.

У природі таких кристалів не існує, тому власний напівпровідник – це ідеалізоване уявлення напівпровідникових кристалів. Реальні кристали тією чи іншою мірою можуть бути близькі до власних напівпровідників.

Носії заряду. Кристалічна структура власного напівпровідника при $T = 0\text{K}$ відповідає рис. 1.1, а зонна діаграма – рис. 1.3, в.

Якщо $T > 0\text{K}$, то за рахунок енергії теплових коливань кристалічних ґрат окремі валентні електрони залишають ковалентні зв'язки та переходять до складу електронного газу (рис. 1.4, а поз. 1).

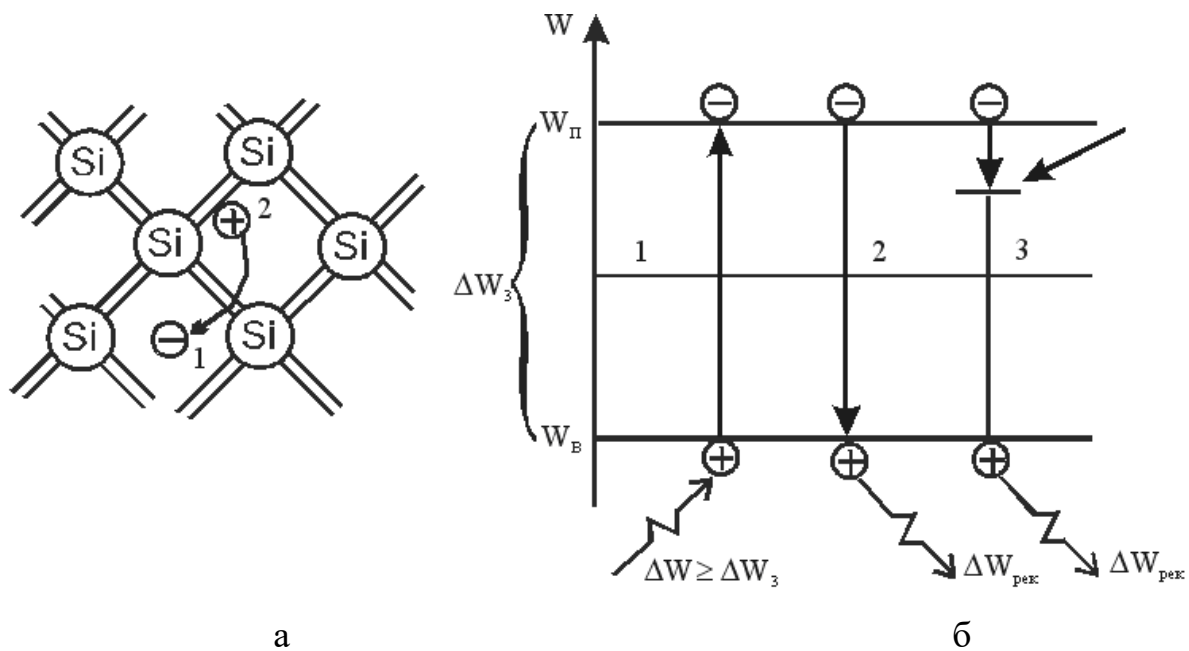


Рисунок 1.4 – Генерація й рекомбінація носіїв заряду у власному напівпровіднику

Вони отримують можливість переміщуватися по кристалу і брати участь у дрейфовому струмі.

Ковалентний зв'язок, який втратив електрон, здобуває позитивний заряд, що дорівнює заряду електрона, і називається діркою (рис. 1.4, а поз. 2). На місце, що звільнилося, може переміститися електрон з іншого зв'язку. Тоді дірка з'явиться там, звідки пішов електрон. Тому дірка може переміщуватися по кристалу і розглядається як рухливий носій позитивного заряду.

Отже, електричний струм у власному напівпровіднику створюється носіями заряду двох «сортів» – електронами та дірками. Вони називаються *власними носіями*. При цьому концентрації електронів n_i і дірок p_i (У позначеннях фізичних величин, що належать до власного напівпровідника, ставлять

індекс «*i*» від англійського слова «intrinsic» (власний) (n_i, p_i тощо) у власному напівпровіднику дорівнюють один одному:

$$n_i = p_i . \quad (1.3)$$

Отже кристал завжди залишається *електронейтральним*, тобто в кожному як завгодно малому (елементарному) його обсязі кількість позитивних об'ємних зарядів Q^+ така ж, як і кількість негативних зарядів Q^- :

$$Q^+ = Q^- . \quad (1.4)$$

Зонна діаграма власного напівпровідника показана на рис. 1.4, б у спрощеному варіанті. Зазначимо стелю валентної зони W_v і дно зони провідності W_p . Таке спрощене подання зонної діаграми можливе тому, що найважливіші електрофізичні процеси та властивості напівпровідникових кристалів пов'язані з переходами електронів із валентної зони в зону провідності. Ці переходи здійснюються через заборонену зону. Ширина забороненої зони $\Delta W_z = (W_p - W_v)$ – один з основних електрофізичних параметрів напівпровідникового кристалу.

У прийнятому варіанті подання зонних діаграм енергетичні рівні в дозволених зонах, тобто на ділянках $W > W_p$ (зона провідності) і $W < W_v$ (валентна зона) не показані через дуже малі «відстані» між дозволеними рівнями в зонах.

Процес утворення пари власних носіїв показано на зонній діаграмі власного напівпровідника стрілкою 1 (рис. 1.4, б). Для переходу в зону провідності валентний електрон має отримати збільшення енергії ΔW , яке перевищує ширину забороненої зони: $\Delta W \geq \Delta W_z$. Звільнений рівень у валентній зоні є діркою, позначеною на рис. 1.4, б знаком «+», електрон у зоні провідності – знаком «-».

Рівень Фермі в напівпровідникових кристалах визначає середню енергію носіїв заряду. У власному напівпровіднику, де концентрація електронів і дірок однакова, практично можна вважати, що він знаходиться посередині забороненої зони W_{Fi} (рис. 1.4, б).

Якщо джерелом енергії для електронів, що переходять у зону провідності, є теплові коливання решітки, то утворення пари власних носіїв називають *тепловою генерацією* (термогенерацією), а самі носії – тепловими.

Поряд із генерацією в кристалі безупинно протікає зворотний процес: електрони із зони провідності повертаються на вільні рівні валентної зони. При цьому зникає пара носіїв – електрон і дірка. Такий процес називають *рекомбінацією*. Рекомбінація може відбуватися або прямим шляхом із зони в зону (рис. 1.4, б стрілка 2), або через окремі дозвольні рівні в забороненій зоні,

що називаються *пастками* (рис. 1.4, б стрілка 3). Енергія $\Delta W_{\text{рек}}$, що виділяється в ході рекомбінації пари носіїв, передається атомам решітки у вигляді тепла чи випромінюється у вигляді кванта світла. Залежно від того, у якій формі виділяється енергія $\Delta W_{\text{рек}}$, розрізняють *безвипромінювальну рекомбінацію* і *випромінювальну*.

У випадку безвипромінювальної прямої рекомбінації електрони безпосередньо переходять із зони провідності у валентну зону, а їхня надлишкова енергія перетворюється в енергію теплових коливань решітки. Оскільки в зоні провідності електрони займають рівні переважно біля дна зони $W_{\text{п}}$, а у валентній зоні – біля стелі зони $W_{\text{в}}$, виділена енергія $\Delta W_{\text{рек}} \approx \Delta W_{\text{з}}$.

Випромінювальна пряма рекомбінація відрізняється від безвипромінювальної тим, що енергія рекомбінації $\Delta W_{\text{рек}}$ виділяється в цьому випадку у вигляді кванта електромагнітного випромінювання, частота якого f може бути визначена із співвідношення:

$$h \cdot f = \Delta W_{\text{рек}} \cong \Delta W_{\text{з}}, \quad (1.5)$$

де h – постійна Планка.

Для практичного застосування найбільш цікаві ті випадки випромінювальної рекомбінації, коли електромагнітне випромінювання, що виділяється під час рекомбінації, належить до оптичного діапазону. На основі цього ефекту працюють твердотільні джерела світла.

У реальних кристалах напівпровідників більш імовірна східчаста рекомбінація, коли електрон переходить у валентну зону не відразу, а через проміжні дозволені рівні (пастки) у забороненій зоні.

При цьому енергія рекомбінації виділяється у вигляді більш дрібних порцій, ніж при прямій рекомбінації. Особливо багато пасток у приповерхневому шарі в зв'язку з наявністю тут численних порушень структури кристала, а також чужорідних атомів і молекул з навколишнього середовища. З цієї причини виділяють так звану поверхневу рекомбінацію, що зазвичай йде більш інтенсивно порівняно з об'ємною, яка спостерігається в більш глибоких шарах кристала.

Одним із найважливіших показників процесів генерації та рекомбінації носіїв заряду в напівпровідниках є *час їх життя* τ . У загальному випадку його визначають окремо для електронів $\tau_{\text{п}}$ і дірок $\tau_{\text{р}}$. Розрізняють також час життя для поверхневих $\tau_{\text{пов}}$ і об'ємних $\tau_{\text{об}}$ областей.

Час життя визначають як середній час між моментами генерації та рекомбінації носіїв заряду. Час життя – це середній час перебування носіїв заряду в активному стані, тобто електронів у зоні провідності, а дірок –

у валентній зоні. Його величина є показником інтенсивності процесу рекомбінації в кристалі. Чим менший час життя τ , тим інтенсивніше протікає процес рекомбінації. Час життя можна регулювати, змінюючи концентрацію центрів рекомбінації в кристалі. Це досягають шляхом введення в кристал спеціальних домішок, наприклад, золота.

Рівноважна концентрація власних носіїв. Якщо температура постійна та відсутні будь-які зовнішні впливи, то в кристалі встановлюється *стан термодинамічної рівноваги*. Число генеруючих в одиницю часу носіїв – називають *швидкістю генерації* $V_{\text{ген}}$, а число рекомбінуючих в одиницю часу носіїв – *швидкістю рекомбінації* $V_{\text{рек}}$. У стані термодинамічної рівноваги ці швидкості однакові $V_{\text{рек}}=V_{\text{ген}}$ і цим забезпечується постійність концентрації носіїв заряду в кристалі. Концентрація носіїв у таких умовах називається *рівноважною*, а самі носії – *рівноважними*.

Показано, що рівноважні концентрації електронів n_i і дірок p_i у власному напівпровіднику визначаються співвідношенням:

$$n_i = p_i = N_0 \cdot (T)^{3/2} \cdot e^{-\frac{\Delta W_3}{2W_T}}, \quad (1.6)$$

де N_0 – слабо залежний від температури коефіцієнт;

e – постійна натуральних логарифмів ($e = 2,718\dots$)...

Інші величини – енергія теплових коливань W_T , ширина забороненої зони

ΔW_3 – нам уже відомі. Показова функція $e^{-\frac{\Delta W_3}{2W_T}}$ у формулі (1.6) називається експонентною. Фізичні величини, описувані експонентними функціями, відрізняються надзвичайно сильною залежністю від їхнього показника. У даному випадку показник експоненти дорівнює відношенню ширини забороненої зони ΔW_3 до енергії теплових коливань $W_T = kT$. Тому концентрація власних носіїв залежить від ширини забороненої зони та температури. Із зростанням температури показник експоненти зменшується, і, оскільки він має негативний знак, концентрація збільшується. При цьому концентрація подвоюється в ході зміни температури всього на кілька градусів.

Про залежність концентрації власних носіїв від ширини забороненої зони ΔW_3 свідчать наступні цифри. У кристалі германію, для якого $\Delta W_3 = 0,72$ еВ, при температурі 20°C $n_i = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

Відповідна концентрація для кремнію, ширина забороненої зони якого дорівнює 1,12 еВ, складає $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Збільшення ширини забороненої зони усього лише на 0,4 еВ призвело до зменшення концентрації власних носіїв приблизно в тисячу разів!

Домішкові напівпровідники містять у своїх ґратах навмисно введені атоми домішок. Введення домішок дозволяє керувати властивостями напівпровідникових матеріалів. Технологічні процеси введення домішок називають *легуванням*, а отримувані при цьому матеріали – легованими. Залежно від типу домішок розрізняють електронні та діркові напівпровідники.

Електронні напівпровідники. Під час введення в решітку чотиривалентного напівпровідника атомів п'ятивалентних елементів (фосфор, миш'як, сурма), чотири валентних електрони домішкових атомів утворюють ковалентні зв'язки. П'ятий валентний електрон домішкового атома виявляється «зайвим». Його зв'язок із домішковим атомом послаблюється, і навіть через невеликий енергетичний вплив з боку ґратки він може перейти до складу електронного газу (рис. 1.5, а).

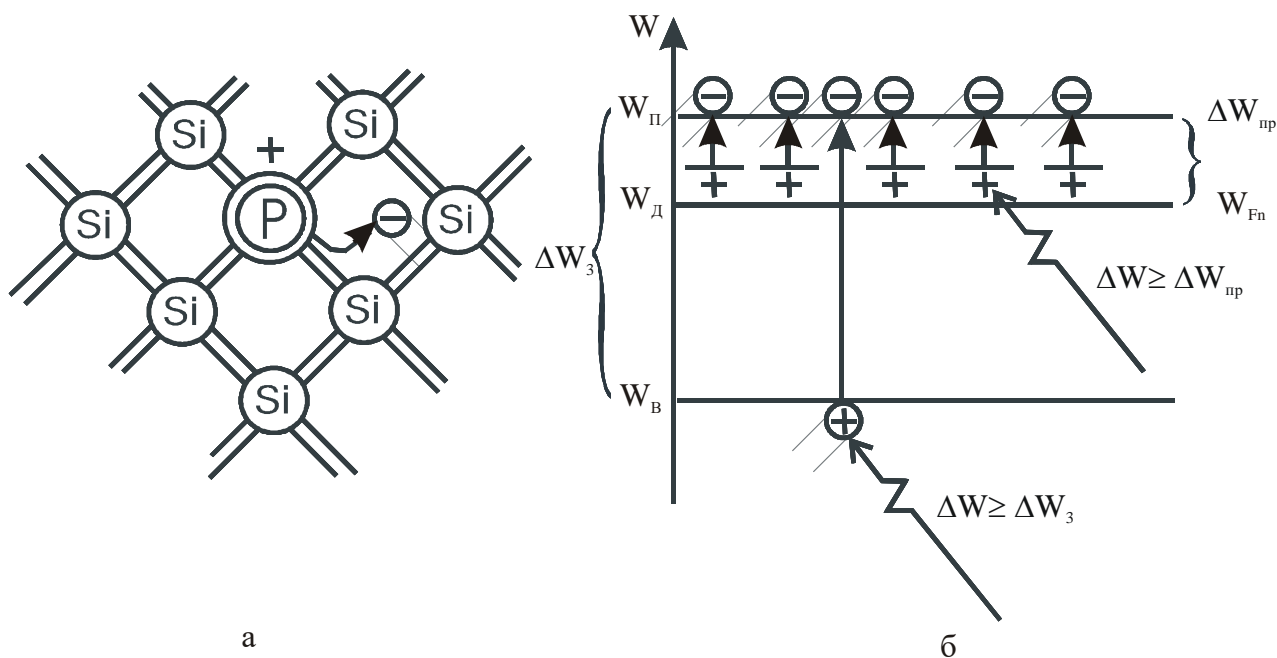


Рисунок 1.5 – Утворення носіїв заряду в електронному напівпровіднику

Атом домішки при цьому перетворюється в *позитивний іон* із зарядом $+q$, що дорівнює за величиною заряду електрона $-q$. У кристалі з'являється додатковий чи домішковий носій. Іони домішок не переміщуються у кристалі, вони закріплені у вузлах решітки. Концентрація електронів (n_n) у такому кристалі стає більшою концентрацією дірок (p_n), і він здобуває виражену електронну провідність. *Напівпровідники* такого типу називаються *електронними* або напівпровідниками *n-типу*. У позначеннях фізичних величин, що належать до електронного напівпровідника, ставлять індекс «n» (n_n , p_n і т.д.). Домішки, що сприяють збільшенню концентрації електронів, називають *донорними*, тобто такими, що віддають носії.

Носії заряду в домішковому напівпровіднику з більшою концентрацією називаються *основними*, а носії заряду з меншою концентрацією – *неосновними*. У напівпровіднику *n*-типу основними носіями є електрони, а дірки – неосновними.

Зонна діаграма електронного напівпровідника показана на рис 1.5, б. Її відмінність від зонної діаграми бездомішкового кристала в тому, що з введенням донорної домішки в забороненій зоні з'являються окремі дозволені рівні W_{∂} , розташовані поблизу дна зони провідності. При температурі абсолютного нуля ці рівні зайняті п'ятьма валентними електронами домішкових атомів. Різниця енергії між рівнями W_{∂} і дном зони провідності $\Delta W_{\text{пр}} = (W_{\text{п}} - W_{\partial})$ називається енергією активації домішки. Ця енергія складає соті частки електронвольта і виявляється істотно меншою ширини забороненої зони: $\Delta W_{\text{пр}} \ll \Delta W_{\text{з}}$.

З підвищенням температури електрони з рівнів W_{∂} легко переходять в зону провідності, отримавши порцію енергії $\Delta W \geq \Delta W_{\text{пр}}$. За нормальних робочих температур практично всі домішкові атоми іонізовані, тобто кожен із них віддає в зону провідності один електрон. Концентрація електронів n_n є практично рівною концентрації донорів N_{∂} . Дірки в напівпровіднику *n*-типу утворюються за рахунок переходів валентних електронів через усю заборонену зону, для цього необхідна порція енергії $\Delta W \geq \Delta W_{\text{з}}$.

Рівень Фермі W_{Fn} у напівпровіднику *n*-типу зміщується тим ближче до зони провідності, чим більша концентрація донорної домішки (рис. 1.5, б).

Незважаючи на перевагу електронів з негативним зарядом, порівняно з дірками, кристал напівпровідника *n*-типу завжди залишається електронейтральним. Негативний заряд електронів врівноважується в ньому позитивним зарядом нерухомих іонів домішки і рухливих дірок. *Умова електронейтральності* (1.4) записується у вигляді:

$$n_n = N_{\text{з}} + p_n, \quad (1.7)$$

де $N_{\text{з}}$ – концентрація донорної домішки в кристалі.

Діркові напівпровідники. Під час введення в решітку чотиривалентного напівпровідника атомів домішки тривалентного елемента (бор, алюміній, індій) один ковалентний зв'язок домішкового атома із сусідами виявляється незаповненим. Якщо сюди перейде електрон із будь-якого сусіднього зв'язку, то домішковий атом перетворюється в нерухомий (не рухається по ґраткам) *негативно заряджений іон*, а в решітці з'являється рухлива дірка (рис. 1.6, а).

Домішки, що сприяють появі дірок, називаються *акцепторними*, тобто приймаючими електрони. За досить високої концентрації акцепторної домішки дірки стають основними носіями заряду. *Напівпровідник*, концентрація дірок (p_p) у якому перевищує концентрацію електронів (n_p), називається *дірковим*

або *p-типу**. У позначеннях фізичних величин, що належать до діркових напівпровідників, ставлять індекс «*p*» (p_p , n_p і т.д.). Електрони в дірковому напівпровіднику є неосновними носіями.

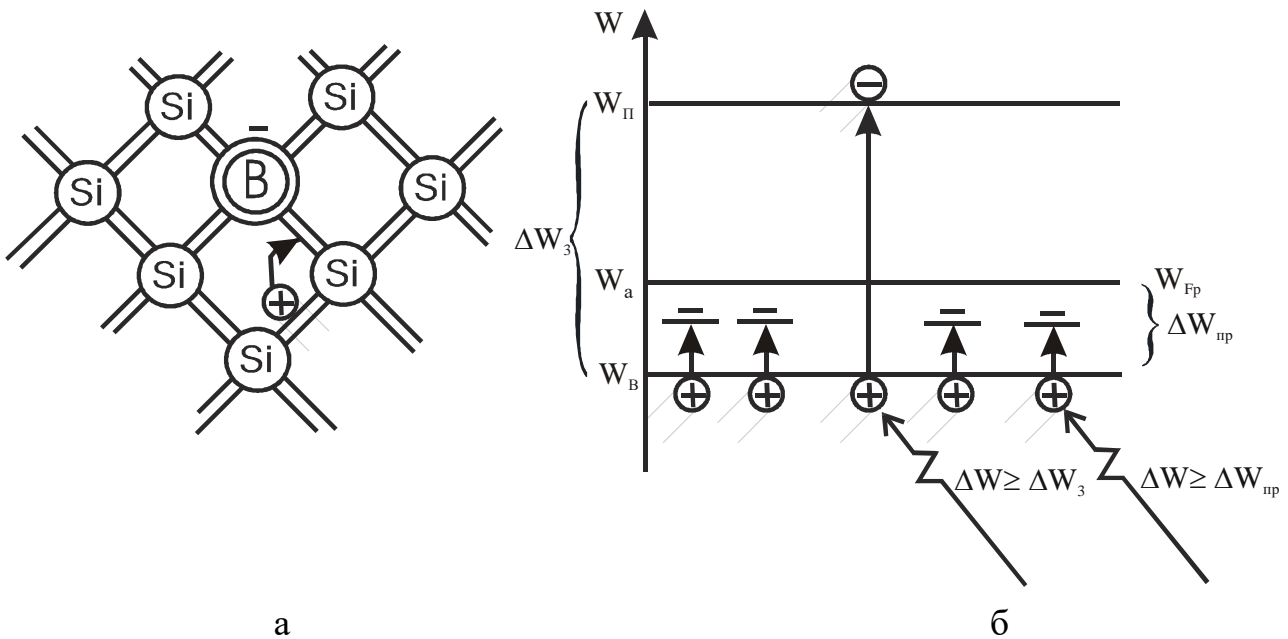


Рисунок 1.6 – Утворення носіїв заряду в дірковому напівпровіднику

Зонна діаграма діркового напівпровідника показана на рис. 1.6, б. Введення акцепторних домішок призводить до появи в забороненій зоні акцепторних домішкових рівнів W_a поблизу стелі валентної зони. При $T=0\text{K}$ зона провідності і рівні W_a цілком вільні. Із зростанням температури починається перехід валентних електронів на більш високі рівні зонної діаграми. Однак, оскільки енергія активації домішкових атомів $\Delta W_{\text{пр}} = (W_a - W_B) \ll \Delta W_3$ (рис. 1.6, б), то насамперед відбувається заповнення домішкових рівнів W_a . За кімнатної температури вони заповнені практично цілком, і у валентній зоні з'являються дірки з концентрацією p_p , рівною концентрації домішкових атомів N_a . Неосновні носії в напівпровіднику *p*-типу – електрони утворяться за рахунок їхніх переходів через всю заборонену зону, для чого необхідна порція енергії $\Delta W/\Delta W_3$.

Рівень Фермі W_{Fp} у напівпровіднику *p*-типу зміщується від середини забороненої зони тим ближче до валентної зони, чим більша концентрація акцепторної домішки (рис. 1.6, б).

Умова електронейтральності (1.4) кристала з дірковою провідністю виконується завдяки тому, що позитивний заряд дірок урівноважується негативним зарядом електронів і іонів акцепторів:

$$p_p = N_a + n_p, \quad (1.8)$$

де N_a – концентрація акцепторної домішки в кристалі.

Рівноважні концентрації основних носіїв у домішкових напівпровідниках визначають, виходячи з припущення, що вони мають досить високий ступінь легування ($N_{\angle} \gg n_i$ чи $N_a \gg n_i$) і всі атоми домішок при робочих температурах іонізовані. Під час виконання цих умов концентрація основних носіїв буде істотно більшою від концентрації неосновних ($n_n \gg p_n$ або $p_p \gg n_p$). Тому на підставі умов електронейтральності (1.4) і (1.5) для рівноважних концентрацій основних носіїв в електронному та дірковому напівпровідниках отримаємо:

$$n_n \cong N_{\angle} , \quad p_p \cong N_a. \quad (1.9)$$

Концентрація неосновних носіїв у домішкових напівпровідниках визначається з закону діючих мас. Відповідно до цього закону добуток концентрації електронів і дірок у напівпровідниковому кристалі в стані термодинамічної рівноваги є постійним і підкоряється співвідношенню:

$$n \cdot p = n_i^2 = p_i^2 . \quad (1.10)$$

Вираз (1.7) для електронного напівпровідника $n_n p_n = n_i^2$. Підставляючи сюди (1.6), отримаємо:

$$p_n = \frac{n_i^2}{N_0} . \quad (1.11)$$

Відповідно для діркового напівпровідника $p_p \cdot n_p = n_i^2$ і з урахуванням (1.9), отримаємо:

$$n_p = \frac{n_i^2}{N_{\partial}} . \quad (1.12)$$

З виразів (1.11) і (1.12) видно, що зі збільшенням ступеня легування напівпровідникового кристала (збільшення N_{∂} чи N_a) концентрація неосновних носіїв пропорційно зменшується.

Компенсовані напівпровідники. В ході формування структур напівпровідникових приладів й інтегральних мікросхем доводиться робити багаторазове легування кристала домішками. Напівпровідникові матеріали, що містять і донорні, і акцепторні домішки, називаються компенсованими.

Якщо концентрації введених донорів і акцепторів рівні ($N_{\angle} \cong N_a$), то електрони з донорних рівнів W_{\angle} переходять на більш низькі акцепторні рівні W_a і цілком їх заповнюють. Домішки компенсують одна одну і кристал за своїми властивостями наближається до власного напівпровідника.

Якщо ж концентрації домішок не рівні ($N_a \neq N_{\partial}$), то вони компенсуються тільки частково. Тип електропровідності кристала в цьому випадку визначається домішками з більшою концентрацією.

Вироджені напівпровідники – це домішкові напівпровідники з гранично високими ступенями легування. Концентрації домішок у вироджених

напівпровідниках (не менше $10^{20} \dots 10^{21} \text{ см}^{-3}$) наближаються до концентрації атомів самого кристалу (порядку 10^{23} см^{-3}).

Атоми домішки у вироджених напівпровідниках розміщуються на невеликих відстанях один від одного. Їхні електронні оболонки починають взаємодіяти між собою, і домішкові рівні розщеплюються в окремі домішкові зони, що перекриваються з найближчими дозволеними зонами самого кристала. Загальні зони, що утворюються, заповнені електронами не повністю, тому за своїми властивостями вироджені напівпровідники наближаються до металів. Для їхнього позначення використовують символи $n+$ і $p+$ (чи навіть $n++$, $p++$).

Запитання й завдання для самоперевірки

1. Який напівпровідник називають власним?
2. Чому при $T=0\text{K}$ власний напівпровідник не проводить електричний струм?
3. Що таке «дірка» у напівпровіднику?
4. Чому в провідниках немає дірок?
5. Які частки в напівпровідниковому кристалі називають «носіями заряду»?
6. Як сформулювати умову електронейтральності напівпровідника в загальному випадку?
7. Як забезпечується умова електронейтральності у власному напівпровіднику?
8. Покажіть на зонній діаграмі власного напівпровідника, як утворюються носії заряду – електрони та дірки.
9. Що таке генерація носіїв і яка генерація називається тепловою?
10. Що таке рекомбінація носіїв заряду в напівпровідниках?
11. Які розрізняють види рекомбінації?
12. Що таке «час життя» носіїв заряду?
13. Що характеризує час життя носіїв заряду?
14. Який стан кристала напівпровідника називається станом термодинамічної рівноваги?
15. Якою функцією визначається рівноважна концентрація власних носіїв у напівпровіднику?
16. Як залежить рівноважна концентрація власних носіїв від ширини забороненої зони та температури?
17. Що таке легування?
18. Які домішки в напівпровідниках називають донорами?
19. Поясніть, як під час введення донорів у напівпровідник отримують перевагу концентрації електронів над концентрацією дірок.

20. Чим позитивний іон донора відрізняється від дірки?
21. Який напівпровідник називають електронним чи напівпровідником *n*-типу?
22. Які носії заряду в домішкових напівпровідниках називають основними, а які – неосновними?
23. Яка відмінність зонних діаграм зонного та власного напівпровідників?
24. Покажіть на зонній діаграмі електронного напівпровідника процес утворення основних і неосновних носіїв заряду.
25. Що таке рівень Фермі і яке його положення на зонній діаграмі власного й електронного напівпровідників?
26. Як виконується умова електронейтральності в напівпровіднику *n*-типу?
27. Які домішки в напівпровідниках називають акцепторами?
28. Поясніть, як під час введення акцепторів у напівпровідник отримують перевагу концентрації дірок над концентрацією електронів.
29. Чим негативний іон акцептора відрізняється від електрона?
30. Який напівпровідник називають дірковим або напівпровідником *p*-типу?
31. Нарисуйте та поясніть зонну діаграму напівпровідника *p*-типу.
32. Покажіть на зонній діаграмі діркового напівпровідника процес утворення основних і неосновних носіїв заряду.
33. Покажіть і поясніть положення рівня Фермі на зонній діаграмі діркового напівпровідника.
34. Як виконується умова електронейтральності в напівпровіднику *p*-типу?
35. Чим визначаються рівноважні концентрації основних носіїв у домішкових напівпровідниках?
36. Сформулюйте закон діючих мас.
37. Як визначають рівноважні концентрації неосновних носіїв заряду в домішкових напівпровідниках?
38. Які напівпровідники називають компенсованими?
39. Які напівпровідники називають виродженими?

1.4 Електропровідність, електричні струми і поля в напівпровідниках

Питома електропровідність (провідність) є найважливішим параметром напівпровідникового матеріалу і визначається в загальному випадку виразом:

$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p), \quad (1.13)$$

де q – заряд електрона та дірки;

n, p – концентрації електронів і дірок відповідно;

μ_n, μ_p – рухливості електронів і дірок.

Рухливість носія заряду (μ_n і μ_p) визначають як середні швидкості дрейфу носіїв в електричному полі з напруженістю $E = 1$ В/см. Дрейфом називають рух носіїв в електричному полі.

На підставі (1.13) для власного напівпровідника, концентрації електронів і дірок у якому дорівнюють n_i , можна записати:

$$\sigma_i = qn_i(\mu_n + \mu_p). \quad (1.14)$$

Під час розрахунку провідності напівпровідників n -типу або p -типу можна зневажити внеском неосновних носіїв, тому що їх концентрація мала, і тоді:

$$\sigma_n \cong q \cdot N_0 \cdot \mu_n; \quad \sigma_p \cong qN_a \mu_p \quad (1.15)$$

Найменшу провідність мають власні напівпровідники. Провідність германію при кімнатній температурі складає $1,7 \cdot 10^{-2}$ См/см, а кремнію – $3,5 \cdot 10^{-6}$ См/см. Після введення домішок їхня провідність може зрости в $10^2 \dots 10^9$ разів.

Температурні властивості напівпровідників визначаються залежністю їх електропровідності від температури $\sigma = \sigma(T)$.

Якщо звернутися до виразу (1.13), то необхідно відмітити, що від температури залежать концентрації носіїв заряду n , p і їх рухливості μ_n , μ_p . Але температурна залежність рухливості істотно слабкіша від температурної залежності концентрації, тому в цілому залежність $\sigma(T)$ визначається тим, як змінюються з температурою концентрації $n(T)$ і $p(T)$.

Провідність власного напівпровідника змінюється з температурою за експонентою, тобто так само, як і концентрація власних носіїв n_i (1.6).

Залежність $\sigma = \sigma(T)$ для домішкових напівпровідників має більш складний характер і в якісному вигляді показана на рис. 1.7. Згідно з рис. 1.7 на характеристиці $\sigma = \sigma(T)$ домішкового напівпровідника можна виділити три характерні області:

1 – область домішкової провідності ($T < T_1$). Зростання провідності на цій ділянці обумовлений збільшенням концентрації основних носіїв у результаті іонізації домішок. Цей процес закінчується при температурі T_1 , коли всі атоми домішки іонізовані;

2 – область ($T_1 < T < T_2$), у межах якої всі атоми домішок іонізовані, а енергії теплових коливань недостатньо для утворення власних носіїв. Тому концентрація основних носіїв у ній практично постійна, а провідність незначно зменшується через зменшення рухливості;

3 – область власної провідності ($T > T_2$). У зв'язку із зростанням енергії теплових коливань решітки концентрація власних носіїв в області 3 зростає настільки, що стає більше концентрації домішкових носіїв. Кристал здобуває власну провідність. Після охолодження домішкова електропровідність кристала

відновлюється. Гранична температура T_2 таких перетворень залежить від концентрації домішок і ширини забороненої зони. Зі збільшенням ΔW_3 температура T_2 зростає.

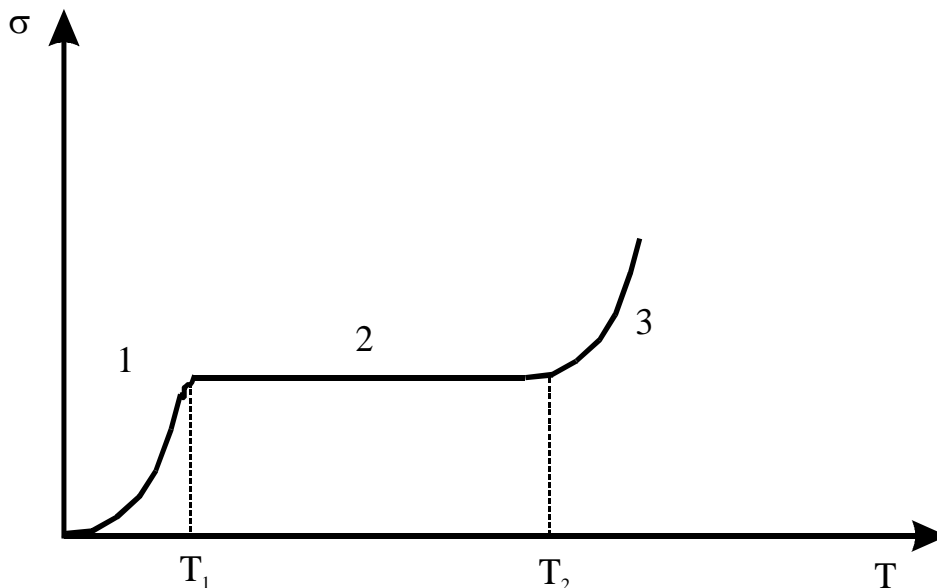


Рисунок 1.7 – Залежність електропровідності домішкового напівпровідника від температури

Матеріали, що використовуються під час виробництва НПП і ІМС, вибирають так, щоб у передбачуваних умовах експлуатації їхня провідність якнайменше залежала від температури. Цій умові відповідає ділянка $T_1 - T_2$.

Для найбільш розповсюджених напівпровідникових матеріалів (кремній, германій) нижня межа робочих температур $T_1 = -60 \dots -70^\circ\text{C}$... Максимальна робоча температура T_2 для цих же матеріалів дорівнює відповідно $+120 \dots 150^\circ\text{C}$ і $+70 \dots 90^\circ\text{C}$...

Електричні струми в напівпровідниках можуть бути викликані електричним полем або перепадом (градієнтом) концентрації носіїв. Відповідно до цього розрізняють дрейфові і дифузійні струми.

Електричний струм у провідниках може бути тільки дрейфовим. Створити перепад концентрації носіїв у кристалі провідника, коли усі валентні електрони, беруть участь в електропровідності, неможливо.

Дрейфовий струм – це спрямований рух носіїв заряду в електричному полі. Щільність цього струму (A/cm^2) визначається законом Ома:

$$I_{\text{др}} = \sigma E, \quad (1.16)$$

де E – напруженість електричного поля у напівпровіднику, а провідність σ розраховується за формулою (1.13) або за спрощеними формулами, що впливають з неї.

Якщо потрібно розрахувати окремо електронні та діркові компоненти дрейфового струму, то використовують співвідношення:

$$I_{дрп} = qn\mu_n; \quad I_{дрр} = qp\mu_{рe}. \quad (1.17)$$

Дифузійний струм. Дуже часто з різних причин у кристалі напівпровідника виникає перепад концентрацій рухливих носіїв заряду з відстанню. Як приклад на рис. 1.8 показано нерівномірний розподіл концентрації дірок p залежно від деякої відстані x у кристалі.

У цьому випадку, як будь-які рухливі частки, дірки рухатимуться (дифундуватимуть) з області з більшою концентрацією в область із меншою концентрацією. При цьому переноситься заряд і виникає струм, названий дифузійним. Якщо на відстані Δx перепади концентрацій електронів і дірок дорівнюють відповідно Δn і Δp , то відповідно до законів дифузії щільність повного дифузійного струму:

$$I_{дф} = qD_n \frac{\Delta n}{\Delta x} + qD_p \frac{\Delta p}{\Delta x} = I_{дфn} + I_{дфр}, \quad (1.18)$$

де D_n, D_p – сталі, що називаються коефіцієнтами дифузії,

$\frac{\Delta n}{\Delta x}; \frac{\Delta p}{\Delta x}$ – перепади концентрації на відстані одиничної довжини, такі

перепади називають градієнтами.

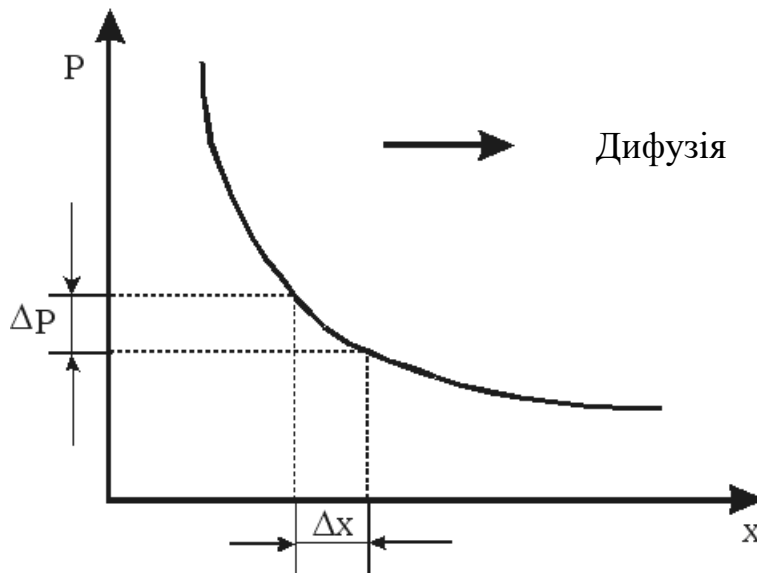


Рисунок 1.8 – Нерівномірний розподіл концентрації дірок p від відстані називають градієнтами

Носії заряду завжди дифундують убік зменшення концентрації. Оскільки електрони та дірки мають протилежні за знаком заряди, то електронні та діркові складові струми дифузії (1.17) будуть спрямовані в різні сторони.

Процеси дифузії та дрейфу взаємно незалежні. Якщо в кристалі одночасно існує електричне поле та перепад концентрації, то загальний електричний струм:

$$I = I_{др} + I_{дф} . \quad (1.19)$$

Відомо, що за технічний напрямок електричного струму приймають напрямок від «+» до «-». Звідси випливає таке правило:

технічний напрямок струму збігається з фактичним рухом дірок і протилежний фактичному руху електронів.

Електричні поля в напівпровідниках можуть бути зовнішніми та внутрішніми. Зовнішнім електричним полем називають таке, яке створюється зовнішнім (стороннім) джерелом напруги (е.р.с.). На відміну від провідників, у напівпровідниках може існувати і внутрішнє електричне поле, не зв'язане з зовнішньою е.р.с. Одна з причин появи внутрішнього поля – нерівномірний розподіл домішок у кристалі.

Нехай, наприклад, донори в напівпровіднику n-типу розподілені згідно з кривою 1 рис. 1.9. Оскільки основні носії утворюються в результаті іонізації домішок, то розподіл електронів має бути таким самим. Але електрони – рухливі частки. Вони дифундуватимуть в бік меншої концентрації, тобто уздовж осі x. У результаті дифузії їхній розподіл (крива 2) відрізнятиметься від розподілу донорів і електронейтральність кристала порушиться. Після відходу електронів з лівої частини кристалу там залишаться некомпенсовані позитивні іони донорів, а права частина заряджається негативно електронами, що продифундували сюди.

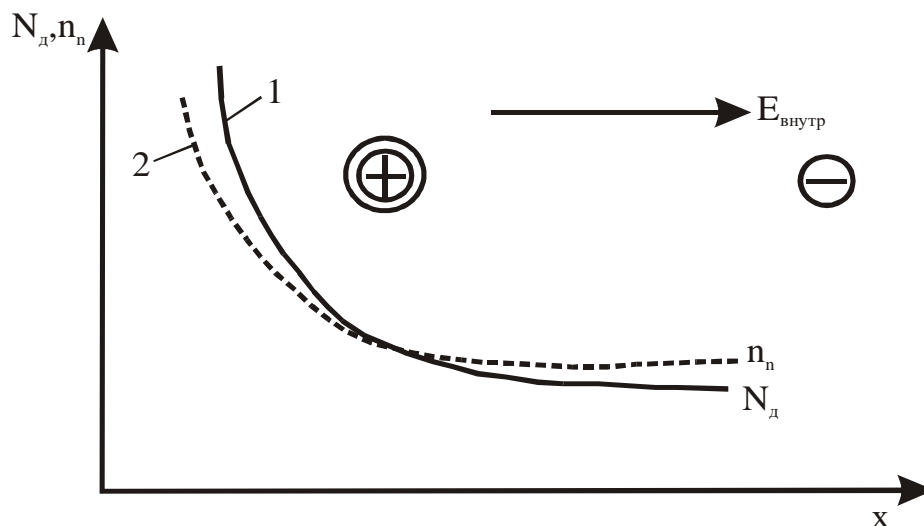


Рисунок 1.9 – Схема утворення внутрішнього електричного поля у напівпровіднику

Як наслідок виникає внутрішнє електричне поле, напруженість якого E пропорційна перепаду, а точніше градієнту, концентрації домішок:

$$E_{\text{внутр}} \sim \frac{\Delta N_{\partial}}{\Delta x} . \quad (1.20)$$

Іноді це поле називають дифузійним, тому що воно пов'язано з дифузією носіїв заряду.

Запитання й завдання для самоперевірки

1. Наведіть загальну формулу для питомої електропровідності напівпровідників і поясніть усі фізичні величини, що належить їй.

2. Наведіть і поясніть формули для електропровідності власного і домішкового напівпровідників.

3. Який рух носіїв заряду називають дрейфом?

4. Який фізичний зміст має рухливість носіїв заряду в кристалі?

5. Чому провідність власного напівпровідника менше, ніж провідність домішкових напівпровідників?

6. З яких причин змінюється з температурою електропровідність σ напівпровідників?

7. Нарисуйте та поясніть температурну залежність електропровідності власних напівпровідників $\sigma_i(T)$.

8. Нарисуйте та поясніть температурну залежність електропровідності домішкових напівпровідників $\sigma(T)$.

9. Який інтервал температур вибирають, як правило, для роботи НПП. Поясніть на основі температурної залежності $\sigma(T)$.

10. Чому робочий інтервал температур кремнієвих НПП ширший, ніж від германієвих?

11. Який електричний струм називають дрейфовим?

12. Запишіть вираз для визначення щільності дрейфового електронного та діркового струмів?

13. Який ще електричний струм буває в провідниках?

14. Що називають дифузією носіїв заряду?

15. Нарисуйте та поясніть розподіл носіїв заряду в напівпровіднику, необхідний для існування дифузії?

16. Який електричний струм називають дифузійним?

17. Запишіть формули для визначення щільності електронного та діркового дифузійних струмів. Поясніть фізичний зміст величин, що належать цій формулі.

18. Сформулюйте правило відповідності технічного напрямку електричного струму і фактичного руху носіїв заряду в напівпровідниках.
19. Які електричні поля в напівпровідниках називають зовнішніми?
20. Які електричні поля в напівпровідниках називають внутрішніми?
21. Нарисуйте та поясніть, як при нерівномірному розподілі домішок у кристалі утвориться внутрішнє електричне поле.

1.5 Нерівноважні електрофізичні процеси в напівпровідниках

У попередньому п.1.3 сформульовано умови, під час виконання яких напівпровідник знаходиться в стані термодинамічної рівноваги. Відповідно до цих умов рівноважний стан має місце, якщо температура напівпровідника є постійною і він не піддається будь-яким зовнішнім впливам.

Отже, будь-який зовнішній енергетичний вплив переводить напівпровідник у нерівноважний стан. Залежно від конкретних умов нерівноважний стан напівпровідника може виявлятися в змінах концентрацій носіїв заряду, у появі електричних струмів або внутрішніх електричних полів.

Залежно від характеру поведінки зовнішніх енергетичних впливів у часі нерівноважний стан може бути стаціонарним (постійним) і нестаціонарним (мінливим у часі). Особливий інтерес становить вивчення так званих перехідних процесів, що виникають під час різких («східчастих») змін зовнішнього впливу. За перехідними характеристиками, що відбивають хід цих процесів, можна дати оцінку швидкодії або інерційності НПП. При цьому розглядають тільки неосновні носії, оскільки за звичайних рівнів зовнішніх впливів відносні зміни концентрації основних носіїв зневажливо малі.

Розглянемо деякі приклади. Наприклад, у напівпровіднику *p*-типу рівноважна концентрація неосновних носіїв n_p . Нехай у цей кристал рівномірно по всьому об'єму вводяться нерівноважні носії – електрони концентрації n_0 .
Надлишкова концентрація:

$$\Delta n_0 = n_0 - n_p. \quad (1.21)$$

Припустимо, що в момент часу $t=0$ перестав діяти зовнішній фактор, що викликав надлишкову концентрацію нерівноважних носіїв (рис. 1.10). Тоді з часом концентрація електронів $n(t)$ зменшуватиметься внаслідок рекомбінації.

Можна показати, що у будь-який момент часу t концентрація електронів $n(t)$ визначатиметься за виразом:

$$n(t) = n_p + \Delta n_0 e^{-\frac{t}{\tau_n}}, \quad (1.22)$$

де n_p – рівноважна концентрація електронів;

Δn_0 – надлишкова концентрація в момент часу $t=0$;

t – час життя електронів.

Якщо нерівноважні носії вводяться в область обмежених ділянок кристала, то зміна їхньої концентрації буде обумовлена не тільки рекомбінацією, але і дифузією в області з меншою концентрацією.

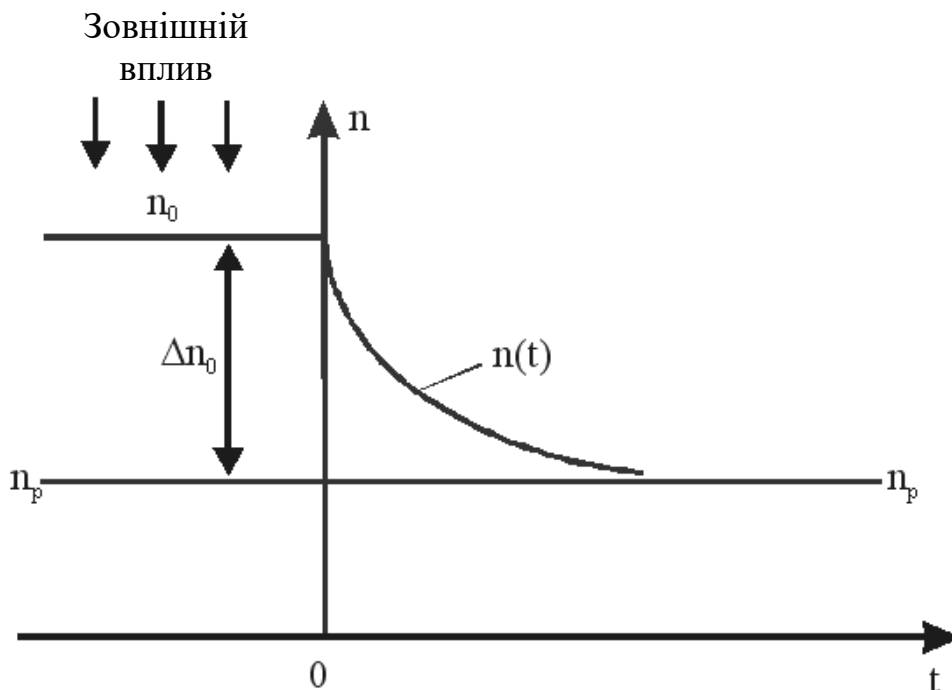


Рисунок 1.10 – Залежність концентрації неосновних нерівноважних носіїв від часу

Можна показати, що у будь-який момент часу t концентрація електронів $n(t)$ визначатиметься за виразом:

$$n(t) = n_p + \Delta n_0 e^{-\frac{t}{\tau_n}}, \quad (1.22)$$

де n_p – рівноважна концентрація електронів;

Δn_0 – надлишкова концентрація в момент часу $t=0$;

t – час життя електронів.

Якщо нерівноважні носії вводяться в область обмежених ділянок кристала, то зміна їхньої концентрації буде обумовлена не тільки рекомбінацією, але і дифузією в області з меншою концентрацією. Для опису розподілу $n(x)$ нерівноважних носіїв, що дифундують у напрямку осі x , користуються виразом:

$$n(x) = n_p + \Delta n(0) e^{-\frac{x}{L_n}}, \quad (1.23)$$

де $\Delta n(0)$ – надлишкова концентрація електронів у точці з координатою $x=0$;

L_n – дифузійна довжина електронів.

Дифузійна довжина є середньою відстанню, яку проходять носії заряду за час життя, тобто від моменту генерації до моменту рекомбінації. Дифузійна довжина L_n і час життя τ_n зв'язані один з одним співвідношенням:

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} . \quad (1.24)$$

Як видно, в обох розглянутих випадках поведінка неосновних нерівноважних носіїв описується експонентними функціями.

Аналогічно чином поведуться нерівноважні дірки в кристалах n -типу.

Запитання й завдання для самоперевірки

1. Який стан напівпровідника називають рівноважним?
2. Який стан напівпровідника називають нерівноважним?
3. Який нерівноважний стан напівпровідника називають стаціонарним?
4. Який нерівноважний стан напівпровідника називають нестаціонарним?
5. Які процеси в напівпровідниках називають перехідними?
6. Чому при розгляді перехідних процесів оцінюють поведінку неосновних нерівноважних носіїв?
7. На прикладі напівпровідника p -типу розгляньте поведінку нерівноважних носіїв, якщо вплив зовнішнього фактору різко змінюється.
8. Нарисуйте залежність від часу $n(t)$ концентрації електронів у напівпровіднику p -типу за різкої зміни зовнішнього впливу.
9. Яка концентрація називається надлишковою?
10. Якою функцією описується поведінка неосновних нерівноважних електронів $n(t)$ за різкої зміни зовнішнього впливу?
11. Що відбувається з концентрацією нерівноважних носіїв, якщо вони вводяться в обмежені області напівпровідника?
12. Якою функцією описується залежність від відстані концентрації нерівноважних носіїв, що дифундують, $n(x)$?
13. Що таке дифузійна довжина носіїв заряду в напівпровіднику?
14. Наведіть співвідношення, що встановлюють зв'язок дифузійної довжини носіїв заряду і їх часу життя.

1.6 Поверхневі явища

Поверхня напівпровідникового кристалу є порушенням періодичності його решітки. Як і будь-яке інше порушення, це призводить до зміни електрофізичних параметрів напівпровідника на поверхні. Крім того, на поверхні реального

кристала можуть знаходитися молекули або атоми інших речовин (кисню, води й ін.). Таким чином, структура поверхні виходить досить складною.

На прикладі домішкових напівпровідників (п. 1.3) було показано, що дефекти в напівпровідниках призводять до появи додаткових енергетичних рівнів у забороненій зоні. Рівні в забороненій зоні, що обумовлені поверхнею, називаються *поверхневими*. Якщо ці *рівні* розташовуються поблизу дна зони провідності, вони поведуться як *донорні*, тобто віддають електрони, здобуваючи при цьому позитивний заряд. Якщо дозволені *рівні* знаходяться біля валентної зони, вони поведуться як *акцепторні*, тобто приймають на себе електрони, і їхній заряд стає негативним. Такі *рівні* поведуться подібно донорним чи акцепторним домішкам.

При кімнатній температурі більшість домішок зазвичай іонізовано, тобто на поверхневих рівнях знаходяться заряди. Відповідно до умови електричної нейтральності в об'ємі напівпровідника виникає об'ємний заряд протилежного знаку. Це призводить до вигину енергетичних зон і появи електричного поля поблизу поверхні напівпровідника.

Розглянемо, як приклад, напівпровідник *n*-типу, на поверхні якого існують поверхневі заряди.

Нехай на поверхні знаходиться невеликий негативний заряд. Цим зарядом основні носії – електрони – відштовхуються всередину напівпровідника. В результаті концентрація основних носіїв біля поверхні зменшується й утворюється так званий *збіднений шар*. На рис. 1.11, а показана зонна діаграма такого напівпровідника. Тут x – відстань із глибини напівпровідника перпендикулярно поверхні, x_n – координата поверхні. Як було показано (п. 1.3), у рівноважному стані рівень Фермі W_{Fn} – однаковий для всього кристала й знаходиться вище середини забороненої зони, позначеної на рис. 1.11, а – W_i . Рівень Фермі W_{Fn} тим ближче до зони провідності W_n , чим більша концентрація основних носіїв. У збідненому шарі концентрація основних носіїв зменшується, що призводить до вигину меж дозовлених зон.

Межа збідненого шару в глибині напівпровідника знаходиться там, де починається вигин енергетичних рівнів. Ширину збідненого шару можна визначити як $(x_n - x_1)$.

За наявності на поверхні великого негативного заряду з приповерхневого шару може піти так багато електронів, що переважною стане концентрація дірок. Такий шар стане *p*-типу, він називається *інверсним*. Зонну діаграму для цього випадку показано на рис. 1.11, б. Межа інверсного шару в глибині напівпровідників x_1 розташована там, де рівень Фермі W_{Fn} перетинає середину забороненої зони.

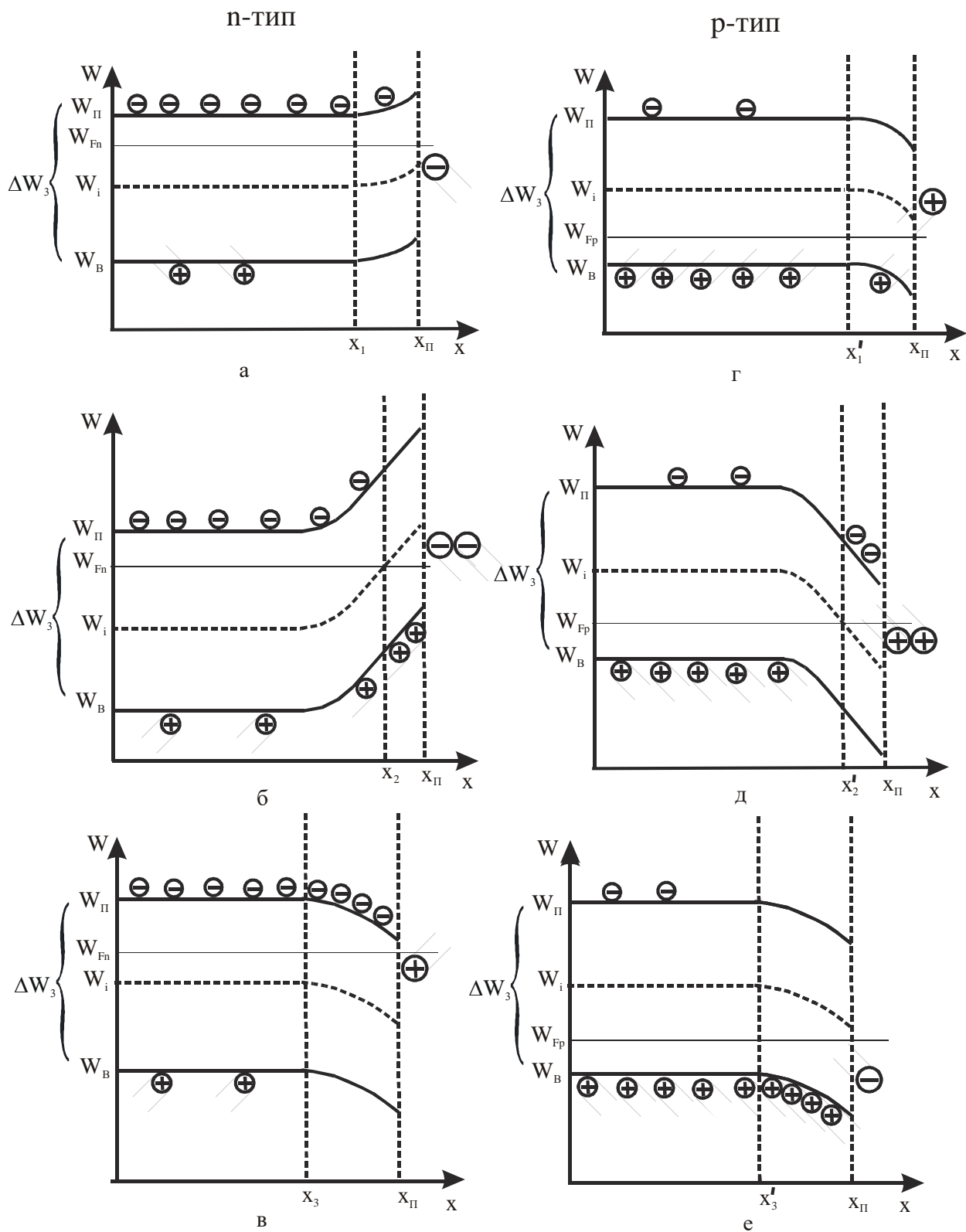


Рисунок 1.11 – Скривлення енергетичних зон поблизу поверхні напівпровідника

Ширина інверсного шару ($x_2 - x_1$). Під інверсним шаром у напівпровіднику знаходиться збіднений шар.

I, нарешті, припустимо, що на поверхні напівпровідника n -типу знаходиться позитивний заряд. Електрони притягуватимуться до поверхні і приповерхневий шар буде збагаченим основними носіями. Зонна діаграма для цього випадку показана на рис. 1.11, в. Ширина збагаченого шару – $(x_n - x_3)$.

Ширина приповерхневого шару об'ємного заряду залежить від заряду поверхні, і також від питомого опору (чи концентрації домішок) напівпровідника та складає зазвичай $10^{-2} \dots 10$ мкм.

У випадку напівпровідника p -типу у поверхні можуть утворюватися аналогічні шари, але за наявності на поверхні зарядів, протилежного порівняно з n -типом, знаку (рис. 1.11, м, д, е).

Поверхневі рівні, розташовані поблизу середини забороненої зони, відіграють роль пасток чи *центрів рекомбінації*. Пастка є як би «проміжною» зупинкою для електрона, що залишає зону провідності і переходить на більш низький рівень валентної зони. Рекомбінація через пастки йде значно швидше, ніж рекомбінація з прямим переходом електронів через усю заборонену зону (рис. 1.4, б). В результаті цього в приповерхневих шарах кристала змінюється такий важливий параметр, як час життя носіїв заряду.

Якщо структура НПП чи елемента ІМС зосереджена в тонкому приповерхневому шарі, то його параметри багато в чому визначаються станом поверхні. Тому підготовці поверхні напівпровідникових кристалів, а також захисту її від впливів навколишнього середовища приділяється велика увага.

Запитання й завдання для самоперевірки

1. Які рівні на зонній діаграмі напівпровідника називають поверхневими?
2. Що може бути причиною наявності на зонній діаграмі напівпровідника поверхневих рівнів?
3. Які поверхневі рівні називають донорними?
4. Які поверхневі рівні називають акцепторними?
5. Поясніть, як за наявності поверхневих зарядів утворюється об'ємний заряд у приповерхневому шарі.
6. Поясніть утворення приповерхневого збідненого шару в напівпровіднику n -типу.
7. Поясніть утворення приповерхневого збідненого шару в напівпровіднику p -типу.
8. Наведіть і поясніть зонні діаграми в напівпровідниках n -типу зі збідненим шаром біля поверхні?

9. Наведіть і поясніть зонну діаграму напівпровідника p -типу зі збідненим шаром біля поверхні.
10. Який шар називають інверсним?
11. Поясніть, за яких умов утвориться інверсний шар біля поверхні напівпровідника n -типу.
12. Поясніть утворення інверсного шару в поверхні напівпровідника p -типу.
13. Наведіть і поясніть зонну діаграму напівпровідника n -типу з інверсним приповерхнім шаром.
14. Наведіть і поясніть зонну діаграму напівпровідника p -типу з інверсним шаром у поверхні.
15. Який шар напівпровідника називають збагаченим?
16. Поясніть утворення збагаченого шару в поверхні напівпровідника n -типу.
17. Поясніть утворення збагаченого шару в поверхні напівпровідника p -типу.
18. Наведіть і поясніть зонну діаграму напівпровідника n -типу зі збагаченим шаром біля поверхні.
19. Наведіть і поясніть зонну діаграму напівпровідника p -типу зі збагаченим шаром біля поверхні.
20. Які поверхневі рівні відіграють роль пасток?
21. Які параметри напівпровідника залежать від кількості пасток?
22. Як залежить ширина приповерхневих шарів об'ємного заряду від електропровідності напівпровідника та величини заряду на його поверхні ?

1.7 Фотоелектричні і термоелектричні явища в напівпровідниках

*Фотоелектричні явища спостерігаються під час освітлення напівпровідників. Якщо на напівпровідник падає світлове випромінювання, енергія квантів цього випромінювання поглинається кристалом. За певних умов таке поглинання може призвести до зміни електропровідності. Ця зміна і складає сутність *фотоелектричних явищ* у напівпровідниках.*

Розглянемо як приклад напівпровідник n -типу. Його зонна діаграма обговорювалася в п. 1.3 і показана на рис. 1.12.

Якщо енергія квантів падаючого випромінювання $h \cdot f_1$ більша ширини забороненої зони:

$$h \cdot f_1 \geq \Delta W_3, \quad (1.25)$$

то електрон, який отримав цю енергію, може перейти з валентної зони в зону провідності.

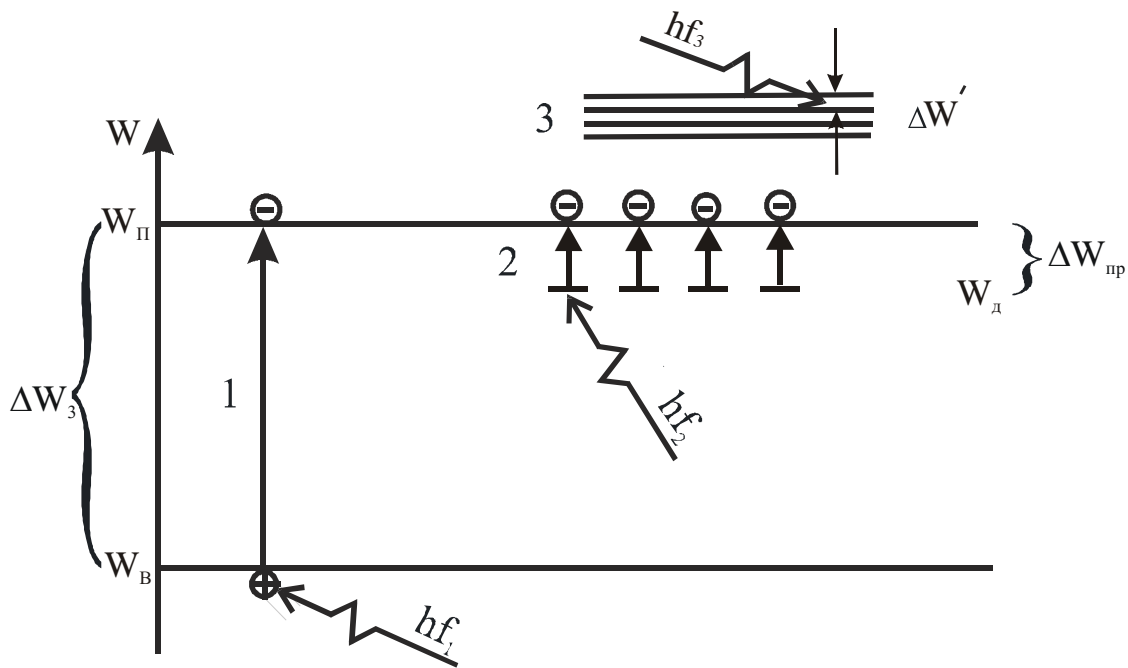


Рисунок 1.12 – Механізми поглинання світлового випромінювання в напівпровідниках

Рівень, що звільнився, у валентній зоні, як відомо, є діркою. Розглянутий процес на рис. 1.12 позначений цифрою 1. Носії заряду, що утворюються під дією світла, називаються фотоносіями. У даному випадку вони утворюються парами, як у власному напівпровіднику. Тому процес, що задовольняє умову (1.25), називається *власним поглинанням*. Збільшення концентрації електронів Δn таке ж, як і збільшення концентрації дірок Δp ($\Delta n = \Delta p > 0$).

Провідність, яку мав напівпровідник без освітлення, називають *темною* та визначають із відомої формули:

$$\sigma_T = q (n\mu_n + p\mu_p), \quad (1.26)$$

де n, p – концентрації електронів і дірок у напівпровіднику без освітлення.

Зміна концентрації носіїв заряду $\Delta n, \Delta p$, тобто поява фотоносіїв, призводить до додаткової провідності, яка називається власною фотопровідністю σ_Φ :

$$\sigma_\Phi = q (\Delta n \mu_n + \Delta p \mu_p). \quad (1.27)$$

Таким чином загальна провідність напівпровідника в ході освітлення:

$$\sigma = \sigma_T + \sigma_\Phi. \quad (1.28)$$

Власна фотопровідність обумовлена зміною концентрації носіїв заряду обох знаків (дірок і електронів), тому її ще називають *біполярною фотопровідністю* (приставка «бі» означає «два»).

Якщо енергія кванта падаючого випромінювання:

$$hf_{кр} = \Delta W_3, \quad (1.29)$$

то відповідну йому частоту $f_{кр}$ називають *червоною межею фотоефекту*. Для тих квантів, у яких $f < f_{кр}$, енергія hf недостатня для генерації фотоносіїв. Червона межа визначає найменшу енергію квантів, за якої можлива фотопровідність.

У напівпровіднику n -типу в результаті введення донорів, як відомо, на зонній діаграмі з'являються донорні рівні W_d біля зони провідності. «Відстань» до зони провідності – енергія активації домішок $\Delta W_{пр} \ll W_3$

Якщо на напівпровідник падає випромінювання, енергія квантів якого hf_2 задовольняє умову:

$$\Delta W_{пр} < hf_2 < \Delta W_3, \quad (1.30)$$

то електрон, що отримав цю енергію, може перейти з рівня W_d у зону провідності. Такий процес поглинання на рис. 1.12 позначено цифрою 2. Поглинання називається *домішковим*, тому що генерація фотоносіїв відбувається з домішкових рівнів. У випадку домішкового поглинання в напівпровіднику n -типу зростає тільки концентрація електронів на величину Δn , тобто з'являються фотоносії одного знаку:

$$\Delta n > 0; \quad \Delta p = 0. \quad (1.31)$$

Провідність, яка утворилася в результаті домішкового поглинання, називається *домішковою фотопровідністю*. Її обчислюють за формулою:

$$\sigma_{\phi} = q \Delta n \mu_n. \quad (1.32)$$

Оскільки в домішковій фотопровідності беруть участь фотоносії одного знаку, то її називають також *уніполярною фотопровідністю* (приставка «уні» означає «один»). Загальна провідність напівпровідника σ відповідає співвідношенню (1.27).

Можливим є світлове випромінювання з енергією квантів hf_3 , яка недостатня для іонізації домішки, але електрон, який її отримав, може перейти на більш високий рівень у зоні провідності:

$$\Delta W' < hf_3 < \Delta W_{пр}, \quad (1.33)$$

де $\Delta W'$ – різниця енергій дозволених рівнів у зоні провідності. Такий процес поглинання на рис. 1.12 позначений цифрою 3. У цьому процесі фотоносії не з'являються, тобто ($\Delta n = \Delta p = 0$).

Але, як правило, часто різним рівням у дозволених зоні відповідають різні значення рухливості μ . Перехід електрона на інший рівень під дією випромінювання може призвести до зміни рухливості:

$$\Delta \mu \neq 0. \quad (1.34)$$

Поглинання, за якого міняється рухливість, називається μ -поглинання. Обумовлена таким поглинанням фотопровідність – це μ -провідність:

$$\sigma = qn\Delta\mu_n. \quad (1.35)$$

Загальна провідність визначається, як і у всіх попередніх випадках, співвідношенням (1.28).

Термоелектричні явища спостерігаються в напівпровіднику тоді, коли різні області його мають не однакову температуру.

Іншими словами, у напівпровіднику є деякий градієнт температури. Серед термоелектричних явищ в однорідних напівпровідниках найважливішим є *ефект термоелектрорушійної сили* або *термоЕРС*.

Розглянемо, як приклад, однорідний напівпровідник p -типу, кінці якого «а» і «b» мають різну температуру – на кінці «а» температура T_1 , на кінці «b» температура T_2 (рис. 1.13).

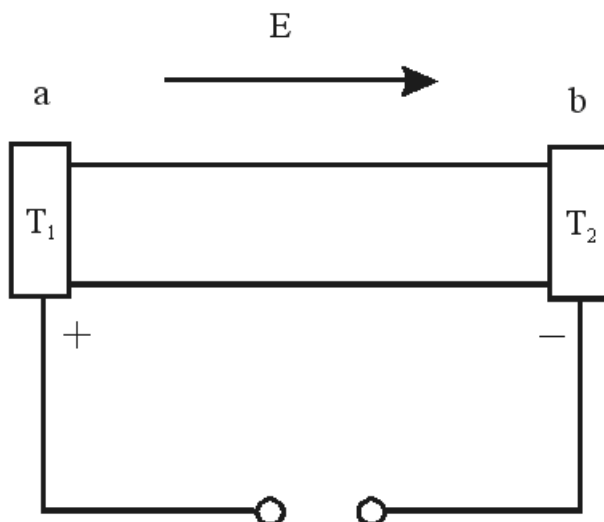


Рисунок 1.13 – Виникнення термоЕРС у напівпровіднику p -типу при $T_2 > T_1$

Припустимо, що кінець «b» більш нагрітий, тобто $T_2 > T_1$. Середня енергія носіїв заряду, у даному випадку дірок, і їх концентрація будуть більшими в тій області, де вища температура, тобто на кінці «b». Можна сказати, що градієнт температури в однорідному напівпровіднику призводить до градієнта середньої енергії носіїв заряду та градієнта їх концентрації. Виникає дифузія дірок від кінця «b» до кінця «а». Тому біля кінця «b» утвориться деякий позитивний заряд у результаті приходу дірок, а біля кінця «а» – негативний заряд внаслідок їх відходу. Між цими зарядами з'являється електричне поле E , чи різниця потенціалів, що і розглядається як термоерс V_T .

Величину цієї термоЕРС визначають із виразу:

$$V = \alpha(T_2 + T_1), \quad (1.36)$$

де α – коефіцієнт, що залежить від властивостей напівпровідника. Величина α у напівпровідників може складати кілька сотень чи навіть тисяч мкВ/град.

У розглянутому напівпровіднику p -типу холодний кінець має позитивний заряд. У випадку напівпровідника n -типу холодний кінець матиме негативний заряд, тому що дифундувати до холодного кінця будуть електрони. Таким чином, у домішковому напівпровіднику за законом термоерс можна визначити тип домішкової провідності, або, що теж саме, тип основних носіїв зарядів.

Запитання й завдання для самоперевірки

1. Які явища в напівпровідниках називають фотоелектричними?
2. Яке поглинання називають власним?
3. Якій умові має відповідати енергія кванта випромінювання для власного поглинання?
4. Покажіть на зонній діаграмі напівпровідника механізм власного поглинання.
5. Які носії заряду називають фотоносіями?
6. Наведіть і поясніть формулу для визначення темної провідності.
7. Що таке власна фотопровідність і як вона визначається кількісно?
8. Чому власну фотопровідність називають також біполярною?
9. Що таке червона межа фотоефекта $f_{кр}$?
10. Яке поглинання називають домішковим?
11. Якій умові має відповідати енергія кванта випромінювання для домішкового поглинання?
12. Покажіть на зонній діаграмі напівпровідника механізм домішкового поглинання.
13. Що таке домішкова фотопровідність і як вона визначається кількісно?
14. Чому домішкову фотопровідність називають уніполярною?
15. Яке поглинання називають μ -поглинанням?
16. Якій умові має відповідати енергія кванта випромінювання для μ -поглинання?
17. Покажіть на зонній діаграмі напівпровідника механізм μ -поглинання.
18. Які явища в напівпровідниках називають термоелектричними?

19. Що таке ефект термоерс?
20. На прикладі напівпровідника p -типу поясніть виникнення термоерс.
21. На прикладі напівпровідника n -типу поясніть виникнення термоерс.
22. Від чого залежить полярність термоерс в однорідному домішковому напівпровіднику?
23. Від чого залежить величина термоерс в однорідному напівпровіднику?
24. Як визначити тип основних носіїв у домішковому напівпровіднику за допомогою виміру термоерс?

2 КОНТАКТНІ ЯВИЩА В НАПІВПРОВІДНИКАХ

2.1 Різновиди і технологія p - n -переходів

За своїм принципом дії всіх напівпровідникових приладів (НПП) можуть бути розділені на дві групи. До першої з них належать прилади, у яких використовуються різного роду об'ємні ефекти, наприклад, залежність провідності від температури (термістори), від освітлення (фоторезистори) тощо. В іншу, найбільш численну групу, належать НПП, що працюють на контактних явищах (напівпровідникові діоди, транзистори, тиристори й ін.). У цьому розділі розглядаються властивості контактів між напівпровідниками n - і p -типу, які називають електронно-дірковими чи p - n -переходами, а також контактів типу метал–напівпровідник. Прилади, що містять контакти метал–діелектрик і діелектрик–напівпровідник (польові транзистори), розглянуті в розділі 5.

Електронно-дірковий перехід – це перехідний шар між напівпровідниками n - і p -типу (рис. 2.1). Без знання його структури (устрою) і властивостей неможливо зрозуміти принцип дії та властивості реальних НПП. Вивчення p - n -переходів почнемо з *класифікації*, тобто з перерахування їхніх різновидів.

За *геометричними ознаками* розрізняють площинні та сферичні p - n -переходи. У *площинних переходах* поверхня контакту між p - і n -областями площинна (рис. 2.1, а). *Сферичні переходи* виникають на межі між областями напівпровідників, одна з яких має форму півсфери (рис. 2.1, б). Якщо розміри сферичного p - n -переходу порівняльні з дифузійною довжиною носіїв заряду, його називають *точковим*.

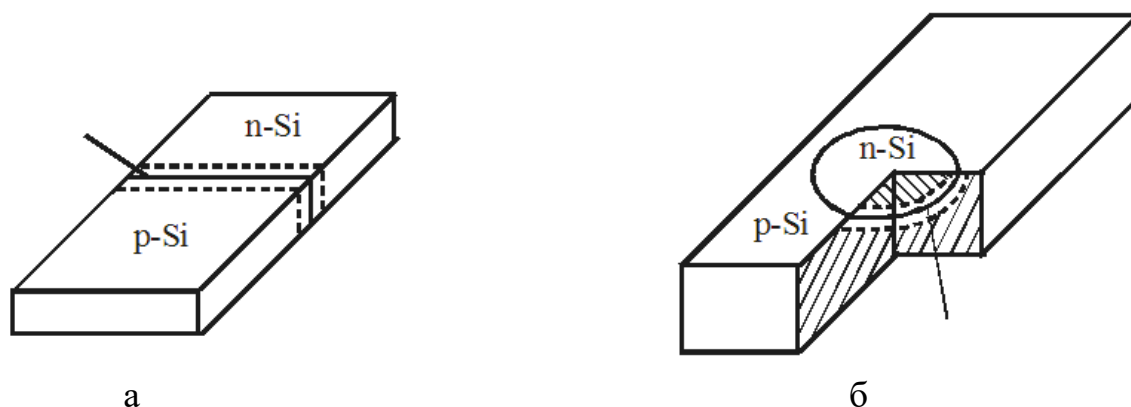


Рисунок 2.1– Кристал кремнію з плоским і сферичним p - n -переходами

За *величиною концентрації домішок* розрізняють симетричні та несиметричні переходи. У *симетричних переходах* концентрація акцепторів N_a

в p -області дорівнює концентрації донорів N_D у n -області. На практиці частіше використовують *несиметричні переходи*, для яких справедливо: $N_A \neq N_D$. При цьому значення N_A і N_D можуть розрізнятися між собою в сотні і навіть тисячу разів.

За характером розподілу домішок розрізняють різкі та плавні p - n -переходи. Розподіли домішок у таких переходах показані на рис. 2.2. У випадку *плавного* p - n -переходу (рис. 2.2, а) концентрація акцепторів у p -області під час наближення до контакту зменшується від N_A до нуля поступово. Аналогічно змінюється концентрація донорів у n -області. Площиною контакту в цьому випадку вважають ту площину, де концентрація донорів і акцепторів рівні (на рис. 2.2, а ця площина проходить через точку x координати $x=0$). Чим крутіша зміна домішок, тим менш плавним є перехід. Якщо концентрація домішок змінюється в області контакту дуже різко, практично в одній площині, p - n -перехід називають *різким* (рис. 2.2, б).

Переходи, створювані в однорідних за хімічним складом кристалах, називають *гомогенними*. У сучасних НПП використовують також p - n -переходи між різнорідними шарами напівпровідників. Ці переходи називають *гетерогенними* або *гетеропереходами*.

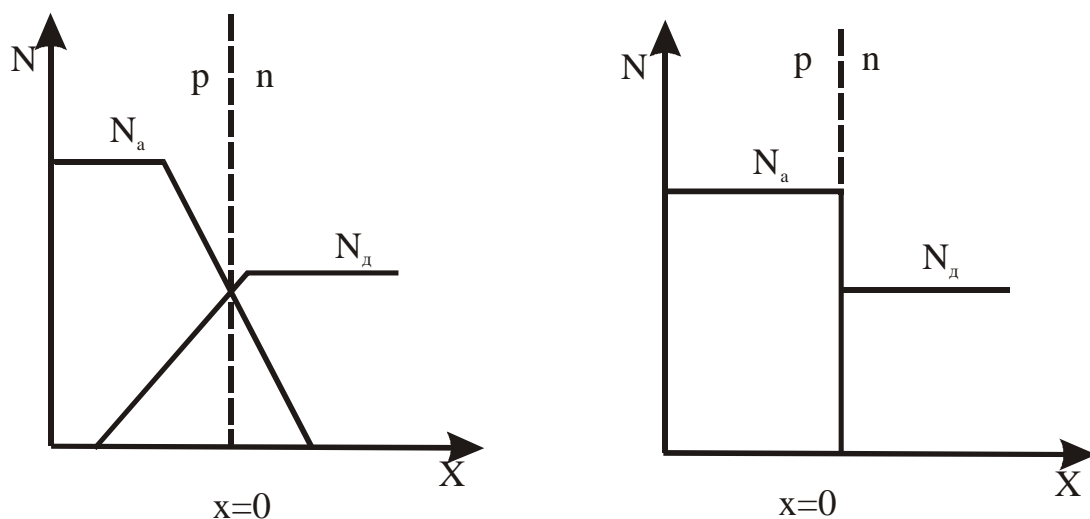


Рисунок 2.2 – Розподіл домішок у плавному та різкому p - n -переходах

Структура p - n -переходів значною мірою визначається *технологією* їх одержання.

Історично першими почали застосовуватися *точкові p-n-переходи*. Вони виготовляються *методом електричного формування* (рис. 2.3). Процес починають із нанесення на одну з граней кристала 1 з електропровідністю, наприклад, n -типу, металевому контакту 2. До іншої грані кристала притискається дріт 3,

загострений кінець якого покривають плівкою акцепторної домішки. Потім через обидва контакти пропускають імпульс електричного струму в декількох амперах. Під час проходження цього струму дріт розігрівається та приварюється до кристала. У процесі приварювання атоми домішки проникають усередину кристала. При цьому утвориться зона p -типу, на межі якої виникає p - n -перехід, у формі півсфери.

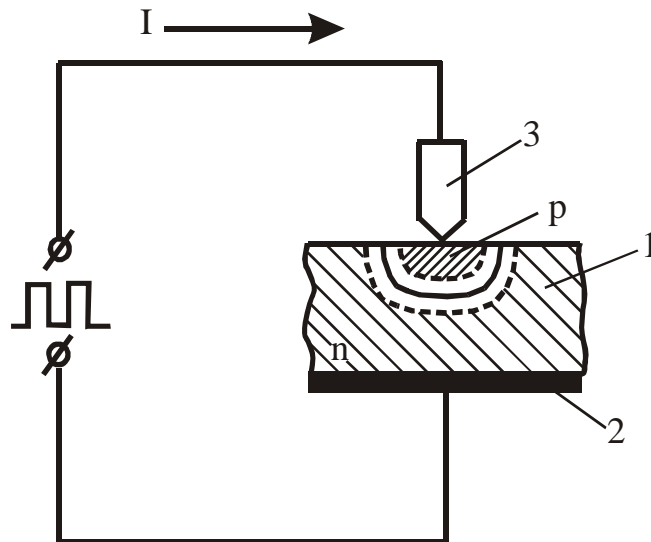


Рисунок 2.3 – Схема формування точкового p - n -переходу

У сучасних НПП масове застосування знаходять *площинні переходи*. Відомо кілька варіантів технологій їхнього формування. На рис. 2.4 показано технологію одержання сплавних p - n -переходів у кристалі германію n -типу. Для цього на поверхні кристала 1 (рис. 2.4, а) розміщують таблетку лігатури 2, що є сильно легованим сплавом чистого напівпровідникового матеріалу з акцепторною домішкою, наприклад, індію. Потім кристал із лігатурою поміщають у піч і розігрівають до температури в кілька сотень градусів Цельсія. При цьому індій розплавляється та розчиняє германій. Розчинення йде настільки сильно, що крапля розплавленої лігатури 3 впроваджується вглиб вихідного кристала (рис. 2.4, б). Під час охолодження в кристалі утворюється область 4 (рис. 2.4, в), яка містить велику кількість атомів індію. Область 4 здобуває провідність p -типу, тому що індій є акцептором для германію. На межі p - і n -областей виникає p - n -перехід площинного типу.

Найчастіше площинні p - n -переходи формують *дифузійним методом*. Для цього до однієї з поверхонь розігрітого напівпровідникового кристала підводять атоми домішки (дифузанта), які дають провідність, протилежну початковій. В результаті дифузії атомів домішки міняється тип електропровідності приповерхневого шару кристала та виникає p - n -перехід (рис. 2.5).

Подібний результат може бути отриманий, якщо кристал опромінювати потоком прискорених іонів домішки, що «примусово» впроваджують у решітку кристала. При цьому змінюють електропровідність приповерхневого шару. Така технологія називається *іонним легуванням*.

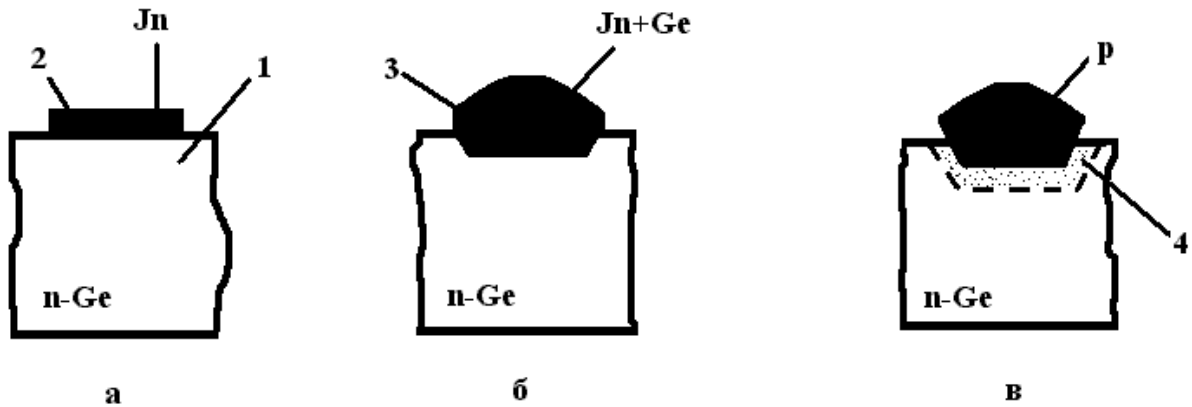


Рисунок 2.4 – Схема формування сплавного *p-n*-переходу

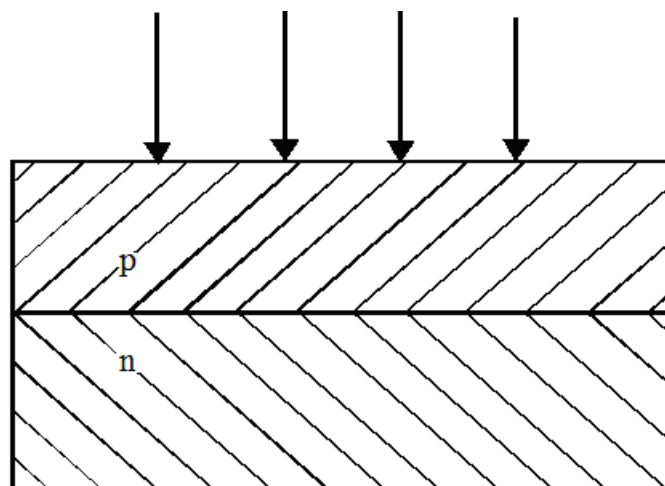


Рисунок 2.5 – Формування *p-n*-переходу методом дифузії або іонного легування

Розподіл домішок у площинних *p-n*-переходах, отриманих описаними методами, показано на рис. 2.6. Вісь *X* відповідає напрямку, перпендикулярному до поверхні кристала. Концентрація домішок безпосередньо на поверхні кристала (точка $X=0$) у всіх випадках має одну і ту ж величину $N_{\text{п}}$. Концентрація домішок у вихідному кристалі N_0 позначена лінією 4. Кривою 3 показано типовий розподіл домішок у сплавлених переходах. Ці переходи вважаються різкими. Переходи, отримані методом дифузії (крива 2) і іонного легування (крива 1) класифікують як плавні. З рис. 2.6 видно, що всі розглянуті *p-n*-переходи є несиметричними. Місце розташування таких переходів визначається точками (X_1, X_2, X_3), у яких концентрація введених домішок стає рівною концентрації домішок N_0 у вихідному кристалі.

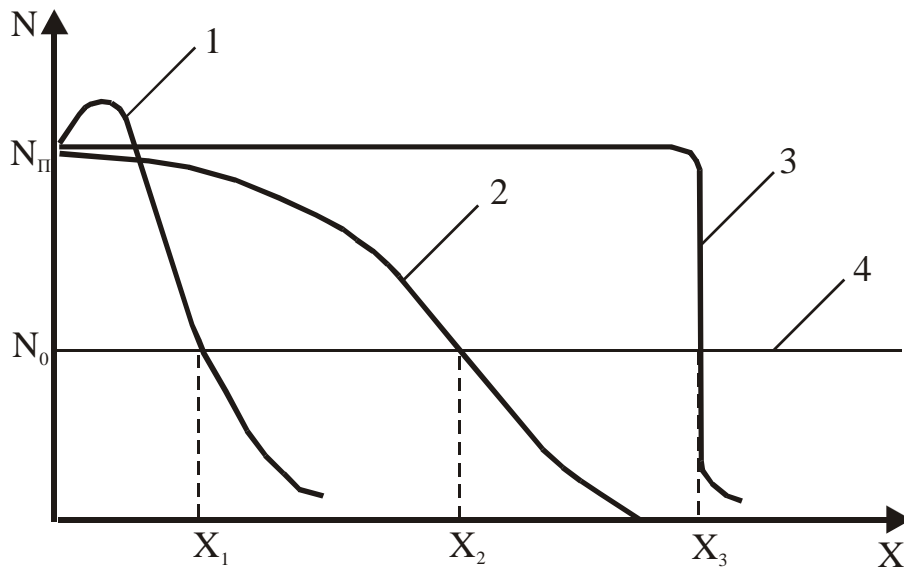


Рисунок 2.6 – Розподіл домішок у структурах $p-n$ -переходів

Найбільш якісні переходи отримують *методом епітаксії* (рис. 2.7). На поверхню кристала 1 у цьому випадку нарощується тонкий шар напівпровідника 2 із протилежним типом електропровідності. Цей шар називають епітаксіальним, і його решітка має безупинно продовжувати решітку вихідного кристала 1. Таким способом формують симетричні та несиметричні $p-n$ -переходи з дуже різким розподілом домішок.

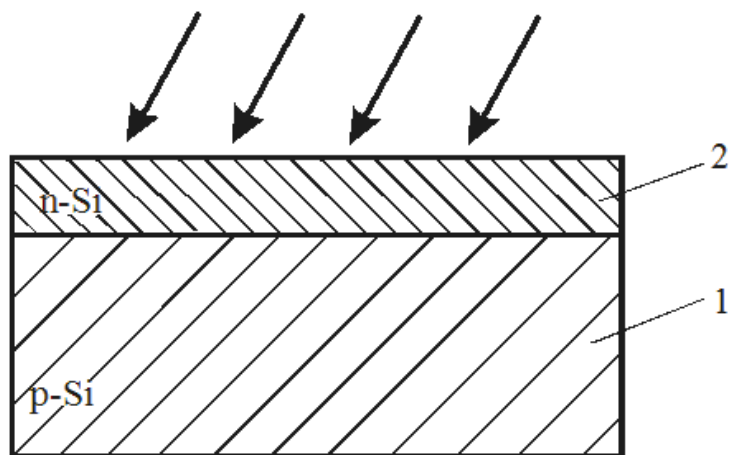


Рисунок 2.7 – Формування епітаксіального $p-n$ -переходу

Запитання й завдання для самоперевірки

1. Що називають електронно-дірковим чи $p-n$ -переходом?
2. За якими ознаками класифікують $p-n$ -переходи?
3. Поясніть, чим площинні $p-n$ -переходи відрізняються від сферичних.
4. Який $p-n$ -перехід називають симетричним, а який несиметричним?

5. Наведіть і поясніть розподіл домішок у кристалі із симетричним і несиметричним p - n -переходом.
6. Як розрізняються між собою плавні та різкі p - n -переходи?
7. Наведіть і поясніть розподіл домішок у кристалі з плавним і різким p - n -переходами.
8. Чим відрізняються гомогенні p - n -переходи від гетерогенних?
9. Наведіть і поясніть схему одержання p - n -переходу методом електричного формування.
10. Поясніть, як одержують p - n -переходи методом сплавки.
11. Що таке дифузійний метод формування p - n -переходів?
12. Поясніть суть методу іонного легування для одержання p - n -переходів.
13. Що таке метод епітаксialного вирощування p - n -переходів?

2.2 Рівноважний стан p - n -переходу

Рівноважним називають такий стан p - n -переходу, коли до нього не прикладена зовнішня напруга і відсутні збуджуючі фактори (нагрівання, освітлення та ін.). Його властивості розглянемо на прикладі площинного переходу з різким розподілом домішок (рис. 2.8). У рівноважному стані струм через p - n -перехід відсутній. Але в ньому є внутрішнє електронне поле. Воно виникає в результаті дифузійного зміщення носіїв й урівноважує його. При цьому створюється область об'ємного заряду різного знаку з різних сторін межі розділу n - і p -шарів. Розглянемо більш детально як виникає ця область.

Об'ємні заряди та струми p - n -переходу. Розподіл домішок і рухливих носіїв заряду в кристалі з різким p - n -переходом показано на рис. 2.8, а. Вісь відстаней X – перпендикулярна межі розділу. Концентрація акцепторів у p -області відзначена штриховою лінією N_a , а донорів у n -області – лінією N_d . Рівноважні концентрації основних носіїв p_{po} і n_{no} на віддалі від переходу практично дорівнюють концентраціям домішок: $p_{po} \approx N_a$ і $n_{no} \approx N_d$ (див. формули 1.9). Неосновних носіїв у кристалі, концентрації яких становлять n_{po} і p_{no} , набагато менше, ніж основних (див. формули 1.11, 1.12). Тому для однойменних носіїв з обох боків переходу будуть правильними співвідношення:

$$n_{no} \gg n_{po}, \quad p_{po} \gg p_{no}. \quad (2.1)$$

Відповідно до (2.1) у p - n -переході існує перепад (градієнт) концентрації носіїв одного знаку: дірок у p -області набагато більше, ніж у n -області, а електронів – навпаки. В результаті виникає *дифузія основних носіїв заряду* через межу розділу областей p - і n -типу, тобто через перехід. Дірки з p -області

прагнуть перейти в n -область, а електрони дифундують у протилежному напрямку. В результаті в переході виникають дірковий $I_{дф.p}$ і електронний $I_{дф.n}$ струми.

Технічний напрямок цих компонентів $I_{дф.p}$ і $I_{дф.n}$ – однаковий, так що повний струм дифузії:

$$I_{дф} = I_{дф.p} + I_{дф.n}. \quad (2.2)$$

Не слід забувати, що технічний напрямок електричного струму збігається з фактичним рухом дірок і протилежний фактичному рухові електронів. З цієї причини струми спрямовані в одну сторону, хоча основні носії дифундують у протилежних напрямках.

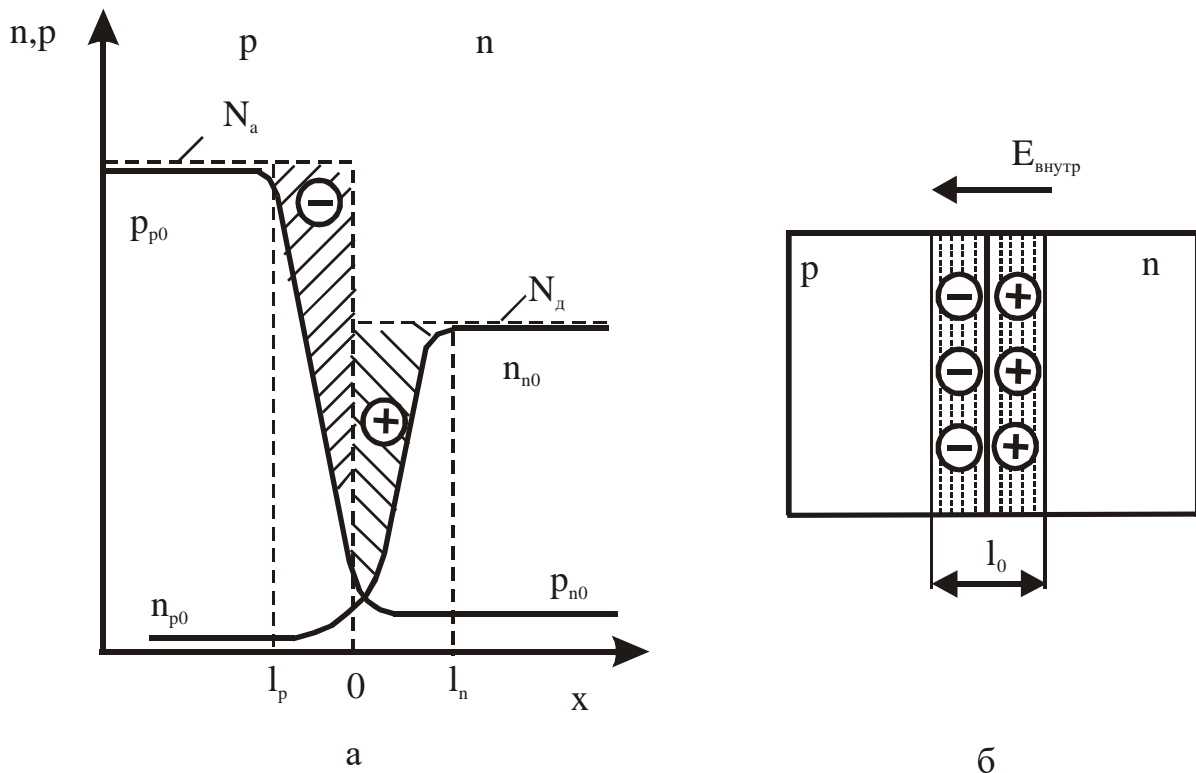


Рисунок 2.8 – Розподіл носіїв заряду та утворення внутрішнього електричного поля в p - n -переході

Якби електрони та дірки були електрично нейтральними частками, то дифузія скінчилася б повним вирівнюванням їх концентрацій. Однак у дійсності це не відбувається, тому що дифузія електронів і дірок супроводжується перерозподілом зарядів. Після відходу електронів із тієї частини n -області, яка безпосередньо примикає до межі розділу, в ній залишаються позитивні іони донорної домішки (на рис. 2.8, а показані штриховою лінією). Аналогічно дірки, що дифундують із p - у n -область, залишають біля межі розділу іони акцепторної домішки з негативним зарядом.

Таким чином, у результаті дифузії основних носіїв приконтатні області p - n -переходу збіднюються рухливими носіями (рис. 2.8, а) і в них виникають два шари нерухомих різнойменних зарядів, утворених іонами акцепторів і донорів.

Подвійний заряджений шар із зниженою концентрацією основних носіїв називається *запірним* або *збідненим шаром* p - n -переходу. Цей шар є основою p - n -переходу і показаний на рис. 2.8, б.

Нескомпенсовані заряди запірного шару створюють *внутрішнє електричне поле* p - n -переходу $E_{вн}$, спрямоване завжди від n - до p -області. Це поле перешкоджає дифузії основних носіїв, тобто для цих носіїв воно є гальмуючим. З іншого боку, поле $E_{вн}$ буде прискорюючим для неосновних носіїв – дірок $p_{по}$ в n -області та електронів $n_{ро}$ в p -області.

Під дією поля $E_{вн}$ дірки з n -області дрейфуватимуть в p -область, створюючи дрейфовий струм $I_{др\ p}$. Електрони з аналогічної причини дрейфують із p - у n -область, створюючи дрейфовий струм $I_{др\ n}$, спрямований у ту саму сторону, що і струм $I_{др\ p}$. Повний струм дрейфу неосновних носіїв у p - n -переході:

$$I_{др} = I_{др\ p} + I_{др\ n} \quad (2.3)$$

Цей струм протилежний за напрямком струму дифузії основних носіїв.

У рівноважному стані дифузійний і дрейфовий струми за величиною дорівнюють один одному, і результуючий струм через p - n -перехід відсутній:

$$I = I_{дф} - I_{др} = 0. \quad (2.4)$$

Таким чином, підсумовуючи сказане, можна вважати, що дифузія основних носіїв $n_{по}$ та $p_{ро}$ через p - n -перехід продовжується доти, доки не сформується таке внутрішнє електричне поле $E_{вн}$, яке ці носії не зможуть подолати. Іншими словами, поки не виникне такий дрейфовий струм неосновних носіїв $I_{др}$, який зрівноважить дифузійний струм основних носіїв $I_{дф}$, так що повний струм $I = (I_{дф} - I_{др})$ дорівнюватиме нулю.

Потенціальний бар'єр p - n -переходу. Внутрішнє поле $E_{вн}$ є гальмуючим для основних носіїв заряду, що дифундують через p - n -перехід. У фізиці в ході оцінки дії таких полів, прийнято замінювати їх *потенціальними бар'єрами*. «Висота» бар'єра визначається роботою, яку виконує носій, переборюючи гальмуюче поле. Слід чітко уявляти, що потенціальний бар'єр існує тільки для основних носіїв заряду. Для неосновних носіїв у p - n -переході $E_{вн}$ є прискорюючим електричним полем, тому для цих носіїв потенціального бар'єра в p - n -переході немає. Розподіл потенціалу в кристалі з p - n -переходом у рівноважному стані показано на рис. 2.9. Такий розподіл називають потенціальною діаграмою.

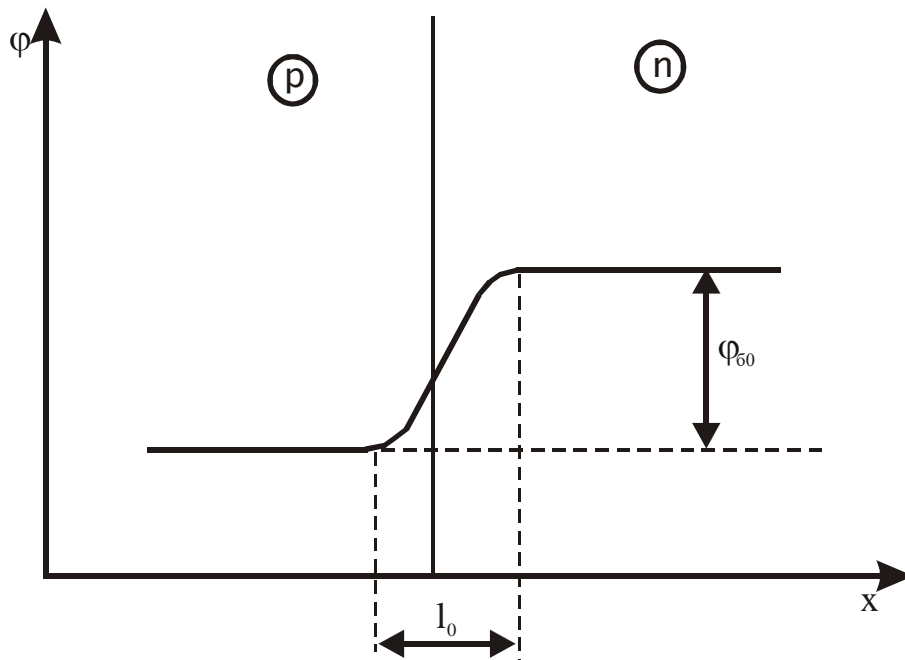


Рисунок 2.9 – Потенціальна діаграма p - n -переходу в рівноважному стані

Висота потенціального бар'єру, позначена ϕ_{60} , залежить від перепаду концентрації однойменних носіїв на його межах:

$$\phi_{60} = \phi_T \cdot \ln \frac{n_{no}}{n_{po}} = \phi_T \ln \frac{P_{po}}{P_{no}}. \quad (2.5)$$

Величину $\phi_T = \frac{kT}{q}$ називають *термодинамічним потенціалом*. При 20°C

$$\phi_T = 0,025 \text{ В.}$$

Якщо скористатися виразами (1.9), (1.11) і (1.12) для рівноважних концентрацій носіїв у домішкових напівпровідниках, то формули (2.5) зводяться до виразу:

$$\phi_{60} = \phi_T \ln \frac{N_a \cdot N_d}{n_i^2}. \quad (2.6)$$

З виразу (2.6) випливає, що висота бар'єра ϕ_{60} залежить від ширини забороненої зони напівпровідника ΔW_z . Відповідно до формули (1.6) концентрація власних носіїв n_i експоненціально зменшується зі збільшенням ΔW_z . Отже, аргумент логарифмічної функції у (2.6) зростатиме. Це означає збільшення потенціального бар'єра ϕ_{60} зі збільшенням ширини забороненої зони ΔW .

Змінити ϕ_{60} можна також шляхом зміни кількості домішок N_a і N_d . Однак зростання ϕ_{60} зі збільшенням концентрації домішок не може бути безмежним. З великими ступенями легування ($N_a, N_d \approx 10^{19} \dots 10^{20} \text{ см}^{-3}$) напівпровідникові

шари вироджуються і висота бар'єра ϕ_{ϕ_0} в рівноважному стані досягає максимального для даного напівпровідника значення $\phi_{\phi_0 \max}$, чисельно близького до ширини забороненої зони. Так ΔW_3 у германію та кремнію:

$$(\Delta W_3)_{\text{Ge}} \approx 0,7 \text{ eV}; \quad (\Delta W_3)_{\text{Si}} = 1,12 \text{ eV};$$

відповідно:

$$(\phi_{\phi_0 \max})_{\text{Ge}} \approx 0,7 \text{ В}; \quad (\Delta W_3)_{\text{Si}} = 1,1 \text{ В}.$$

Зонна діаграма p - n -переходу. Сутність процесів, що протікають у p - n -переході, який знаходиться в рівноважному стані, можна додатково проілюструвати за допомогою його зонної діаграми. (рис. 2.10). Її отримують шляхом взаємного зміщення зонних діаграм ізольованих n - і p -областей (рис 1.5, 1.6) із таким розрахунком, щоб структура в цілому мала однаковий рівень Фермі $W_{\text{Fp}}=W_{\text{Fn}}=W_{\text{F}}$. Рівень Фермі W_{F} визначає середню енергію носіїв заряду, тому в рівноважному стані він однаковий для всього кристала. У результаті такого зміщення в зоні контакту неминуче виникає скривлення енергетичних рівнів дна зони провідності W_{n} і стелі валентної зони W_{B} .

Користуючись зонною діаграмою, можна в наочній формі описати процеси, що спостерігаються в рівноважних переходах.

З рис. 2.10 видно, що в створенні струму дифузії електронів $I_{\text{дф.п.п}}$ беруть участь тільки ті електрони з зони провідності n -області, які займають рівні, що перевищують енергію $q\phi_{\phi_0}$. Цій умові відповідають рівні $W > W_{\text{n}}'$. Електрони, що займають рівні $W_{\text{n}}'' < W < W_{\text{n}}'$ (рис 2.10) відбиваються бар'єром і в p -область не попадають. З іншого боку, будь-який електрон, що знаходиться в зоні провідності p -області, можна уподобити кульці, що легко скачується в n -область, тому що для нього немає бар'єра. Ці електрони створюють дрейфовий струм $I_{\text{др.п.}}$.

Дірки у валентній зоні можна уподобити пухирцям повітря, що знаходяться в заповненій водою судині. Дірки завжди прагнуть зайняти максимально високі енергетичні рівні, оскільки електрони прагнуть перейти на більш низькі рівні (принцип мінімуму енергії). Тому дірки з n -області, потрапляючи в зону переходу, легко спливають у протилежний шар, утворюючи при цьому дірковий дрейфовий струм $I_{\text{др.р.}}$. Для того, щоб змусити дірку з p -області перейти в n -область, необхідно попередньо занурити її на більш низький енергетичний рівень, тобто надати їй додаткову енергію. В утворенні діркового дифузійного струму $I_{\text{др.р.}}$ беруть участь тільки дірки, які займають рівні нижче стелі валентної зони n -області: $W < W_{\text{B}}''$. Дірки

з p -області, що знаходяться на рівнях $W_B'' < W < W_B'$, перебороти потенціальний бар'єр не можуть.

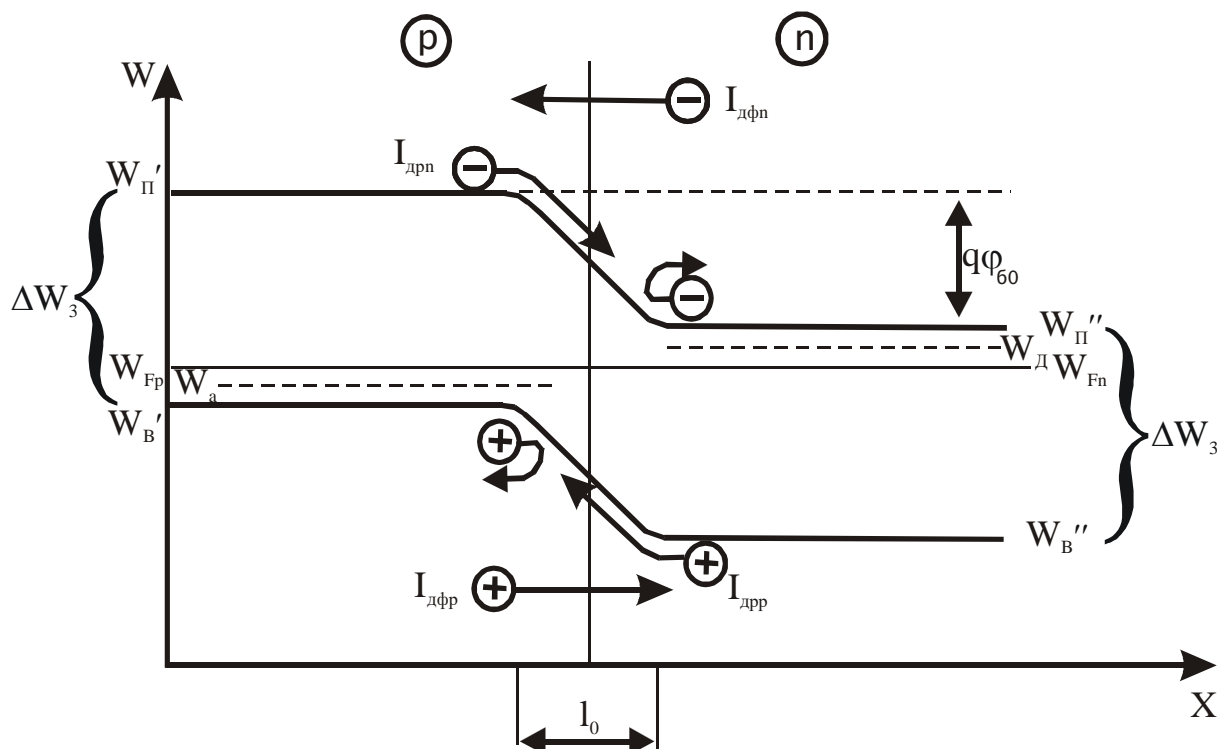


Рисунок 2.10 – Зонна діаграма p - n -переходу в рівноважному стані

Важливо пам'ятати, що встановлення рівноважного стану p - n -переходу зводиться до встановлення такої висоти потенціального бар'єра ϕ_{60} , за якого дрейфові та дифузійні струми врівноважують один одного.

Ширина запірного шару є важливим параметром p - n -переходу. В ході її визначення припускають, що в межах запірного шару практично немає вільних носіїв, а заряди створюються тільки домішковими іонами. На рис. 2.11 ширина збідненого шару в p -області позначена l_p , у n -області – l_n . Заштриховані області пропорційні зарядам домішкових іонів. Повна ширина запірного шару різкого p - n -переходу визначається виразом:

$$l_0 = l_p + l_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{q} \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) \Phi_{60}} \quad , \quad (2.7)$$

де ε – відносна діелектрична проникність напівпровідника;

ε_0 – абсолютна електрична проникність вакууму.

Ширина плавного переходу залежить від характеру розподілу домішок у кристалі.

Крім повної ширини запірного шару l_0 у ряді випадків необхідно знати розміри шарів позитивних і негативних зарядів l_p і l_n .

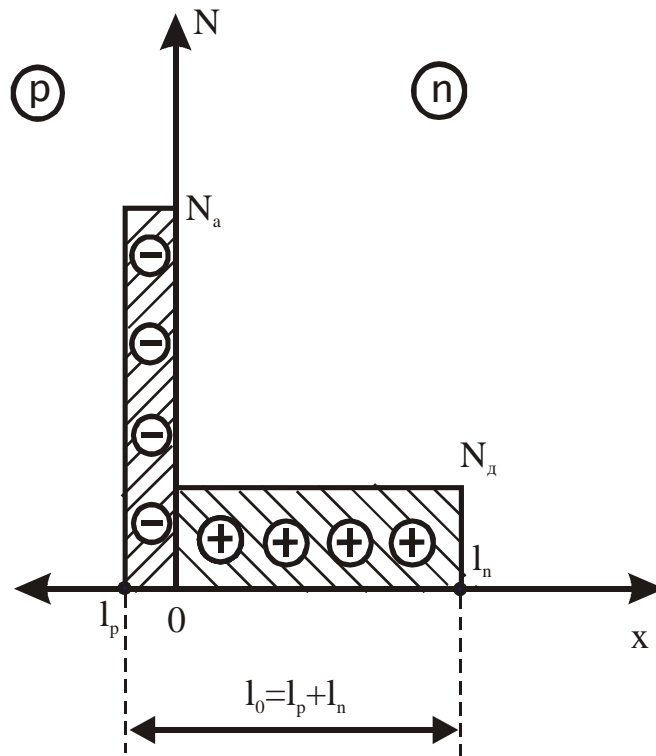


Рисунок 2.11 – Ширина області об’ємного заряду $p-n$ -переходу

Оскільки в цілому кристал зберігає електричну нейтральність, ті сумарні заряди негативного (Q^-) і позитивного (Q^+) шарів мають дорівнювати:

$$Q^- = N_a^- l_p S = N_d^+ l_n S = Q^+, \quad (2.8)$$

де S – площа $p-n$ -переходу.

З (2.8) отримують співвідношення:

$$\frac{l_p}{l_n} = \frac{N_d}{N_a}, \quad (2.9)$$

з якого видно, що запірний шар ширше в тій області кристала, яка менш легована.

Ширина l_0 переходів реальних НПП коливається в межах від сотих часток до десятків мікрометрів ($1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$).

Запитання й завдання для самоперевірки

1. Який стан $p-n$ -переходу називають рівноважним?
2. Нарисуйте й поясніть розподіл носіїв заряду в кристалі з різким $p-n$ -переходом у рівноважному стані.
3. Поясніть виникнення дифузії основних носіїв через $p-n$ -перехід.
4. Нарисуйте й поясніть напрямки електронної та діркової компонент дифузійного струму через $p-n$ -перехід.
5. Як утворюються в області $p-n$ -переходу нерухомі об’ємні заряди?

6. Поясніть виникнення внутрішнього електричного поля p - n -переходу, покажіть його напрямки.
7. Доки продовжується дифузія основних носіїв через p - n -перехід?
8. Як виникає дрейфовий струм через p - n -перехід і які носії заряду в ньому беруть участь?
9. Нарисуйте й поясніть напрямки електронної та діркової компонент дрейфового струму через p - n -перехід.
10. Як зв'язані між собою дифузійний і дрейфовий струми через p - n -перехід у рівноважному стані?
11. Чим обумовлено виникнення потенціального бар'єра p - n -переходу?
12. Для яких носіїв заряду існує потенціальний бар'єр у p - n -переході?
13. Наведіть і поясніть формули для висоти потенціального бар'єра p - n -переходу.
14. Поясніть як і чому висота потенціального бар'єра переходу залежить від ширини забороненої зони напівпровідника.
15. Поясніть як залежить висота потенціального бар'єра переходу від ступеня легування напівпровідника n - і p -типу.
16. Від чого залежить максимальна висота потенціального бар'єра p - n -переходу, яку можна одержати?
17. Нарисуйте та поясніть зонну діаграму p - n -переходу в рівновазі.
18. Чому в кристалі з p - n -переходом рівень Ферми однаковий для всього кристала?
19. Покажіть на зонній діаграмі, як утворюються дифузійний та дрейфовий електронні струми через перехід.
20. Покажіть на зонній діаграмі, як утворюються дифузійний і дрейфовий діркові струми через перехід.
21. Напишіть і поясніть формули для ширини запірної шари p - n -переходу.
22. У випадку несиметричних p - n -переходів у якій з областей більше ширина запірної шари?

2.3 Вольтамперна характеристика p - n -переходу

Для розуміння вольтамперної характеристики (ВАХ) p - n -переходу необхідно розглянути його властивості під час подачі зовнішньої напруги: прямого і зворотнього зміщення.

Режим прямого зміщення відповідає подачі такої напруги, за якої викликане нею зовнішнє електричне поле $E_{пр}$ спрямоване назустріч

внутрішньому полю переходу (рис. 2.12, а). Під дією прямої напруги основні носії заряду зміщуються від контактів у напрямку переходу, частково заповнюють збіднений шар і *ширина останнього зменшується*: $l_{пр} < l_0$.

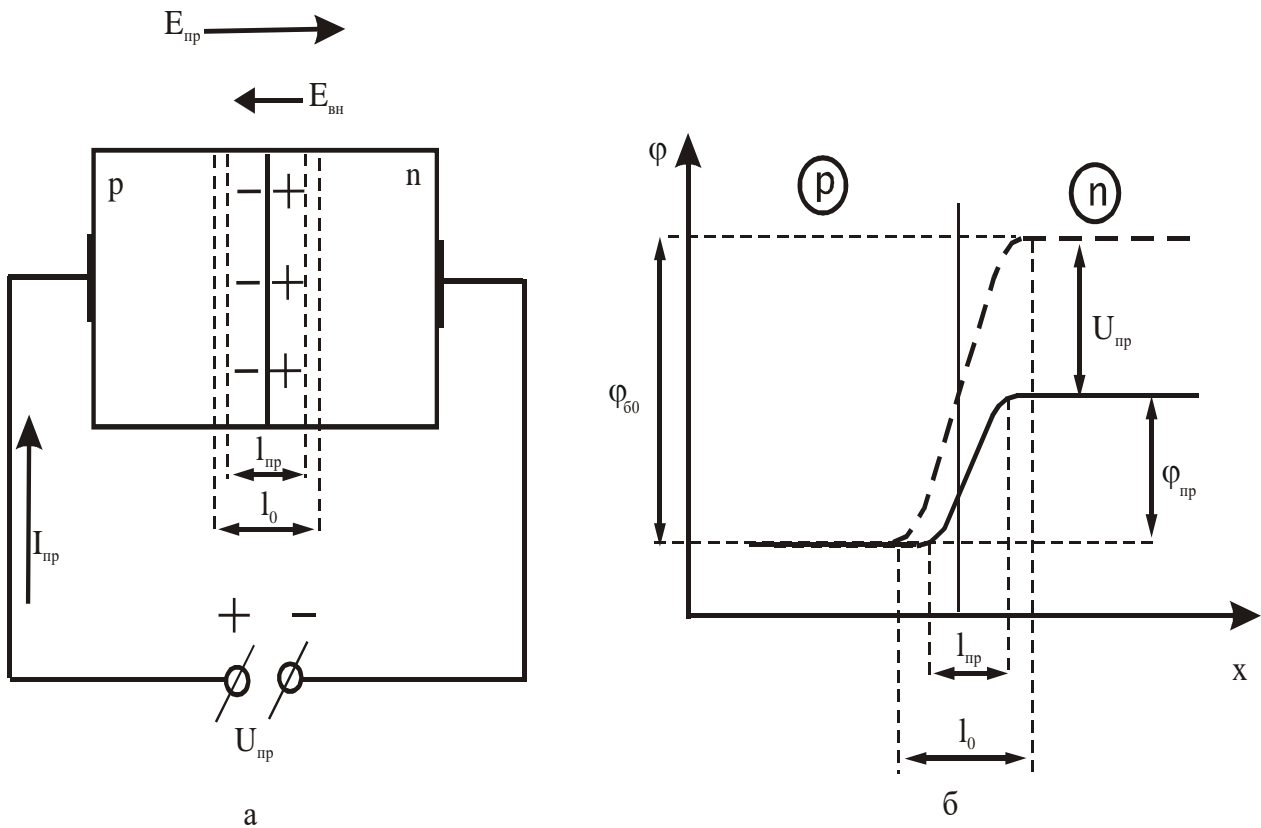


Рисунок 2.12 – Пряме зміщення p - n -переходу

Оскільки електричні поля $E_{вн}$ і $E_{пр}$ спрямовані в різні боки, то сумарне електричне поле дорівнюватиме їхній різниці $(E_{вн} - E_{пр}) < E_{вн}$. Одночасно з цим *висота потенціального бар'єру зменшується* на величину прикладеної прямої напруги і *стає* рівною:

$$\varphi_{пр} = \varphi_{60} - U_{пр}. \quad (2.10)$$

Ширину переходу в такому режимі можна визначити за формулою (2.7) після підстановки туди $\varphi_{пр}$ замість φ_{60} .

Унаслідок зниження бар'єра, його гальмуюча дія стосовно основних носіїв зменшується і рівновага між дифузійним і дрейфовим струмами переходу порушується. *Дифузійний струм* при прямому зміщенні стає *більшим за дрейфовий*. Результуючий струм $I_{пр}$, який називають *прямим струмом переходу*, стає відмінним від нуля:

$$I_{пр} = I_{дф} - I_{др} \approx I_{дф} > 0. \quad (2.11)$$

Цей струм утворений основними носіями, концентрація яких велика. Тому при прямих зміщеннях, навіть порядку частки вольта через перехід

протікатиме значний струм $I_{пр}$ (десятки міліампер і більше), а сам перехід у такому режимі характеризується малим опором (десятки Ом).

Інжекція неосновних носіїв. Під час подачі прямого зміщення на $p-n$ -перехід знижується його потенціальний бар'єр і підсилюється дифузія основних носіїв. Основні носії, що перебороли потенціальний бар'єр і потрапили в протилежну область, стають неосновними. Тому концентрація неосновних носіїв поблизу меж переходу, зміщеного в прямому напрямку, зростає. *Явище збільшення концентрації неосновних носіїв називається інжекцією.*

Носії інжектвані через перехід є надлишковими чи нерівноважними. Їхня концентрація на межі $p-n$ -переходу визначається такими співвідношеннями:

для дірок у n -області:

$$p_n(0) = p_{no} e^{\frac{U_{пр}}{\varphi_T}} ; \quad (2.12)$$

для електронів у p -області:

$$n_p(0) = n_{po} e^{\frac{U_{пр}}{\varphi_T}} ,$$

де p_{no} ; n_{po} – рівноважні концентрації неосновних носіїв.

Видно, що залежність граничних концентрацій $p_n(0)$ і $n_p(0)$ від напруги $U_{пр}$ підкоряється експонентній функції, тобто цю залежність можна вважати сильною.

В результаті появи на межі переходу надлишкових неосновних носіїв $p_n(0) > p_{no}$, виникає перепад концентрації цих носіїв за напрямком до середини кристала. При цьому надлишкові нерівноважні дірки активно рекомбінують з основними носіями електронами та концентрація їх поступово зменшується (рис. 2.13), прагнучи до рівноважного значення p_{no} . Залежність концентрації від відстані X згідно з формулою (1.22) можна записати:

$$(p_n - p_{no}) = [p_n(0) - p_{no}] e^{\frac{-X}{L_p}} . \quad (2.13)$$

Інжекція дірок не порушує електричної нейтральності n -області, тому що супроводжується одночасним надходженням туди рівної кількості електронів із зовнішнього кола. Розподіл нерівноважних дірок у n -області показано на рис. 2.13 крива 1, а розподіл електронів в цій самій області – крива 1', за формою співпадаючої з розподілом кривої 1. Можна показати, що на відстані від переходу, що перевищує дифузійну довжину дірок у n -області L_p , нерівноважні носії майже всі рекомбінують. Аналогічним чином у режимі прямого зміщення відбувається інжекція електронів із n - у p -область. Їхня гранична концентрація підкоряється формулі (2.12). Розподіл електронів, інжектованих в p -область, показано кривою 2 на рис. 2.13. Крива 2 визначає розподіл дірок у цій же області, які компенсують заряд нерівноважних електронів.

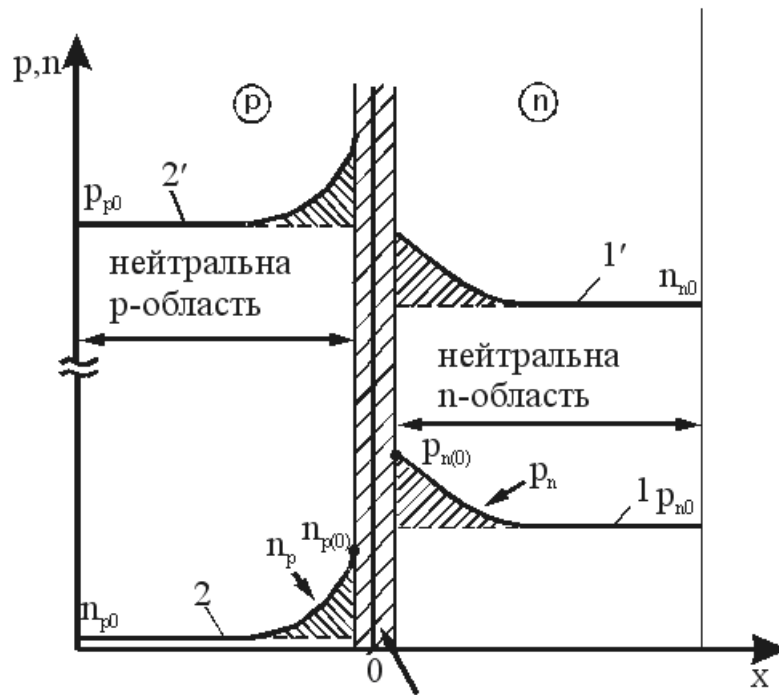


Рисунок 2.13 – Розподіл носіїв заряду в нейтральних областях під час прямого зміщення

Режим зворотного зміщення відповідає такій напрузі, за якої зовнішнє електричне поле $E_{зв}$ збігається за напрямком із внутрішнім полем p - n -переходу $E_{вн}$ (рис. 2.14, а). Під час подання зворотної напруги $U_{зв}$ основні носії у p - і n -областях відтягуюватимуться від меж запірного шару, що призведе до збільшення його ширини $I_{зв} > I_0$. Якщо електричні поля $E_{вн}$ і $E_{зв}$, спрямовані в одну сторону, складаються, то результуюче електричне поле зростає:

$$(E_{вн} + E_{зв}) > E_{вн} .$$

Висота потенціального бар'єру при цьому теж збільшується:

$$\varphi_{зв} = \varphi_{б0} + U_{зв} . \quad (2.14)$$

Подібно попередньому випадку ширину переходу в режимі зворотного зміщення можна визначити за формулою (2.7) після підстановки величини $\varphi_{зв}$ замість $\varphi_{б0}$.

Під час зворотного зміщення основні носії заряду мають енергію, що не достатня для подолання потенціального бар'єра. Тому дифузійний струм через перехід у такому режимі різко зменшується і переважаючим стає дрейфовий струм неосновних носіїв.

Повний зворотний струм p - n -переходу:

$$I_{зв} = I_{дф} - I_{др} \approx -I_{др} . \quad (2.15)$$

Його величина пропорційна концентрації неосновних носіїв.

Оскільки таких носіїв у кристалі напівпровідника дуже мало, то зворотний струм має незначну величину (одиниці мікроампер і менше). У режимі зворотного зміщення перехід має великий опір (від сотень кілоом до декількох мегаом).

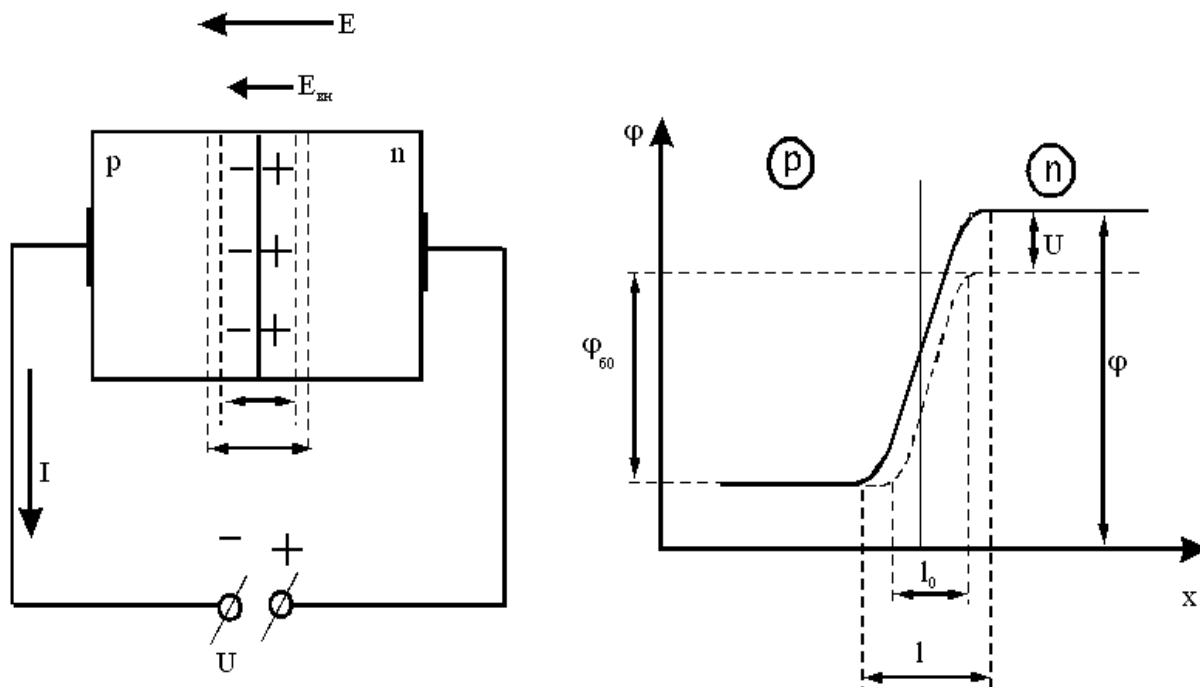


Рисунок 2.14 – Зворотне зміщення p-n-переходу

Екстракція неосновних носіїв. Під час зворотного зміщення результуюче електричне поле $p-n$ -переходу зростає. Оскільки воно є прискорюючим для неосновних носіїв заряду, кожний з них, що потрапив на межу заперного шару, переходить через перехід (дрейфовий рух) у протилежну область. В результаті концентрація неосновних носіїв на межах заперного шару зменшується порівняно з рівноважною.

Явище зменшення концентрації неосновних носіїв на межах зміщеного у зворотному напрямку $p-n$ -переходу називають *екстракцією*.

Вирази для граничних концентрацій дірок $p_n(0)$ і електронів $n_p(0)$ у режимі екстракції подібні виразам (2.12) із тією різницею, що напруга $U_{зв}$ у показник експоненти підставляється зі знаком «-»:

$$p_n(0) = p_{n0} e^{-\frac{U_{зв}}{\varphi_T}}; \quad n_p(0) = n_{p0} e^{-\frac{U_{зв}}{\varphi_T}}. \quad (2.16)$$

З цих формул видно, що під час подачі зворотної напруги $U_{зв} > (3...4) \varphi_T = (75...100) \text{ мВ}$ концентрації неосновних носіїв на межах падають практично до нуля:

$$p_n(0) \approx n_p(0) \approx 0.$$

Проте в режимі зворотного зміщення через перехід протікає кінцевий за величиною зворотний струм $I_{зв}$. Це забезпечується тим, що в зв'язку зі зниженням концентрації неосновних носіїв на межах заперного шару сюди безупинно дифундують неосновні носії з глибини шарів напівпровідника замість екстрагованих.

Розподіл неосновних носіїв у режимі екстракції показано кривими 1' і 2' на рис. 2.15. Електрична нейтральність p - і n -областей забезпечується тим, що з них через зовнішні виводи йде частина основних носіїв заряду (криві 1 і 2 на рис. 2.15).

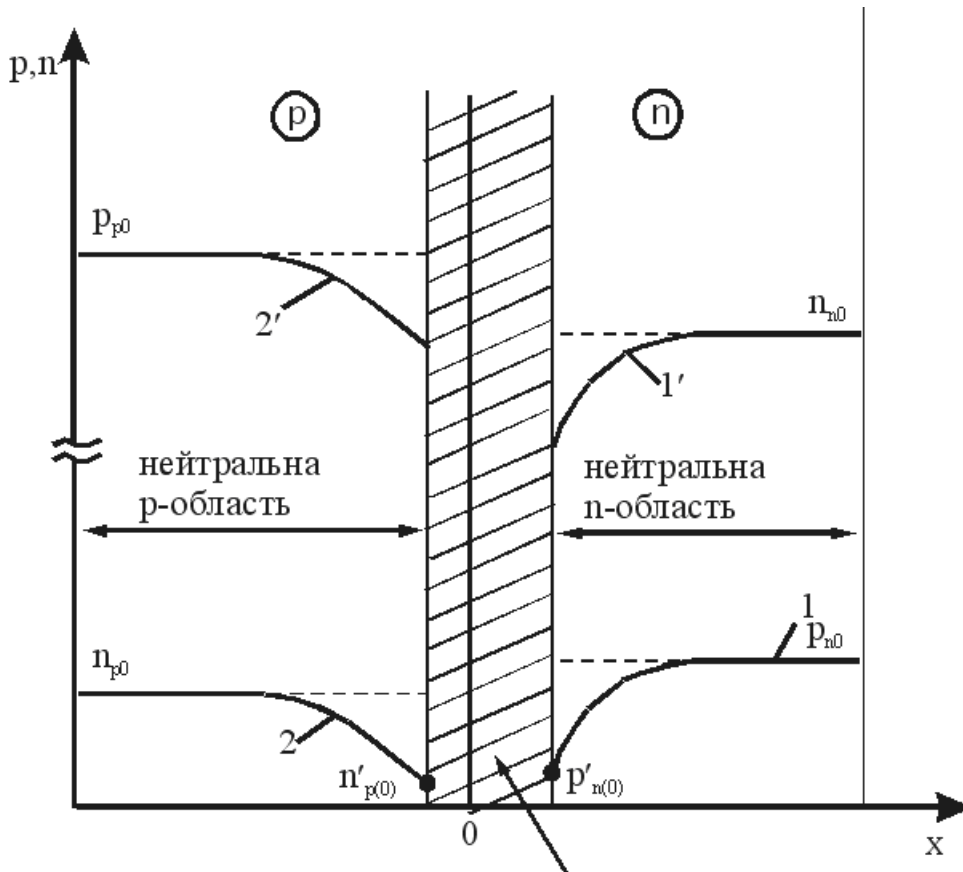


Рисунок 2.15 – Розподіл носіїв заряду в нейтральних областях під час зворотного зміщення

Вольтамперна характеристика (ВАХ) – це залежність струму, що протікає через прилад, від прикладеної напруги.

ВАХ ідеалізованого p - n -переходу. Суворий аналіз ВАХ p - n -переходу, за якого враховувалися б усі процеси в його структурі, є складною задачею. Для її спрощення зневажають деякими з процесів, тобто розглядають так званий ідеалізований p - n -перехід. При цьому зневажають спадом напруги на нейтральних областях кристала, вважаючи, що вся зовнішня напруга падає на самому переході, а також не враховують явища, що протікають на поверхні

кристала. Крім того, вважають, що товщина запірного шару така мала, що нею можна знехтувати.

Під час розгляду явищ інжекції й екстракції носіїв встановлено, що незалежно від режиму зміщення електричний струм безпосередньо на межах запірного шару має дифузійну природу. На підставі цієї закономірності і з урахуванням введених спрощень отримують ВАХ ідеалізованого *p-n*-переходу. Для одержання ВАХ достатньо отримати математичні вирази для розподілу носіїв заряду поблизу меж переходу при довільному зовнішньому зміщенні і розрахувати щільність струмів дифузії за формулою (1.18). Розв'язання цієї задачі призводить до виразу:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{U}{\varphi_T}} - 1 \right), \quad (2.17)$$

де I_0 – зворотний струм *p-n*-переходу.

Під час розрахунків за цією формулою пряму напругу підставляють із знаком «+», а зворотну зі знаком «-».

Вид ВАХ ідеалізованого *p-n*-переходу показаний на рис. 2.16 (крива 1).

В області прямих зміщень ($U > 0$) із зростанням напруги струм зростає за експонентою. Під час подавання на перехід напруги $U = U_{пр} > \varphi_T$ струм, що протікає через перехід, має вигляд:

$$I = I_{пр} \approx I_0 e^{\frac{U_{пр}}{\varphi_T}}. \quad (2.18)$$

Оскільки під час виконання цієї умови експонента $e^{\frac{U_{пр}}{\varphi_T}} \gg 1$, то одиницею в правій частині можна знехтувати.

У режимі зворотного зміщення ($U = U_{зв} < 0$) характер залежності струму від напруги змінюється. Якщо за абсолютною величиною зворотна напруга на переході велика ($|U_{зв}| \gg \varphi_T$), то експонента у формулі (2.17) $e^{-\frac{U_{зв}}{\varphi_T}} \cong 0$ і струм через перехід виходить на ділянку насичення:

$$I = I_{зв} = -I_0. \quad (2.19)$$

У межах цієї ділянки струм не залежить від напруги. В цьому випадку I_0 називають струмом насичення *p-n*-переходу.

Цей струм має дрейфову природу. Він утворений неосновними носіями заряду й пропорційний їхній концентрації:

$$I_0 = q \left(\frac{p_n D_p}{L_p} + \frac{n_p D_n}{L_n} \right). \quad (2.20)$$

Його називають також тепловим струмом, підкреслюючи тим самим, що він утворений носіями, які виникли в результаті теплової генерації.

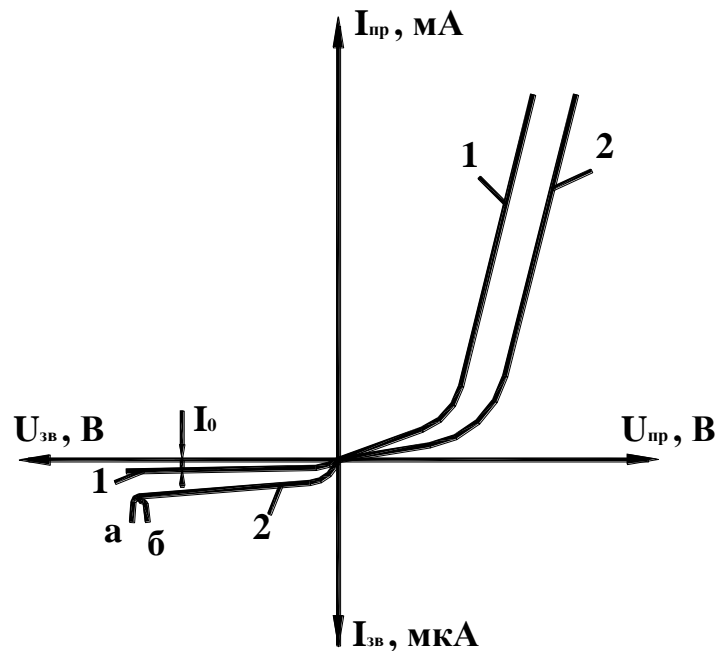


Рисунок 2.16 – Вольтамперна характеристика ідеалізованого (1) і реального (2) $p-n$ -переходів

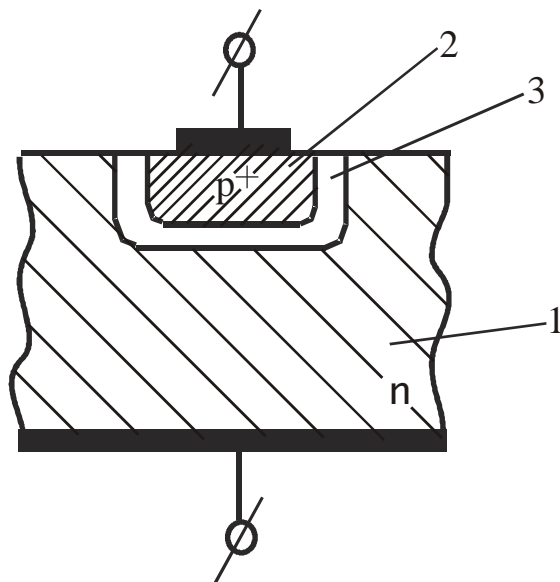
Запитання й завдання для самоперевірки

1. Який режим $p-n$ -переходу називають режимом прямого зміщення?
2. Нарисуйте схему подачі прямого зміщення на $p-n$ -перехід і покажіть напрямки внутрішнього та зовнішнього електричних полів.
3. Поясніть, як змінюється ширина $p-n$ -переходу під час подання на нього прямого зміщення.
4. Поясніть, як зміниться висота потенціального бар'єра $p-n$ -переходу під час подавання на нього прямого зміщення.
5. Яка природа струму, що проходить через $p-n$ -перехід під час прямого зміщення?
6. Від чого залежить величина $I_{пр}$ через $p-n$ -перехід?
7. Зобразіть розподіл носіїв заряду в нейтральних областях кристала з $p-n$ -переходом при прямому зміщенні.
8. Яке явище називають інжекцією?
9. Запишіть вираз для граничних концентрацій інжектованих носіїв.
10. Як пояснити зменшення з відстанню концентрації інжектованих носіїв?
11. Запишіть вираз, що визначає залежність від відстані концентрації надлишкових неосновних носіїв.

12. Чим забезпечується нейтральність областей кристала поза $p-n$ -переходом у випадку подавання прямого зміщення?
13. Який режим роботи $p-n$ -переходу називають режимом зворотного зміщення?
14. Нарисуйте схему подачі зворотного зміщення на $p-n$ -перехід і покажіть напрямки внутрішнього та зовнішнього електричних полів.
15. Поясніть, як змінюється висота потенціального бар'єра $p-n$ -переходу при подачі на нього зворотного зміщення.
16. Яка природа струму, що протікає через $p-n$ -перехід при зворотному зміщенні?
17. Від чого залежить величина струму $I_{зв}$ через $p-n$ -перехід?
18. Поясніть, чому при прямому зміщенні опір $p-n$ -переходу малий, а при зворотному зміщенні великий.
19. Зобразіть розподіл носіїв заряду в нейтральних областях кристала з $p-n$ -переходом при зворотному зміщенні.
20. Яке явище називають екстракцією?
21. Запишіть вираз для граничних концентрацій неосновних носіїв у режимі екстракції $p-n$ -переходу.
22. Чим забезпечується нейтральність областей кристала поза $p-n$ -переходом у випадку подачі зворотного зміщення?
23. Що називають ВАХ $p-n$ -переходу?
24. Який $p-n$ -перехід вважають ідеалізованим?
25. Запишіть вираз для ВАХ ідеалізованого $p-n$ -переходу.
26. Зобразіть графічно ВАХ ідеалізованого $p-n$ -переходу.
27. Зобразіть і поясніть вирази для прямого $I_{пр}$ і зворотного $I_{зв}$ струмів $p-n$ -переходу.
28. Який струм називають струмом насичення $p-n$ -переходу і від чого залежить його величина?

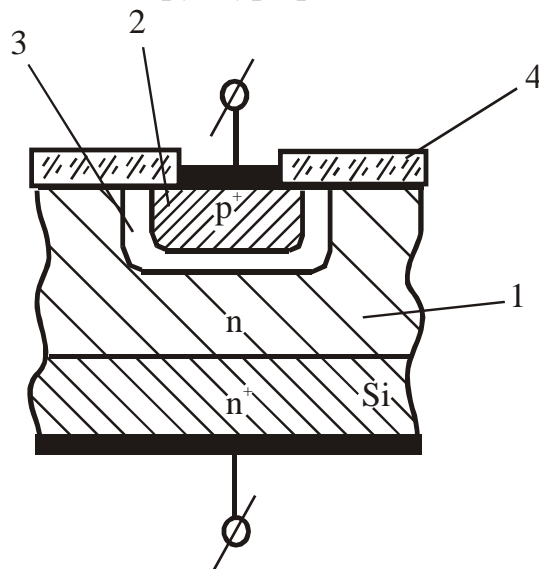
2.4 Технічні властивості реального $p-n$ -переходу

Реальні $p-n$ -переходи, як правило, є несиметричними, тобто одна з їхніх областей легована істотно більше іншої. Дірковий напівпровідник із підвищеним легуванням позначають p^+ або навіть p^{++} . Відповідно електронний напівпровідник n^+ чи n^{++} . Та область несиметричного $p-n$ -переходу, що більше легована, називається *емітером* (2 на рис. 2.17), менш легована область – *базою* (1 на рис. 2.17). Для зменшення падіння напруги на базі її біля контакту підвищено легують (n^+ на рис. 2.18).



1 – база; 2 – емітер; 3 – p - n -перехід

Рисунок 2.17 – Структура реального p - n -переходу



1 – база; 2 – емітер; 3 – p - n -перехід; 4 – шар діелектрика

Рисунок 2.18 – Структура планарно-епітаксiального реального p - n -переходу

ВАХ реального p - n -переходу показана на кривою 2 на рис. 2.16. При прямих зміщеннях реальна характеристика розташована нижче характеристики ідеалізованого p - n -переходу. Це пояснюється тим, що не вся зовнішня напруга падає на переході, частина її падає на нейтральних областях кристала, насамперед базі, якщо p - n -перехід несиметричний. Це призводить до зниження напруги на самому p - n -переході і відповідно до зменшення струму, що протікає через нього. При прямій напрузі $U_{пр}$, більшій за висоту потенціального бар'єра ϕ_{60} , характеристика близька до лінійної, тому що заірний шар при цьому зникає.

Зворотний струм реального p - n -переходу більший, ніж в ідеалізованого, і зростає зі збільшенням зворотної напруги. У реальному p - n -переході необхідно враховувати процеси термогенерації носіїв заряду в об'ємі запірного шару.

Виникаючі при цьому електрони та дірки виносяться електричним полем переходу за його межі, не встигаючи рекомбінувати один з одним. Створюваний цими носіями струм називають струмом термогенерації I_T . За напрямком він збігається з дрейфовим струмом неосновних носіїв I_0 .

Оскільки зі збільшенням зворотної напруги $U_{зв}$ зростає ширина запірного шару, то зростатиме і струм термогенерації I_T . Крім того, на поверхні кристала можуть виникати провідні плівки різного походження. Ці плівки шунтують p - n -перехід, по них протікає струм, що називається струмом витoku $I_{вит}$.

Таким чином, повний зворотний струм реального p - n -переходу більший, ніж ідеалізованого p - n -переходу і є залежним від прикладеної напруги:

$$I_{зв}(U) = I_0 + I_T(U) + I_{вит}(U). \quad (2.21)$$

Найважливішою властивістю p - n -переходу є *властивість однобічної провідності*. Ця властивість полягає у тому, що, якщо виміряти струми, які протікають через перехід при подачі на нього прямої і зворотної напруги рівної за величиною, то вони відрізнятимуться один від одного в тисячі і більше разів. Властивість однобічної провідності використовується в ході побудови різних НПП.

На ВАХ реального p - n -переходу з'являється різке збільшення зворотного струму при визначеному значенні зворотної напруги (гілки А і Б на рис. 2.16). Це явище називається *пробоєм p - n -переходу*.

Розрізняють *два основних види пробойів*: електричний і тепловий. *Електричний пробій* за своєю природою буває тунельним або лавинним. В основі тунельного пробоя лежить так званий тунельний ефект, який пояснюється наявністю в електрона хвильових властивостей. Завдяки цим властивостям електрон за певних умов може пройти крізь потенціальний бар'єр, не змінюючи своєї енергії. При цьому на іншій стороні бар'єра має бути дозволений енергетичний рівень. Тунельний пробій спостерігається в тонких p - n -переходах із шириною порядку 100 А (ангстрем), що відповідає 0,01 мкм (1 мкм = 10000 А).

Лавинний пробій спостерігається в широких p - n -переходах і полягає у тому, що при зворотному зміщенні неосновні носії заряду прискорюються електричним полем переходу й отримують додаткову енергію. Якщо енергія прискорених носіїв перевищує ширину забороненої зони, то в ході їхнього зіткнення з атомами кристалічної ґратки відбувається іонізація останніх і

генерація додаткових електронно-діркових пар. Процес цей може прийняти лавиноподібний характер, що призводить до зростання зворотного струму при практично постійній напрузі (гілка А на кривій 2 рис. 2.16).

Обидва види електричного пробую мають зворотний характер. Зі зменшенням зовнішньої напруги струм зменшується і пробій може припинитися.

Причиною *теплого пробую* є нагрівання *p-n*-переходу під час протікання через нього зворотного струму. Якщо в переході тепла виділяється більше, ніж виводиться в навколишнє середовище, то його температура зростає. При цьому підсилюється тепла генерація електронно-діркових пар, збільшується зворотний струм і відбувається подальше нагрівання кристала. Зростання температури і зворотного струму при тепловому пробую стає лавиноподібним (гілка б на рис. 2.16). Тепловий пробій має беззворотний характер і призводить до розплавлення кристала.

Запитання й завдання для самоперевірки

1. Який *p-n*-перехід вважають несиметричним?
2. Що називають базою та емітером несиметричного *p-n*-переходу?
3. Наведіть на одному графіку (в одній системі координат) ВАХ реального та ідеалізованого *p-n*-переходів.
4. Чим відрізняється ВАХ реального та ідеалізованого *p-n*-переходу в ході прямого зміщення? Поясніть ці розходження.
5. Чим відрізняються ВАХ реального та ідеалізованого *p-n*-переходу в ході зворотного зміщення?
6. Поясніть, чому зворотний струм $I_{зв}$ реального *p-n*-переходу більший за струм насичення I_0 ідеалізованого *p-n*-переходу.
7. Поясніть, чому зворотний струм $I_{зв}$ реального *p-n*-переходу збільшується з підвищенням зворотної напруги.
8. У чому полягає властивість однобічної провідності *p-n*-переходу?
9. Яке явище називають пробоем *p-n*-переходу?
10. Покажіть на ВАХ реального *p-n*-переходу ділянку пробую, виділивши на ній дві гілки.
11. Які бувають різновиди електричного пробую?
12. У чому полягає явище тунельного пробую?
13. У яких *p-n*-переходах може спостерігатися тунельний пробій?
14. У чому полягає явище лавинного пробую?
15. У яких *p-n*-переходах може спостерігатися лавинний пробій?

16. Що є причиною теплового пробію?
17. Поясніть явище теплового пробію.
18. Який пробій p - n -переходу руйнує його структуру і є тому беззворотним?

2.5 Вплив неелектричних факторів на властивості і характеристики p - n -переходів

Вольтамперні характеристики p - n -переходів, а значить і їхні властивості, залежать від ряду неелектричних факторів, серед яких можна виділити вплив матеріалу й вплив температури.

Вплив матеріалу на ВАХ p - n -переходу можна показати, порівнюючи характеристики переходів із таких широко розповсюджених матеріалів як германій (Ge) і кремній (Si). ВАХ p - n -переходів цих двох матеріалів показано на рис. 2.19. З порівняння цих характеристик видно, що кремнієвий діод має істотно менший зворотний струм і його пряма гілка лежить правіше германієвого, що відповідає меншому прямому струму при подачі на діоди однакової прямої напруги $U_{пр}$. Головна причина такої відмінності: різна ширина забороненої зони ΔW_3 цих матеріалів:

$$(\Delta W_3)_{Ge} = 0,7 \text{ eV}; \quad (\Delta W_3)_{Si} = 1,12 \text{ eV}.$$

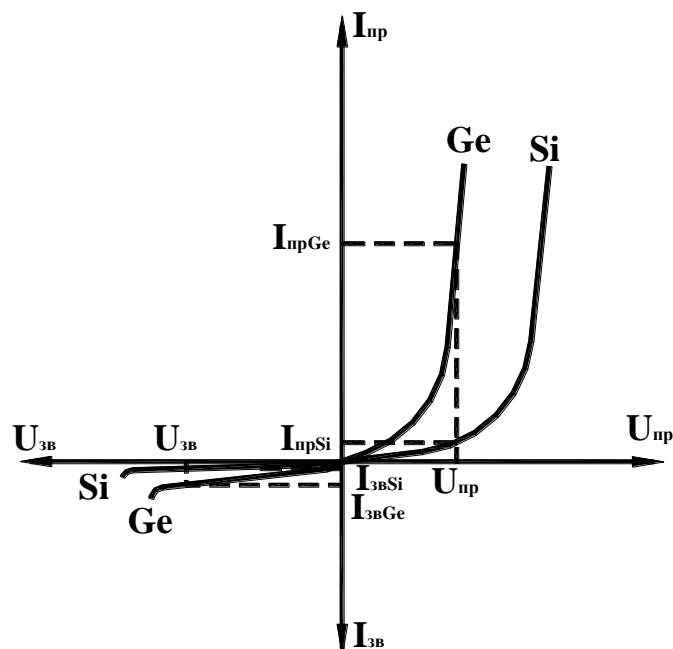


Рисунок 2.19 – Характеристики германієвого й кремнієвого p - n -переходів

Цим обумовлена різна концентрація власних носіїв заряду n_i у германії й кремнії за інших рівних умов. Виходячи з виразу, можна записати:

$$(n_i)_{Ge} > (n_i)_{Si} .$$

Відповідно до закону діючих мас концентрації неосновних носіїв p_n і n_p у кремнію менше, ніж у германію з однаковою концентрацією легуючих домішок N_δ і N_a , тому що зворотний струм створюється неосновними носіями, $(I_{зв})_{Si} < (I_{зв})_{Ge}$.

Відповідно до рівності (2.6) потенціальний бар'єр ϕ_{60} кремнієвого p - n -переходу вище, ніж германієвого. Ця обставина, в додачу до розходження в струмах, обумовлює те, що $(I_{пр})_{Si} < (I_{пр})_{зв}$.

Вплив температури на ВАХ p - n -переходів показано на рис. 2.20. З підвищенням температури (на рис. 2.20 $T_2 > T_1$) зростають і прямий і зворотний струми p - n -переходу. Це пояснюється наявністю сильної залежності струму насичення I_0 від температури.

Відповідно до формули (2.20) струм насичення I_0 пропорційний концентраціям неосновних носіїв у кристалі напівпровідника, що у свою чергу відповідно до формул (1.11), (1.12) є експонентними функціями температури:

$$n_p, p_p \approx n_i^2 \approx e^{-\frac{\Delta W_3}{kT}}.$$

Як наслідок сильна залежність $I_0 = f(T)$ призводить до зазначеного зміщення статичних ВАХ p - n -переходу. Необхідно зважити також на деяке зменшення висоти потенціального бар'єра ϕ_{60} при збільшенні температури, викликане зростанням концентрації n_i^2 .

В ході практичних оцінок термостабільності ВАХ прийнято вважати, що під час зміни температури на $8...10^\circ\text{C}$ зворотний струм p - n -переходу збільшується приблизно вдвічі:

$$I_{зв}(T) = I_{зв}(T_0) \cdot 2^{\frac{\Delta T}{8...10}}, \quad (2.22)$$

де $I_{зв}(T)$, $I_{зв}(T_0)$ – значення зворотних струмів при температурах T і T_0 ;

ΔT – зміна температури, К або $^\circ\text{C}$.

В ході оцінки термостабільності p - n -переходів у режимі прямого зміщення користуються температурним коефіцієнтом напруги (ТКН):

$$\alpha_T = \frac{\Delta U_{пр}(T)}{\Delta T}, \quad (2.23)$$

де $\Delta U_{пр}(T)$ – зміна прямої напруги на переході при $I_{пр} = \text{const}$, викликана зміною температури ΔT .

В області помірних величин $I_{пр}$ (ТКН) p - n -переходів $\alpha_T = -(2...4)$ мВ/К.

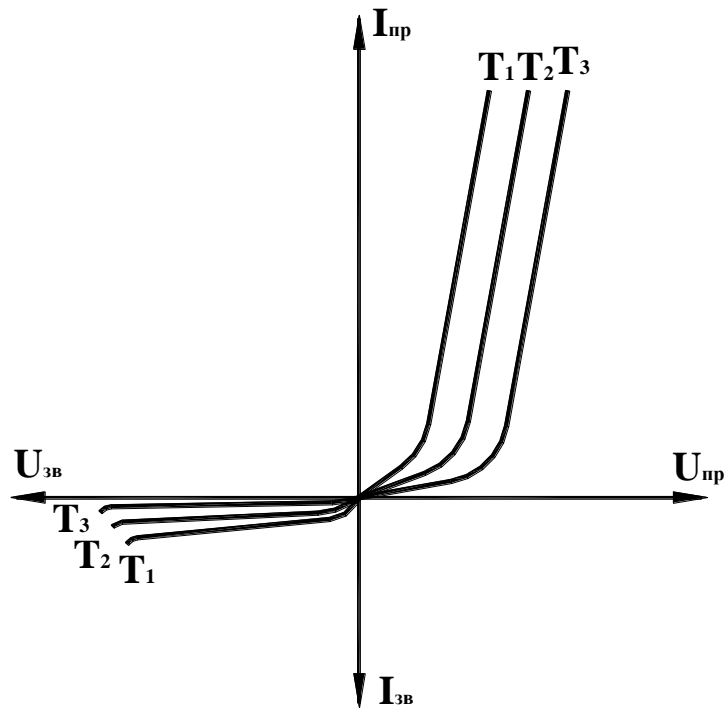


Рисунок 2.20 – ВАХ p - n -переходу для різних температур

Запитання й завдання для самоперевірки

1. Які неелектричні фактори впливають на ВАХ p - n -переходів і їх властивості?
2. Наведіть в одній системі координат ВАХ германієвого та кремнієвого p - n -переходів і вкажіть їх розходження.
3. Поясніть, чому відрізняються зворотні струми германієвого та кремнієвого p - n -переходів за однакових зворотних напруг.
4. Поясніть, чому розрізняються потенціальні бар'єри германієвого та кремнієвого p - n -переходів.
5. Поясніть, чому розрізняються прямі струми германієвого та кремнієвого p - n -переходів за однакових прямих напруг.
6. Наведіть в одній системі координат ВАХ p - n -переходу з різними температурами.
7. Поясніть, чому зростає зворотний струм p - n -переходу зі збільшенням температури.
8. Як впливає температура на висоту потенціального бар'єра p - n -переходу?
9. Поясніть, чому зростає прямий струм p - n -переходу зі збільшенням температури.
10. Як визначають температурний коефіцієнт напруги (ТКН) p - n -переходу?

2.6 Ємнісні властивості *p-n*-переходу

Розглянута вище ВАХ *p-n*-переходу називається статичною й описує його властивості під час роботи з постійними струмами та напругами. Статичну характеристику можна використовувати й у випадку повільно мінливих напруг і струмів (низькочастотних сигналів). Якщо ж напруга на *p-n*-переході змінюється з високою частотою, то необхідно враховувати його інерційність, зв'язану з витратами часу на перезаряд бар'єрної й дифузійної ємності.

Бар'єрна ємність. Будь-який *p-n*-перехід містить два шари об'ємних зарядів домішкових іонів. Зі зворотною напругою ширина переходу збільшується, що викликає пропорційне збільшення нерухомого об'ємного заряду (рис. 2.21, а). Під час прямого зміщення перехід звужується й загальний заряд заперного шару зменшується. Бар'єрну ємність C_{δ} – визначають як відношення збільшення заряду нерухомих іонів заперного шару ΔQ до збільшення викликаного їм напруги ΔU на переході:

$$C_{\delta} = \frac{\Delta Q_{\text{нерухомих іонів}}}{\Delta U}. \quad (2.24)$$

Ця ємність схожа на ємність плоского конденсатора, обкладками якого служать шари іонів заперного шару. Чим більше домішок у кристалі, тим тонше перехід і більша бар'єрна ємність. Ємність C_{δ} зростає зі збільшенням площі переходу.

Від прикладеної напруги бар'єрна ємність залежить нелінійно. Так у випадку різкого *p-n*-переходу:

$$C_{\delta} = \frac{C_0}{\sqrt{1 + \frac{U}{\Phi_{\delta 0}}}}, \quad (2.25)$$

де C_0 – ємність переходу при напрузі $U=0$. Графічно залежність бар'єрної ємності від напруги показана на рис. 2.22. Нелінійна залежність C_{δ} від напруги пояснюється нелінійною залежністю ширини *p-n*-переходу від напруги (2.7). Бар'єрна ємність може досягати сотень пікофарад у розрахунку на 1 мм² площі переходу.

Дифузійна ємність. Під час зміни напруги на переході змінюється не тільки заряд заперного шару, але і концентрація (заряд) нерівноважних рухливих носіїв у нейтральних приконтактних областях (явище інжекції, рис. 2.13).

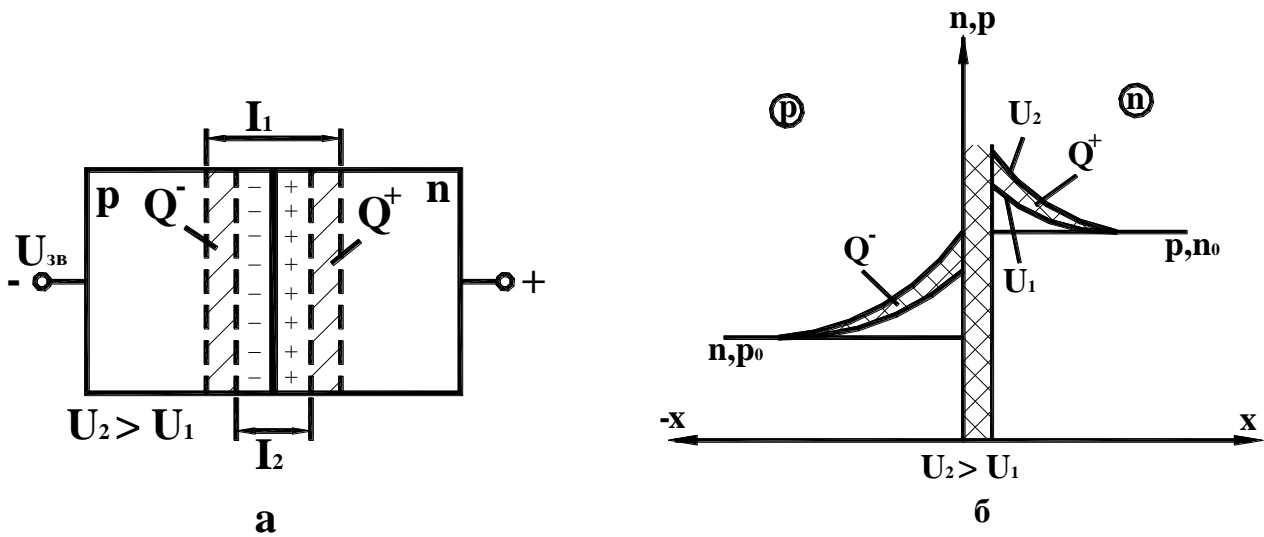


Рисунок 2.21 – Зміни зарядів нерухомих іонів у запірному шарі p - n -переходу (а) і зміни зарядів неосновних нерівноважних носіїв у нейтральних областях кристала (б)

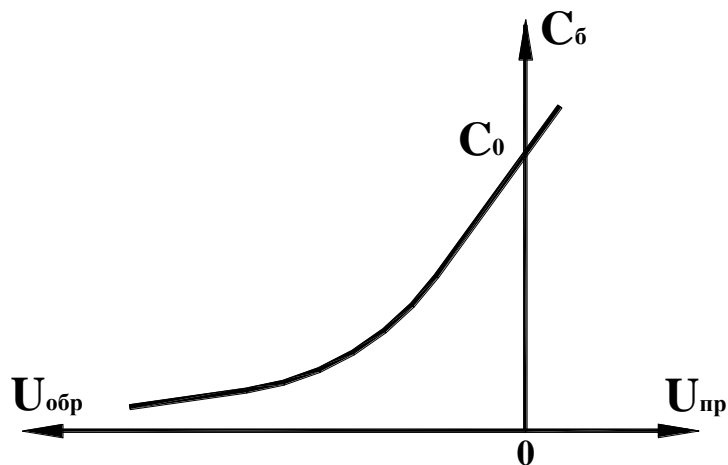


Рисунок 2.22 – Залежність бар'єрної ємності p - n -переходу від прикладеної до переходу напруги

Дифузійною ємністю $C_{дф}$ називають відношення збільшення об'ємного заряду ΔQ нерівноважних носіїв (як основних, так і неосновних) біля меж переходу до збільшення напруги ΔU (рис. 2.22, б):

$$C_{дф} = \frac{\Delta Q_{\text{нерівноважних носіїв}}}{\Delta U}. \quad (2.26)$$

Під час зворотних зміщень на переході ємність $C_{дф}$ невелика і її зазвичай не враховують. Істотну роль ця ємність відіграє лише при прямих напругах, коли проходить інжекція носіїв і в приконтактних шарах накопичується значний заряд нерівноважних носіїв ΔQ .

Дифузійна ємність $C_{дф}$ кількісно пропорційна прямому струму через перехід:

$$C_{дф} = \frac{1}{T} (I_p \cdot \tau_p + I_n \cdot \tau_n), \quad (2.27)$$

де I_p, I_n – діркова та електронна компоненти прямого струму;

τ_p, τ_n – час життя дірок і електронів відповідно.

Від прикладеної напруги $C_{дф}$ залежить так само, як прямий струм $I_{пр}$ (2.18), тобто експоненціально:

$$C_{дф} \approx e^{\frac{U_{пр}}{\Phi_T}}. \quad (2.28)$$

Графічно залежність $C_{дф}$ від напруги показана на рис. 2.23.

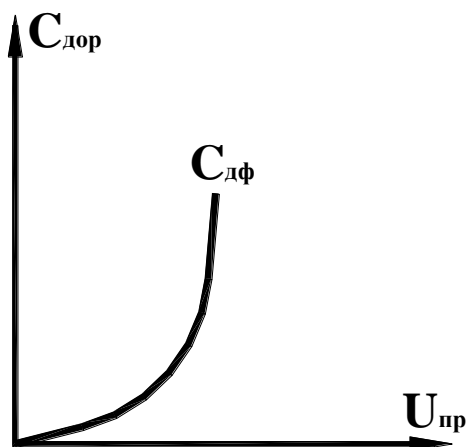


Рисунок 2.23 – Залежність дифузійної ємності p - n -переходу від прямої напруги переходу

Повна ємність p - n -переходу $C_{пер}$ дорівнює сумі бар'єрної та дифузійної ємностей:

$$C_{пер} = C_{б} + C_{дф}. \quad (2.29)$$

Запитання й завдання для самоперевірки

1. Які ємності існують у p - n -переході?
2. Дайте визначення бар'єрної ємності p - n -переходу.
3. Нарисуйте та поясніть залежність бар'єрної ємності від прикладеної до p - n -переходу напруги.
4. Нарисуйте та поясніть розподіл концентрацій нерівноважних носіїв у нейтральних областях кристала при прямому зміщенні p - n -переходу.

5. Дайте визначення дифузійної ємності p - n -переходу.
6. Нарисуйте та поясніть залежність дифузійної ємності від прикладеної до p - n -переходу напруги.
7. Що таке повна ємність p - n -переходу?

2.7 Контакти метал–напівпровідник. Гетероперехід

Контакти метал–напівпровідник є обов’язковими частинами структури будь-якого НПП і ІМС. Вони використовуються або як робочі функціональні елементи приладів, володіючи визначеними, найчастіше випрямляючими властивостями, або як зовнішні виводи. Відповідно до цього контакти метал–напівпровідник поділяють на дві групи: *випрямляючі та невипрямляючі (омічні)*. Реальні властивості контактів метал–напівпровідник залежать від співвідношення між величинами роботи виходу електронів із кристалічних ґрат контактуючих матеріалів.

Робота виходу A – це енергія, яку необхідно передати електрону для його виходу в навколишній простір через поверхню кристала.

Випрямляючі контакти з напівпровідником n -типу (m - n) утворюються тоді, коли робота виходу електронів із напівпровідника A_n менша роботи виходу A_m із металу ($A_n < A_m$). У цьому випадку електронам енергетично вигідніше знаходитися в кристалічних ґратах металу і внаслідок цього виникає потік електронів із приконтактних шарів напівпровідника в метал. Після відходу електронів із напівпровідника там залишаються некомпенсовані позитивні заряди донорної домішки, а метал заряджається негативно. Внаслідок цього в зоні контакту виникає електричне поле E_K і потенціальний бар’єр ϕ_6 , які перешкоджають подальшому переходу електронів у метал (рис. 2.24, а):

$$\phi_6 = \frac{A_m - A_n}{q}. \quad (2.30)$$

Опір такого m - n -переходу залежить від полярності прикладеної напруги. Напруга, подана мінусом на напівпровідник n -типу, а плюсом – на метал, є прямим зміщенням $U_{пр}$; сумарне гальмуюче електричне поле в переході зменшується й виникає значний струм електронів із напівпровідника в метал.

При цьому відсутнє явище інжекції й немає нагромадження нерівноважних зарядів:

$$A_n < A_m \qquad A_n > A_m$$

Рівняння ВАХ випрямляючого m - n -переходу практично таке ж як рівняння для p - n -переходу (2.17).

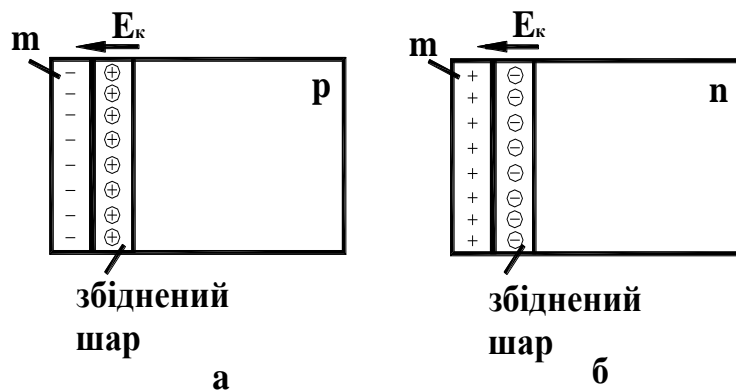


Рисунок 2.24 – Випрямляючі метало–напівпровідникові переходи

Напруга, подана плюсом на напівпровідник n -типу, а на метал – мінусом, є зворотним зміщенням $U_{зв}$. Гальмуюче електричне поле в переході збільшується, а струм виявляється надзвичайно малим. Струм $I_{зв}$ створюється тільки тими електронами, які здатні перебороти в ході переходу з металу в напівпровідник великий потенціальний бар'єр:

$$\varphi_{зв} = \varphi_б + U_{зв}.$$

Якщо різниця між роботами виходу A_m і A_n порівняна із шириною забороненої зони:

$$(A_m - A_n) > \frac{\Delta W_3}{2},$$

то дифузія електронів із напівпровідника в метал виявляється дуже сильною. Концентрація електронів у приповерхневому шарі стає менше концентрації дірок, і цей шар здобуває провідність p -типу. Такі шари називають *інверсними* чи *шарами з інверсною провідністю*.

Оскільки поверхневий шар кристала отримав провідність p -типу, то на його межі з областями кристала n -типу виникає p - n -перехід. Він має властивість однобічної провідності, як звичайний p - n -перехід (рис. 2.25, а).

$$(A_n - A_m) > W_3/2 \quad A_n > A_m$$

Випрямляючі контакти з напівпровідниками p -типу (m - p) утворюються за умови, що робота виходу електрона з напівпровідника A_n більше роботи виходу з металу A_m ($A_n > A_m$). У цьому випадку електрони переходитимуть з металу в напівпровідник (рис. 2.25, б). При цьому метал заряджається позитивно. Електрони, що перейшли в напівпровідник, «осідають» на вільні рівні валентної зони, зменшуючи тим самим концентрацію дірок. У напівпровіднику утвориться некомпенсований заряд акцепторів і електричне поле, що відштовхує дірки від контакту. Виникає збіднений шар і потенціальний бар'єр:

$$\varphi_б = \frac{A_m - A_n}{q}. \quad (2.31)$$

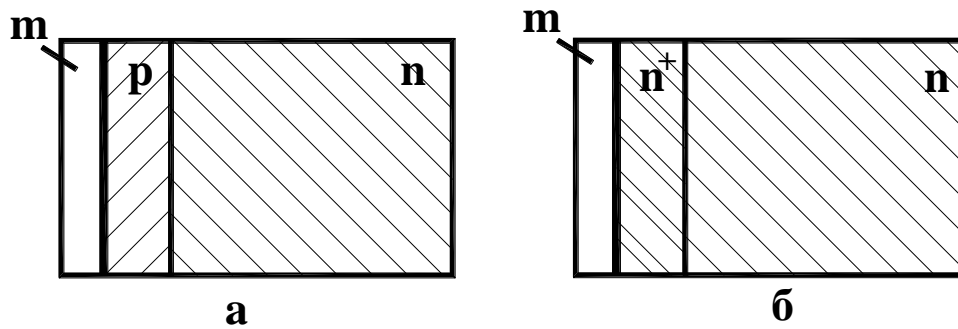


Рисунок 2.25 – Випрямляючий і омичний контакти метал–напівпровідник

Пряма напруга $U_{пр}$ на випрямляючому $m-p$ -переході відповідає подачі плюса на p -область. Зворотна напруга $U_{зв}$ – відповідно навпаки.

Якщо $(A_n - A_m) > \Delta W_{3/2}$, то дірок у приповерхневому шарі може виявитися менше, ніж електронів. Тоді цей шар здобуває інверсну провідність n -типу і виникає $p-n$ -перехід.

Випрямляючі метало-напівпровідникові контакти (без утворення $p-n$ -переходів) називають *переходами Шотки*.

Омічні контакти – це контакти, що використовуються для включення НПП і ІМС у зовнішні електричні кола. Вони мають мінімальний електричний опір і лінійну ВАХ, тобто не повинні мати випрямляючі властивості. Від якості та надійності омичних контактів багато в чому залежить якість і надійність приладу в цілому. Тому формування омичних контактів – одна з найважливіших операцій технології напівпровідникового виробництва.

Як омичні можуть використовуватися будь-які контакти метал–напівпровідник, що не мають випрямляючих властивостей.

Під час створення омичних контактів із напівпровідниками n -типу робота виходу електронів із металу A_m має задовольняти умову $A_m < A_n$. У цьому випадку електрони з металу переходять у напівпровідник. В області контакту виникає збагачений рухливими носіями шар (n^+ -шар на рис. 2.25, б), що має малий електричний опір.

Аналогічні збагачені p^+ -шари виникають у кристалах p -типу, якщо на їхню поверхню наносять контакти з металу, для якого $A_m > A_n$.

Все раніше сказане справедливе в тих випадках, коли в ході формування контактів атоми металу не проникають у решітку напівпровідника. Якщо це відбувається, властивості контакту залежатимуть також від типу та концентрації введеної домішки.

Найчастіше як матеріал омичних контактів використовується алюміній, який є акцептором основних напівпровідникових матеріалів – германію та

кремнію. Тому, під час нанесення алюмінієвих контактів на області з провідністю p -типу, проникнення алюмінію в напівпровідниковий кристал особливих проблем не виникає. Якщо ж алюмінієвий контакт наноситься на область n -типу, то дифузія атомів алюмінію в кристал може призвести до утворення випрямляючого p - n -переходу у приконтактній області. Щоб уникнути цього, в місцях під майбутніми контактами попередньо створюють сильно леговані n^+ -області з таким розрахунком, щоб проникнення алюмінію не призвело до утворення паразитного p - n -переходу (рис. 2.25, б). Ширина замикаючого шару між алюмінієм і n^+ -напівпровідником дуже мала, і носії легко переборюють цей шар за рахунок тунельного ефекта.

Гетеропереходи. В ході виробництва НПП застосовують структури, утворені хімічно різнорідними напівпровідниковими матеріалами. Основу таких структур утворюють гетерогенні p - n -переходи або гетеропереходи.

Принципове розходження між гетеропереходом і звичайним (гомогенним) p - n -переходом полягає в тому, що гетеропереходи утворюються на контактах між напівпровідниками з різною шириною забороненої зони. Тому на зонних діаграмах гетеропереходів порушується безперервність меж дозволених зон (рис. 2.26). Це, в свою чергу, призводить до того, що в гетеропереході створюються потенціальні бар'єри з різною висотою для електронів і дірок. Як наслідок при відповідному виборі матеріалів можна створювати p - n -переходи, у яких практично виключена інжекція чи інших рухливих носіїв заряду.

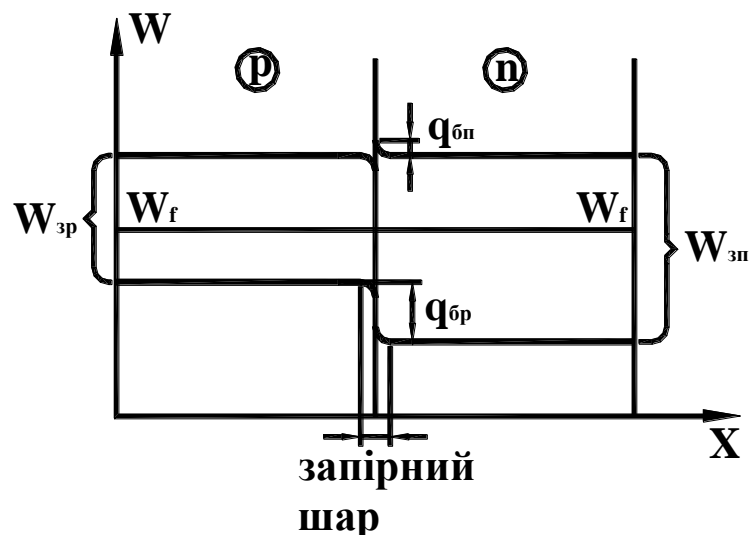


Рисунок 2.26 – Зонна енергетична діаграма гетеропереходу

Як приклад на рис. 2.26 зображена зонна діаграма гетеропереходу, утвореного на контакті між вузькозонним напівпровідником p -типу і широкозонним напівпровідником n -типу: $\Delta W_{zp} < \Delta W_{zn}$.

Зи таким співвідношенням між значеннями ширини забороненої зони n - і p -напівпровідника висота потенціального бар'єру для дірок $\Phi_{бр}$ виходить істотно більше висоти потенціального бар'єра для електронів $\Phi_{бн}$:

$$\Phi_{бр} > \Phi_{бн}.$$

Тому в режимі прямого зміщення в p - n -переході спостерігатиметься в основному, інжекція електронів. За інших сполучень матеріалів можна створити структури, інжектуючі, в основному, дірки. У ряді випадків завдяки використанню зазначеної властивості гетеропереходів вдається істотно поліпшити технічні показники НПП.

Запитання й завдання для самоперевірки

1. Що називають роботою виходу електронів із кристалічних ґрат?
2. Які загальні властивості випрямляючих контактів метал–напівпровідник?
3. Які загальні властивості невикористаних (омічних) контактів метал–напівпровідник?
4. Яким має бути співвідношення між роботою виходу електронів із металу і n -напівпровідника для утворення випрямляючого контакту?
5. Поясніть утворення випрямляючого контакту металу з напівпровідником n -типу (m - n).
6. Поясніть властивості m - n -контакту при подачі на нього прямого і зворотного зміщення.
7. Поясніть, за яких умов під металевим контактом виникають шари з інверсною провідністю.
8. За яких співвідношень між роботами виходу електронів із металу та p -напівпровідника виникають випрямляючі контакти?
9. Поясніть утворення випрямляючого контакту металу з напівпровідником p -типу (m - p).
10. За яких співвідношень між роботами виходу електронів із металу та напівпровідника можна сформулювати омічні контакти?
11. Які p - n -переходи називають гетерогенними або гетеропереходами?
12. Наведіть зонну діаграму гетеропереходу на напівпровідниках із різною шириною забороненої зони.
13. Поясніть, як під час подачі прямого зміщення гетеропереходу можна забезпечувати інжекцію носіїв заряду через перехід одного знака (електронів або дірок).
14. Що таке перехід Шотки?

3 НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДІОДИ

3.1 Загальні властивості і різновиди діодів

Напівпровідниковими діодами (НД) називають прилади з двома зовнішніми виводами, принцип дії яких лежить у використанні контактних явищ у напівпровідниках. Часто в діодах застосовують електронно-дірковий ($p-n$)-перехід, контакт метал-напівпровідник ($m-n$, $m-p$), гетероперехід. Структура деяких діодів може містити кілька переходів (діністор, $p-i-n$ -діод, МДМ-, МДН-діоди й ін.). Деяке виключення є діодами, у структурі яких відсутній перехід (діод Ганна).

НД має нелінійну ВАХ, тобто є нелінійним двополюсником. НД використовують для перетворення електричних сигналів або енергії.

У загальному вигляді діод на несиметричному $p-n$ -переході показаний на рис. 2.17. Емітером такого діода є p^+ -шар, а базою – n -шар. Крім самого $p-n$ -переходу, прилад містить два омичних контакти з зовнішніми виводами. Кристал із $p-n$ -переходом і омичними контактами розміщують у герметичному корпусі або наносять на нього спеціальні покриття для захисту від навколишнього середовища.

На рис. 2.18 показано структуру планарно-епітаксіального діода. Такі структури часто виготовляють із кремнію. У цьому діоді базу n -типу отримано за допомогою епітаксіального нарощування на низькоомній підкладці p^+ -типу. Емітер p^+ -типу створюється в результаті дифузії атомів акцепторів через спеціально утворені вікна в шарі діелектрика покриваючого базу. Як діелектрик, як правило, використовують двоокис кремнію SiO_2 .

Існуючі НД дуже різноманітні за своїми властивостями, конструкціями, призначенням. Сукупність НД можна розділити на такі групи:

- за фізичними властивостями й призначенням – на випрямляючі, стабілітрони, імпульсні, варикапи, лавино-пролітні, параметричні, світлодіоди та ін.;
- за конструктивно-технологічними ознаками – на точкові, мікросплавні, площинні, котрі, у свою чергу, підрозділяються за технологічними ознаками на дифузійні, планарні, планарно-епітаксіальні, дифузійно-сплавні й ін.;
- за основними електричними параметрами НД розрізняються за значеннями припустимих струмів, напруг, потужності і т.д.;
- залежно від роду матеріалу – на германієві, кремнієві, арсенід-галієві і т.д.

Запитання й завдання для самоперевірки

1. Який прилад називають напівпровідниковим діодом?
2. Що лежить в основі структури більшості НД?
3. Наведіть і поясніть структуру НД на несиметричному *p-n*-переході.
4. Наведіть і поясніть структуру планарно-епітаксialного діода.
5. На які групи поділяють НД за фізичними властивостями та призначенням?
6. На які групи поділяють за конструктивно-технологічними ознаками?
7. На які групи поділяють НД за електричними параметрами?
8. На які групи поділяють НД залежно від роду вихідного матеріалу?

3.2 Випрямляючі діоди

В основі принципу *випрямляючих діодів* лежить властивість однобічної провідності *p-n*-переходів. Основне їхнє *призначення* – *перетворення* (випрямлення) *змінного струму в постійний*. Найпростіша схема випрямляча показана на рис. 3.1, а.

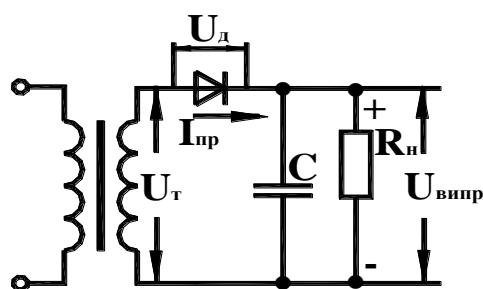
При подачі на вхід випрямляча змінної напруги, яка змінюється, наприклад, за гармонійним законом, струм через діод і послідовно включене навантаження R_H протікає лише в ту частину періоду, коли напруга на діоді відповідає прямому зміщенню. Напруга на навантаженні, як і струм, носитиме пульсуючий характер. Якість спрямованої напруги можна істотно поліпшити підключенням ємності C паралельно навантаженню. Протягом тієї частини періоду, коли діод знаходиться в провідному стані, ємність C заряджається. У ті проміжки години, коли діод не проводить струм, ємність C розряджається на навантаження R_H . Цим забезпечується згладжування пульсацій напруги й струму на навантаженні (рис. 3.1, б).

Характеристики випрямляючих діодів – такі ж, як у реального *p-n*-переходу (крива 2 рис. 2.16). Випрямляючі діоди виготовляють із германію та кремнію. Розходження в їх ВАХ були обговорені в розділі 2.5 (рис. 2.19). Кремнієві діоди дозволяють отримувати високі зворотні напруги пробою. Це пояснюється тим, що питомий опір власного кремнію ($\rho_i \sim 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) багато більше питомого опору власного германію ($\rho_i \sim 50 \text{ Ом}\cdot\text{см}$). Кремнієві діоди працюють у більш широкому інтервалі температур ($-70\dots+125^\circ\text{C}$), ніж германієві ($-70\dots+85^\circ\text{C}$), що пояснюється тим, що у кремнієвих діодів істотно менший зворотний струм через більшу ширину забороненої зони.

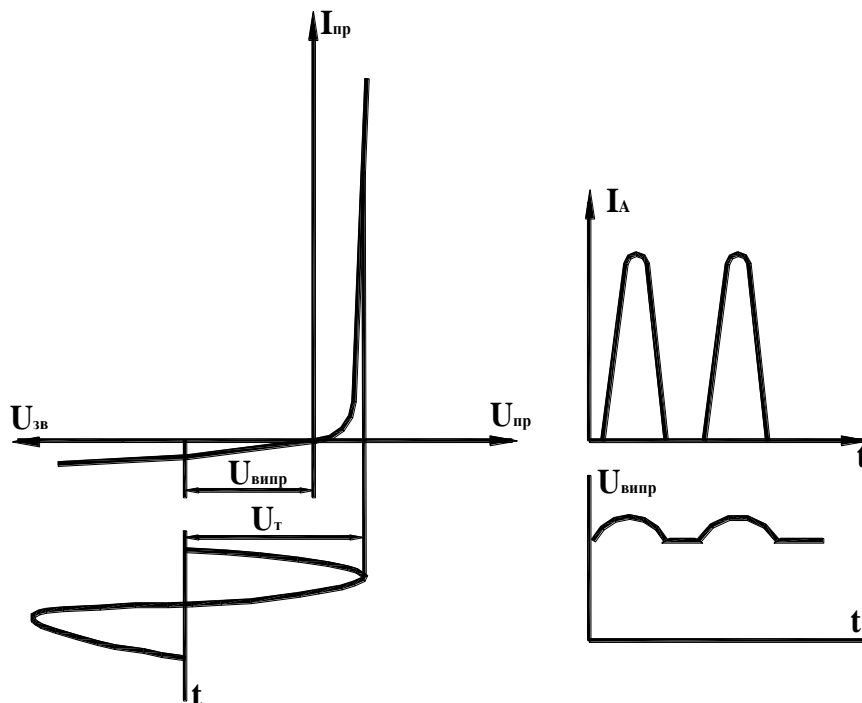
Германієві діоди дуже зручні в ході випрямлення невисоких напруг, тому що за таких самих значень прямого струму $I_{пр}$, відповідна йому пряма напруга $U_{пр}$ у германієвих діодів менша.

Параметри випрямляючих діодів. Поряд із характеристиками для оцінки властивостей діодів вводиться ціла система чисельних показників або параметрів. До основних параметрів випрямляючих діодів належать (рис. 3.2):

- максимально припустимий прямий струм $I_{пр\ max}$;
- пряме спадання напруги $U_{пр\ max}$, що відповідає $I_{пр\ max}$;
- максимально припустима зворотна напруга $U_{проб}$;
- номінальний прямий струм $I_{обр\ ном}$.



а



б

Рисунок 3.1 – Схема та характеристики діодного випрямляча

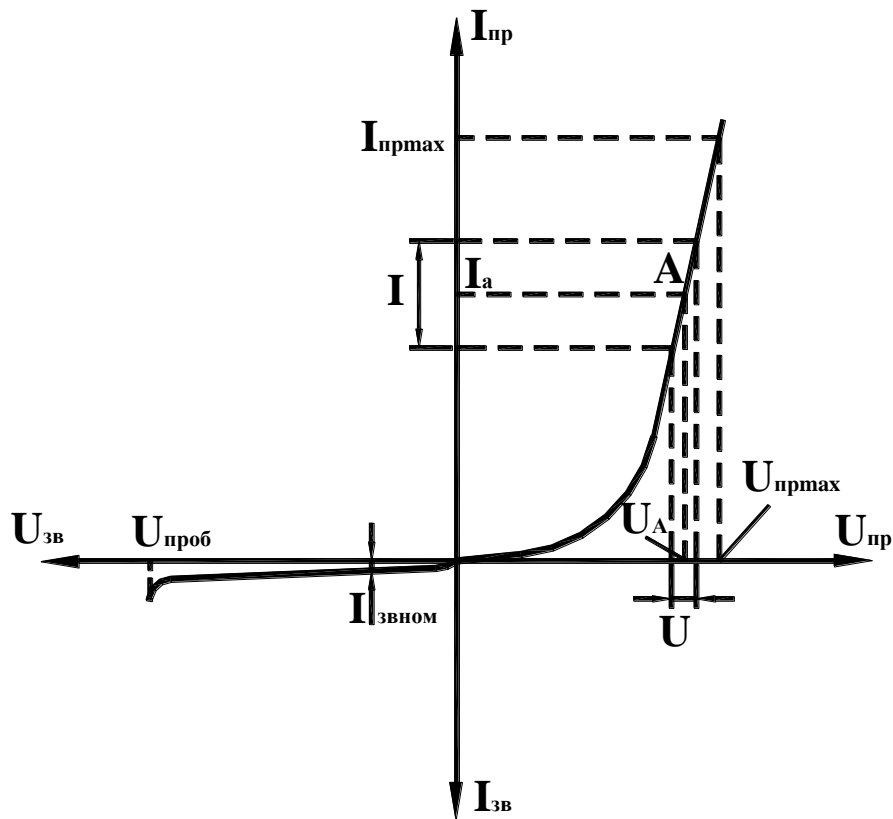


Рисунок 3.2 – Визначення параметрів діода за характеристикою

Ці параметри обмежують робочі ділянки ВАХ, у межах яких забезпечується нормальна експлуатація діодів. Експлуатація діодів за межами робочих ділянок може призвести їх до виходу з ладу внаслідок електричного або теплового пробію. (Електричний пробій сам по собі не руйнує, але якщо не прийняти спеціальні заходи, він може перейти в руйнуючий тепловий).

Для стабільної роботи протягом тривалого часу необхідно, щоб потужність, яка виділяється на діоді, не перевищувала потужність, що відводиться від нього. Тому важливим параметром діода є максимально припустима потужність P_{max} , яку він може розсіяти в навколишнє середовище.

Ця потужність залежить від конструкції діода, а також від умов тепловідвода. Її величина пропорційна різниці максимально припустимої температури переходу T_{max} і температури навколишнього середовища $T_{окр}$, і обернено пропорційна тепловому опору конструкції діода R_T :

$$P_{max} = \frac{T_{max} - T_{окр}}{R_T}. \quad (3.1)$$

Тепловий опір діода R_T вимірюється в $^{\circ}C/Вт$ і дорівнює різниці температур кристала і навколишнього середовища під час розсіювання потужності в 1 Вт. Для зменшення R_T діоди забезпечують радіаторами або монтують на платах,

виконаних із матеріалу з доброю теплопровідністю. Іноді використовують примусове водяне чи повітряне охолодження.

За величиною припустимої потужності розрізняють діоди малопотужні ($P_{\max} < 0.3$ Вт), середньої потужності ($0,3 \text{ Вт} < P_{\max} < 1$ Вт) і великої потужності ($P_{\max} > 1$ Вт).

Особливу групу параметрів складають так звані *диференціальні параметри*. Вони встановлюють зв'язок між малими збільшеннями струмів і напруг, тобто характеризують властивості діодів під час роботи зі змінними сигналами. До них належать:

- ємність діоду $C_{\text{пер}}$;
- диференціальний опір $r_{\text{диф}} = \frac{\Delta U}{\Delta I}$,
- крутизна $S = \frac{1}{r_{\text{диф}}}$.

Опір $r_{\text{диф}}$, наприклад, визначають в обраній робочій точці А, як показано на рис. 3.3.

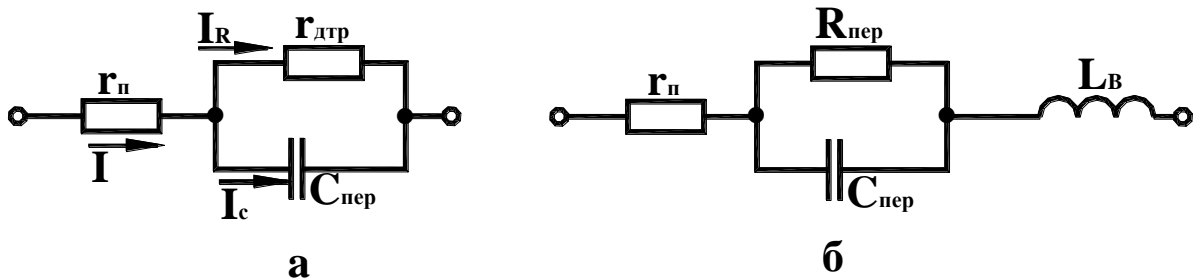


Рисунок 3.3 – Еквівалентна схема діода

Частотні властивості випрямляючого діода можна оцінити, замінивши діод його схемною моделлю або еквівалентною схемою. Ця схема за своїми зовнішніми властивостями подібна діоду за певних умов. Так для режиму роботи з малими змінними сигналами, еквівалентна схема діода показана на рис. 3.3. Вона містить диференціальний опір p - n -переходу $r_{\text{диф}}$, ємність переходу $C_{\text{пер}}$, а також опір втрат нейтральних областей кристала (головним чином, бази) r_6 . У загальному випадку величини $C_{\text{пер}}$ і $r_{\text{диф}}$ залежать від прикладеної напруги. Елементи, що мають такі властивості, називаються нелінійними. Тому, наведена схема справедлива тільки для визначеної робочої точки (заданий струм I_A і напруга U_A).

Припустимо, що до переходу прикладена змінна напруга високої частоти. Відповідно до еквівалентної схеми у виводах діода протікатиме струм I , що має дві компоненти: ємнісну I_C і активну I_R . Складова струму I_R – це робочий струм, пов’язаний з випрямляючими властивостями діода. Ємнісний струм I_C є в даному випадку паразитною або непотрібною складовою. Із зростанням частоти прикладеної напруги величина струму I_C збільшується, тому що опір ємності, рівний $\frac{1}{\omega C_{\text{пер}}}$, зменшується. На досить високих частотах може виявитися, що

$I_C > I_R$ і діод втрачає випрямляючі властивості. Частоту ω_{max} , на якій $I_C = I_R$, визначають як максимальну робочу частоту діода. Випрямляючі діоди малої й середньої потужності зберігають свою працездатність до частот 50...100 кГц, потужні діоди можуть працювати до частот, які не перевищують одиниць кГц.

Температурні властивості в якісному вигляді можна оцінити за рис. 2.20. Із зростанням температури спостерігається збільшення як прямого, так і зворотного струму внаслідок підвищення концентрації носіїв заряду в кристалі.

Оскільки зміна зворотного струму істотно більша, ніж прямого, то при досить високій температурі діод втрачає випрямляючі властивості. За низьких температур може істотно зменшитися спрямовуючий струм, порушитися термостійкість корпусу і т.д., тому в паспорті діода задається діапазон припустимих температур $T_{\text{min}} \dots T_{\text{max}}$.

У ряді випадків температурна залежність параметрів випрямляючих діодів знаходить корисне застосування. Ці діоди можуть використовуватися як датчики температури або елементів термостабілізації режимів роботи електронних схем.

З’єднання діодів. За необхідності випрямлення струму, більшого ніж $I_{\text{пр max}}$ одного діода, кілька діодів з’єднують паралельно (рис. 3.4, а).

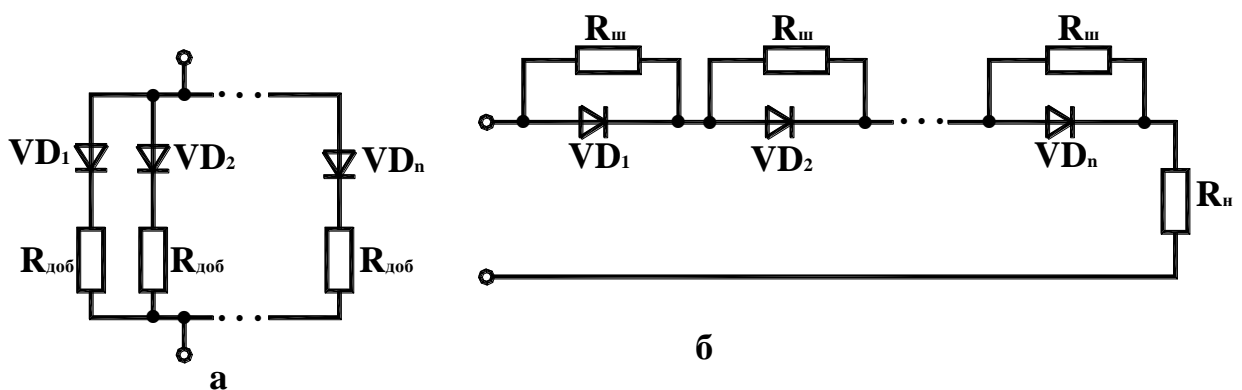


Рисунок 3.4 – З’єднання діодів

Оскільки опори різних діодів одного типу при прямому зміщенні $r_{пр}$ завжди ненабагато відрізняються один від одного, то для вирівнювання струмів через діоди послідовно з кожним діодом включають додатковий резистор $R_{дод}$, величина якого має бути ненабагато більша $r_{пр}$.

Якщо необхідно випрямити напругу, більшу, ніж $U_{зв\ max}$ одного діода, то кілька діодів з'єднують послідовно (рис. 3.4, б). Оскільки зворотний опір діодів $r_{зв}$ одного типу також неоднаковий, то зовнішня напруга буде нерівномірно розподілятися між діодами. Для вирівнювання падінь напруг на діодах застосовують шунтування кожного діода паралельно включеним резистором $R_{ш}$, величина якого вибирається ненабагато меншою значення $r_{зв}$.

Якщо діоди були виготовлені в єдиному технологічному процесі з використанням групових методів мікроелектроніки, то досягається достатня ідентичність їх ВАХ і параметрів.

У такому випадку з'єднання діодів не вимагає використання додаткових резисторів.

Запитання й завдання для самоперевірки

1. Яке призначення випрямляючих діодів?
2. Наведіть схему діодного випрямляча і поясніть її роботу.
3. З якою метою у схемі діодного випрямляча паралельно до резистора навантаження R_n підключають конденсатор C ?
4. Наведіть і поясніть форму струму через діод I_0 та струму через навантаження I_d як функцію години t у схемі діодного спрямовувача.
5. Наведіть і поясніть ВАХ випрямляючого діода.
6. Наведіть ВАХ випрямляючих діодів із германію та кремнію, поясніть їхні розходження.
7. Для випрямляючого діода покажіть гранично припустимі параметри.
8. Що таке максимально припустима потужність P_{max} діода?
9. Від чого залежить величина P_{max} діода?
10. Що таке тепловий опір діода?
11. У яких одиницях вимірюють тепловий опір діода?
12. На які групи поділяють діоди за величиною припустимої потужності?
13. Які параметри діода називають диференціальними?
14. Покажіть, як в обраній робочій точці на ВАХ визначають диференціальний опір діода.
15. Наведіть еквівалентну схему діода для режиму малих змінних сигналів.

16. Як виявляється вплив ємності p - n -переходу $C_{\text{пер}}$ на роботу випрямляючого діода?

17. Як змінюється із зростанням частоти властивість однобічної провідності діода?

18. Яку частоту вважають максимальною частотою діода?

19. Як змінюється ВАХ випрямляючого діода при зміні температури?

20. Чому температурний діапазон роботи діодів обмежений як з боку низьких, так і з боку високих температур?

21. Для чого застосовують паралельне з'єднання діодів?

22. Яке призначення додаткових резисторів під час рівнобіжного з'єднання діодів?

23. Для чого застосовують послідовне з'єднання діодів?

24. Яке призначення шунтуючих резисторів під час послідовного з'єднання діодів?

3.3 Високочастотні діоди

Високочастотні діоди – це діоди, призначені для роботи на високих частотах. До високих частот належать частоти в десятки і сотні мегагерц.

У групу високочастотних поєднують:

– детекторні діоди, призначені для виділення низькочастотного сигналу з високочастотного модульованого коливання;

– змішувальні діоди, які використовуються для зміни несучої частоти модульованого коливання;

– модуляторні діоди, призначені для модуляції (Модуляція – це зміна амплітуди, частоти чи фази, як правило, високочастотних коливань) високочастотного коливання й ін.

Усі високочастотні діоди мають ряд загальних особливостей.

На високих частотах істотно знижується опір ємності $C_{\text{пер}}$, яка шунтує p - n -перехід (рис. 3.3, а). Внаслідок цього погіршується або зовсім губиться найважливіша властивість діода – однобічна провідність.

У результаті зменшення опору переходу значна частина зовнішньої напруги падає на опорі нейтральних шарів $r_{\text{п}}$, що додатково погіршує його випрямляючі властивості.

Тому високочастотні діоди повинні мати *малу ємність переходу і малий опір бази*.

Для зменшення ємності використовують *p-n*-переходи малої площі, тому широко поширені точкові високочастотні діоди (рис. 2.3). ВАХ точкового діода подібна характеристиці випрямляючого діода, але на її зворотній гілці майже немає горизонтальної ділянки. Із зростанням напруги зворотній струм поступово збільшується і плавно переходить на ділянку пробую. Ці особливості обумовлені неоднорідністю структури точкових *p-n*-переходів.

Властивості високочастотних діодів визначаються, в основному, тими ж параметрами, що і випрямляючих діодів. Через малу площу *p-n*-переходу для них характерні невеликі прямі струми (одиниці – десятки мА), а припустимі зворотні напруги не перевищують десятків вольт.

Крім цього, для високочастотних діодів, призначених для виконання тих чи інших задач, вводять ряд спеціальних параметрів, які відображають їхні функціональні особливості (коефіцієнт перетворення – у змішувальних діодах; чутливість по струму й добротність – у детекторних і т.д.).

На частотах у тисячі мегагерц (діапазон надвисоких частот – НВЧ) помітно впливають на властивості діода індуктивності його виводів L_v , які тим більші, чим тонші та довші виводи (рис. 3.3, б). На досить високій частоті індуктивний опір виводів ω може стати порівняним з ємнісним опором *p-n*-переходу $\frac{1}{\omega C_{пер}}$, і в діоді виникнуть резонансні явища. Робоча частота має бути нижче цієї резонансної частоти. Тому діоди НВЧ – діапазону поміщають у спеціальні корпуси, конструкція яких не тільки зводить до мінімуму індуктивності виводів, але і зручна для включення діодів у хвильоводні лінії передачі, цього діапазону частот.

Запитання й завдання для самоперевірки

1. Які діоди називають високочастотними?
2. Перелічіть діоди, які належать до високочастотних.
3. Чому у високочастотних діодах необхідно зменшувати ємність *p-n*-переходу?
4. Чому у високочастотних діодах необхідно знижувати опір бази?
5. Чому у високочастотному діапазоні використовують точкові діоди?
6. Які частоти називають надвисокими – НВЧ?
7. Чому в діодів діапазону НВЧ необхідно зменшувати індуктивність виводів?
8. Як забезпечують у діодів НВЧ-діапазону малі індуктивності виводів і ємності *p-n*-переходу?

3.4 Стабілітрони

Стабілітронами або опорними діодами називають напівпровідникові діоди, які використовують для стабілізації електричної напруги.

ВАХ стабілітрона показана на рис. 3.5. Пряма гілка характеристики практично нічим не відрізняється від прямої гілки ВАХ звичайного випрямляючого діода. Особливістю стабілітрона є те, що на зворотній гілці його ВАХ є чітко виражена ділянка електричного пробую. На цій ділянці напруга залишається практично постійною в ході зміни струму в широких межах, що і дозволяє використовувати стабілітрон для стабілізації напруги. Ділянка пробую на зворотній гілці ВАХ є робочою ділянкою стабілітрона.

Сучасні стабілітрони виготовляють із кремнію, який дозволяє отримувати на характеристиках робочі ділянки з досить високою крутістю і зберігає свої властивості в широкому температурному діапазоні. Залежно від концентрації домішок у *n*- і *p*-шарах переходу розрізняють два різновиди кремнієвих стабілітронів: з малою концентрацією домішок і з широким *p-n*-переходом, які працюють у режимі лавинного пробую. Напруга пробую в цих приладах перевищує 5В. Стабілітрони на вузьких сильнолегованих *p-n*-переходах працюють на тунельному пробую, напруга якого менше 5В.

Параметри стабілітрона. Основний параметр стабілітрона – напруга стабілізації $U_{ст}$ (рис. 3.5), що практично збігається з напругою пробую. Параметрами стабілітрона є граничні величини його робочих струмів I_{min} і I_{max} . Починаючи зі струму I_{min} у приладі встановлюється стійкий пробій. Струм I_{max} визначається максимально припустимою потужністю, яку може розсіяти стабілітрон. Експлуатація стабілітрона при струмі, що перевищує величину I_{max} , неприпустима, оскільки в цьому випадку електричний пробій може перейти в тепловий.

Якість стабілітрона оцінюється значенням диференціального опору:

$$r_{ст} = \frac{\Delta U_{ст}}{\Delta I_{ст}}, \quad (3.2)$$

який визначається як відношення зміни напруги стабілізації $\Delta U_{ст}$ до зміни струму $\Delta I_{ст}$, що викликав цю зміну напруги. Неважко бачити, що $r_{ст}$ визначає крутизну робочої ділянки ВАХ стабілітрона. Чим менше $r_{ст}$, тим вище якість стабілізації. Значення $r_{ст}$ для різних стабілітронів коливається від одиниць до десятків і сотень Ом.

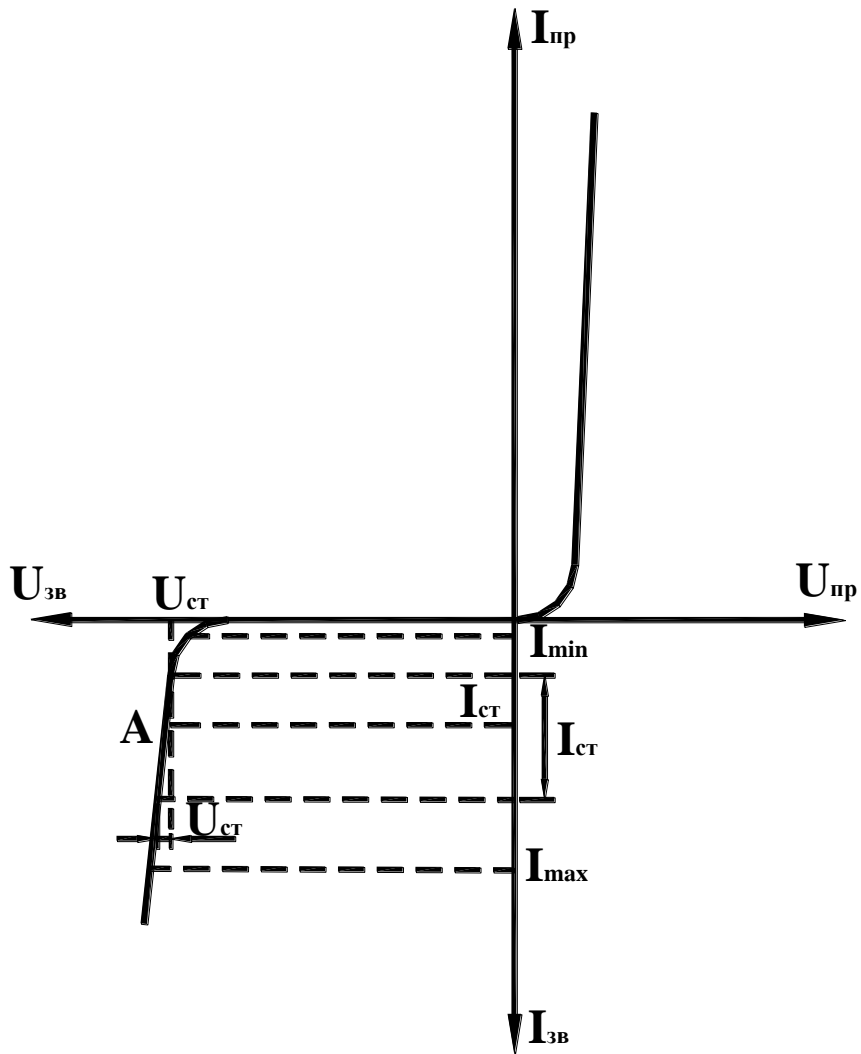


Рисунок 3.5 – Вольтамперна характеристика стабілітрона

Напруга стабілізації залежить від температури. Ця залежність оцінюється спеціальним параметром, який називається температурним коефіцієнтом напруги стабілізації – ТКНС. Його величина:

$$\text{ТКНС} = \frac{\Delta U_{\text{ст}}}{U_{\text{ст}}} \cdot \frac{1}{\Delta T}. \quad (3.3)$$

Його величина є відносною зміною напруги стабілізації $\frac{\Delta U_{\text{ст}}}{U_{\text{ст}}}$ на 1° зміни

температури. Вимірюється ТКНС у $1/\text{K}$ або $1/^\circ\text{C}$.

Величина ТКНС і його знак залежать від напруги стабілізації. Для лавиноподібного пробою характерний позитивний ТКНС ($U_{\text{проб}}$ зростає із зростанням температури), а для тунельного – негативний ($U_{\text{проб}}$ зменшується із зростанням температури). Величина ТКНС зазвичай знаходиться в межах $10^{-3} \dots 10^{-4} 1/\text{K}$.

Різновиди стабілітронів. Промисловість випускає стабілітрони із широким діапазоном зміни параметрів $U_{ст}$ (від 3...4 до сотень вольтів) і $P_{доп}$ (до десятків ватів). До спеціальних типів стабілітронів належать термокомпенсовані стабілітрони та стабістори.

Термокомпенсовані стабілітрони відрізняються надзвичайно малим ТКНС (порядку $10^{-4} \dots 10^{-5} 1/K$). Вони є послідовним з'єднанням звичайного стабілітрона з лавинним пробоем і *p-n*-переходу, включеного в пряму напрямку. З підвищенням температури спадання напруги на прямо включеному переході зменшується, в той час як напруга лавинного пробоя стабілітрона зростає. Термокомпенсовані стабілітрони використовують у джерелах еталонної напруги.

Стабістори. Для стабілізації напруги можна використовувати і пряму гілку вольтамперної характеристики діода, якщо вона має велику крутизну. Діоди, які призначені для стабілізації в режимі прямого зміщення, називають стабісторами. Їх виготовляють із кремнію з досить високою концентрацією домішок, що забезпечує малий опір нейтральних областей напівпровідника і круту вольтамперну характеристику.

Відмінною рисою стабісторів порівняно зі стабілітронами є менша напруга стабілізації. Вона визначається прямим спаданням напруги на діоді і для кремнієвих стабісторів складає десяті частки вольта. Оскільки із зростанням температури потенційний бар'єр *p-n*-переходу зменшується, то стабістори мають негативний коефіцієнт напруги стабілізації.

Схема включення стабілітрона. Принципова схема стабілізатора напруги на стабілітроні наведена на рис. 3.6.

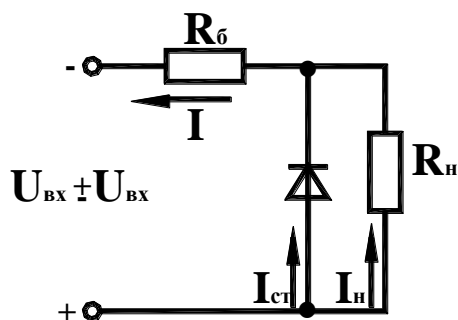


Рисунок 3.6 – Схема стабілізатора напруги на стабілітроні

Такий стабілізатор має всього два елементи – стабілітрон, який включається паралельно навантаженню R_n , і баластовий опір $R_б$. Під час зміни вхідної напруги стабілізатора на деяку величину ΔU в колі $R_б$ -стабілітрон виникає збільшення струму ΔI , який практично цілком відгалужується в стабілітрон, оскільки його опір у режимі пробоя істотно менше опору

навантаження. Оскільки під час зміни струму на робочій ділянці стабілітрона напруга на його затискувачах міняється мало, то практично все збільшення вхідної напруги виділяється на баластовому опорі:

$$\Delta U_{\text{вх}} \approx \Delta I \cdot R_{\zeta}.$$

В результаті цього напруга на навантаженні змінюється незначно. При правильному виборі параметрів схеми вдається в десятки разів зменшити нестабільність напруги в навантаженні.

Запитання й завдання для самоперевірки

1. Які діоди називають стабілітронами?
2. Наведіть ВАХ стабілітрона і покажіть на ній робочу ділянку.
3. Які види електричного пробою використовують у стабілітронах?
4. З якого напівпровідникового матеріалу виготовляють, в основному, стабілітрони?
5. Як відрізняється ступінь легування кремнію в стабілітронах із лавинним і тунельним пробоєм?
6. Перелічіть параметри стабілітронів і покажіть, як можна їх визначити з ВАХ.
7. Від чого залежить величина напруги стабілізації?
8. Якими фізичними факторами визначаються значення мінімального I_{min} та максимального I_{max} струмів стабілітрона?
9. Яка якість стабілітрона оцінюється таким параметром як диференціальний опір?
10. Виберіть на робочій ділянці ВАХ стабілітрона робочу точку і покажіть, як у ній можна визначити диференціальний опір.
11. Що називають температурним коефіцієнтом напруги стабілізації – ТКНС?
12. У яких одиницях вимірюють ТКНС?
13. Як залежить знак ТКНС від виду пробою, використовуваного в стабілітроні?
14. Які стабілітрони називають термокомпенсованими?
15. Як досягається мале значення ТКНС у термокомпенсованих стабілітронів?
16. Які діоди називають стабісторами?
17. З якого напівпровідникового матеріалу, як правило, виготовляють стабістори?
18. Наведіть ВАХ стабістора та покажіть на ній робочу ділянку.

19. Чому напруга стабілізації стабісторів складає звичайно десяти частки вольт?

20. Наведіть схему стабілізатора напруги на стабілітроні.

21. Яка роль баластового опору R_6 у схемі стабілізатора?

3.5 Варикапи

Варикап – це напівпровідниковий діод, призначений для використання як ємність, керована напругою.

Принцип дії. Електронно-дірковий перехід має дифузійну й бар'єрну ємності, значення яких залежить від прикладеної напруги. Дифузійна ємність у варикапі не використовується, тому що вона проявляється під час прямого зміщення p - n -переходу, коли протікає великий струм і в приладі витрачається значна потужність. Робочими елементами для варикапів є бар'єрні ємності p - n -переходів, які працюють у режимі зворотного зміщення. Струм, що протікає через варикап, у цьому випадку дуже малий і на керування його ємністю витрачається мала потужність.

Структура варикапа визначається основними вимогами, висунутими до приладу: він повинен мати «різку» залежність ємності від напруги, досить велику напругу пробою, малий опір бази. На рис. 3.7 показана структура варикапа p^+ - n - n^+ -типу з двошаровою базою (n - n^+). При цьому високоомний n -шар, у якому створюють робочий p - n -перехід, має товщину до 10 мкм і його отримують методом епітаксії на низькоомному n^+ -шарі. Така структура забезпечує порівняно високу пробивну напругу p - n -переходу без істотного збільшення опору бази. Конструктивне оформлення варикапів не відрізняється від звичайних діодів. Для захисту варикапів від впливів навколишнього середовища застосовують металеві, скляні чи пластмасові корпуси.

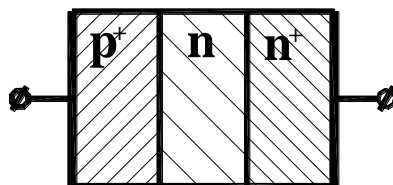


Рисунок 3.7 – Структура варикапа

Характеристики та параметри. Основною характеристикою варикапа є вольтфарадна характеристика, яка є залежністю його ємності від прикладеної напруги (рис. 3.8).

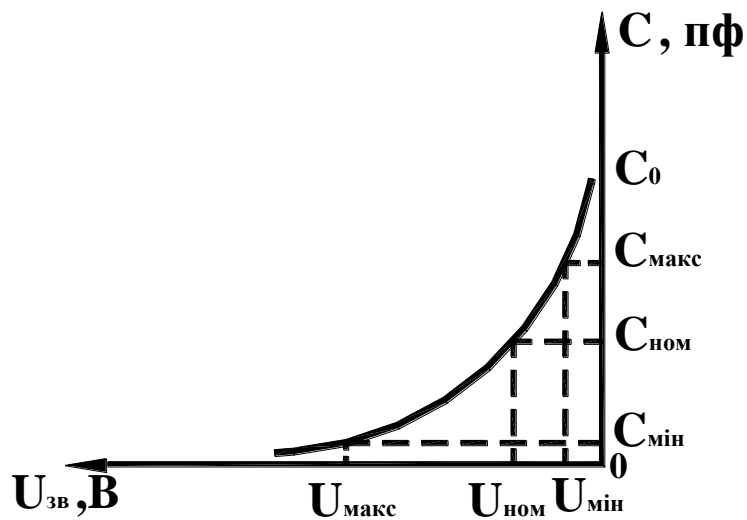


Рисунок 3.8 – Вольтфарадна характеристика варикапа

Ця характеристика нелінійна, крутизна її залежить від розподілу домішок у напівпровіднику, тобто структури *p-n*-переходу.

Основними параметрами варикапа є:

C_0 – початкова ємність, вимірювана за відсутності зовнішньої напруги. Величина цієї ємності для приладів, що серійно випускаються, може досягати сотень пікофарад.

$C_{ном}$ – номінальна ємність із заданою зовнішньою напругою $U_{ном}$.

$C_{макс}$, $C_{мін}$ – максимальна і мінімальна ємності в межах заданого діапазону зміни керуючої напруги від мінімальної величини $U_{мін}$ до максимального значення $U_{макс}$.

Для оцінки якості варикапа вводиться такий параметр, як добротність Q . Добротність Q визначається як відношення реактивного опору до опору втрат у приладі на заданій частоті.

Ця величина є складною функцією частоти і для більшості промислових зразків приладів має максимум у діапазоні частот 1...10 МГц.

Застосування варикапів. Найчастіше варикапи використовують для електронного підстроювання резонансної частоти коливальних контурів. Типова схема включення варикапа наведена на рис. 3.9. Варикап підключено до LC – контуру паралельно через розділовий конденсатор C_p , ємність якого $C_p \gg C_{ном}$. Цей конденсатор ізолює LC – контур від кола керування варикапа. Постійне зміщення $U_{упр}$, що керує ємністю варикапа, подається через резистор R номіналом у сотні кілоом. Цим виключається шунтування контуру колом зміщення.

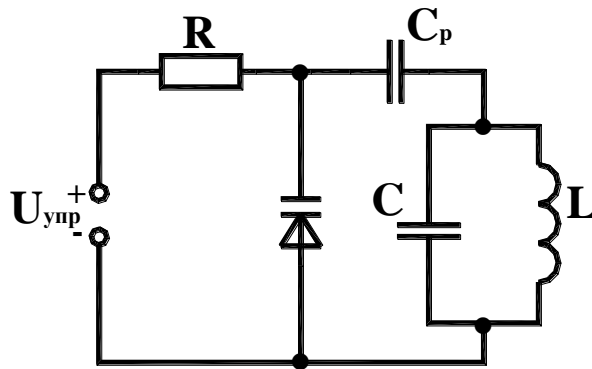


Рисунок 3.9 – Схема включення варикапа

Запитання й завдання для самоперевірки

1. Який діод називають варикапом?
2. Чому у варикапах не використовується дифузійна ємність $p-n$ -переходу?
3. Чому у варикапах використовується бар'єрна ємність $p-n$ -переходу?
4. Яке зміщення $p-n$ -переходу – пряме чи зворотне – є робочим для варикапа?
5. Які вимоги висуваються до варикапа?
6. Наведіть приклад структури варикапа.
7. Яка характеристика варикапа називається вольтфарадною?
8. Перелічіть параметри варикапів і покажіть як їх можна визначити за вольтфарадною характеристикою.
9. Що таке добротність варикапа?
10. Наведіть і поясніть схему включення варикапа.

3.6 Імпульсні діоди

Імпульсні діоди призначені для роботи з імпульсними сигналами. Вони застосовуються як швидкодіючі ключі, тобто пристрої, що мають два стани – малого опору («відкритий») і великого опору («закритий»).

У подібному режимі можуть працювати і звичайні випрямляючі діоди. Під час прямого зміщення вони мають малий, а під час зворотному – великий опір. Для їхнього переключення з одного стану в інший затрачається багато часу.

На відміну від цього, імпульсні діоди мають дуже малий час переключення (висока швидкодія). Швидкодія імпульсних діодів оцінюється за перехідними характеристиками.

Перехідна характеристика є залежністю струму від часу або напруги у виводах приладу при подачі на нього сигналу визначеної (звичайно прямокутної) форми.

Перехідна характеристика струму імпульсного діода при подачі на нього відпираючого імпульсу прямокутної форми показана на рис. 3.10.

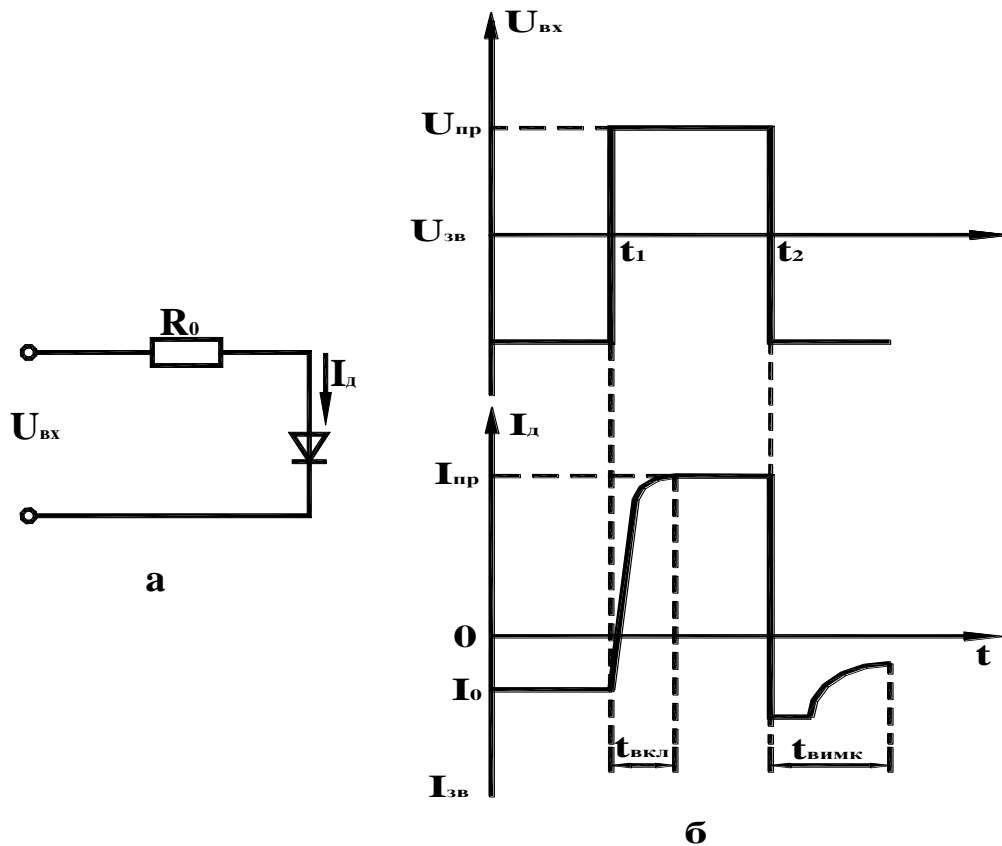


Рисунок 3.10 – Перехідні процеси в діоді

У початковому стані ($t < t_1$) на діод подана запираюча напруга $U_{вх} = U_{обр}$, і в його виводах протікає невеликий зворотний струм $I_d = I_0$. У цьому режимі в діоді існує розподіл нерівноважних носіїв, показаних кривими на рис. 2.15. В момент часу $t = t_1$ на діод надходить відпираюча напруга $U_{вх} = U_{пр}$, під дією якої в діоді має встановлюватися струм $I_d = I_{пр}$. Розподіл нерівноважних носіїв у цьому випадку має відповідати кривим рис. 2.13. Однак, як видно з рис. 3.10, б, прямий струм встановлюється не миттєво, а лише через час $t_{вкл}$, який називається *часом включення*. Протягом цього часу в діоді відбувається нагромадження надлишкових нерівноважних носіїв, тобто вихідні розподіли (рис. 3.10, б) перетворюються в розподіли, характерні для прямого включення.

У момент часу $t = t_2$, коли закінчується відмикаючий імпульс на вході, у діоді починається зворотний процес. Для того, щоб перевести його в закритий стан, необхідно вивести («розсмоктати») із приконтактних областей накопичені надлишкові носії. Розподіли (рис. 2.13) мають повернутися у початковий

стан (рис. 2.15). Тому до повного завершення цього процесу зворотний струм у діоді перевищує значення I_0 . Час $t_{\text{вискл}}$, протягом якого в діоді встановлюється нормальна величина зворотного струму, називають *часом вимикання*.

Описані процеси нагромадження й розсмоктування нерівноважних носіїв є процесами заряду й розряду дифузійної ємності p - n -переходу. Кінцева їхня тривалість – це головна причина інерційності діода. Крім того, на швидкодію діода впливають і процеси перезарядження бар'єрної ємності p - n -переходу. Але впливом цих процесів можна знехтувати.

Параметри імпульсних діодів. Загальні властивості імпульсних діодів оцінюються системою параметрів, введених раніше для випрямляючих діодів, ($I_{\text{пр max}}$, $U_{\text{пр max}}$, $U_{\text{зв доп}}$, $I_{\text{звр}}$ і т.д.). Крім цього, у паспорті імпульсного діода завжди вказуються величини $t_{\text{вкл}}$ і $t_{\text{вискл}}$. У ряді випадків ці параметри називаються, відповідно, часом встановлення прямого ($t_{\text{вст}}$) і встановлення зворотного ($t_{\text{вист}}$) опорів. В сучасних імпульсних діодах $t_{\text{вискл}} > t_{\text{вкл}}$ і їхня загальна швидкодія оцінюється величиною $t_{\text{вискл}}$. Для швидкодіючих діодів $t_{\text{вискл}}$ знаходиться в межах від десятих часток до декількох мікросекунд. Діоди з надвисокою швидкодією мають $t_{\text{вискл}} < 0.1$ мкс.

Структура та конструкція імпульсних діодів мають забезпечувати насамперед максимальну швидкодію. Її досягають, у першу чергу, за рахунок зменшення ємності p - n -переходу, для чого роблять малою площу переходу. Тому широко поширені імпульсні діоди точкової конструкції. Сучасна технологія дозволяє отримати і плоскі p - n -переходи малої площі, що називаються мікроплощинними. На рис. 3.11 показано два приклади мікроплощинних переходів: меза- і планарного типу, формованих методами дифузійної технології.

У випадку меза-діода після проведення дифузії частина дифузійного p -шару хімічно стравлюється. Залишається p - n -перехід, що піднімається над іншою структурою у вигляді столу (звідси назва діода: «меза» – іспанською – стіл). Структура планарного діода формується дифузією домішок через вікно в плівці Si_2 . Мала площа переходу досягається малим розміром вікна.

Крім зменшення розмірів p - n -переходів, швидкодію імпульсних діодів збільшують шляхом легування їх структури золотом. Атоми золота створюють у кристалі центри рекомбінації і зменшують час життя носіїв. Це сприяє зменшенню $t_{\text{вискл}}$.

В імпульсних діодах часто застосовують переходи Шотки. Їхньою особливістю є відсутність нагромадження нерівноважних носіїв під час прямого зміщення. Інерційність діодів Шотки пояснюється лише наявністю бар'єрної ємності, яка не перевищує одиниць пікофарад. Діоди Шотки можуть мати час вимикання порядку $1 \text{ нс} = 10^{-9} \text{ с}$.

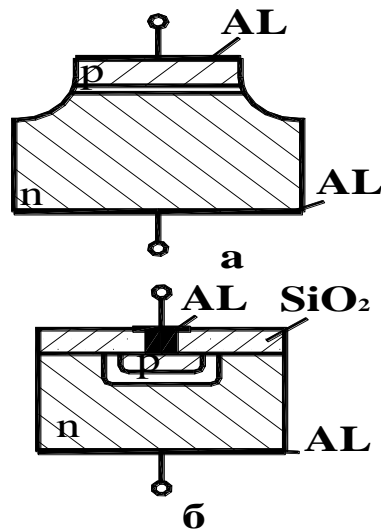


Рисунок 3.11 – Структури меза (а) і планарного (б) діодів

Запитання й завдання для самоперевірки

1. Які діоди називають імпульсними?
2. Які електронні пристрої називають ключовими?
3. Чому в ключових пристроях не застосовують випрямляючі діоди?
4. Що називають швидкодією імпульсних діодів?
5. Що таке перехідна характеристика імпульсного діода?
6. Наведіть перехідну характеристику струму імпульсного діода при подачі на нього випрямляючої напруги прямокутної форми.
7. Наведіть і поясніть розподіл нерівноважних носіїв заряду в нейтральних областях кристала під час прямого зміщення *p-n*-переходу.
8. Наведіть і поясніть розподіл нерівноважних носіїв заряду в нейтральних областях кристалу під час зворотного зміщення *p-n*-переходу.
9. Покажіть на перехідній характеристиці імпульсного діода час включення $t_{\text{вкл}}$ і поясніть, з якими фізичними процесами він зв'язаний.
10. Покажіть на перехідній характеристиці імпульсного діода час вимикання $t_{\text{викл}}$ і поясніть, з якими фізичними процесами він зв'язаний.
11. Яким часом – $t_{\text{вкл}}$ або $t_{\text{викл}}$ – визначається швидкодія імпульсного діода?
12. Чому для поліпшення швидкодії імпульсних діодів зменшують площу *p-n*-переходу?
13. Наведіть і поясніть структуру меза–діода.
14. Наведіть і поясніть структуру планарного діода.
15. З якою метою структуру імпульсних діодів легують золотом?
16. Чим визначається швидкодія імпульсних діодів Шотки?

4 БІПОЛЯРНІ ТРАНЗИСТОРНІ СТРУКТУРИ

4.1 Побудова і принцип дії біполярних транзисторів

Біполярний транзистор (БТ) – триелектродний прилад, здатний підсилювати електричні сигнали за потужністю. Його структура (рис. 4.1) містить три області з різними типами провідності. Залежно від порядку чергування цих областей розрізняють БТ типу *p-n-p* і *n-p-n*.

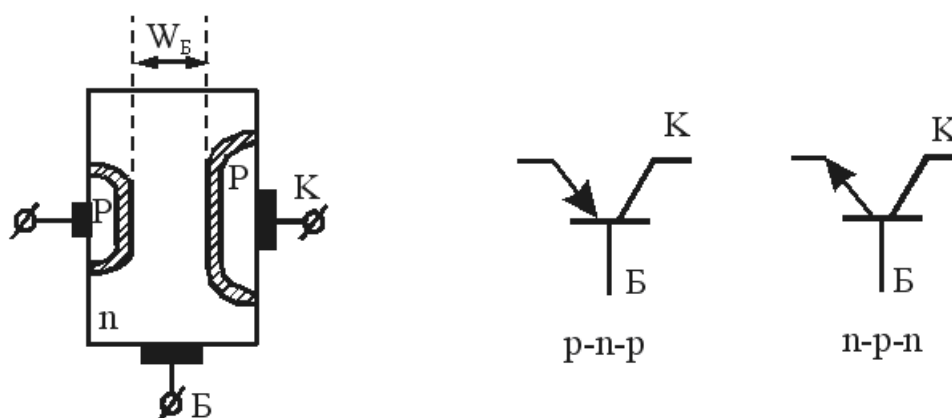


Рисунок 4.1 – Біполярний транзистор і його позначення

Основні визначення. Одна з крайніх областей БТ називається *емітером*, середня область – *базою*, інша крайня область – *колектором*. Електронно-дірковий перехід між емітером і базою називають емітерним. Зазвичай він працює в режимі інжекції неосновних носіїв у базу, тобто має пряме зміщення. З метою підвищення ефективності роботи емітерного переходу (ЕП) емітер легують сильніше бази. Концентрація домішок в емітері N_e зазвичай на два–три порядки перевищує концентрацію домішок у базі N_B .

Інший *p-n*-перехід БТ, названий колекторним (КП), призначений для екстракції неосновних носіїв із бази, тобто працює зі зворотним зміщенням. Площа цього переходу завжди більше площі ЕП. Залежно від технології виробництва БТ його колектор може мати більший чи менший, ніж база, ступінь легування.

Найважливішим параметром структури БТ є ширина бази W_B – відстань між ЕП і КП. Значення W_B має бути набагато меншим дифузійної довжини L неосновних носіїв у базі, типове значення її – від часток мікрметра до десятків мікрметрів.

Різновиди БТ. Струми в структурі БТ утворюються рухом носіїв заряду двох знаків – електронів і дірок. Цим пояснюється назва «біполярний

транзистор», тобто транзистор, що працює на двох полярних носіях заряду. Взаємодія між переходами БТ здійснюється шляхом передачі через базу неосновних носіїв: дірок у *p-n-p*-структурах.

Залежно від механізму переносу неосновних носіїв, через базу розрізняють *дрейфові та бездрейфові БТ*. У бездрейфових БТ носії переміщуються від емітера до колектора за рахунок дифузії, а в дрейфових – під дією прискорюючого електричного поля, створюваного в базі. Вивчення загальних властивостей БТ починають зазвичай на прикладі БТ бездрейфового типу.

За технологією виробництва розрізняють сплавні, дифузійні, дифузійно-сплавні, планарні, епітаксціальні та інші типи БТ. Транзистори розрізняють також за родом вихідного напівпровідникового матеріалу (германій, кремній, арсенід галію й ін.).

Конструкція. Для захисту від впливів навколишнього середовища кристал із структурою БТ поміщають у герметичний корпус, заповнений інертними газами, і опресовують пластмасою. У безкорпусному варіанті конструкції структуру покривають захисними плівками (лаки, смоли, скла).

Принцип дії бездрейфового БТ розглянемо на прикладі транзистора, включеного за схемою рис. 4.2.

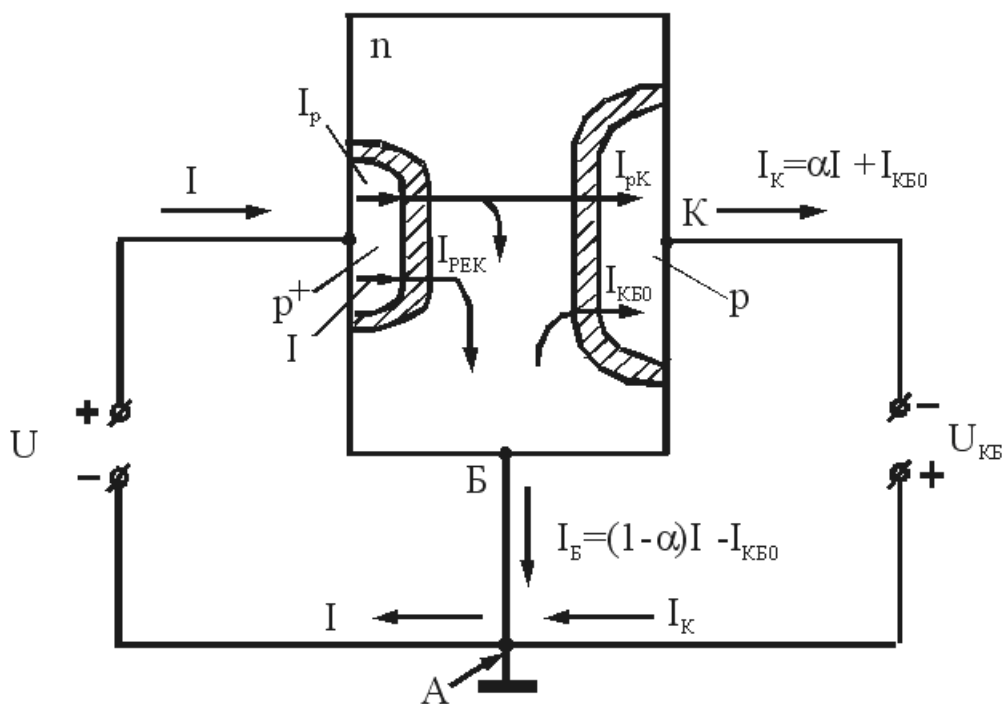


Рисунок 4.2 – Передача струму в бездрейфовому БТ

При цьому потрібно пам'ятати, що технічний напрямок струму збігається з фактичним рухом дірок і протилежний фактичному руху електронів.

У розглянутій схемі на емітер БТ подається пряме, а на колектор – зворотне зміщення. Такий режим роботи транзистора називають *нормальним активним режимом*. Оскільки ЕП зміщений у прямому напрямку, то дірки з емітера інjektують у базу, створюючи дірковий струм I_{pe} . Зустрічна інжекція електронів із бази в емітер створює електронний струм I_{ne} , який набагато менший діркового струму I_{pe} . Таке співвідношення між струмами I_{pe} й I_{ne} пояснюється більш високим ступенем легування емітера. Повний струм емітера:

$$I_e = I_{pe} + I_{ne} . \quad (4.1)$$

У реальному БТ $I_{pe} \gg I_{ne}$ і $I_e \cong I_{pe}$.

Внаслідок інжекції концентрація дірок у базі з боку емітера зростає і стає більшою, ніж із боку колектора. Тому дірки дифундуватимуть в напрямку колектора, що знаходиться під зворотним зміщенням. Досягши межі КП, дірки електричним полем переходу втягуються (екстрагують) у колектор. Це призводить до появи діркового струму I_{pk} у колі колектора.

У процесі дифузії через базу деякі дірки рекомбінують з електронами – основними носіями в базі. Це призводить до появи у виводі бази струму рекомбінації $I_{рек}$. Однак, якщо ширина бази мала ($W_B \ll L$), то струм рекомбінації $I_{рек}$ теж малий $I_{рек} \ll I_{pe}$.

Більша частина інжекттованих дірок досягає колекторного переходу $I_{pk} \cong I_{pe}$.

Розглянемо тепер, що відбувається в колі колектора. За відсутності інжекції емітера, коли $I_e=0$, через колекторний перехід протікає невеликий зворотний струм $I_{кбо}$. Він утворюється неосновними носіями – електронами з колектора та дірками з бази. Струм $I_{кбо}$ називають *некерованим струмом колектора*.

Під час подачі прямого зміщення на ЕП у колі колектора з'являється додатковий струм I_{pk} екстракції дірок, що дійшли сюди від емітерного переходу. Повний струм у виводі колектора:

$$I_k = I_{pk} + I_{кбо} . \quad (4.2)$$

Струм I_{pk} є частиною емітерного струму I_e і називається керованим струмом колектора. Якщо прийняти, що $I_{pk} = \alpha I_e$, то повний струм колектора:

$$I_k = \alpha I_e + I_{кбо} . \quad (4.3)$$

Коефіцієнт α у формулі (4.3) називають *коефіцієнтом передачі струму в транзисторі*, він показує, яка частина емітерного струму відгалужується в колекторне коло. При досить тонкій базі, коли втрати за рахунок рекомбінації малі, коефіцієнт α не менше 0,95, але завжди менше одиниці.

Відповідно до рівняння (4.3) БТ – це прилад, керований струмом: величина вихідного (колекторного) струму визначається вхідним (емітерним)

струмом. Відповідно до схеми рис. 4.2 у точці А сходяться три виводи БТ, по яких протікають струм емітера I_e , струм колектора I_k і струм бази I_b . Точка А називається вузлом струмів. Для вузла струмів є справедливим правило: сума струмів, що втікають у вузол, дорівнює сумі струмів, що витікають із нього. Відповідно до цього правила:

$$I_e = I_k + I_b. \quad (4.4)$$

Використовуючи (4.3) і (4.4), можна записати:

$$I_b = I_e - I_k = (1-\alpha) I_e - I_{кбо}. \quad (4.5)$$

Транзистори типу *n-p-n* відрізняються тільки тим, що передача струму від емітера до колектора здійснюється потоком електронів.

Підсилювальні властивості БТ розглянемо на прикладі спрощеної схеми підсилення змінного сигналу (рис. 4.3), на цій схемі $U_{вх}$ – змінний вхідний сигнал, що підлягає посиленню, включений у коло емітера. Це коло є вхідним. Вихідне коло – це коло колектора, де включено резистор навантаження R_n , – з якого знімають посилений сигнал. Вхідним струмом є струм емітера I_e , вихідним струм колектора.

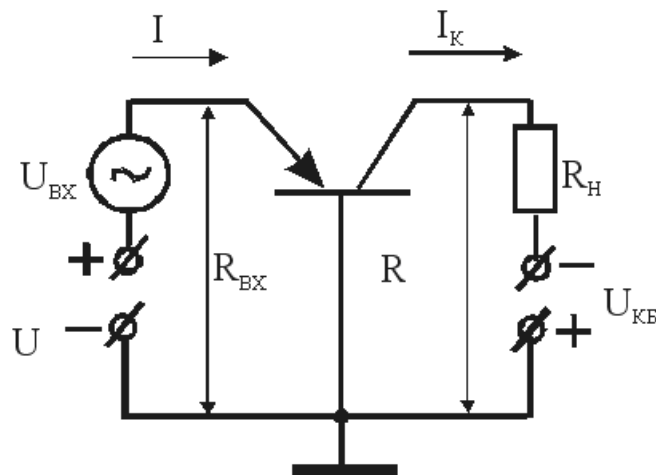


Рисунок 4.3 – Включення БТ для підсилення змінного сигналу

Підсилювальні властивості БТ, як і будь-якого електронного приладу, оцінюють коефіцієнтами підсилення за струмом K_I , за напругою K_U і за потужністю K_P . Змінний струм можна розглядати як зміну (збільшення) постійного струму – ΔI , відповідно змінна напруга – збільшення постійної напруги – ΔU , потужність змінного сигналу – збільшення ΔP потужності постійного струму.

За визначенням:

$$K_I = \frac{\Delta I_{вих}}{\Delta I_{вх}}; \quad K_U = \frac{\Delta U_n}{\Delta U_{вх}}; \quad K_P = \frac{\Delta P_n}{\Delta P_{вх}}. \quad (4.6)$$

Для схеми рис. 4.3:

$$K_I = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_e}.$$

Якщо емітерний струм отримав збільшення ΔI_e , то відповідно до (4.3) :

$$\Delta I_K = \alpha \Delta I_e, \quad (4.7)$$

оскільки струм $I_{кбо}$ не залежить від I_e .

Отже, з (4.6) і (4.7) випливає:

$$K_I = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_e} = \alpha. \quad (4.8)$$

Коефіцієнт $\alpha < 1$, хоча досить близький до одиниці. Отже, у розглянутій схемі, БТ не здійснює підсилення за струмом: змінний струм виходячи $\Delta I_{до}$ незначно, але все ж таки менший змінного струму входу ΔI_e .

Коефіцієнт підсилення напруги:

$$K_U = \frac{\Delta I_K R_H}{\Delta I_e R_{вх}} = \alpha \frac{R_H}{R_{вх}}. \quad (4.9)$$

У розглянутій схемі $R_{вх}$ – мале, тому що у вхідному колі БТ – емітерний перехід прямо зміщений. Навпаки, $R_{вх}$ – велике, тому що у вихідному колі – колекторний перехід зі зворотним зміщенням. Розходження між $R_{вх}$ і $R_{вих}$ може складати сотні – тисячі разів. Зазвичай резистор навантаження R_H вибирають за величиною, досить близьким до $R_{вих}$. Отже:

$$R_H \gg R_{вх} \quad \text{та} \quad K_U \gg 1.$$

У розглянутій схемі БТ здійснює підсилення змінного сигналу за напругою:

$$K_P = \frac{\Delta I_K \cdot \Delta U_H}{\Delta I_e \cdot \Delta U_{вх}} = K_I \cdot K_U. \quad (4.10)$$

Оскільки K_I незначно менше 1, а K_U істотно більше одиниці, то:

$$K_P \gg 1.$$

БТ здійснює підсилення змінного сигналу за потужністю.

Режими роботи транзистора. Розглянутий раніше режим роботи БТ, названий нормальним активним режимом, є основним, але не єдиним. У структурі БТ є *p-n*-переходи, кожний з яких може працювати в режимі прямого чи зворотного зміщення. Тому, залежно від полярності напруг, що подаються на переходи, розрізняють чотири режими роботи БТ:

- нормальний активний (ЕП – відкритий, КП – закритий)
- інверсний активний (ЕП – закритий, КП – відкритий)
- насичення (обидва переходи відкриті);
- відсічення (обидва переходи закриті).

Властивості БТ у кожному з цих режимів залежать від розподілів носіїв і струмів у його структурі.

Нормальний активний режим. Схема включення БТ і розподіл струмів показані на рис. 4.2. Можна зазначити, що найбільш важливим для роботи *p-n-p*-транзистора є дірковий струм емітера I_{pe} . Електронний струм емітера I_{ne} в передачі потужних сигналів не бере участь і його прагнуть звести до мінімуму. Коефіцієнт передачі по струму БТ у нормальному режимі:

$$\alpha_N = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_e} \cdot *$$

Тут індекс N означає, що параметр α визначений для нормального активного режиму. В активному режимі БТ має найкращі підсилювальні властивості.

Інверсний активний режим відрізняється від нормального лише тим, що емітер і колектор виконують функції, протилежні нормальному режиму. Схема виконання *p-n-p*-транзистора і струми в ньому показані на рис. 4.4, а. Розподіл струмів у цьому режимі є дзеркальним відображенням розподілу струмів у нормальному режимі, замість зворотного струму колектора $I_{кбо}$ маємо $I_{ебо}$. Коефіцієнт передачі по струму в цьому режимі:

$$\alpha_I = \frac{\Delta I_E}{\Delta I_K} < \alpha_N. \quad (4.11)$$

Таким чином, якщо під час збирання електронної схеми переплутати виводи колектора та емітера, то БТ, у принципі, має зберегти свою працездатність, але з меншою ефективністю. Зміниться лише величина коефіцієнтів підсилення, оскільки для реальних транзисторів справедливо: $\alpha_I < \alpha_N$. Гірші підсилювальні властивості БТ в інверсному режимі пояснюються тим, що колекторний перехід погано інжектує внаслідок слабого легування колектора, а емітерний перехід, який має малу площу, погано екстрагує дірки з бази. Тому інверсний режим роботи БТ використовується рідко.

Режим насичення. У режимі насичення обидва переходи БТ відкриті.

Схема включення БТ і струми в ньому показані на рис. 4.4, б. У кожному з переходів протікають струми інжекції й струми екстракції. Наприклад, через емітерний перехід протікають струми інжекції дірок I_{pe} й електронів I_{ne} , а також струм екстракції дірок I'_{pe} , які дійшли від колекторного переходу.

Аналогічні складові є й у колекторному переході. Напрямок струму у виводах емітера та колектора залежить від того, яка з цих компонент переважає.

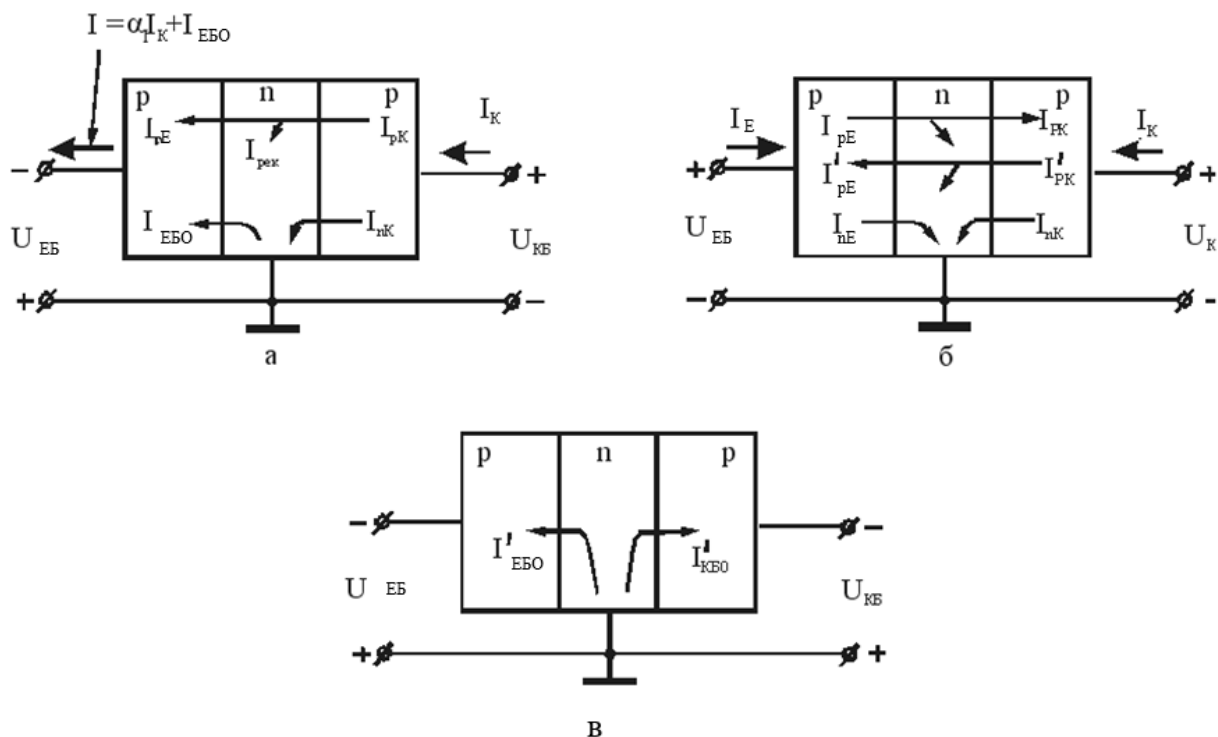


Рисунок 4.4 – Струми в транзисторі в різних режимах роботи

У режимі насичення БТ не має підсилювальних властивостей.

Режим відсічення. У цьому режимі обидва $p-n$ -переходи БТ мають зворотне зміщення. Схема включення та струми в БТ показані на рис. 4.4, в. У БТ протікають зворотні струми переходів I'_{ebo} й I'_{kbo} . Ці струми за величиною трохи менші, ніж введені раніше I_{ebo} і I_{kbo} . Більш точна їх оцінка дозволяє вважати, що в режимі відсічення практично можна прийняти $I_c = I_{ebo} \approx 0$; $I_k = I'_{kbo} \approx I_{kbo}$. У режимі відсічення БТ, як і в режимі насичення, не має підсилювальних властивостей.

Запитання й завдання для самоперевірки

1. Який напівпровідниковий прилад називається біполярним транзистором?
2. Які різновиди структури є в БТ?
3. Наведіть умовні позначення $p-n-p$ - і $n-p-n$ -транзисторів.
4. Нарисуйте структуру БТ і вкажіть області транзистора.
5. Поясніть особливості легування областей БТ.
6. Що таке ширина бази та якій умові вона має відповідати?
7. Перелічіть різновиди БТ.
8. Нарисуйте схему включення БТ у нормального активного режимі.
9. З яких компонентів складається струм емітера?

10. Що таке струм рекомбінації в базі?
11. З яких компонентів складається струм колектора?
12. Що називають коефіцієнтом передачі струму в транзисторі?
13. Напишіть вираз, який встановлює зв'язок між струмами емітера та колектора.
14. Напишіть вираз, який встановлює зв'язок між струмами емітера, бази та колектора.
15. Наведіть схему включення *n-p-n*-транзистора в нормальному активному режимі.
16. Якими коефіцієнтами оцінюють підсилювальні властивості БТ? Наведіть вирази для цих коефіцієнтів.
17. Нарисуйте спрощену схему підсилення змінного сигналу на БТ.
18. Запишіть коефіцієнт підсилення струму БТ у схемі питання 17 та визначте його величину порівняно з одиницею.
19. Запишіть коефіцієнт підсилення за напругою БТ у схемі питання 17 та визначте його величину порівняно з одиницею.
20. Запишіть коефіцієнт підсилення за потужністю БТ у схемі питання 17 і оцініть його величину порівняно з одиницею.
21. Перелічіть режими роботи БТ.
22. Зобразіть схему включення БТ в інверсному активному режимі та розподіл струмів у БТ.
23. Поясніть, чому підсилювальні властивості БТ в інверсному режимі гірші, ніж у нормальному активному.
24. Зобразіть схему включення БТ у режимі насичення та розподіл струмів у транзисторі.
25. Подайте схему включення БТ у режимі відсічення та розподіл струмів у транзисторі.
26. Чи використовують для підсилення режими насичення та відсічення БТ?

4.2 Схеми включення, характеристики транзистора

Біполярний транзистор має три зовнішніх виводи, один із яких має бути спільним для вхідного та вихідного кола. Залежно від вибору спільного виводу розрізняють три схеми включення – із *спільною базою (СБ)*, *спільним емітером (СЕ)* і *спільним колектором (СК)*. Зміна схеми включення призводить до змін електричних властивостей БТ. Розглянемо ці зміни за умови роботи транзистора в нормальному активному режимі.

Схема СБ (рис. 4.5, а) вже аналізувалася під час розгляду принципу дії БТ.

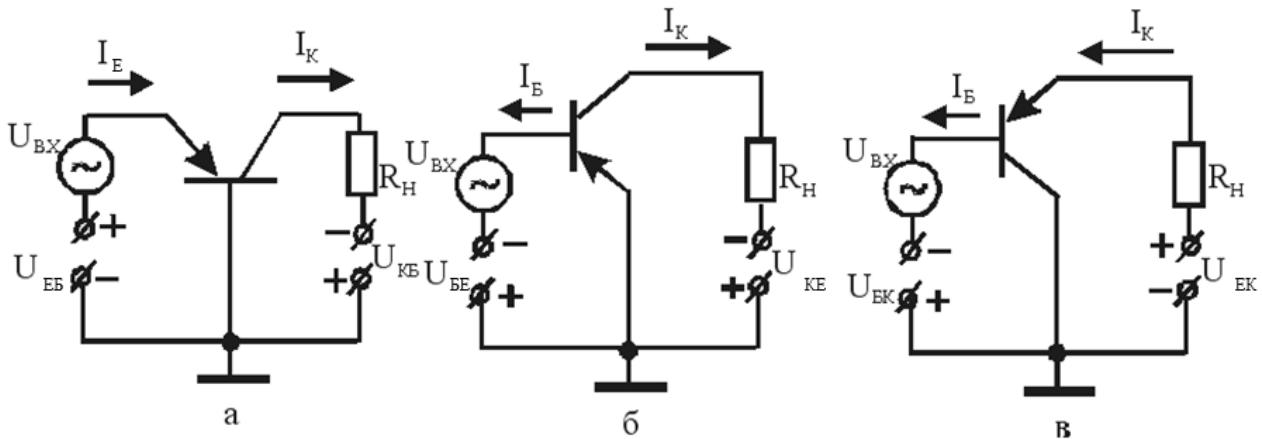


Рисунок 4.5 – Схеми включення транзистора

Як було показано, у схемі СБ транзистор не забезпечує підсилення за струмом, але має підсилення за напругою та потужністю. У цій схемі БТ має малий вхідний і великий вихідний опір, оскільки вхідний струм I_e протікає через відкритий емітерний, а вихідний струм I_k – через закритий колекторний перехід.

Схема СБ використовується рідко. Головна галузь її застосування – високоякісні підсилювачі, які мають малі переколювання форми сигналів, низькі рівні шумів або працюючі на високих частотах.

Схема СЕ (рис. 4.5, б) відповідає випадку коли спільним електродом є емітер, а виводи бази і колектора утворюють відповідно вхідні і вихідні кола. Одна з особливостей схеми СЕ в тому, що для забезпечення активного режиму роботи БТ на його виводі мають подаватися однополярні напруги. Пряме зміщення емітера забезпечується негативною напругою на базі $U_{BE} < 0$, а зворотне зміщення колектора – негативною напругою $U_{KE} < 0$, що перевищує напругу на базі: $|U_{KE}| > |U_{BE}|$. У цьому випадку база матиме позитивний потенціал стосовно колектора і його перехід зміститься в зворотному напрямку.

Підсилювальні властивості БТ у схемі із СЕ відрізняються від підсилювальних властивостей БТ у схемі з СБ. Для оцінки цих властивостей необхідно встановити зв'язок між струмом на вході (I_B) і виході (I_K) транзистора.

Фізичні процеси в транзисторі не залежать від схеми включення, а залежать тільки від режиму його роботи. Отже, якщо в схемі СЕ на виводи транзистора подати напруги відповідні нормальному активному режиму, то струми емітера I_e і колектора $I_{до}$ мають бути зв'язані співвідношенням (4.3). У схемі СЕ теж є вузол струмів, у якому сума струмів, що втікають, дорівнює сумі, що витікають. Тому і для схеми СЕ, як і для схеми СБ:

$$I_E = I_K + I_B$$

Використовуючи цю суму й рівність (4.3), отримаємо:

$$I_K = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B + \frac{1}{1-\alpha} I_{КБО}. \quad (4.12)$$

Введемо параметр:

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}, \quad (4.13)$$

отримаємо з (4.12):

$$I_K = \beta I_B + (\beta+1) I_{КБО}. \quad (4.14)$$

Параметр β називають *коефіцієнтом підсилення струму бази*. Оскільки коефіцієнт α близький до одиниці, то величина $(1-\alpha)$ дуже мала і для коефіцієнта β справедливо:

$$\beta \gg 1.$$

Так, якщо $\alpha = 0,99$, то $(1-\alpha) = 0,01$ і $\beta = 99$. Як видно, у схемі СЕ транзистор забезпечує значне підсилення струму. Крім цього тут зберігається підсилення за напругою. Таким чином схема СЕ відрізняється дуже великим підсиленням за потужністю і є основною схемою включення БТ.

Вхідний опір БТ у схемі СЕ більший вхідного опору того ж транзистора, включеного за схемою СБ. Розходження пояснюється тим, що за однакових вхідних напрямків $|U_{BE}| = |U_{EB}|$ вхідний струм схеми СЕ, який дорівнює струму бази I_B , набагато менший від струму I_E , який є вхідним для схеми СБ. Вхідний опір БТ у схемі СЕ трохи менше, ніж у схемі СБ.

Схема СК (рис. 4.5,в). Під час включення транзистора за схемою СК вхідний сигнал подається в коло бази, а вихідний знімається з виводу емітера. Коефіцієнт підсилення за струмом для схеми СК:

$$K_I = \frac{\Delta I_E}{\Delta I_B} = (\beta + 1) \quad (4.15)$$

трохи більший, ніж для схеми СЕ. Однак підсилення за напругою схема СК не дає, тому що її вхідна напруга і вихідна напруга практично рівні. Ці напруги відрізняються лише на величину прямого зміщення на емітері. Оскільки вхідне коло схеми СК містить протилежно зміщений колекторний перехід, а на вихідне коло включено емітерний перехід, що має пряме зміщення, то вхідний опір цієї схеми є великим, а вихідний – малим. Цим визначається основна корисна властивість схеми СК. На її основі будуються емітерні повторювачі, що забезпечують узгодження джерел сигналів із великим внутрішнім опором із низькоомним навантаженням.

Статичні характеристики транзистора в схемі СБ. Найбільш повне уявлення про властивості БТ можна отримати за його вольт-амперними

характеристиками. На відміну від діодів, властивості яких описувалися однією ВАХ, для БТ вводять цілі сімейства характеристик. Оскільки БТ має три виводи, то при знятті залежностей між струмами та напругами в колі двох із них необхідно задавати струм або напругу на третьому виводі.

Для схеми СБ вводять такі сімейства ВАХ:

- вхідні – $I_E = f(U_{EB})$ при $U_{KB} = \text{const}$;
- вихідні – $I_K = f(U_{KB})$ при $I_E = \text{const}$;
- прямої передачі – $I_K = f(I_E)$ при $U_{KB} = \text{const}$;
- зворотної передачі – $U_{EB} = f(U_{KB})$ при $I_E = \text{const}$.

З цих чотирьох сімейств для повного опису БТ достатньо двох. Найчастіше використовують вхідні й вихідні ВАХ. Схема для їхнього дослідження надана на рис. 4.6, а.

Вхідні характеристики для схеми СБ наведені на рис. 4.6, б. З напругою $U_{KB} = 0$ вхідна характеристика БТ проходить через початок координат і є звичайною ВАХ емітерного переходу.

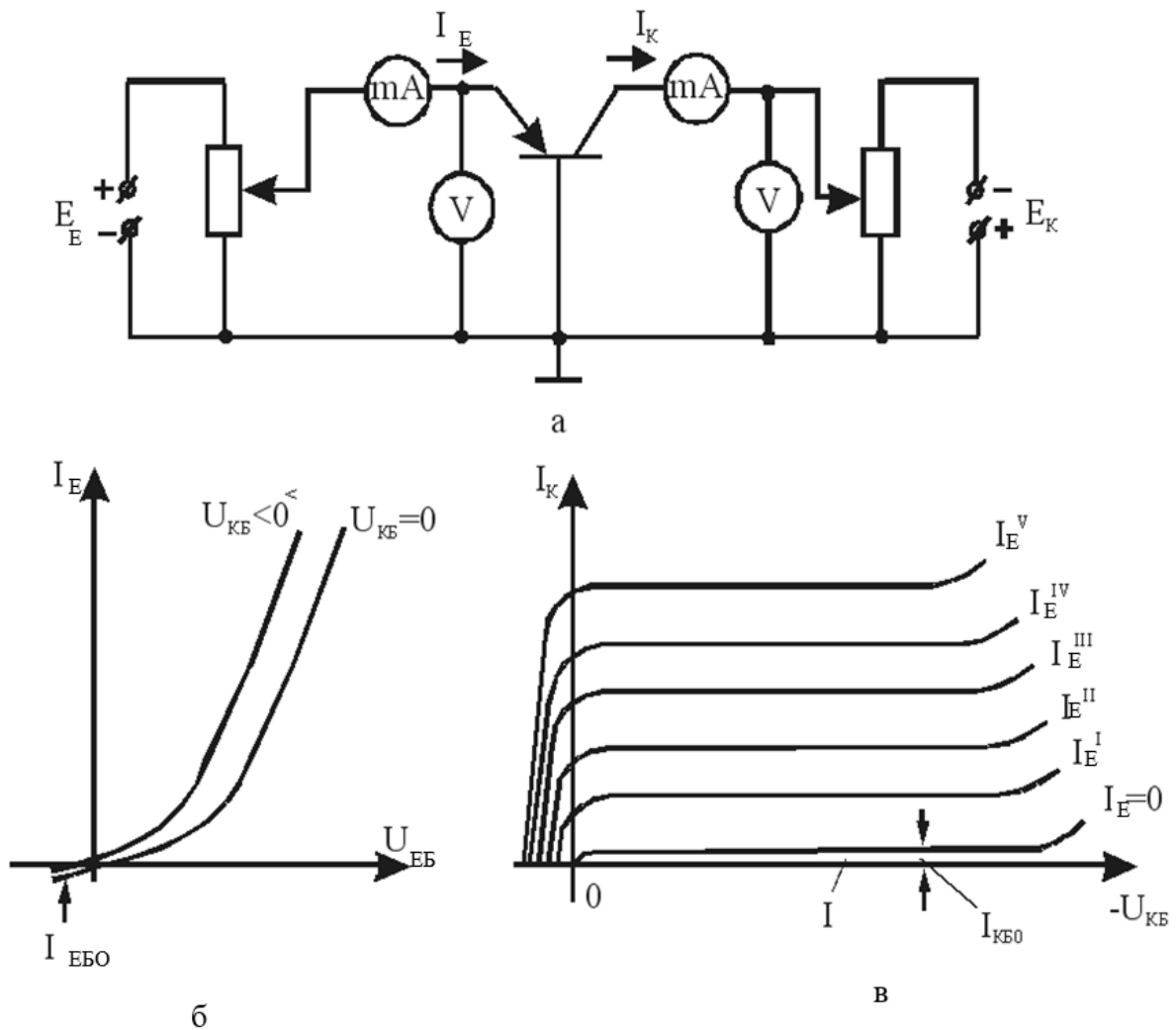


Рисунок 4.6 – Характеристики транзистора в схемі з СБ

З негативною напругою на колекторі ($U_{КБ} < 0$) вхідні характеристики змішуються в область великих емітерних струмів. Залежність струму I_E від напруги $U_{КБ}$ вимагає пояснення. Її наявність у реальних транзисторах пояснюється ефектом модуляції ширини бази (ефект Ерлі, рис. 4.7). Із зростанням зворотної напруги $U_{КБ} < 0$ ширина колекторного переходу збільшується. Це призводить до зменшення ширини бази, визначеної як відстань між межами заірних шарів емітерного (X_K) переходів. Розподіл неосновних носіїв – дірок – у базі для деякого початкового значення $U_{ЕБ} > 0$ і $U_{КБ} < 0$ показано лінією 1. Оскільки емітер у нормальному активному режимі працює в режимі інжекції, концентрація дірок біля емітера $P_E > P_n$ (P_n – рівноважна концентрація дірок у базі). Колектор – у режимі екстракції, тому концентрація дірок біля колектора $P_K \approx 0$.

З незмінною напругою на емітері незмінною залишається і концентрація інжекттованих дірок P_E . Тому із зростанням запираючої напруги на колекторі в базі встановлюється новий, більш крутий розподіл дірок – лінія 2 на рис. 4.7. Струм емітера, який має дифузійну природу і пропорційний крутості розподілу не основних носіїв у базі, при цьому зростає, що і спостерігається в реальних БТ.

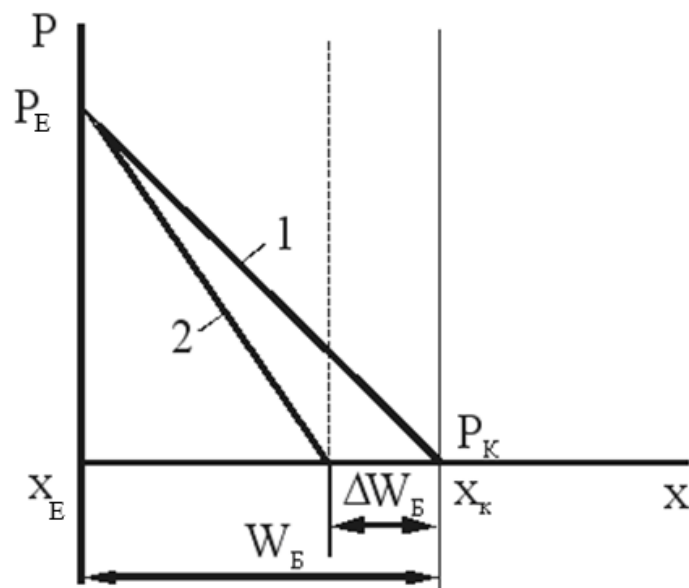


Рисунок 4.7 – Модуляція ширини бази колекторною напругою

Вихідні характеристики для схеми СБ наведені на рис. 4.6, в. Під час їхньої побудови вправо на осі абсцис, відкладають негативні напруги $U_{КБ}$, які є робочими для $p-n-p$ -транзистора.

При $I_c = 0$, коли коло емітера розімкнуте, характеристика $I_K = f(U_{КБ})$ є звичайною зворотною гілкою ВАХ колекторного переходу. У виводі колектора

в цьому випадку протікає невеликий зворотний струм $I_{кбо}$. Крива $I_k=f(U_{кбо})$ при $I_e = 0$ є граничною для режиму відсічення. Область режиму відсічення на рис. 4.6, позначена 1.

Задамо на вході $I_e > 0$. Для цього на емітер треба подати пряме зміщення, що при $U_{кб} < 0$ відповідає переходу транзистора в нормальний активний режим. Оскільки струм I_e в активному режимі практично цілком передається в колекторне коло, то вихідні характеристики при $I_e > 0$ зміщуються нагору в область, позначену цифрою 2. Вона є областю нормального активного режиму.

У реальних БТ струм колектора в активному режимі трохи збільшується із зростанням напруги $U_{кб}$, і характеристики в області 2 мають невеликий нахил стосовно осі абсцис. Це пояснюється ефектом модуляції ширини бази: із зростанням напруги $U_{кб}$ ширина бази зменшується і при заданому струмі I_E велика частина дірок встигає без рекомбінації досягти колекторного переходу.

Якщо на колектор при фіксованому струмі $I_e = \text{const}$ подати позитивне зміщення $U_{кб} > 0$, транзистор переводиться в режим насичення (область 3 на рис. 4.6, в).

При $U_{кб} > 0$ у колі колектора, крім струму екстракції αI_e , з'являється протилежно спрямований струм власної інжекції електронів і дірок. Тому загальний струм колектора в режимі насичення при заданому струмі емітера I_e зменшується. За деякої позитивної напруги $U_{кб}$ струм I_k стає рівним нулю чи навіть змінює знак.

Межа між областю насичення 3 і областю активного режиму 2 відповідає лінії $U_{кб} = 0$, яка збігається з віссю ординат. Характерно, що струм колектора на цій лінії мало чим відрізняється від струму в активній області. Наявність струму в режимі $U_{кб} = 0$ є підтвердженням існування власного поля колекторного переходу. Дірки, інжектвані зміщеним у прямому напрямку емітерним переходом, досягають межі колекторного переходу й екстрагуються його внутрішнім полем. Струм колектора при цьому $I_k = \alpha I_e$. Як бачимо, для екстракції носіїв подача зовнішньої напруги не обов'язкова.

У загальному випадку БТ може експлуатуватися в кожній з виділених областей 1–3. Области відсічення (1) і насичення (3), у межах яких БТ не має підсилювальних властивостей, використовуються в ключових схемах. Під час використання БТ у підсилювачах робочою є область нормального активного режиму 2. Під час роботи в її межах слід враховувати небезпеку пробую колектора при подачі на нього великих напруг. На початковому етапі цей процес має характер лавинного пробую, а надалі може перейти в тепловий. Напруга пробую для схеми СБ $U_{кб\text{ проб}}$ є найважливішим параметром транзистора.

Слід також зважати на те, що за певних умов у БТ спостерігається явище, яке називають проколом бази. З великих напруг на колекторі його запірний шар може зімкнутися із запірним шаром емітера. Струм колектора при цьому різко зростає і БТ переходить у режим теплового пробую, тобто руйнується.

Статичні характеристики транзистора в схемі із СЕ показані на рис. 4.8. Схема для зняття характеристик – на рис. 4.8, а.

Вхідні характеристики є сімейством залежностей $I_B = f(U_{BE})$ при $U_{KE} = \text{const}$ (рис. 4.8, б).

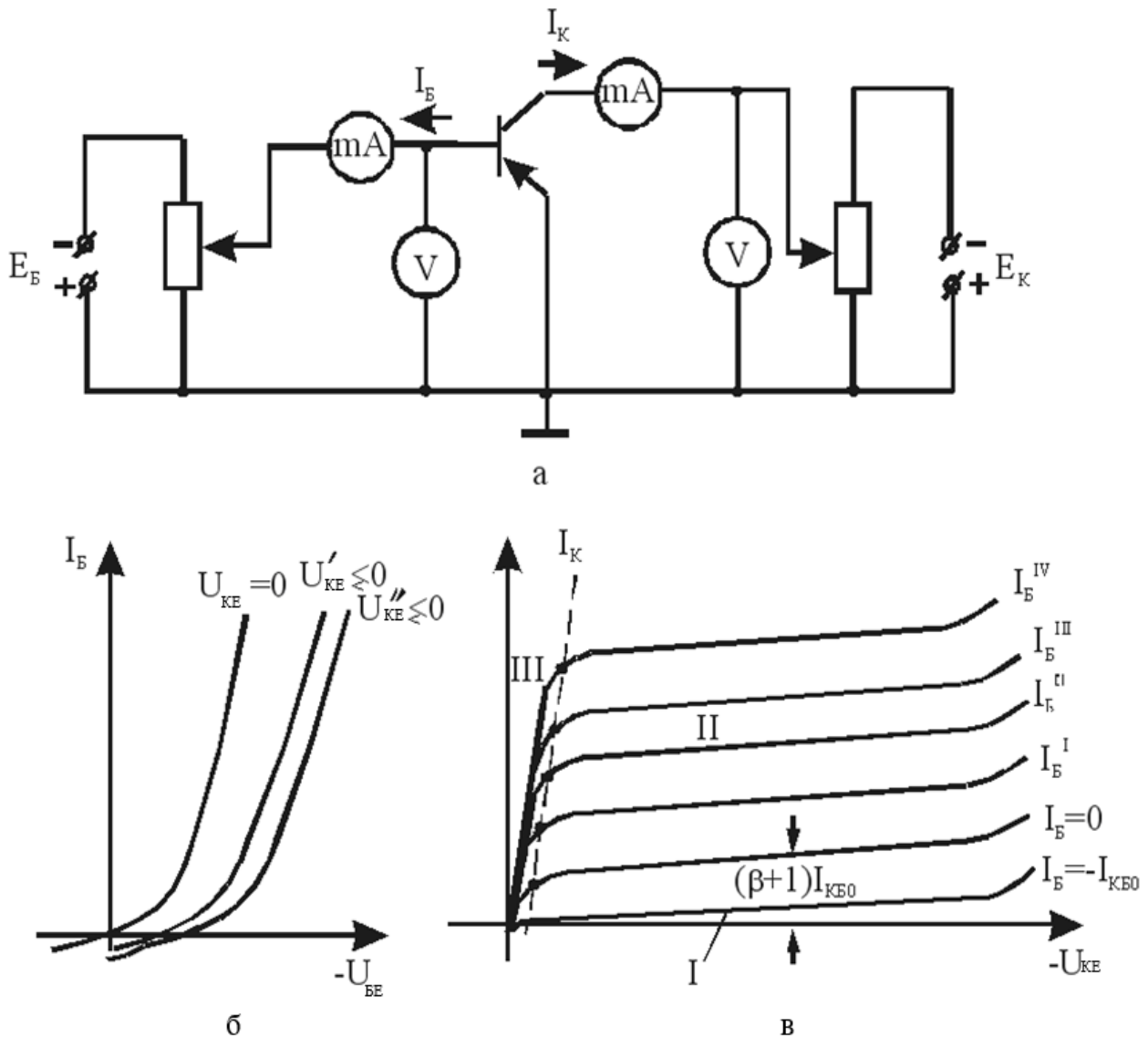


Рисунок 4.8 – Характеристики транзистора в схемі з СЕ

З напругою $U_{KE} = 0$ обидва $p-n$ -переходи БТ з'єднані паралельно. Якщо на базі напруга $U_{BE} < 0$, то обидва переходи отримують пряме зміщення, а сам

транзистор знаходиться в режимі насичення. Тому вхідна характеристика в цьому режимі подібна ВАХ відкритого *p-n*-переходу.

Нехай на колектор подано напругу $U_{кe} < 0$. Як видно з рис. 4.8, б це призводить до зсуву вхідних характеристик вправо і вниз, що відповідає зменшенню базового струму. Якщо негативна напруга $U_{кe}$ за абсолютною величиною більша негативної напруги на базі $U_{бe}$, то БТ знаходиться в активному режимі, і зменшення струму I_b можна пояснити декількома причинами:

- колекторний перехід переводиться в режим зворотного зміщення й інжекція неосновних носіїв через цей перехід припиняється. Це зменшує рекомбінацію в базі й отже зменшує струм бази;

- у зв'язку з модуляцією ширини бази напругою на колекторному переході зменшується струм рекомбінації дірок, які інжектуються емітером;

- у виводі бази з'являється зворотний струм колектора $I_{кбо}$, спрямований назустріч струму рекомбінації.

Вихідні характеристики для схеми СЕ є залежністю $I_k = f(U_{кe})$ при $I_b = \text{const}$ (рис. 4.8, в). Як і у випадку схеми СБ, можна виділити три області, що відповідають різним режимам роботи БТ. Верхньою межею області відсічення I можна вважати вихідну характеристику, що відповідає струму бази $I_b = 0$. Ця характеристика подібна до зворотної гілки ВАХ колекторного переходу, але протікаючий при цьому зворотний струм:

$$I_{кбо}^* = (\beta + 1) I_{кбо}$$

Розмежуємо області активного режиму та режиму насичення. Вихідна характеристика має дві явно виражених ділянки – початкова крута і більш пологіста з великими напругами на колекторі.

Пологіста ділянка характеристики (область 2) відповідає роботі БТ у нормальному активному режимі. Колекторний перехід закритий негативною напругою $U_{кe}$, що перевищує негативну напругу на базі $U_{бe} < 0$. Струм колектора I_k залежить від напруги $U_{кe}$ сильніше, ніж у схемі СБ, тому характеристики мають більший нахил. Причиною цього є модуляція бази, а також те, що в цій схемі напруга $U_{кe}$ впливає на емітерний перехід (рис. 4.5, б).

Якщо колекторна напруга зменшується, то в момент рівності $|U_{кe}| = |U_{бe}|$ відкривається колекторний перехід, і БТ переходить у режим насичення (область 3 рис. 4.8, в). Струм колектора в області насичення зменшується (власна інжекція неосновних носіїв). Це відповідає крутій ділянці вихідних ВАХ.

Як і у випадку схеми СБ, основною робочою областю для схеми СЕ є область нормального активного режиму 2. В ході експлуатації БТ у межах

цієї області можливий пробій колекторного переходу. При цьому напруга пробою $U_{ке\ проб}$ для схеми СЕ менше аналогічного параметра для схеми СБ:

$$U_{ке\ проб} = \sqrt[3]{(1-\alpha)} U_{кб\ проб}, \quad (4.16)$$

де $\alpha \sim 2,5 \dots 3 \dots 3,5$ залежно від конструктивних особливостей БТ. У середньому $\alpha \cong 3$. Напруга $U_{ке\ проб}$ виростає із зростанням струму бази I_b .

Температурні властивості БТ. Як і будь-який інший напівпровідниковий прилад, транзистор є термочутливим пристроєм. Усі його параметри та характеристики змінюються в ході зміни температури. У відношенні ВАХ транзистора можна сформулювати одне загальне правило: із зростанням температури статичні характеристики зміщуються в бік великих струмів.

Якщо порівнювати різні схеми включення БТ, то найменш термостабільна схема СЕ.

Запитання й завдання для самоперевірки

1. Які існують схеми включення БТ?
2. Наведіть схему СБ і охарактеризуйте властивості БТ у цій схемі.
3. Наведіть схему СЕ, поясніть необхідність виконання співвідношення між величинами напруги між величинами напруги на базі $U_{бе}$ і колекторі $U_{ке}$.
4. Наведіть і поясніть рівняння, яке встановлює зв'язок між струмами колектора I_k та бази I_b .
5. Охарактеризуйте підсилювальні властивості БТ у схемі з СЕ.
6. Порівняйте й поясніть співвідношення між вхідними і вихідними опорами БТ у схемах із СБ і СЕ.
7. Наведіть схему СК і охарактеризуйте підсилювальні властивості БТ у цій схемі.
8. Дайте визначення вхідних, вихідних і передатних характеристик БТ у схемі СБ. Нарисуйте схему для зняття ВАХ у схемі СБ.
9. Наведіть та поясніть вхідні характеристики БТ зі схеми СБ.
10. Що таке ефект модуляції бази колекторною напругою і які його прояви?
11. Наведіть та поясніть вихідні характеристики БТ у схемі СБ.
12. Чим пояснюється невеликий нахил вихідних характеристик у схемі СБ?
13. На сімействі вихідних ВАХ покажіть області, які відповідають режиму відсічення, насичення й активному режиму.
14. Поясніть, чому в режимі насичення струм колектора I_k зменшується із зростанням колекторної напруги.
15. Що означає такий параметр БТ як допустима напруга колектора $U_{кб\ проб}$?

16. Дайте визначення вхідних і вихідних характеристик БТ у схемі СЕ. Наведіть схему для зняття ВАХ у схемі СЕ.
17. Наведіть та поясніть вхідні характеристики БТ у схемі СЕ.
18. Наведіть та поясніть вихідні характеристики БТ у схемі СЕ.
19. Покажіть та поясніть на вихідних характеристиках області, що відповідають режимам відсічення, насичення й активному режиму.
20. Порівняйте за величиною напруги пробою колекторного переходу в схемах СБ і СЕ.
21. Як змінюються характеристики БТ зі збільшенням температури?

4.3 Еквівалентні схеми транзистора. Параметри

Для вирішення багатьох задач, пов'язаних із розрахунками пристроїв, які містять транзистори, буває дуже зручним заміна БТ його схемною моделлю або еквівалентною схемою; що також називається схемою заміщення. Схема заміщення за визначених, задалегідь обговорених умов (режим за постійним струмом, частота й амплітуда змінного сигналу і т.д.) має властивості, подібні до розглянутого транзистора.

Фізична нелінійна модель Еберса – Молла показана на рис. 4.9.

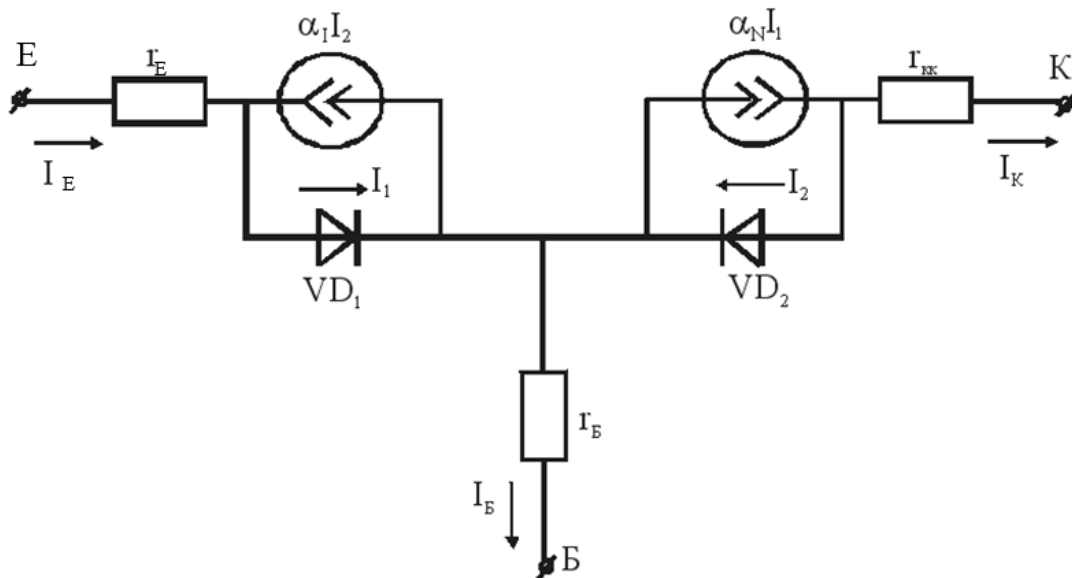


Рисунок 4.9 – Нелінійна модель Еберса – Молла біполярного транзистора

Емітерний перехід поданий тут діодом VD_1 , а колекторний – діодом VD_2 . Передача струму від емітерного до колекторного переходу врахована керованим генератором $\alpha_N I_1$, струм якого пропорційний струму I_1 емітерного діода VD_1 . Передача струму в інверсному напрямку врахована аналогічним

генератором $\alpha_1 I_2$, струм якого пропорційний струму колекторного діода VD_2 . Струми в зовнішніх виводах БТ визначаються у загальному випадку виразами:

$$I_e = \alpha_1 - \alpha_1 I_2; \quad I_k = \alpha_N I_1 - I_2. \quad (4.17)$$

Струми I_1 і I_2 подають у вигляді експоненціальних функцій типу (4.17) від напруг $U_{eб}$ і $U_{кб}$, що діють на переходах. Рівняння (4.17) дають практично повний опис ВАХ БТ.

Під час точних розрахунків іноді враховують опори нейтральних областей. У цьому випадку в схему вводять омичні опори області емітера r_{ee} , колектора $r_{кк}$ і бази r_b .

Отримана нелінійна модель дозволяє розрахувати струми БТ у кожному з режимів його роботи. Однак під час роботи БТ в активному режимі за малих рівнів сигналів можна використовувати більш прості лінійні моделі або еквівалентні схеми. Найбільш широко застосовується лінійна Т-подібна модель БТ.

Лінійна Т-подібна модель отримується шляхом лінеаризації моделі Еберса–Молла. При цьому необхідні перетворення зводяться до того, що:

По-перше, із схеми вилучають джерело струму $\alpha_1 I_2$, оскільки в активному режимі передача струму від колектора до емітера відсутня. Інше кероване джерело струму позначається αI_3 , оскільки за відсутності в колі емітера струму $\alpha_1 I_2$ можна покласти $I_1 = I_3$, й опустити підрядковий індекс N у позначенні коефіцієнта передачі струму ($\alpha_N = \alpha$).

По-друге, замінюються *p-n*-переходи БТ, який працює в малосигнальному режимі, їх диференціальними опорами. Працюючий при прямому зміщенні емітерний діод VD_1 замінюється опором r_e (десятки Ом), а зміщений у зворотному напрямку колекторний діод VD_2 – опором r_k порядку сотень кілоом – одиниць мегаом. З омичних опорів нейтральних областей БТ у схемі заміщення враховується звичайно тільки опір бази r_b .

В результаті зазначених перетворень Т-подібна схема заміщення БТ, включена з СБ, має вигляд, показаний на рис. 4.10, а.

Схема заміщення для БТ, включеного з СЕ (рис. 4.10, б), відрізняється від попередньої керованим джерелом струму (βI_b замість αI_e) і значенням диференціального опору у вихідному колі:

$$r_k^* = \frac{r_k}{\beta + 1}. \quad (4.18)$$

Транзистор як чотириполіусник. Малосигнальну схему заміщення БТ можна отримати також шляхом його формальної заміни лінійним чотириполіусником (рис. 4.11, а).

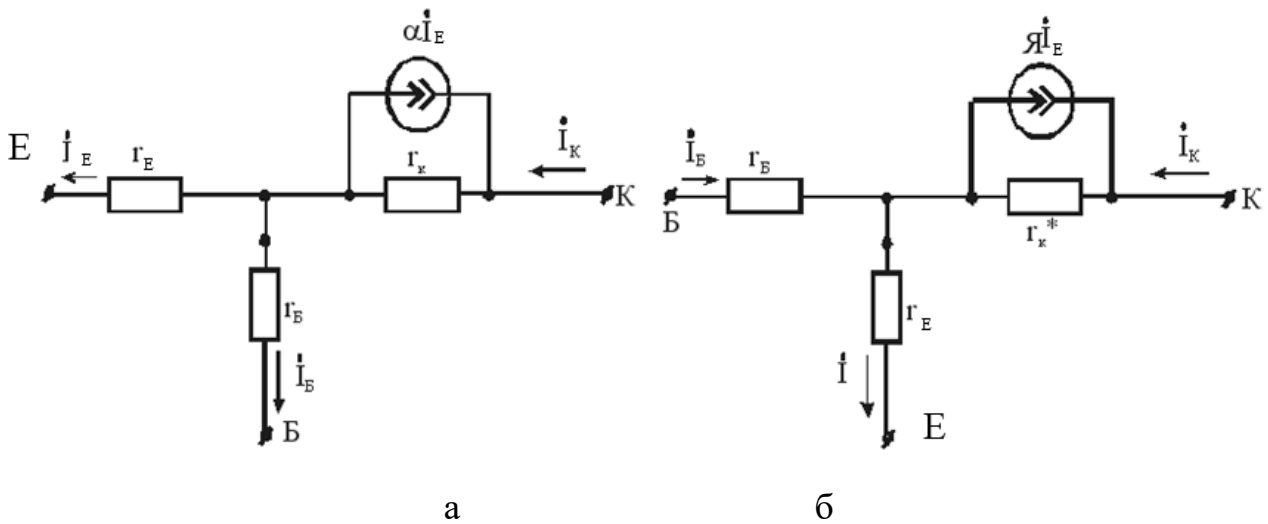


Рисунок 4.10 – Фізичні еквівалентні схеми транзистора для режиму малих змінних сигналів

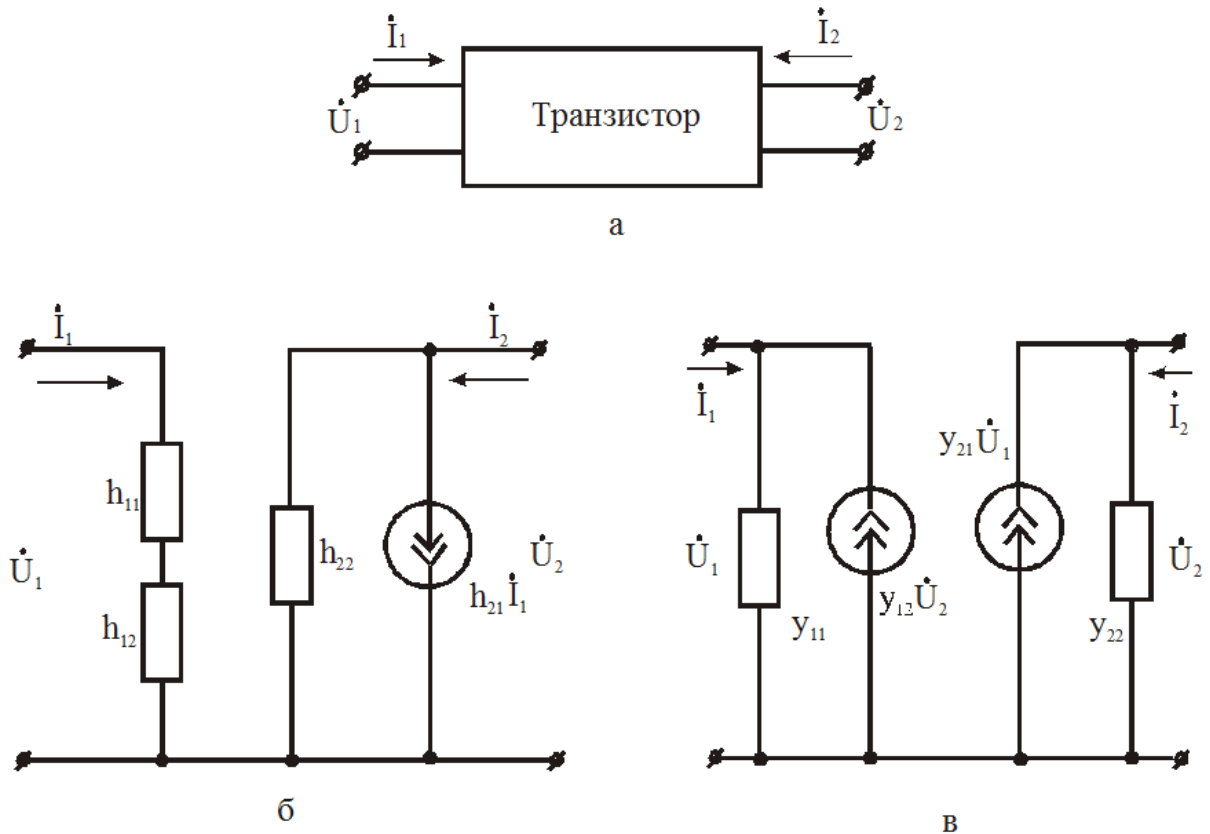


Рисунок 4.11 – Формальні еквівалентні схеми транзистора

З таким підходом внутрішні процеси в БТ не розглядають, вважаючи, що необхідний режим за постійним струмом забезпечений. Враховують тільки зв'язки між перемінними струмами і напругами в зовнішніх виводах. При цьому в схемі СБ струму \dot{I}_1 і напрузі \dot{U}_1 на вході чотирьохполюсника відповідають змінний струм \dot{I}_e і напруга \dot{U}_{e6} на виводі емітера, а для схеми СЕ –

струм бази \dot{I}_6 і напруга \dot{U}_{6e} . \dot{I}_2 і \dot{U}_2 в обох випадках відповідають струму та напрузі на колекторі.

Конкретний вигляд моделей БТ такого типу залежатиме від того, які дві з величин \dot{I}_1 , \dot{U}_1 , \dot{I}_2 , \dot{U}_2 прийняті як незалежні, а які як залежні. Найчастіше використовують два різновиди формальних моделей: системи h- і y-параметрів.

Еквівалентна схема БТ у системі h-параметрів. Якщо за незалежні змінні прийняти вхідний струм \dot{I}_1 і вихідну напругу \dot{U}_2 , то для залежних величин \dot{I}_2 і \dot{U}_1 отримують такі співвідношення:

$$\dot{U}_1 = h_{11}\dot{I}_1 + h_{12}\dot{U}_2; \quad \dot{I}_2 = h_{21}\dot{I}_1 + h_{22}\dot{U}_2. \quad (4.19)$$

Коефіцієнти у виразах (4.19) складають систему h-параметрів БТ. Кожний з цих параметрів має визначений фізичний зміст. Так, якщо в першому рівнянні (4.19) покласти $\dot{U}_2=0$, то параметр h_{11} визначається як вхідний опір БТ при короткому замиканні на виході: $h_{11}=\dot{U}_1/\dot{I}_1$ при $\dot{U}_2=0$. Подібним чином встановлюється фізичний зміст та інші параметри: $h_{12}=\dot{U}_1/\dot{U}_2$ при $\dot{I}_1=0$ – коефіцієнт зворотного зв'язку при холостому ході на вході; $h_{21}=\dot{I}_2/\dot{I}_1$ при $\dot{U}_2=0$ – коефіцієнт передачі струму при короткому замиканні на виході і $h_{22}=\dot{I}_2/\dot{U}_2$ при $\dot{I}_1=0$ – вихідна провідність при холостому ході на вході БТ. Схема заміщення БТ у системі h-параметрів містить чотири елементи і показана на рис. 4.11, б. Величини h-параметрів залежать від схеми включення БТ.

Еквівалентна схема БТ у системі Y-параметрів. Якщо як незалежні величини прийняти напруги на вході \dot{U}_1 та виході \dot{U}_2 , то чотириполосник, що заміщає реальний БТ, може бути описаний системою рівнянь:

$$\underline{I}_1 = Y_{11}\underline{U}_1 + Y_{12}\underline{U}_2; \quad \underline{I}_2 = Y_{21}\underline{U}_1 + Y_{22}\underline{U}_2. \quad (4.20)$$

Коефіцієнти у виразах (4.20) утворюють систему Y-параметрів. Всі Y-параметри мають розмірності провідності і визначаються в такий спосіб: $Y_{11} = \underline{I}_1/\underline{U}_1$ при $\dot{U}_2=0$ – вхідна провідність при короткому замиканні на виході; $Y_{12} = \underline{I}_1/\underline{U}_2$ при $\dot{U}_1=0$ – провідність зворотного зв'язку при короткому замиканні, на вході; $Y_{21} = \underline{I}_2/\underline{U}_1$ при $\underline{U}_2=0$ – провідність прямої передачі при короткому замиканні на виході; $Y_{22} = \underline{I}_2/\underline{U}_2$ при $\underline{U}_1=0$ – вихідна провідність у режимі короткого замикання на вході.

Так само, як і у випадку h-параметрів значення Y-параметрів залежать від схеми включення БТ. Схема заміщення БТ у системі Y-параметрів показана на рис. 2.11, в.

Експлуатаційні параметри транзистора. Біполярний транзистор може працювати в найрізноманітніших режимах, що відрізняються схемою включення, полярністю зміщень на переходах, рівнями, частотою та формою сигналів. Для повного опису його властивостей, потрібно кілька сотень параметрів.

Знати всі ці параметри, як правило, не потрібно, оскільки багато хто з них характеризує властивості БТ у рідко використовуваних режимах роботи.

Параметри БТ розділяють на три групи – гранично припустимі параметри, параметри номінальних режимів і функціональні параметри.

Гранично припустимі параметри – це параметри, що нормують умови експлуатації БТ. До них належать насамперед максимально припустима потужність розсіювання колектора $P_{к\ max}$; максимальний струм колектора $I_{к\ max}$; допустимі напруги на колекторі в схемі СБ ($U_{кб\ max}$) і в схемі СЕ ($U_{ке\ max}$) тощо. До групи гранично припустимих параметрів належать також величини, що обмежують показники зовнішнього середовища (температура, тиск, вологість) чи механічних впливів.

Параметри номінальних режимів визначають рекомендовані умови експлуатації (значення струмів і напруг), за яких забезпечуються найкращі показники роботи БТ. Найчастіше задаються номінальні значення струмів і напруг на колекторі для схем СБ і СЕ.

Функціональні параметри дають безпосередню характеристику властивостей БТ як елемента електронних схем. При цьому обов'язково враховується вид електричних сигналів, для перетворення яких використовується транзистор, і тип еквівалентної схеми. За видом сигналів виділяють три групи функціональних параметрів: низькочастотні, високочастотні й імпульсні (ключові) параметри.

Розглянемо низькочастотні (НЧ) параметри. Вони визначають властивості БТ як підсилювача гармонійних сигналів на таких частотах, коли не потрібно враховувати інерційність передачі струму в його структурі. За видом еквівалентних схем розрізняють три системи НЧ-параметрів.

Фізичні параметри – це номінали елементів Т-подібних схем заміщення, наведених на рис. 4.10,а,б. До основних фізичних НЧ-параметрів належать опори r_e , r_b , r_k і коефіцієнт передачі струму α . Інші елементи схем залежать від основних параметрів ($\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$, $r_k^* = r_k/(\beta+1)$).

Основна перевага фізичних НЧ-параметрів у тому, що вони не залежать від схеми включення транзистора, а визначаються тільки параметрами структури та режимом роботи приладу. Недолік цих параметрів – неможливість їх прямого виміру. Значення фізичних параметрів розраховують за структурою БТ або визначають за відомими h-параметрами. Під час практичних розрахунків можна скористатися, наприклад, такими наближеними формулами:

$$\alpha \cong h_{21b} ; \quad \beta \cong h_{21e} ; \quad r_k \cong \frac{1}{h_{22}} ; \quad r_k^* = \frac{1}{h_{22e}} , \quad (4.21)$$

де індексами «б» і «е» позначені значення h -параметрів відповідно для схеми СБ і СЕ. Виключення складає опір емітеру r_e , який однозначно визначається струмом I_e в точці спокою А:

$$r_e = \varphi_T / I_{eA}. \quad (4.22)$$

h -параметри (рис. 4.11, б) є єдиними малосигнальними параметрами, які у заданій робочій точці можна визначити безпосередньо за статичними характеристиками БТ.

Внаслідок зручності практичного визначення h -параметри широко використовують під час розрахунків електронних схем, що працюють на НЧ.

U -параметри (рис. 4.11, в) визначають зазвичай розрахунковим шляхом за відомими фізичними чи h -параметрами. Основна область їхнього застосування – розрахунок підсилювальних каскадів, що працюють на високих частотах (ВЧ).

В ході використання БТ слід враховувати, що всі його параметри залежать від режиму роботи та температури.

Залежність параметрів БТ від режиму роботи, тобто від положення робочої точки, пояснюється нелінійністю його статичних ВАХ. Для прикладу на рис. 4.12 наведено залежності опору емітера r_e і коефіцієнта передачі струму α від струму емітера I_E , які мають найбільш практичне значення, чи що те саме, струму колектора $I_K \approx I_E$.

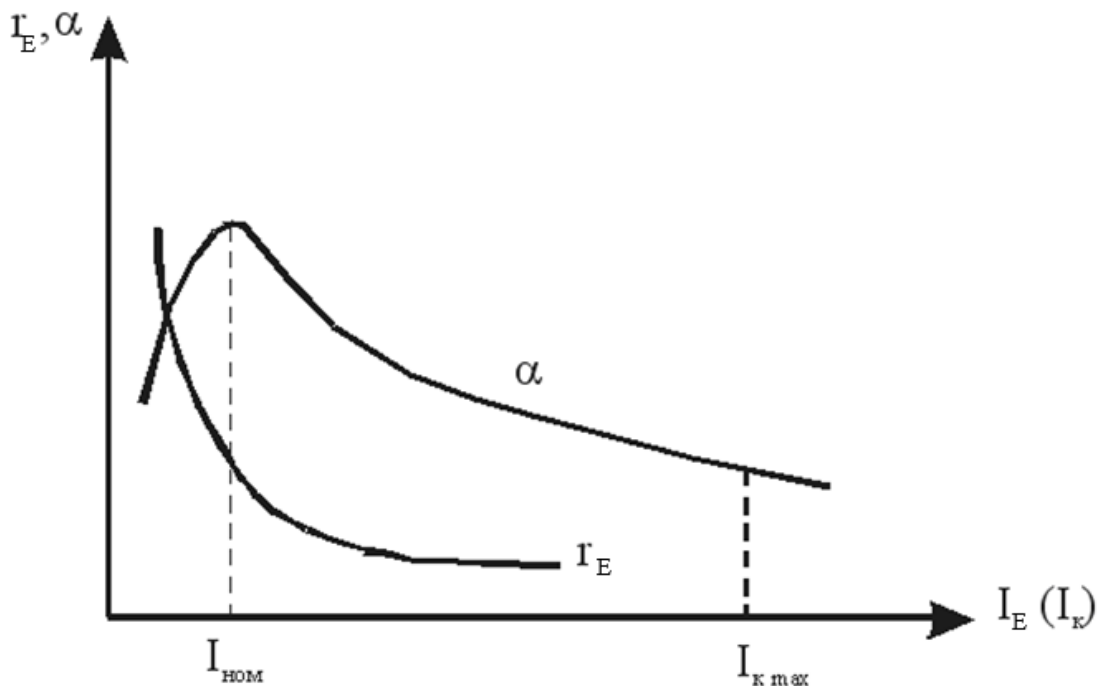


Рисунок 4.12 – Залежність r_e та α транзистора від струму I_e (I_K)

Диференціальний опір емітера, що може бути розрахований за формулою (4.21), зменшується із зростанням струму I_{EA} . Це призводить до зменшення вхідного опору транзистора і погіршує умову узгодження джерела корисних сигналів із входом підсилювального каскаду.

Коефіцієнт передачі струму α , а також і коефіцієнт $\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$ для схеми з СЕ досягає визначеного значення з визначеним струмом $I_{ном}$, що називається номінальним струмом БТ. З меншими струмами БТ (мікрорежим) чи при перевантаженні БТ ($I_{КА} > I_{ном}$) підсилювальні властивості каскаду погіршуються. Так, зокрема, введене вище обмеження для струму колектора $I_{КА} \leq I_{К \max}$ пов'язано саме з цим явищем. Залежність коефіцієнта α від I_{EA} в області малих струмів знаходить у деяких випадках і корисне застосування.

Залежність параметрів БТ від температури має подвійну природу. Існує первинна залежність параметрів, пов'язана з мінливістю електричних властивостей напівпровідникових кристалів концентрації носіїв, їх рухливості й часу життя в діапазоні температур. До залежності такого роду належить, наприклад, те, що з підвищенням температури коефіцієнти підсилення струму бази β у більшості БТ збільшуються. З цієї ж причини спостерігається зростання зворотних струмів БТ (I_{EO} і I_{KO}) під час збільшення температури.

Первинну температурну нестабільність параметрів БТ цілком усунути неможливо. Водночас існує і вторинна температурна нестабільність. Вона пов'язана з тим, що, в ході зміни температури, змінюється положення робочої точки БТ і виникають відповідні зміни параметрів. При цьому змінюється режим роботи БТ і виникають відповідні зміни параметрів. Вторинна температурна нестабільність може бути усунута цілком, якщо вжити заходів з термостабілізації робочої точки БТ.

Запитання й завдання для самоперевірки

1. Що називають схемою заміщення (схемною моделлю) транзистора?
2. Наведіть фізичну нелінійну модель Еберса–Молла та поясніть фізичний зміст її елементів.
3. У яких режимах роботи можна замінити БТ моделлю Еберса–Молла?
4. Для яких режимів роботи БТ модель Еберса–Молла замінюється лінійною Т-подібною схемною моделлю?
5. Наведіть Т-подібну схему заміщення БТ для включення в схему СБ і поясніть фізичний сенс її елементів.

6. Наведіть Т-подібну схему заміщення БТ для включення за схемою СЕ і поясніть фізичний сенс її елементів.
7. Для яких режимів роботи транзистор представляють лінійним чотириполосником?
8. Які чотири фізичні величини описують властивості чотириполосника?
9. При якому виборі незалежних змінних отримують рівняння чотириполосника в системі h -параметрів?
10. Наведіть рівняння БТ у системі h -параметрів і поясніть фізичний сенс h -параметрів.
11. Наведіть схему заміщення БТ у системі h -параметрів.
12. Чи залежать значення h параметрів від схеми включення БТ?
13. При якому виборі незалежних параметрів отримують рівняння чотириполосника в системі Y -параметрів?
14. Наведіть рівняння БТ у системі Y -параметрів і поясніть фізичний сенс Y -параметрів.
15. Наведіть схему заміщення БТ у системі Y -параметрів.
16. Чи залежить значення Y -параметрів від схеми включення БТ?
17. Які параметри БТ називають гранично припустимими?
18. Наведіть приклади гранично припустимих параметрів БТ.
19. Які параметри БТ називають параметрами номінальних режимів?
20. Наиведіть приклади параметрів номінальних режимів БТ.
21. Які параметри БТ називають функціональними?
22. Які параметри БТ називають фізичними?
23. Чи залежить значення фізичних параметрів БТ від схеми його включення?
24. Наведіть придатний для практичних розрахунків зв'язок фізичних і h -параметрів БТ.
25. Які параметри БТ можна безпосередньо змінити: фізичні, h -параметри чи Y -параметри?
26. Чи залежать параметри БТ від режиму його роботи?
27. Нарисуйте та поясніть залежність диференціального опору емітера r_E від постійного струму емітера I_E .
28. Нарисуйте та поясніть залежність коефіцієнта передачі за струмом від постійного струму емітера.
29. Як пояснити первинну залежність параметрів БТ від температури?
30. Чим викликана вторинна залежність параметрів БТ від температури?
31. Яку температурну залежність параметрів первинну чи вторинну можна істотно зменшити?

4.4 Частотні і шумові властивості транзисторів. Частотні властивості БТ

Під час роботи зі змінними сигналами високих частот малосигнальні параметри транзистора стають частотно залежними величинами, підсилення електричних сигналів погіршується, з'являються перекручування форми сигналів.

Основні причини залежності параметрів БТ від частоти – *інерційність руху носіїв у базі і ємності структури*.

Інжектвані в базу носії переміщуються в напрямку колектора в результаті порівняно повільної дифузії. При цьому для кожного взятого БТ можна вказати кінцевий час «прольоту» $t_{пр}$, за який основні носії встигають досягти колекторного переходу. Величина цього часу залежить від ширини бази W_5 і рухливості носіїв у базових областях.

Якщо період повторення T_c посилюваного сигналу задовольняє умову $T_c \gg t_{пр}$, то інерційність руху носіїв практично не позначається на величинах параметрів T . За умови $T_c \approx t_{пр}$ чи навіть $T_c < t_{пр}$ носії заряду не встигають досягти колектора протягом періоду, час їхнього перебування в базі зростає. Внаслідок цього коефіцієнти передачі струму α і β зменшуються в зв'язку із зростанням струму рекомбінації.

З достатньою для практики точністю залежно від частоти коефіцієнти передачі струму в БТ описуються функціями:

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + j \frac{f}{f_\alpha}}; \beta = \frac{\beta_0}{1 + j \frac{f}{f_\beta}}, \quad (4.23)$$

де α_0 – коефіцієнт передачі струму в схемі СБ на низькій частоті;

β_0 – коефіцієнт передачі (підсилення) струму в схемі СЕ;

$f = \frac{1}{T_c}$ – частота посилюваного сигналу;

f_α , f_β – частотні параметри БТ, називані *граничними частотами* в схемі СБ (f_α) і СЕ (f_β).

На підставі виразів (4.22) можна отримати амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) транзистора, які є залежністю модулів коефіцієнтів α і β від частоти. Ці характеристики показані на рис. 4.13. Відповідно до цих графіків граничні частоти f_α і f_β визначаються як частоти, на яких модулі коефіцієнтів α і β зменшуються в $\sqrt{2}$ раз (чи до $0,7\alpha_0$ і $0,7\beta_0$) порівняно з низькочастотними значеннями α_0 і β_0 . Величина f_α і f_β є найважливішими параметрами БТ.

Гранична частота для схеми СБ:

$$f_{\alpha} \cong \frac{1}{t_{\text{пр}}} \quad (4.24)$$

зростає зі зменшенням ширини бази і з підвищенням рухливості носіїв заряду.

Гранична частота для схеми СЕ:

$$f_{\beta} = \left(\frac{f_{\alpha}}{1 + \beta_0} \right) < f_{\alpha}. \quad (4.25)$$

Важливою є також частота f_T , названа частотою одиничного підсилення або *граничною частотою*. На частоті f_T модуль коефіцієнта передачі (підсилення) $\beta = 1$.

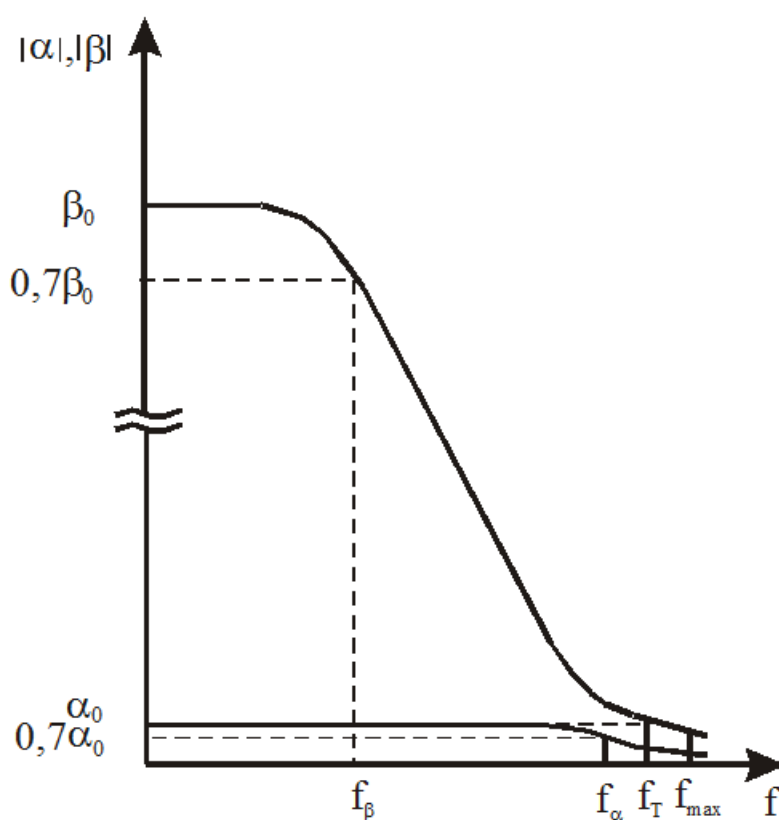


Рисунок 4.13 – Частотні характеристики транзистора

До ємнісних елементів, які впливають на частотні властивості БТ, належать ємності емітерного C_e і колекторного C_k переходу, а також паразитна ємність монтажу C_m , що підключається до колекторного виводу транзистора.

Еквівалентні схеми транзистора в схемі СБ, що працює на ВЧ, показана на рис. 4.14, а, а в схемі СЕ – на рис 4.14, б. Із зростанням частоти сигналу опір ємнісних елементів зменшується і вони починають шунтувати переходи транзистора. Особливо впливає на частотні властивості БТ бар'єрна ємність колектора C_k . Через опір r_b ємність C_k включена паралельно навантаженню

(навантаженню R_H у колі колектора). На ВЧ опір кола $C_K r_b$ знижується і через неї відгалужується значна частина вихідного струму, не потрапляючи в навантаження. Одночасно, через r_b частина колекторної напруги попадає на вхід БТ, що не тільки знижує підсилення, але може зробити роботу підсилювального каскаду хитливою.

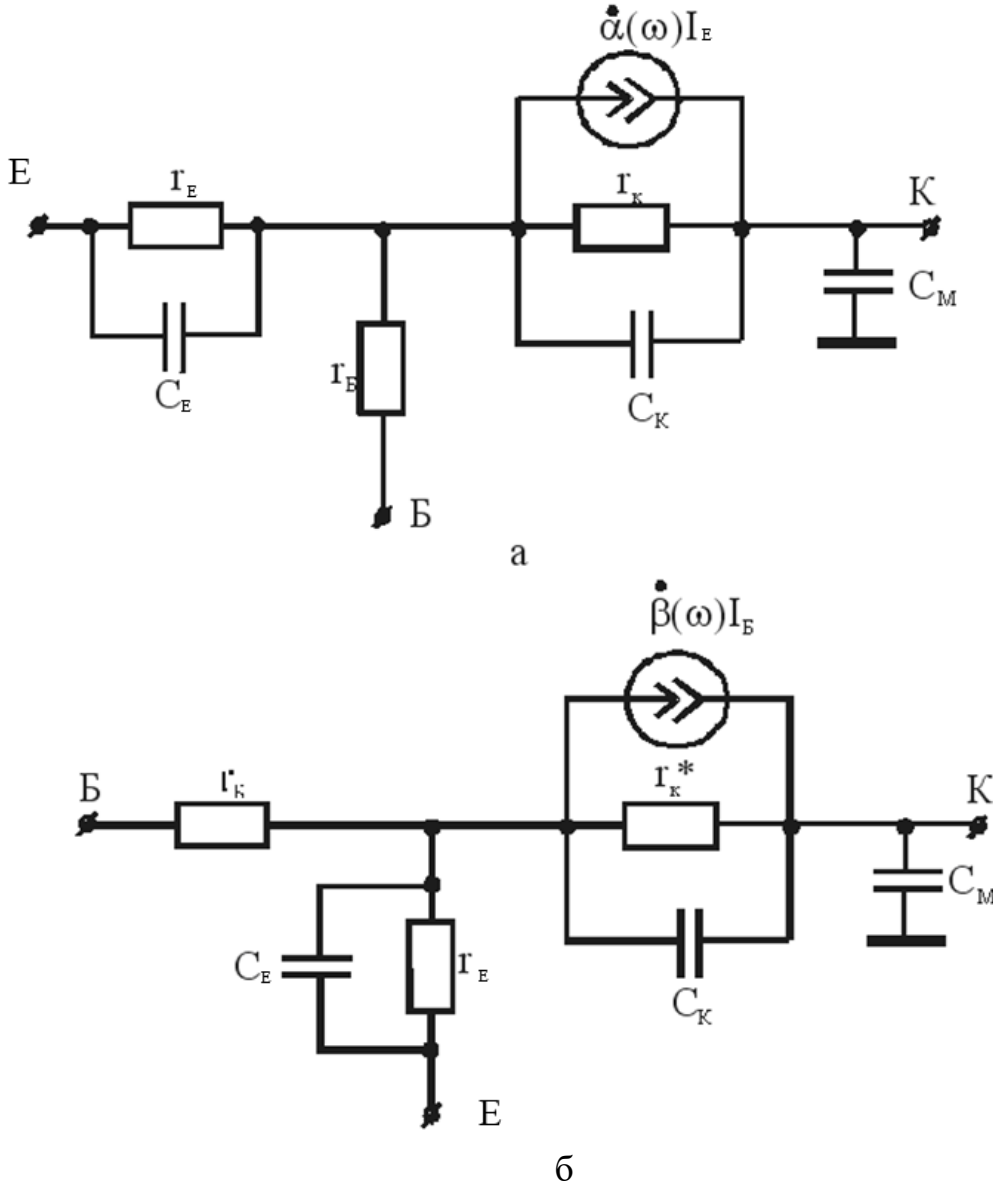


Рисунок 4.14 – Еквівалентні схеми транзистора на високих частотах

Ємність C_K і опір r_b визначають такий найважливіший показник БТ як *максимальна частота*:

$$f_{\max} = \sqrt{\frac{\alpha_0 f_\alpha}{4r_b C_K}}. \quad (4.26)$$

На частоті f_{\max} коефіцієнт підсилення транзистора за потужністю $K_p = 1$. Якщо частота сигналу $f < f_{\max}$, то $K_p > 1$ і транзистор поводить себе як підсилювальний елемент. Використовувати транзистор для підсилення чи

генерації сигналів на частотах $f > f_{\max}$ даремно, тому що для будь-якої системи його включення $K_p < 1$.

З наведеного опису частотних властивостей БТ впливає, що для розширення його робочого діапазону частот необхідно зменшувати ширину бази, збільшувати рухливість носіїв і зменшувати загальні розміри структури, що призводить до зменшення ємності переходів.

Так, внаслідок більш високої рухливості електронів порівняно з дірками кращі частотні властивості мають транзистори типу *n-p-n*. Істотне (на один–два порядки) розширення робочих діапазонів частот досягається в дрейфових транзисторах.

Дрейфові транзистори – це такі БТ, у базових областях яких створено електричне поле, яке прискорює рух носіїв від емітера до колектора. Прискорююче поле у базі призводить до зменшення часу *прольоту* $t_{\text{пр}}$ і до відповідного збільшення *граничної частоти* f_{α} (4.24). Одночасно з цим поліпшуються і підсилювальні властивості БТ, оскільки при меншому часі прольоту велика частина інжекттованих носіїв встигає дійти до колектора без рекомбінації. За іншими показниками дрейфові БТ аналогічні розглянутим вище бездрейфовим приладам.

Прискорююче поле у дрейфових транзисторах створюється в результаті нерівномірного розподілу домішок у їх базових областях. Структура та методи формування дрейфових БТ описані в підрозділі 4.6.

Залежно від робочого діапазону частот БТ підрозділяють на низькочастотні ($f_{\alpha} < 3$ МГц), середньочастотні (3 МГц $< f_{\alpha} < 30$ МГц), високочастотні (30 МГц $< f_{\alpha} < 300$ МГц) і надвисокочастотні ($f_{\alpha} > 300$).

Шумові властивості транзисторів. У багатьох галузях застосування електронної апаратури (радіозв'язок, радіолокація, електронні вимірювальні пристрої тощо) приходиться приймати й обробляти сигнали з гранично низькими рівнями. Одним із показників якості такої апаратури є її чутливість, обумовлена найменшими рівнями сигналів, що надійно виявляються.

Чутливість радіоелектронної апаратури на НПП обмежується тим, що всі прилади, і зокрема, транзистори, самі є джерелами слабких змінних сигналів.

Навіть при точно постійних напругах на електродах БТ його струми мають малі випадкові коливання, що називаються флуктуаціями. Ці флуктуації підсилюються в наступних каскадах і відтворюються звуковідтворюючими пристроями у вигляді шуму. Тому вони називаються шумами.

Шуми становлять випадкові зміни струмів транзистора, їхня амплітуда та висота не є визначеними. Тому шуми характеризують середнім квадратом

діючого значення шумового струму $I_{ш}^2$ чи напруги $U_{ш}^2$, який пропорційний середній потужності цих коливань. Залежно від фізичних причин, що викликають флуктуації струмів, розрізняють наступні різновиди шумів.

Теплові шуми обумовлені тепловим хаотичним рухом носіїв заряду. Вони виникають на затисках будь-якого резистора і пропорційні його величині:

$$U_{шт}^2 = 4 k T R \Delta f, \quad (4.27)$$

де k – постійна Больцмана;

T – температура резистора R ;

Δf – смуга частот, у якій вимірюється шум.

Потужність теплових шумів не залежить від частоти. Вони становлять суму випадкових коливань різноманітних частот від дуже низьких до надвисоких. Тому говорять, що теплові шуми мають «білий» частотний спектр. Оскільки з трьох областей транзистора – емітера, колектора, бази – найбільший опір має база, вона вносить найбільший вклад у тепловий шум.

Дробові шуми емітерного та колекторного переходів обумовлені тією обставиною, що електричний струм створюється дискретними, окремими зарядами («дробинками») і число тих зарядів, які проходять через переходи, не є постійним у часі.

Шуми струморозподілу зв'язані із флуктуаціями розподілу емітерного струму між колектором і базою. Спектр цих шумів так само, як і дробових – «білий».

Низькочастотні шуми типу $\frac{1}{f}$ визначаються флуктуаціями, головним чином, поверхневої електропровідності напівпровідника (хаотично змінюється в часі кількість носіїв заряду). Такі шуми найбільш інтенсивні в області низьких частот і істотно залежать від стану поверхні напівпровідника. Іноді їх називають надлишковими чи «рожевими» шумами. Із зростанням частоти потужність надлишкових шумів зменшується, і на частотах у декілька кілогерц у транзисторі переважають теплові та дробові шуми.

Оцінку шумових властивостей транзистора роблять за коефіцієнтом шуму $K_{ш}$. Щоб зрозуміти фізичний зміст цього параметра, слід взяти до уваги, що будь-яке джерело вхідного сигналу з внутрішнім опором R_C , шумить (4.27). Ці шуми транзистор сприймає як змінний сигнал потужністю $P_{шс}$ і підсилює їх. Якби сам транзистор не шумів, на виході його була б тільки посилена ним потужність вхідних шумів $K_p P_{шс}$ (K_p – коефіцієнт підсилення транзистора за потужністю). Але, оскільки транзистор вносить свій внесок у шуми, то потужність шумів на його виході $P_{ш\text{вих}}$ більша, ніж $K_p P_{шс}$.

Коефіцієнт шуму визначають як відношення потужності шумів на виході транзистора $P_{Ш\text{вих}}$ до посиленої транзистором потужності шумів джерела вхідного сигналу $P_{ШС}$:

$$K_{Ш} = \frac{P_{Ш\text{вих}}}{K_p P_{ШС}} > 1. \quad (4.28)$$

Іноді коефіцієнт шуму виражається не в безрозмірних одиницях, а в децибелах, тоді:

$$K_{Ш} = 10 \lg \frac{P_{Ш\text{вих}}}{K_p P_{ШС}}. \quad (4.29)$$

Коефіцієнт шуму є меншим у тих транзисторів, в яких малий опір бази r_b і високий коефіцієнт підсилення струму бази β .

$K_{Ш}$ залежить від вибору режиму роботи транзистора: він зменшується зі зменшенням струму емітера. Від колекторної напруги $K_{Ш}$ залежить слабо. Існує деякий оптимальний опір джерела вхідного сигналу $R_{с.опт}$, за якого $K_{Ш}$ мінімальний. У більшості випадків значення $R_{с.опт}$ знаходиться в межах 0,5...1 кОм.

Залежність $K_{Ш}$ від частоти показана на рис. 4.15. На частотах $f < f_1$ переважають низькочастотні надлишкові шуми. У діапазоні $f_1 < f < f_2$ $K_{Ш}$ не залежить від частоти. Збільшення коефіцієнта шуму при $f > f_2$ пояснюється погіршенням підсилювальних властивостей транзистора в області ВЧ.

Оскільки з підвищенням частоти коефіцієнт підсилення сигналу за потужністю K_p зменшується (4.28), то навіть при постійній вхідній $P_{ШС}$ і внутрішньому шумі транзистора його коефіцієнт шуму збільшуватиметься.

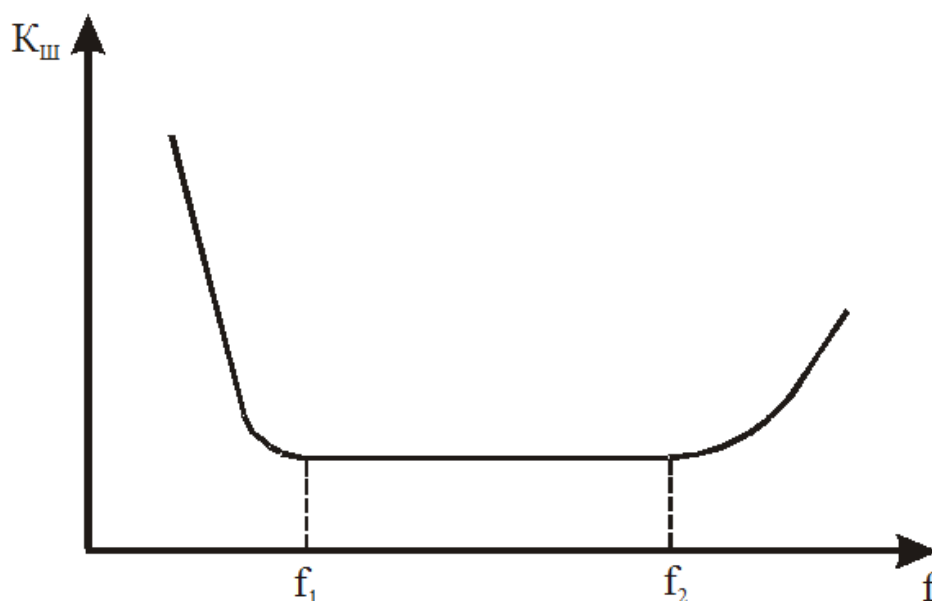


Рисунок 4.15 – Залежність коефіцієнта шуму транзистора від частоти

Запитання й завдання для самоперевірки

1. Як змінюються властивості транзисторів під час підвищення робочої частоти сигналів?
2. Назвіть причини зміни властивостей транзистора на високих частотах.
3. Що називають часом «прольоту» $t_{пр}$ неосновних носіїв у базі БТ?
4. За яких співвідношень між періодом колювання змінного сигналу T_c і часом прольоту $t_{пр}$ спостерігається зниження підсилення в БТ?
5. Наведіть формулу, що визначає залежність коефіцієнта передачі струму БТ від частоти у схемі СБ і поясніть її.
6. Наведіть формулу, яка визначає залежність від частоти коефіцієнта підсилення за струмом БТ у схемі СЕ і поясніть її.
7. Поясніть фізичний сенс таких частотних параметрів БТ, як гранична частота для схеми СБ – f_α , і для схеми СЕ – f_β .
8. Який зв'язок існує між часом «прольоту» неосновних носіїв у базі $t_{пр}$ і граничної частоти f_α ?
9. Порівняйте між собою граничні частоти БТ у схемі СБ – f_α і в схемі СЕ – f_β .
10. Поясніть фізичний зміст такого частотного параметра БТ як гранична частота f_T .
11. Нарисуйте та поясніть амплітудно-частотні (АЧХ) характеристики БТ для схеми СБ і схеми СЕ. Покажіть на них частоти f_α , f_β і f_T .
12. Які ємності транзистора впливають на його властивості на високих частотах?
13. Наведіть і поясніть Т-подібну еквівалентну схему БТ для включення з СБ на високих частотах.
14. Наведіть до пояснення Т-подібну еквівалентну схему БТ для включення з СЕ на високих частотах.
15. В чому полягає вплив ємностей БТ на його підсилювальні властивості на високих частотах?
16. Яка з ємностей БТ впливає на його властивості на високих частотах?
17. Поясніть фізичний зміст такого частотного параметра БТ як максимальна частота?
18. Наведіть і поясніть вираз для максимальної частоти БТ.
19. Чому використання БТ на частотах $f > f_{max}$ не має сенсу?
20. Покажіть частоту f_{max} на АЧХ транзистора.

21. Аналізуючи вираз для f_{\max} , поясніть які зміни в структурі БТ необхідно провести, щоб зробити транзистор більш високочастотним.

22. Чому БТ типу $n-p-n$ більш високочастотні, ніж БТ типу $p-n-p$ (за інших однакових умов)?

23. Які транзистори називають дрейфовими?

24. На які групи поділяються БТ залежно від робочого діапазону частоти?

25. Що називають флуктуаціями струму БТ?

26. Що називають шумами БТ?

27. Якими значеннями струмів і напруг характеризують БТ?

28. Які шуми називають тепловими?

29. Напишіть і поясніть вирази для квадрата напруги теплових шумів.

30. Як слід розуміти вираз – «білий» частотний спектр?

31. Який з опорів структури БТ вносить найбільший вклад у тепловий шум?

32. Які шуми називають дробовими?

33. З якими фізичними процесами в БТ зв'язані шуми струморозподілу?

34. З якими фізичними процесами БТ зв'язані низькочастотні шуми типу $\frac{1}{f}$?

35. Запишіть і поясніть вирази для коефіцієнта шуму $K_{\text{ш}}$ транзистора.

36. Запишіть вираз для коефіцієнта шуму $K_{\text{ш}}$ транзистора в децибелах.

37. Як коефіцієнт шуму БТ залежить від режиму його роботи – величини струму емітера та напруги колектора?

38. Як залежить коефіцієнт шуму БТ від таких параметрів структури БТ як опір бази r_b і коефіцієнт підсилення струму бази β ?

39. Як залежить коефіцієнт шуму БТ від внутрішнього опору джерела вхідного сигналу?

40. Як залежить коефіцієнт шуму БТ від частоти?

4.5 Різновиди транзисторів

Промисловість випускає велику кількість різновидів БТ, які відрізняються своїми експлуатаційними властивостями та параметрами. Оскільки реальні властивості БТ залежать від безлічі факторів – дати їх повну та точну класифікацію важко. Зробимо загальний огляд основних різновидів БТ, у ході виділення яких враховувалися основні структури, технологічні й експлуатаційні показники.

За типом робочого матеріалу виділяють групи германієвих, кремнієвих, арсенід галієвих БТ. Основні розходження між приладами зазначених груп – у допустимій робочій температурі, що пов'язано з розходженням вихідних матеріалів у ширині забороненої зони. При цьому, якщо германієві транзистори можуть працювати при $T_p \leq 70 \dots 90^\circ\text{C}$, то для кремнієвих і арсенід галієвих транзисторів цей показник досягає відповідно $120 \dots 150^\circ\text{C}$ та $200 \dots 250^\circ\text{C}$.

За механізмом передачі струму в структурі розрізняють бездрейфові та дрейфові транзистори. Властивості бездрейфових БТ докладно розглянуто раніше.

Дрейфові транзистори – це такі БТ, у базових областях яких створено електричне поле, яке прискорює рух носіїв від ЕП до КП. Дія прискорюючого поля призводить до зменшення часу «прольоту» носіїв через базу $t_{пр}$ і до відповідного збільшення граничних частот f_α і f_β . Одночасно з цим істотно поліпшуються і підсилювальні властивості БТ, оскільки при меншому часі прольоту велика частина інжектованих носіїв встигає дійти до колектора без рекомбінації. За іншими показниками дрейфові БТ аналогічні раніше розглянутим бездрейфовим приладам (див. підрозд. 4.1–4.4).

Прискорююче поле у базі дрейфових транзисторів має дифузійну природу і створюється в результаті нерівномірного розподілу домішок у їхніх базових областях. Структури і методи формування дрейфових БТ описано далі.

За електропровідністю робочих областей розрізняють транзистори *p-n-p*-і *n-p-n*-типу. Розходження у властивостях цих транзисторів визначається тим, що робочими носіями в *n-p-n*-структурах є електрони, які мають більш високу рухливість порівняно з дірками. Тому транзистори *n-p-n*-типу мають кращі підсилювальні і частотні властивості.

Технологічні різновиди БТ. У ході виробництва дискретних БТ найчастіше використовуються прийоми сплавної, дифузійної і епітаксialної технології. З конструктивно-технологічних різновидів БТ найбільш широке застосування знаходять сплавні, дифузійно-сплавні і планарні, мезо-планарні і планарно-епітаксialні транзистори.

Сплавні транзистори виготовляють методом сплавлення *p-n*-переходів. Як вихідний матеріал для таких транзисторів найчастіше використовують германій. Типова структура сплавного транзистору і розподіл у ньому легуючих домішок показано на рис. 4.16, а, б.

У ході оцінки властивостей сплавних БТ насамперед необхідно врахувати, що під час їхнього виробництва використовуються вихідні напівпровідникові кристали (підкладки) із рівним розподілом домішок. Оскільки після вплавлення емітера й колектора вони утворюють базу транзистора,

розподіл домішок у базі виявляється рівномірним (лінія $N_{об}$ на рис. 4.16, б). Такі транзистори – класичний приклад БТ із бездрейфовим механізмом передачі струму від емітера до колектора.

Сплавні транзистори (рис. 4.16, б) мають різкі $p-n$ -переходи, утворені сильнолегованими областями емітера та колектора. Такі переходи мають невелику ширину та відрізняються порівняно невисокими зворотними напружками. Інша особливість – підвищене значення бар'єрної ємності колектора. У зв'язку з приблизно однаковою концентрацією акцепторної домішки в емітері $N_{аЕ}$ і колекторі $N_{аК}$ обидва переходи сплавного транзистора мають приблизно однакові інжекційні властивості. Тому порівняно з іншими типами БТ ці транзистори більш пристосовані до роботи в інверсному активному режимі.

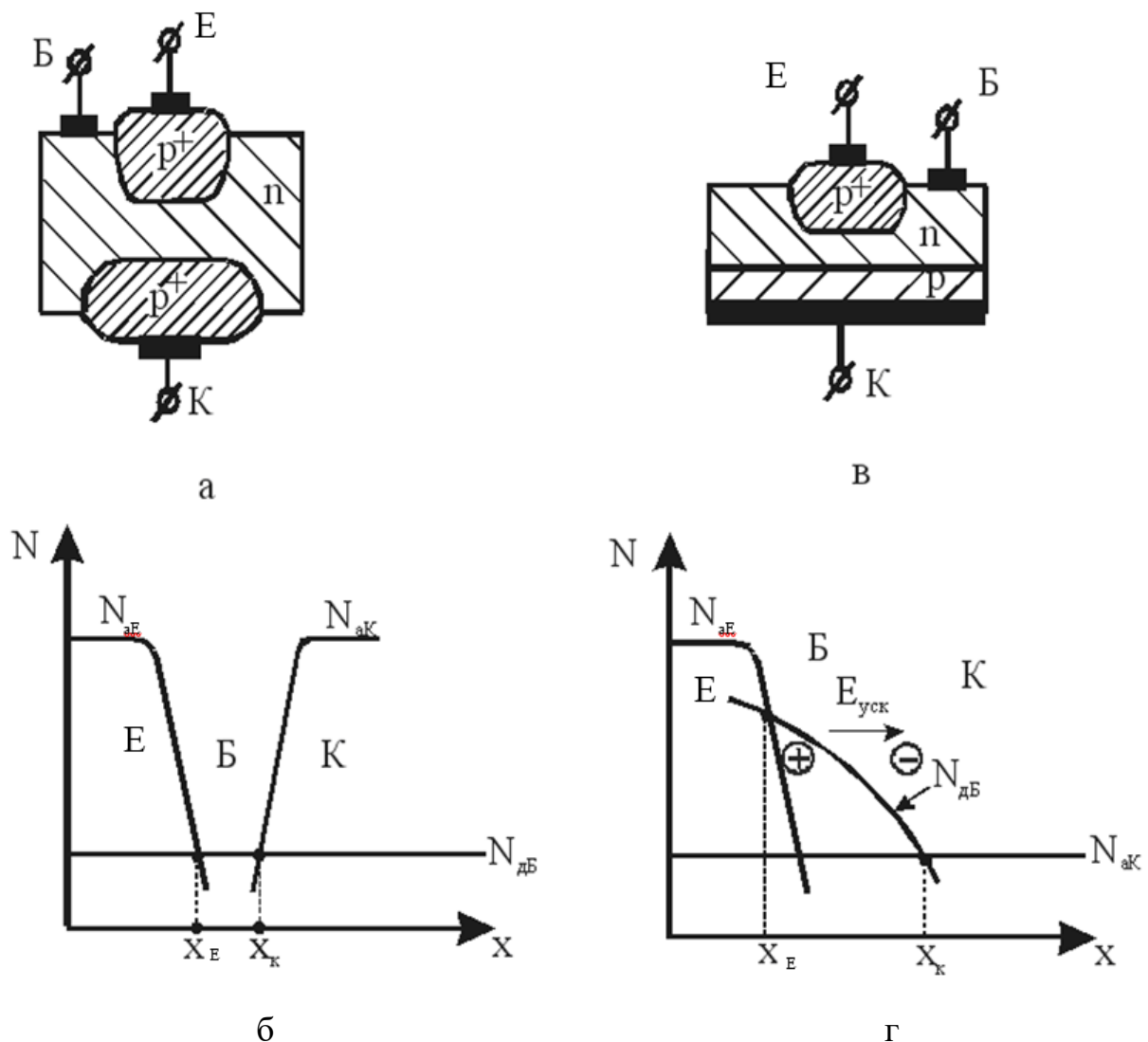


Рисунок 4.16 – Сплавні (а, б) і дифузійно-сплавні (в, г) транзистори

Під час вплавлення $p-n$ -переходів дуже важко забезпечити однорідність їхніх фронтів, тому профіль $p-n$ -переходу реального сплавного транзистора

відрізняється від ідеальної плоскої форми. Отримати сплавні транзистори з дуже тонкою базою неможливо через небезпеку сплавки емітерної та колекторної областей. З цієї причини сплавні транзистори, особливо при великих площах переходів, мають базові області шириною порядку 10...15 мкм, що порівняльно з дифузійною довжиною носія в кристалі. Тому сплавні транзистори, як правило, є низькочастотними. Інша причина обмеження діапазону робочих частот сплавних транзисторів – інерційність бездрейфового механізму передачі струму між переходами та значні ємності переходів.

Дифузійно-сплавні БТ є транзисторами з дрейфовим механізмом передачі струму. Приклад такого БТ і розподіл домішок у ньому показано на рис. 4.16, в, г. Їхні структури формують у наступному порядку. Спочатку у вихідній пластині *p*-типу з концентрацією акцепторів N_{AK} методом дифузії створюють базову *n*-область глибиною 10...15...15 мкм. Розподіл домішок у цій *n*-області виходить нерівномірним (лінія N_{EB} на рис. 4.16, г). Потім у цій області методом сплавної технології формують емітерний перехід.

У дифузійно-сплавних транзисторах, як і в сплавних, важко створити тонку базу. Основна їхня перевага – наявність прискорюючого поля в базовій області, що поліпшує їхні частотні властивості порівняно зі сплавними БТ. Це поле має дифузійну природу і виникає завдяки нерівномірному розподілу домішок у базі (рис. 4.16, г і пояснення в п. 4.4). Інша перевага дифузійно-сплавних транзисторів – висока електрична міцність КП, що пояснюється малою концентрацією домішок у колекторі.

Планарні транзистори є іншим прикладом дрейфових БТ, у ході виробництва яких використовується дифузійна технологія. Відмінна риса їхньої структури – вихід усіх робочих областей на ту саму сторону кристала. Технологічні етапи формування планарного транзистора показані на рис. 4.17.

На першому етапі (рис. 4.17, а) вихідну пластину кремнію *n*-типу поміщають в атмосферу пару води чи кисню, де вона покривається плівкою двоокису кремнію товщиною не більш 1 мкм. Ця плівка надійно захищає кристал від дифузії чужорідних домішок із навколишнього середовища. Якщо яким-небудь чином, наприклад, методом фотолітографії, у плівці Si_2 розкрити «вікно», то через нього можна проводити локальну дифузію домішок, створюючи робочі області БТ.

На другому етапі процесу вікно розкривають під базову область планарного транзистора (рис. 4.17, б) і проводять через нього дифузію акцепторів. Завдяки цьому створюється базова *p*-область БТ. Потім знову окислюють поверхню кристала (рис. 4.17, в) і в плівці, що утворилася,

розкривають вікно (рис. 4.17, г). Проводять дифузію донорів на меншу глибину і створюють емітерну n^+ -область (рис. 4.17, д).

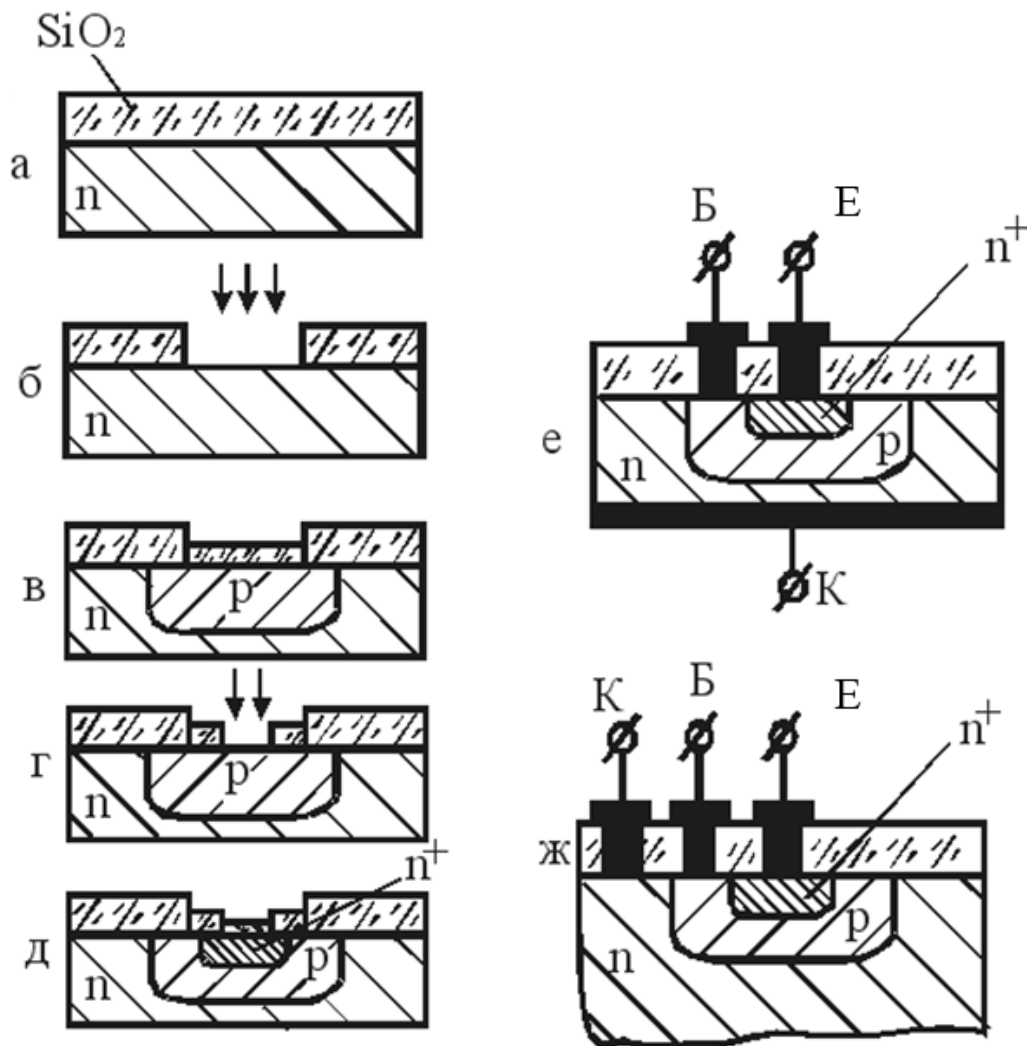


Рисунок 4.17 – Технологія (а–д) і структури (е–ж) планарного транзистора

Потім у діелектрику протравлюють вікна для омичних контактів. Якщо омичні контакти лежать у двох площинах, отримують двосторонню структуру (рис. 4.17, е). В другому варіанті планарного транзистора (рис. 4.17, ж) усі його омичні контакти формують на верхній поверхні кристалу. Така структура характерна для БТ, використовуваних в інтегральних мікросхемах.

У планарному транзисторі межі p - n -переходів, що виходять на поверхню, виявляються під шаром діелектрика, який служить захистом від зовнішніх впливів і виключає струми витoku.

Планарна технологія дозволяє істотно поліпшити параметри транзисторів, особливо їхні частотні характеристики. Добре контрольоване легування методом дифузії разом із точними методами фотолітографії дозволяє точно витримати розміри та глибину залягання областей транзистора. При цьому отримують базу

товщиною десяти частки мікрметра. За допомогою планарної технології досягнуто робочі частоти транзисторів у десятки гігагерц ($1 \text{ ГГц} = 10^9 \text{ Гц}$).

Межа-планарний транзистор показаний на рис. 4.18, а.

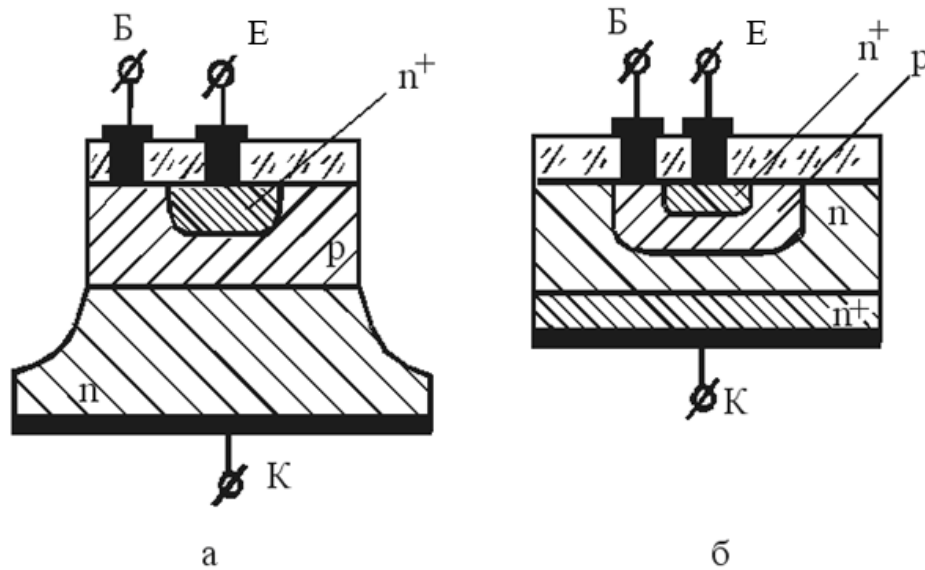


Рисунок 4.18 – Межа-планарний (а) і планарно-епітаксіальний (б) транзистори

Його виготовляють за планарною технологією. Для зменшення площі КП і з метою зниження його ємності витравлюють визначені ділянки кристала так, що активна частина транзистора має вигляд межа-структури. Межа-структура дозволяє зменшити ємність колектора до часток пікофарад, що сприяє істотному підвищенню робочих частот транзистора.

Планарно-епітаксіальний транзистор схематично показано на рис. 4.18, б. Він має колектор, який складається з двох шарів – низькоомного n^+ і високоомного – n -шару. Високоомний шар необхідний для отримання широкого колекторного переходу з малою ємністю і досить великою допустимою колекторною напругою. Низькоомний n^+ -шар дозволяє знизити опір області колектора з метою зменшення втрат потужності на ньому. Високоомний шар колектора є монокристалічною епітаксіальною плівкою, яка повторює кристалічну структуру n^+ -шару. Епітаксіальна технологія забезпечує високоточний контроль товщини й опору плівки, що сприяє істотному поліпшенню параметрів транзистора. Такі транзистори мають малий розкид параметрів від приладу до приладу.

Потужні транзистори. Залежно від припустимої потужності, що розсіюється, $P_{\text{доп}}$ усі БТ розділяють на три групи:

- малої потужності $P_{\text{доп}} < 0,3 \text{ Вт}$;
- середньої потужності $0,3 \text{ Вт} < P_{\text{доп}} < 1,5 \dots 3 \text{ Вт}$;
- великої потужності $P_{\text{доп}} > 1,5 \text{ Вт}$.

Потужні транзистори мають працювати зі значними робочими струмами (одиниці ампер і більше) й високими напругами (десятки й сотні вольт). Їхня конструкція має забезпечувати ефективне відведення виділеного тепла в навколишнє середовище.

Для поліпшення тепловідведення підкладки потужних БТ монтують на кристалотримачах із матеріалу з гарною теплопровідністю. У більшості випадків для цієї мети використовують провідні матеріали, тому колектор потужного БТ зазвичай має гальванічне з'єднання з корпусом. За необхідності потужні БТ оснащують додатковими радіаторами.

Під час роботи з великими струмами в транзисторі виявляється ефект відтискування струму від центру емітерного переходу до його країв (рис. 4.19).

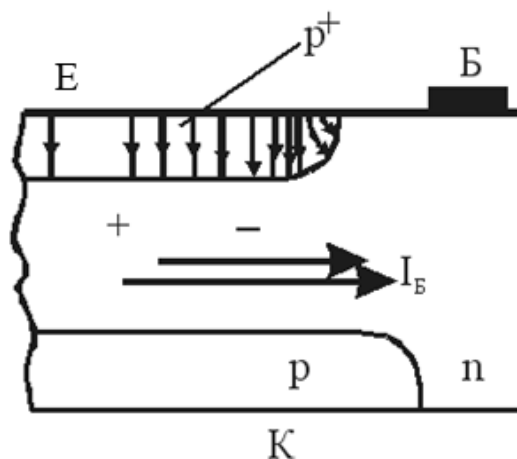


Рисунок 4.19 – Ефект відтиснення струму на емітерному переході

Оскільки товщина бази дуже мала, її опір може виявитися досить великим. Струм бази I_B протікає паралельно площині емітерного p - n -переходу, тому потенційна база зменшується від центру емітера до його країв. У результаті висота потенційного бар'єру емітерного переходу по краях виходить менше, ніж у центрі. Це призводить до того, що щільність струму емітеру неоднорівномірна по його площі: у середній частині переходу інжекція дірок менша, ніж по краях. При цьому зростають втрати на рекомбінацію, що призводить до зниження коефіцієнта передачі за струмом.

Потужні НЧ транзистори. В діапазоні НЧ як потужні застосовуються сплавні транзистори. Вони мають значні площі емітерного та колекторного переходів, що необхідно для одержання великих струмів. Для того щоб зменшити прояв ефекту відводу струму емітера від центра p - n -переходу до його країв, змінюють конфігурацію емітера. Його виготовляють у вигляді смуги чи кільця (рис. 4.20).

Якщо в ході виробництва потужних БТ використовують прийоми планарно-дифузійної технології, то емітерній області можна надати більш складну конфігурацію, наприклад, у вигляді гребінки (рис. 4.21, а). Можливо також використання багатоемітерних структур, коли в єдиній базовій області є до декількох десятків чи сотень емітерних областей, об'єднаних у єдине ціле плівковими з'єднаннями (рис. 4.21, б).

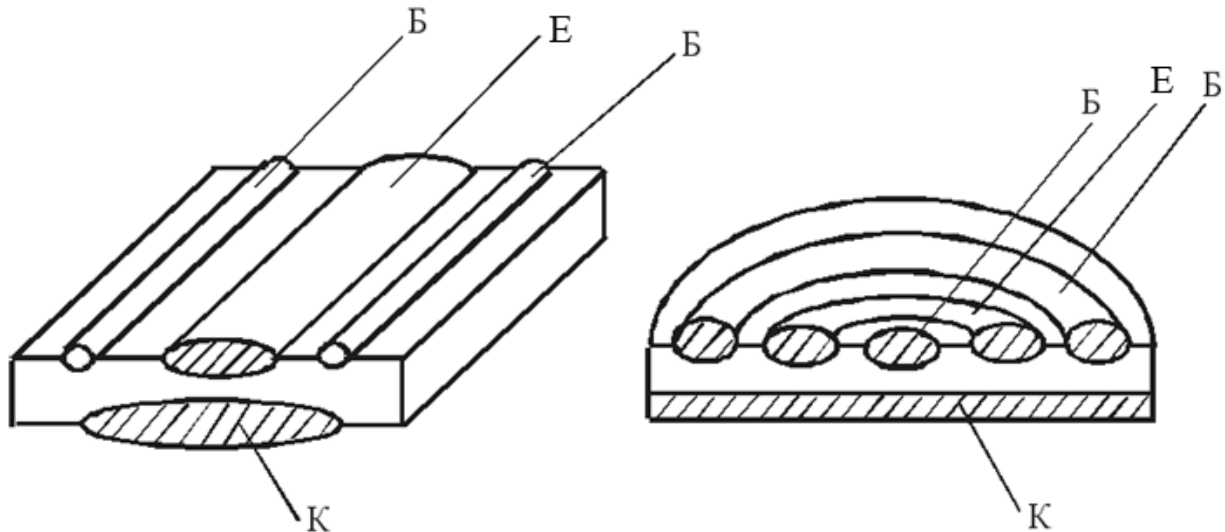


Рисунок 4.20 – Структури потужних сплавних транзисторів

Високовольтні транзистори. Для одержання великих потужностей потрібно, крім збільшення струмів, підвищувати робочу напругу на переходах транзисторів. Ці напруги обмежуються явищем пробоя переходів. У реальних планарних транзисторах пробій колекторного *p-n*-переходу має зазвичай лавинний характер, а напруга пробоя знаходиться в межах декількох десятків вольт. Пробій емітерних переходів, як правило, тунельний і відбувається при напрузі порядку одиниць вольт.

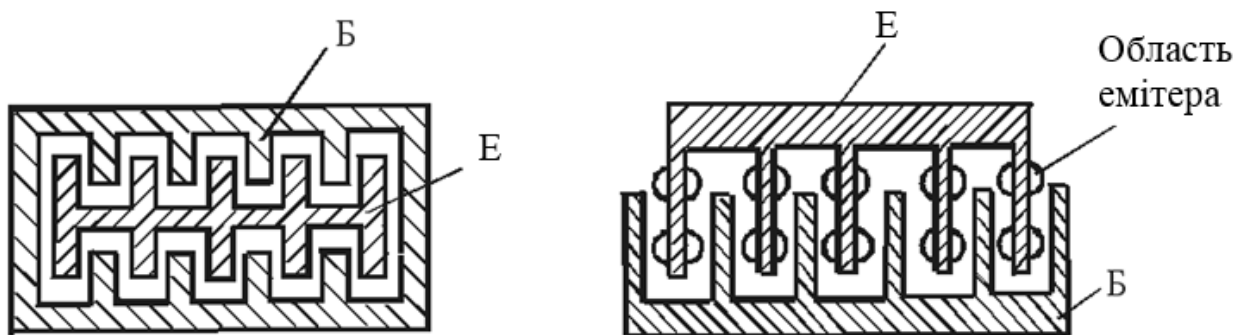


Рисунок 4.21 – Конструкції потужних планарно-дифузійних транзисторів

В ідеальному випадку значення напруги пробою мають залежати тільки від концентрації та характеру розподілу домішок у $p-n$ -переході. У реальних БТ пробою відповідають ряд додаткових факторів, головними з яких є:

- вигини $p-n$ -переходів, у яких різко зростає напруженість електричного поля;
- з наближенням до поверхні підвищується концентрація домішок, що призводить до зменшення ширини, і відповідно, напруги пробою $p-n$ -переходу;
- у місцях виходу переходів на поверхню можуть утворитися паразитні провідні канали, які знижують його електричну міцність.

Зниження дій цих факторів дозволяє підвищити напругу пробою до декількох сотень і більш вольт. Це досягається в структурах високовольтних транзисторів з охоронним кільцем і розширеним контактом бази.

Структура планарного транзистора з охоронним кільцем показана на рис. 4.22, а. Під час її створення базову дифузію проводять у два прийоми. Спочатку по контуру майбутнього колекторного переходу проводять глибоку дифузію охоронного кільця і лише після проводять дифузію в центральній області бази.

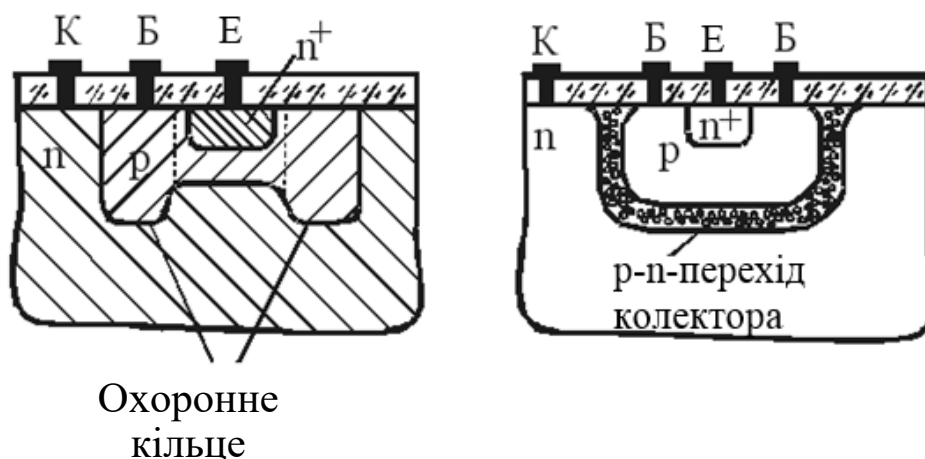


Рисунок 4.22 – Структури високовольтних планарних транзисторів

Така двоступінчаста технологія дозволяє зменшити крутість колекторного переходу в місцях вигину і зменшити небезпеку лавинного пробою.

Структуру транзистора з розширеним базовим контактом показано на рис. 4.22, б. Введення розширеного базового контакту дозволяє знизити небезпеку пробою колектора в поверхневій області. Пояснення в тому, що базовий контакт у передпробійному режимі знаходиться під великим негативним потенціалом стосовно колекторної області ($n-p-n$ -структура). У зв'язку з цим під базовим контактом створюється електричне поле, що «відтискує» електрони в глиб кристалу. У поверхневій області колектора виникає (індукується)

збіднений шар із провідністю n -типу, і в результаті збільшується ширина p - n -переходу. Цим усувається причина передчасного пробію колектора в місці його виходу на поверхню кристала.

Застосування описаних методів збільшує напругу пробію колектора планарного транзистора до декількох сотень вольт.

Потужні ВЧ- і НВЧ-транзистори. За діапазоном робочих частот транзистори підрозділяються на такі групи:

- низькочастотні (НЧ) $f_{\alpha} < 3$ МГц;
- середньочастотні (СЧ) $f_{\alpha} < 30$ МГц;
- високочастотні (ВЧ) $f_{\alpha} < 300$ МГц;
- надвисокочастотні (НВЧ)– $f_{\alpha} > 300$ МГц.

ВЧ- і НВЧ-транзистори – це транзистори з дрейфовим механізмом передачі струму, що мають структуру n - p - n -типу. Перспективним матеріалом для цих груп БТ є арсенід галію (GaAs), що відрізняється особливо високою рухливістю електронів. Оскільки ВЧ- і НВЧ-транзистори мають гранично тонку базу, в ході їхньої експлуатації не рідко виникає явище проколу бази.

Особливу складність становить виробництво потужних ВЧ- і НВЧ-транзисторів. Ці транзистори повинні мати велику допустиму потужність розсіювання, високу граничну частоту f_{α} , малу ємність емітерного та колекторного переходів, малу сталу часу $C_K \tau_b$.

Потужні ВЧ- і НВЧ-транзистори часто виготовляють методами планарно-епітоксіальної технології, що дозволяє формувати області транзистора складної форми з високою точністю. При цьому широко використовуються структури з гребінчастими емітерами (рис. 4.21, а) і багатоемітерні БТ (рис. 4.21, б).

У НВЧ-діапазоні використовуються також багатоструктурні транзистори, що складаються з декількох багатоемітерних транзисторів, які розміщені на одній напівпровідниковій пластині й об'єднані у єдину систему. Окремі елементи такої структури розміщені досить далеко одна від одної, так що їхні теплові потоки не перекриваються й потужність, що розсіювана всією структурою, зростає.

У конструкціях корпусів потужних НВЧ-транзисторів передбачають не тільки ефективне тепловідведення, але й малі індуктивності виводів, а також малі ємності між виводами й корпусом. У разі потреби корпусу НВЧ-транзисторів надають форму, зручну для установки в лінії передачі цього діапазону.

Потужності НВЧ-транзисторів досягають одиниць ват на частотах тисяч МГц.

Транзистори з підвищеним підсиленням. Підсилювальний елемент із підвищеним підсиленням може бути отриманий завдяки використанню складених транзисторів (рис. 4.23). Вони можуть збиратися з БТ з однотипною структурою (рис. 4.23, а – обидва БТ *n-p-n*-типу). Або з БТ із взаємодоповнюючою структурою (рис. 4.23, б – один БТ *p-n-p*-типу, інший *n-p-n*-типу). Структури, показані на рис. 4.23, б, називаються комплементарними. Якщо β_1 і β_2 – коефіцієнти підсилення струму бази в «одинарних» транзисторах, то підсилення складеної пари $\beta = \beta_1 \beta_2$. Значення β може досягати величин, що перевищують $10^3 \dots 10^4$. Складені транзистори можуть мати єдине конструктивне оформлення.

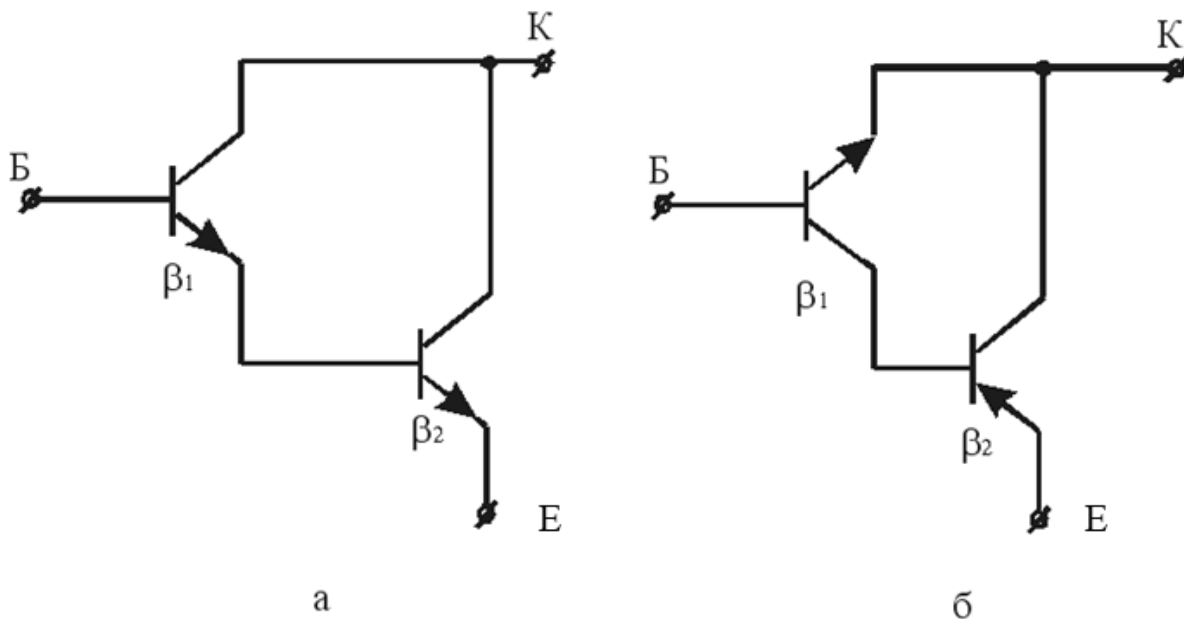


Рисунок 4.23 – Складені транзистори

Дуже високе підсилення ($\beta \sim 10^4 \dots 10^5$) отримують за допомогою, так званих, транзисторів-супербета. Ці транзистори мають дуже тонку базу та емітерну область, створену методом іонної імплантації.

Малощумові транзистори призначені для побудови перших каскадів високочутливих підсилювальних схем. Зазвичай це малопотужні БТ, у паспорті яких вказано значення коефіцієнта шуму. У гарних зразках малощумових БТ коефіцієнт шуму не перевищує 3...6 дБ.

Запитання й завдання для самоперевірки

1. На які групи розділяють транзистори за типом робочого матеріалу?
2. У чому полягає основна відмінність БТ з різних матеріалів і чим пояснюється ця відмінність?

3. На які групи поділяють БТ за механізмом передачі струму в базі?
4. Як рухаються не основні носії в базі бездрейфового транзистора?
5. Які БТ називають дрейфовими?
6. На які властивості дрейфового транзистора впливає електронне поле в базі?
7. На які групи поділяють БТ за електропровідністю робочих областей?
8. У чому полягає відмінна властивість транзисторів, що відрізняються електропровідністю робочих областей?
9. Які існують технологічні різновиди БТ?
10. Які БТ називають сплавними?
11. Зобразіть і поясніть розподіл концентрацій домішок у структурі сплавних БТ.
12. Поясніть, чому сплавні БТ, як правило, низькочастотні.
13. Чому в сплавних БТ важко отримати тонку базу?
14. Які БТ називають дифузійно-сплавними?
15. Зобразіть і поясніть розподіл домішок у структурі дрейфового дифузійно-сплавного БТ.
16. Поясніть, як у базі з нерівномірним розподілом домішок утвориться електричне поле, що прискорює неосновні носії від емітерного до колекторного переходу.
17. Чому у дифузійно-сплавних БТ як правило, досить висока напруга пробою колекторного переходу?
18. Які БТ називають планарними?
19. Поясніть технологічні етапи формування структури планарного БТ.
20. Чому в планарних БТ кращі, порівняно зі сплавними БТ, параметри і частотні характеристики?
21. Які БТ називають меза-планарними?
22. З якою метою в меза-планарного БТ зменшена площа колекторного переходу?
23. Наведіть і поясніть структуру планарно-епітаксialьного БТ.
24. Чому планарно-епітаксialьні БТ мають малий розкид параметрів від приладу до приладу?
25. На які групи поділяють БТ за величиною припустимої потужності, що розсіюється?
26. Які міри приймають для поліпшення тепловідведення в потужних БТ?
27. У чому полягає ефект відтискування струму від центра емітера до країв потужних БТ?

28. З якою метою емітер потужних БТ роблять у вигляді смуг чи кілець?
29. З якою метою в потужних НЧ-транзисторах роблять великими площі емітерного й колекторного переходів?
30. Наведіть і поясніть особливості багатоемітерних структур потужних БТ.
31. Чим обмежуються робочі напруги потужних БТ?
32. Як фактори реальних БТ сприяють пробою колекторного переходу?
33. Наведіть і поясніть структуру БТ з охоронним кільцем.
34. Наведіть і поясніть структуру БТ із розширеним контактом бази.
35. На які групи поділяють БТ за діапазоном робочих частот?
36. Чому ВЧ- і НВЧ-транзистори, як правило, *n-p-n*-типу? У чому їхні переваги порівняно з *p-n-p*-транзисторами?
37. Яким вимогам має відповідати структура ВЧ- і НВЧ-транзисторів?
38. Яку технологію найчастіше використовують в ході виробництва ВЧ- і НВЧ-транзисторів?
39. Що таке багатоструктурні транзистори?
40. Чому в багатоструктурних БТ досить висока припустима розсіювана потужність?
41. Які вимоги висуваються до індуктивностей виводів і ємностей між виводами й корпусом НВЧ-транзисторів?
42. Які транзистори називають складеними?
43. Яке підсилення струму бази може бути отримане у складених транзисторів?

5 ПОЛЬОВІ ТРАНЗИСТОРИ

5.1 Побудова і різновиди польових транзисторів

Польові транзистори (ПТ) – це підсилювальні НПП, у яких вихідний струм керується електричною напругою або електричним полем. На відміну від біполярних транзисторів струми в їхній структурі утворюються носіями заряду тільки одного знаку – електронами або дірками. Тому їх також називають уніполярними транзисторами.

Основу будь-якого ПТ утворює шар напівпровідника, названий *каналом*. У процесі роботи ПТ опір каналу змінюється під дією зовнішнього електричного сигналу (поля). Електрод, за допомогою якого керують опором каналу, називають *затвором*. Область кристалу, з якої носії заряду надходять у канал, називають *витоком*.

Зараз виробляється безліч різновидів ПТ.

За способом керування провідністю каналу (чи за типом затвора) виділяють два основних типи ПТ:

- ПТ із *p-n*-затвором чи бар'єром Шотки;
- ПТ з ізолюваним затвором.

За типом провідності каналу розрізняють:

- ПТ із *n*-каналом;
- ПТ із *p*-каналом.

У ході класифікації ПТ враховуються й інші конструктивні чи технологічні ознаки.

Побудова ПТ із *p-n*-затвором, який має канал *n*-типу, показано на рис. 5.1, а.

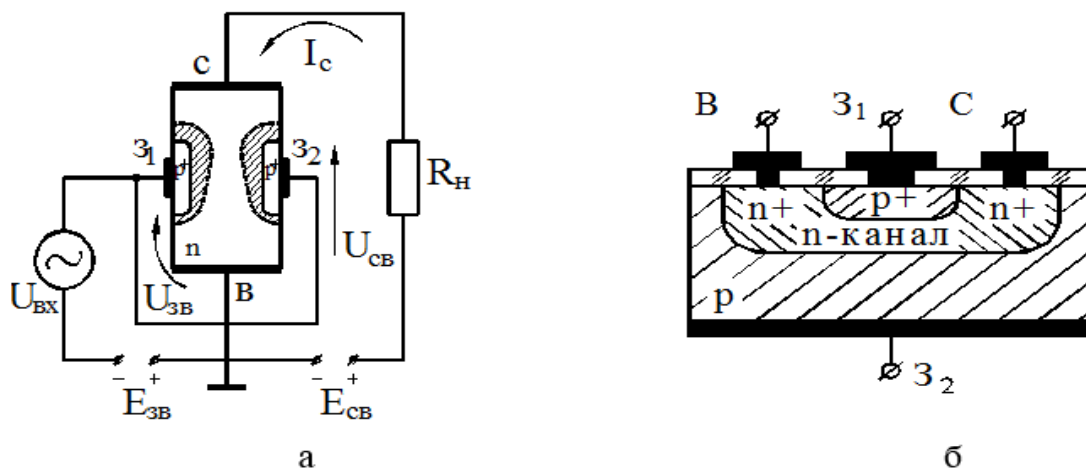


Рисунок 5.1 – Структура польових транзисторів з *p-n*-затвором і схема включення зі спільним стоком

Такі транзистори створюються в кристалах кремнію n -типу, із двох сторін яких формуються p^+ -області з підвищеним вмістом акцепторів. Ці області мають омичні контакти (виводи Z_1 і Z_2) і використовуються як затвори. Затвори Z_1 і Z_2 в робочому стані можуть з'єднуватися разом або використовуватися окремо.

У структурі ПТ може бути сформована одна p^+ -область, що виконує роль затвора. У такому випадку і омичний вивід буде один.

Ділянка кристалу, обмежена затворними p^+ -областями, є робочим каналом розглянутого ПТ. Ширина каналу i , відповідно, його опір визначаються відстанню між межами заперних шарів p - n -переходів, що виникають по контуру затворних p^+ -областей. Якщо на затвори подати зовнішнє зміщення, то в зв'язку зі зміною ширини p - n -переходів змінюватиметься ширина та опір робочого каналу. Завдяки цьому з'являється можливість керувати струмом у каналі i , як наслідок, підсилювати електричні сигнали за потужністю. Для вводу та виводу струму в ПТ на торцеві грані кристала наносять омичні контакти витоку (У) й стоку (С).

Облаштування ПТ, який працює так само, але має планарну структуру, показано на рис 5.1, б. У транзисторах з каналом p -типу знаки напруг на електродах змінюються на протилежні.

На рис. 5.2 показано умовні позначки ПТ із p - n -затвором з каналами n - і p -типу.

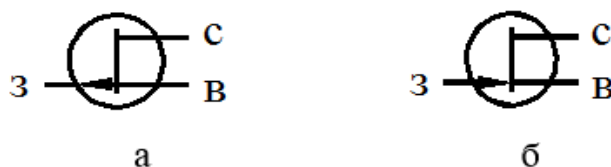


Рисунок 5.2 – Умовні позначки польових транзисторів з p - n -затвором і з каналом n -типу (а), із каналом p -типу (б)

Структури ПТ з ізольованими затворами показані на рис. 5.3. Як затвор тут використовують тонкоплівкові металеві електроди (найчастіше з алюмінію), ізольовані від кристалу напівпровідника тонким (біля $100\text{Å} = 0,01\text{ мкм}$) шаром діелектрику. Оскільки в таких структурах є шари металу, діелектрика й напівпровідника, то їх називають транзисторами типу метал–діелектрик–напівпровідник або скорочено МДН-транзисторами. Якщо МДН-транзистор виготовляється в кристалі кремнію, то як діелектрик зручно використовувати оксид кремнію SiO_2 . У цьому випадку МДН-транзистори називають МОН-транзисторами, тобто транзистори зі структурою метал–окисел–напівпровідник.

Обов'язковими елементами структури МДН-транзистору є дві планарні області стоку та витоку (p^+ -області на рис. 5.3 для МДН-транзистора з каналом p -типу; для МДН транзистора з n -каналом це буде дві n^+ -області).



Рисунок 5.3 – Структури польових транзисторів з ізольованими затворами

Вони відокремлені один від одного на відстань, яка не перевищує 20...30 мкм. За способом формування робочого каналу виділяють два різновиди:

- МДН-транзистори з індукованим каналом;
- МДН-транзистори з вбудованим каналом.

В ході формування структури МДН-транзистора з індукованим каналом канал між витоком і стоком не створюється (рис. 5.3, а). Він з'являється (індукується) тільки при подачі на затвор напруги визначеної величини та полярності. У МДН-транзисторах із вбудованим каналом робочий канал створюється у вигляді неглибокої p - чи n -області, що з'єднує витік та стік структури (рис. 5.3, б). Напівпровідниковий кристал, у якому формується МДН-транзистор, називається *підкладкою*. Вона оснащується омичним контактом, за допомогою якого з'єднується з витоком, або з окремим зовнішнім виводом. Цей вивід, як і вивід затвора може бути використаний для подачі керуючих сигналів.

На рис. 5.4 показані умовні позначки МДН транзисторів з каналами n - і p -типу.

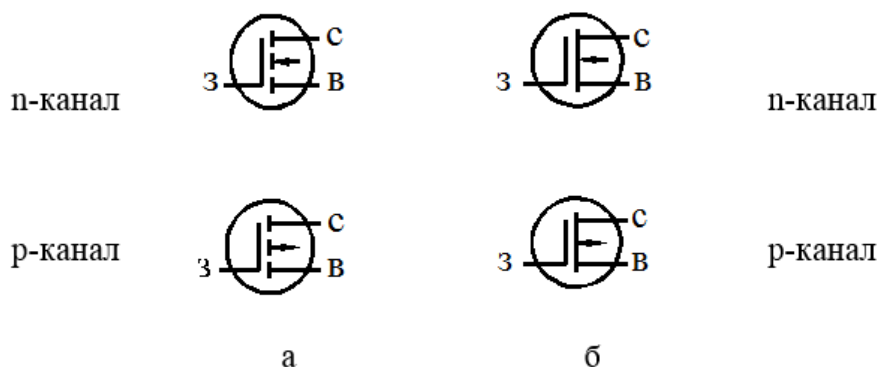


Рисунок 5.4 – Умовні позначки МДН-транзисторів з індукованим каналом (а) і вбудованим каналом (б)

Запитання й завдання для самоперевірки

1. Які транзистори називають польовими або уніполярними?
2. Як називаються області структури ПТ, а також омічні виводи цих областей?
3. На які групи поділяють ПТ за типом затвора?
4. На які групи поділяють ПТ за типом каналу?
5. Нарисуйте та поясніть структуру ПТ із *p-n*-затвором.
6. Як можна керувати опором каналу польового транзистора з *p-n*-затвором?
7. Нарисуйте та поясніть планарну структуру ПТ із *p-n*-затвором.
8. Нарисуйте умовні позначки ПТ із *p-n*-затвором, що має канали *n*- або *p*-типу.
9. Наведіть і поясніть структуру ПТ з ізольованим затвором.
10. Як слід розуміти аббревіатуру (скорочена назва) «МДН- чи МОН-транзистор»?
11. Які існують різновиди МДН-транзисторів?
12. Чим структура МДН-транзистора з індукованим каналом відрізняється від структури МДН-транзистора із вбудованим каналом?
13. Що називають підкладкою в структурі МДН-транзистора?
14. Наведіть умовні позначки МДН-транзисторів з індукованим каналом *n*- і *p*-типу.
15. Наведіть умовні позначки МДН-транзисторів із вбудованими каналами *n*- і *p*-типу.

5.2 Польові транзистори з *p-n*-затвором

*Принцип дії ПТ із *p-n*-затвором* розглянемо на прикладі схеми, показаної на рис. 5.1, а. У ПТ так само, як і в біполярного транзистора три електроди – стік, витік, затвор. Якщо його застосовують у схемі для посилення електричних сигналів, то один із його електродів має бути спільним для вхідного чи вихідного кола. На рис. 5.1, а показано схему зі спільним витоком (СВ). Вхідним колом, куди включається посилюваний змінний сигнал $U_{вх}$, є коло затвор–витік. Вихідним колом, в яке включено опір навантаження R_H (із нього знімають посилений електричний сигнал), є коло стік–витік.

Правила подачі постійних зміщень у коло затвора $E_{зв}$ і стоку $E_{св}$ полягають у тому, що:

– напруга на затворі $E_{зв}$ має бути такої полярності, щоб p - n -перехід між затвором і каналом був закритий;

– напругу на стоці $E_{св}$ необхідно підключати такої полярності, щоб основні носії каналу (у даному випадку n -каналу це електрони) притягувались до стоку.

Струм стоку I_c , який протікає у вихідному колі, є дрейфовим струмом основних носіїв каналу. Величину цього струму можна визначити в такий спосіб:

$$I_c = \frac{E_{зв}}{R_H + R_K}, \quad (5.1)$$

де R_K – опір каналу структури польового транзистора.

У виразі (5.1) не враховані опори ділянок структури біля введів стоку та витоку (поза каналом). Як правило, ці опори незначні і ними часто можна знехтувати.

Якщо напруга у вхідному колі затвор–витік $U_{вх}$ змінюється, то це призводить до зміни ширини p - n -переходів між затвором і каналом. Внаслідок цього змінюється переріз каналу, а значить і його опір R_K . Це призводить до того, що вихідний струм стоку I_c відповідно до формули (5.1) теж змінюється. Результатом цього є змінна напруга на навантаженні:

$$U_H = I_c \cdot R_H.$$

Так вхідний сигнал $U_{вх}$ керує вихідною напругою U_H .

В ході оцінки підсилювальних властивостей ПТ потрібно насамперед враховувати, що вхідний струм затвора $I_з$ – надзвичайно малий. Як правило, польові транзистори виготовляють із кремнію. Зворотний струм закритого кремнієвого p - n -переходу може складати $10^{-9} \dots 10^{-12}$ А і менше. Вихідний струм стоку I_c у більшості структур ПТ – десятки, сотні міліампер. Оскільки вихідний струм I_c і вхідний струм $I_з$ відрізняються дуже сильно, коефіцієнт підсилення за струмом в ПТ не розглядають.

Через малість вхідного струму напруга та потужність у вхідному колі істотно менші за напругу та потужність, отримані на навантаженні.

ПТ у схемі з СВ забезпечує посилення змінних електричних сигналів за напругою й потужністю.

Керування опором каналу ПТ здійснюється напругою не тільки на затворі, але і на стоці.

Розглянемо спочатку вплив напруги на затворі $U_{зв}$, враховуючи, що напруга на стоці $U_{св} = 0$, а затвори c_1 і c_2 з'єднані один з одним (рис. 5.5, а).

При подачі на затвор замикаючої напруги ($U_{зв} < 0$ для ПТ із n -каналом) товщина каналу змінюватиметься однаково по всій довжині. При цьому, чим більшу напругу подано на затвор, тим тоншим стає канал і тим більше його опір. З деякою напругою на затворі $U_{зв} = U_{зв\text{відс}}$, що називається напругою відсічення, запірні шари обох p - n -переходів стуляються один з одним, канал виявиться цілком перекритим і його опір досягає максимуму.

Розглянемо тепер випадок, коли при заземленому затворі ($U_{зв} = 0$) на стік ПТ із каналу n -типу подається позитивна напруга $U_{св} > 0$ (рис. 5.5,б). Під дією цієї напруги в каналі протікає струм стоку I_c . В результаті цього по всій довжині каналу виникає розподілене спадання напруги. Так, наприклад, при подачі на стік напруги $U_{св} = +10\text{В}$ у каналі можна відшукати точку, потенціал якої стосовно витоку дорівнюватиме $+5\text{В}$. Ця точка має знаходитися приблизно на середині довжини каналу. Під час зміщення від середини в напрямку витоку, потенціал каналу зменшуватиметься до нуля, а під час наближення до стоку – збільшуватиметься до значення $+10\text{В}$.

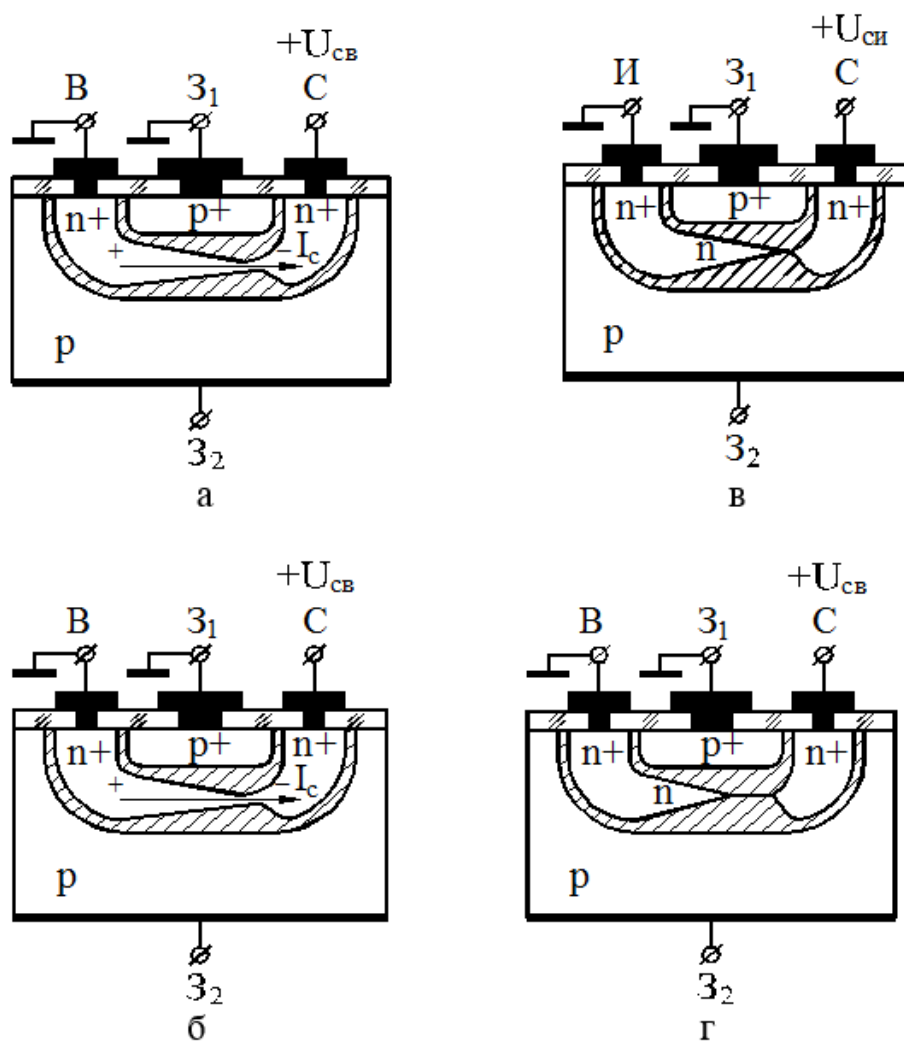


Рисунок 5.5 – Вплив напруг затвора й стоку на конфігурацію каналу

Спадання напруги в каналі є замикаючим для p - n -переходів затвора («+» на n -області, а виводи p^+ -області заземлені). Тому в результаті протікання струму в каналі ширина запірних шарів у напрямку від витоку до стоку збільшується, а ширина каналу – зменшується (рис. 5.5, б). З деякою напругою на стоці $U_{\text{св}} = U_{\text{св.нас}}$, що називається напругою насичення, канал з боку стоку цілком перекривається (рис. 5.5, в). Перекриття це відбувається спочатку на дуже невеликій відстані, майже в точці. Неважко здогадатися, що напруга насичення в розглянутому випадку має дорівнювати напрузі відсічення: $U_{\text{св.нас}} = U_{\text{зв.відс}}$.

З подальшим збільшенням напруги на стоці зона перекриття каналу пропорційно збільшується (рис. 5.5, г). Таким чином, змінюючи напругу на стоці, можна забезпечити керування опором каналу практично в тих самих межах, що й у випадку подачі напруги на затвор.

Режим роботи ПТ визначають за фізичним станом його каналу. При цьому виділяють три режими роботи:

- режим при цілком відкритому каналі, коли опір між витоком і стоком малий (десятки – сотні Ом) (рис. 5.5, а і 5.5, б);
- режим насичення при частково перекритому каналі, опір між витоком і стоком десятки – сотні кОм (рис. 5.5, в і 5.5, г);
- режим відсічення при цілком закритому каналі, опір між стоком і витоком досягає одиниць МОм.

Основним режимом, у якому ПТ має підсилювальні властивості, є режим насичення. Тому його не можна ототожнювати з режимом насичення біполярного транзистора.

Схеми включення ПТ. У ході побудови електронних схем використовують три схеми включення ПТ: із спільним витоком (СВ), спільним затвором (СЗ) і спільним стоком (СС). Найбільш широко застосовується схема з СВ (рис. 5.1, а).

Запитання й завдання для самоперевірки

1. Наведіть і поясніть структуру ПТ із p - n -затвором.
2. Наведіть і поясніть структуру планарного ПТ із p - n -затвором.
3. Наведіть схему включення зі спільним витоком ПТ із p - n -затвором для посилення змінних сигналів.
4. Якого правила слід дотримуватись при подачі постійного зміщення в колі затвор–витік?
5. Якого правила слід дотримуватись при подачі постійного зміщення в колі стік–витік?

6. Який механізм струму I_c , що протікає в колі стоку, і якими носіями в структурі ПТ цей струм задається?
7. Від чого залежить величина струму стоку I_c ?
8. Поясніть, як змінна напруга в колі затвора $U_{вх}$ керує змінною напругою U_n на навантаженні, включеному в коло стоку.
9. Чому в ході оцінки підсилювальних властивостей ПТ не розглядають коефіцієнт підсилення за струмом?
10. Поясніть, як ПТ із $p-n$ -затвором у схемі з СВ забезпечує посилення змінних сигналів за напругою й потужністю.
11. Напругами на яких електродах ПТ можна керувати опором його каналу?
12. Як впливає напруга затвора $U_{зв}$ на конфігурацію каналу і його опір?
13. Яку напругу затвора називають напругою відсічення $U_{зв.відс.}$?
14. Як впливає напруга стоку $U_{св}$ на конфігурацію каналу і його опір?
15. Чому при подачі напруги на стік $U_{св}$ переріз каналу ПТ стає неоднаковим по його довжині – вузька частина біля стоку, більш широка – біля витоку?
16. Яку напругу витоку називають напругою насичення $U_{св.нас}$?
17. Чим конфігурація каналу при $U_{св.нас}$ відрізняється від конфігурації каналу при $U_{зв.відс.}$?
18. Чому опір каналу при $U_{св.нас}$ менший, ніж при $U_{зв.відс.}$?
19. Чим визначаються режими роботи ПТ?
20. Зобразіть структуру ПТ і конфігурацію його каналу в режимі цілком відкритого каналу.
21. Зобразіть структуру ПТ і конфігурацію його каналу в режимі насичення.
22. Зобразіть структуру ПТ і конфігурацію його каналу в режимі відсічення.
23. В якому режимі роботи використовують ПТ для посилення змінних сигналів?
24. Які існують схеми включення ПТ із $p-n$ -затвором?

5.3 Характеристики, експлуатаційні властивості та параметри польових транзисторів із $p-n$ -затвором

Розглянемо ПТ із $p-n$ -затвором у схемі СВ, яку найчастіше використовують в електронних пристроях (рис 5.1, а).

Статичні характеристики ПТ. Основними характеристиками ПТ є вихідні чи стокові ВАХ, а також характеристики прямої передачі або стоко-затворні ВАХ.

Вихідні характеристики ПТ для схеми СВ є залежностями струму стоку I_c від напруги на стоці U_{CB} при постійних значеннях напруги на затворі:

$$I_c = f(U_{CU}) \text{ при } U_{зв} = \text{const.} \quad (5.2)$$

Ці характеристики наведені на рис (5.6,а). На кожній з цих характеристик можна виділити три ділянки: початкова крута ділянка (3), потім положиста (2) і ділянка пробою при великих напругах.

Розглянемо спочатку характеристику, що відповідає напрузі $U_{зв} = 0$. Вона проходить через початок координат і її початкова крута ділянка відповідає роботі ПТ при цілком відкритому каналі. При цьому в області малих напруг U_{CB} струм стоку зростає практично за лінійним законом. У цьому випадку ПТ має властивості звичайного омичного опору. Зі збільшенням струму I_c зростає спад напруги по довжині каналу, ширина каналу з наближенням до стоку зменшується і його опір збільшується (рис. 5.5, б). Тому характеристика стає нелінійною: струм I_c зростає повільніше, ніж напруга на стоці U_{CB} . У момент, коли напруга U_{CB} досягне напруги насичення $U_{CB,нас}$, канал біля стоку перекриється. Струм стоку при цьому дорівнює величині $I_{c,поч}$, яка називається початковим струмом стоку.

При напругах $U_{CB} > U_{CB,нас}$ ПТ переводиться в режим насичення, а його вихідна характеристика виходить на положисту ділянку або ділянку насичення (не плутати з режимом насичення БТ!). У межах пологої ділянки струм стоку I_c змінюється незначно, оскільки зі збільшенням напруги U_{CB} зростає довжина перекритої ділянки каналу і, відповідно, його опір. При дуже великих напругах на стоці ($U_{CB} = U_{CB,max} \geq 20...500$ В) виникає пробій $p-n$ -затвора. Процес пробою починається на ділянках поблизу стока, які знаходяться під максимальною напругою, і має зазвичай лавинний характер. Якщо на затвор подати запираючу напругу $U_{зв} < 0$, то загальна ширина каналу зменшиться, його опір виросте і вихідні характеристики змістяться в область менших струмів I_c . Перекриття каналу відбуватиметься тепер при менших напругах на стоці. Оскільки напруга, прикладена до $p-n$ -затвора поблизу стоку, дорівнює сумі напруг на стоці та затворі, то в момент змикання каналу буде справедливим:

$$U_{CB,нас} + U_{зв} = U_{зв,відс}$$

Звідси:

$$U_{CB,нас} = U_{зв,відс} - U_{зв}$$

З цієї причини пробій ПТ при $U_{зв} < 0$ відбуватиметься при меншій напрузі на стоці.

Таким чином, на кожній вихідній характеристиці ПТ (рис 5.6, а) можна виділити точку перегину з координатою $U_{св.нас} = U_{зв.відс.} - U_{зв}$, яка розмежовує круту та пологісту ділянки.

Якщо всі ці точки з'єднати штриховою лінією, то отримаємо межу між областю, у якій канал відкритий (область 5) і насичення (область 2). Межа режиму відсічення (область 1) збігається з характеристикою, знятою при $U_{зв} = U_{зв.відс.}$. У цьому випадку канал перекритий по всій довжині навіть при $U_{св}=0$ і струм стоку мізерно малий.

Передатні характеристики ПТ є залежністю струму стоку від напруги на затворі при постійних напругах на стоці:

$$I_c = f(U_{зв}) \text{ при } U_{св} = \text{const.} \quad (5.5)$$

Передатні характеристики наведено на рис. 5.6, б. Постійні напруги на стоці вибираються при цьому так, щоб у всьому діапазоні зміни напруги $U_{св}$ ПТ знаходився в режимі насичення. Як видно з рис. 5.6,б, струм стоку I_c досягає максимальної величини при нульовій напрузі на затворі. При подачі зворотного зміщення на затвор струм стоку плавно зменшується зі змінюю шириною каналу. При $U_{зв} = U_{зв.відс}$ канал цілком перекривається і струм стоку може дорівнювати нулю.

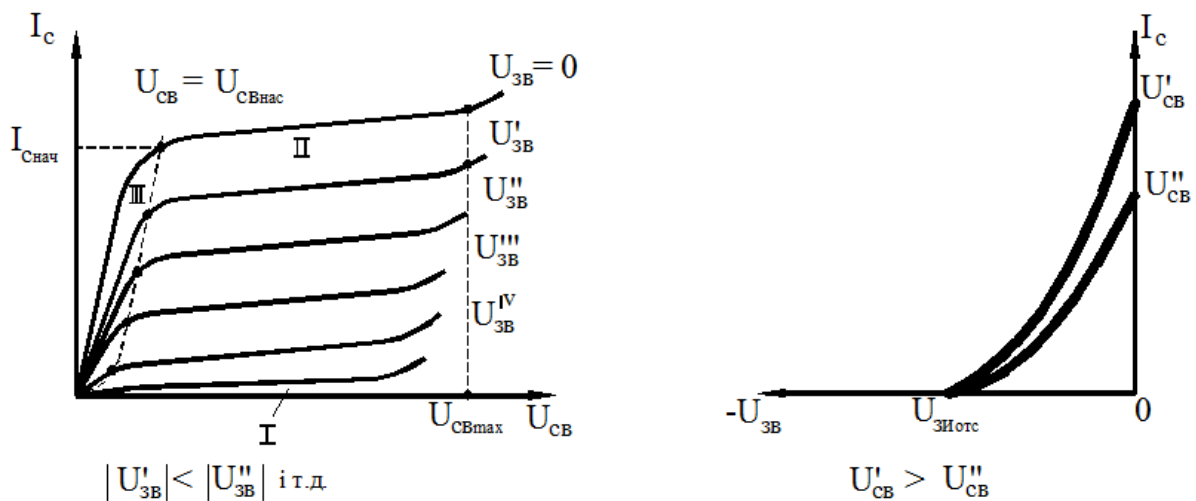


Рисунок 5.6 – Статичні характеристики польового транзистора з p - n -затвором

Оскільки ПТ p - n -затворами експлуатуються тільки при замикаючих напругах на затворі, то «прямі» гілки передатних характеристик (при $U_{зв} > 0$) не розглядаються.

Температурні властивості ПТ. Польовий транзистор із p - n -затвором працює на основних носіях заряду, концентрація яких у межах робочого

діапазону температур практично постійна. Тому, під час змін температури властивості ПТ змінюються менше, ніж у біполярних транзисторів. Вплив температури на передатні характеристики ПТ показаний на рис. 5.7.

Він зумовлений тим, що під час зміни температури змінюється рухливість носіїв заряду, висота потенційного бар'єра $p-n$ -переходу, а значить і його ширина, що призводить у підсумку до зміни опору каналу. Усі ці фізичні характеристики по-різному залежать від температури. Як видно з рис. 5.7, можна підібрати такий режим роботи ПТ ($U_{зв} = U_T$), за якого струм стоку не залежить від температури. Точка на ВАХ, у якій $U_{зв} = U_T$, називається термостабільною.

Експлуатаційні властивості ПТ

Одна з основних галузей застосування ПТ – підсилювачі електричних сигналів. Спрощена схема підсилювального каскаду на ПТ, включеному за схемою СВ, показана на рис. 5.8, а. Відповідно до цієї схеми на вхід транзистора, крім постійного зміщення $E_{св}$, подається посилюваний змінний сигнал $U_{вх}$. Вихідне коло містить джерело живлення $E_{св}$ і навантаження $R_{н}$, на якому виділяється посилений змінний сигнал $U_{вх}$.

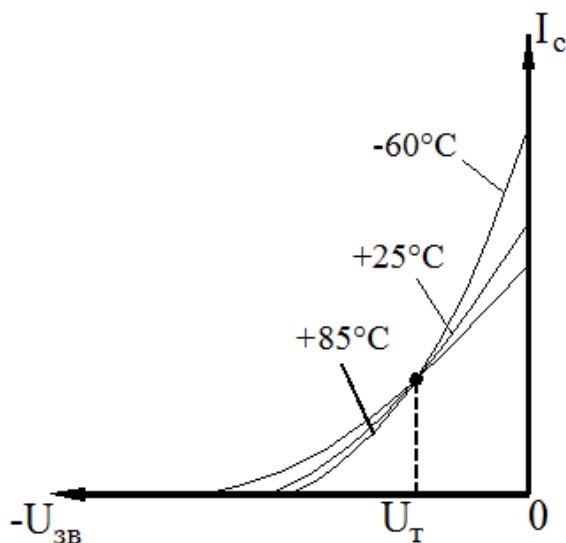


Рисунок 5.7 – Вплив температури на передатні характеристики польового транзистора

У підсилювальних схемах ПТ працюють в режимі насичення, а струми та напруги містять постійні й змінні складові. Тому їхній розрахунок виконують у два прийоми: спочатку визначають величини постійних струмів і напруг за умови відсутності змінного сигналу (режим мовчання), а потім приступають до визначення змінних складових.

Струми та напруги, які характеризують роботу ПТ у режимі спокою, однозначно пов'язані між собою і відповідають фіксованим точкам на сімействі його статичних ВАХ. Ці точки називають робочими точками.

Під час розрахунку підсилювальних каскадів користуються статичними ВАХ, доповненими так званими навантажувальними характеристиками.

Навантажувальні характеристики (НХ) будуються на сімействах статичних ВАХ. Вони дають зв'язок між струмами та напругою на виходах транзистора за наявності зовнішнього навантаження.

При включеному навантаженні частина напруги джерела живлення виділяється на ній і зв'язок між струмами та напругою відрізняється від статичних ВАХ.

У ПТ, як правило, будують тільки вихідну навантажувальну характеристику на сімействі статичних вихідних (стокових) ВАХ. У ході побудови вихідної НХ виходять з того, що напруга стокового живлення E_{cb} дорівнює сумі падінь напруг у колі стоку (рис 5.9, а):

$$E_{cb} = U_{cb} + I_c \cdot R_H. \quad (5.4)$$

З (5.4) маємо:

$$I_c = \frac{E_{cb} - U_{cb}}{R_H}. \quad (5.5)$$

Отримані вирази (5.5) визначають вихідну НХ. Її форма така, що ця характеристика має бути прямою лінією. Для визначення положення НХ на сімействі статичних вихідних ВАХ достатньо знайти точки її перетину з осями координат. Якщо у формулі (5.5) прийняти $U_{cb} = 0$, то з неї випливає, що НХ перетинає вісь ординат у точці:

$$I_c = \frac{E_{cb}}{R_H}.$$

Точку перетину НХ із віссю абсцис знаходять із формули (5.5) після підстановки туди $I_c = 0$. Неважко бачити, що ця точка має координату:

$$U_{cb} = E_{cb}.$$

З'єднуючи отримані точки прямою лінією, отримують потрібну вихідну НХ (рис 5.8, б).

Використовуючи НХ, можна задавати положення робочої точки, визначати величину та форму вихідного сигналу за заданих напруг постійних зміщень E_{zb} і E_{cb} , напруги змінного сигналу $U_{вх.м}$ і опору R_H .

Покажемо це на прикладі схеми та характеристик (рис. 5.8).

Нехай постійні зміщення на затворі $E_{zb} = U_{zb}^{III}$. Точку спокою А на навантажувальній характеристиці знаходимо на перетині НХ із статичною

вихідною характеристикою, що відповідає постійній напрузі затвора $U_{зв}^{III}$ (рис 5.8, б). Ордината цієї точки визначає постійний струм I_c у режимі спокою. Абсциса цієї точки визначає постійні напруги стоку $U_{свА}$ в цьому режимі. Постійні напруги на навантаженні при цьому:

$$U_{R_H} = I_c \cdot R_H \text{ чи } U_{R_H} = E_{св} - U_{свА} , \quad (5.6)$$

тому що $U_{свА} + U_{R_H} = E_{св}$.

Визначивши положення точки спокою, приступають до розрахунку режиму роботи підсилювального каскаду зі змінним струмом. Для цього через точку $I_{сА}$ і $U_{свА}$ проводять осі часу t і відтворюють у масштабі осі форму змінного вихідного струму і вихідної напруги.

Припустимо, що на вхід ПТ подається змінний гармонійний сигнал $U_{вх}$ з амплітудою $U_{вх.м}$:

$$U_{вх} = U_{вх.м} \sin \omega t.$$

Під час зміни вхідного сигналу робоча точка переміщується за навантажувальною характеристикою. Нехай амплітуда вхідного сигналу:

$$U_{вх.м} = U_{зв}^{III} - U_{зв}^I ,$$

або:

$$U_{вх.м} = U_{зв}^V - U_{зв}^{III} .$$

Тоді на навантажувальній характеристиці робоча точка А при $U_{вх.м} = (U_{зв}^{III} - U_{зв}^I)$ зміщується в точку A^I , а при $U_{вх.м} = (U_{зв}^V - U_{зв}^{III})$ – у точку A^{II} . Точки A^I і A^{II} відповідають максимуму й мінімуму змінного сигналу на затворі. По координатах A^I і A^{II} знаходять амплітуди вихідного струму стоку $I_{ст}$ вихідної напруги $U_{св.м}$.

Для змінних напруг $U_{кв\sim}$ і $U_{вих\sim}$ справедливо (рис. 5.8, а) :

$$U_{кв\sim} + U_{вих\sim} = 0.$$

Звідси для змінної напруги на навантаженні можна записати:

$$U_{вих\sim} = - U_{св\sim}.$$

Визначивши амплітуду сигналу на стоковому виводі транзистора $U_{св.м}$, тим самим знаходять амплітуду вихідного сигналу:

$$U_{вих м} = U_{св м}.$$

Знаючи величини $U_{вх м}$ і $U_{вих м}$, можна визначити підсилення ПТ за напругою, як:

$$K_{и} = \frac{U_{вихм}}{U_{вхм}} .$$

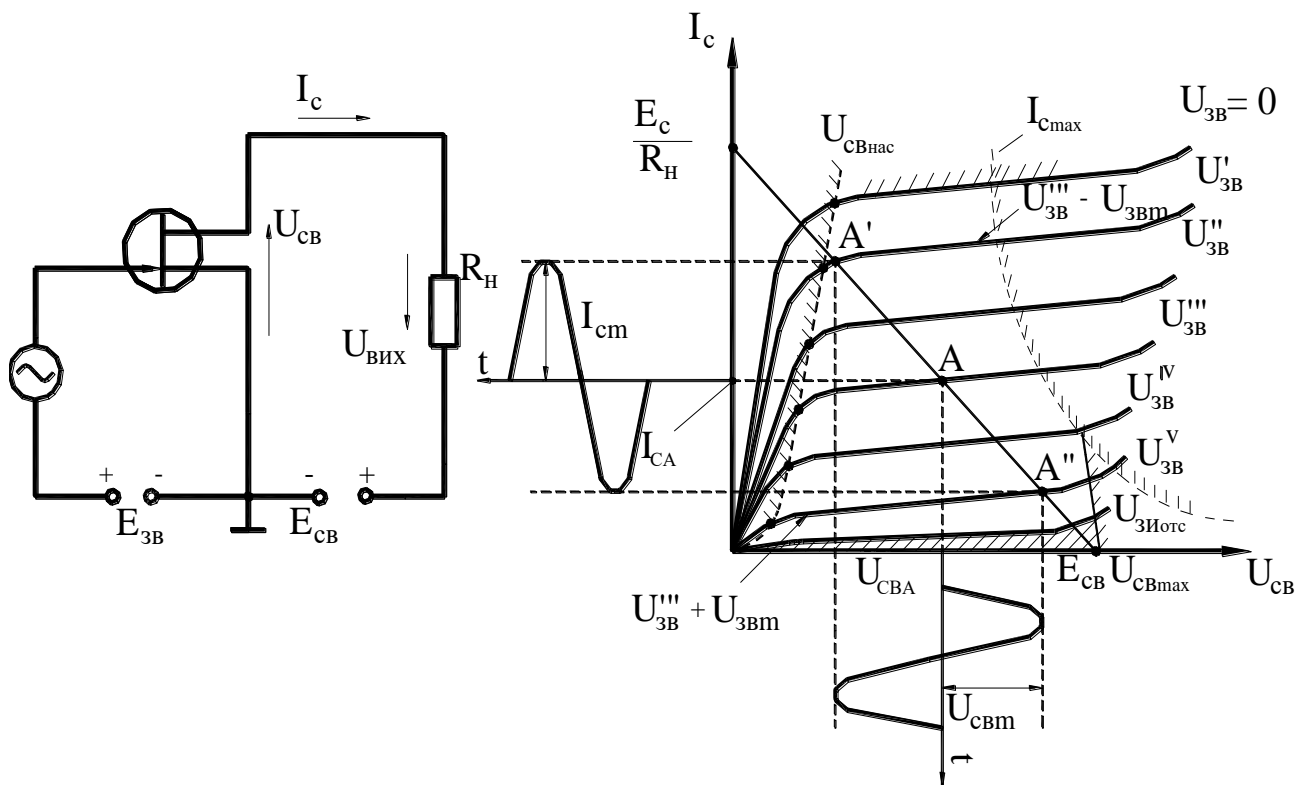


Рисунок 5.8 – Підсилювальний каскад на ПТ із СВ і його навантажувальна характеристика

Припустима робоча область ПТ. У реальних схемах напруги та струми ПТ не мають виходити за межі припустимої робочої області, щоб транзистор зберігав свої функціональні властивості протягом всього часу експлуатації.

Межами цієї області (рис. 5.9) є:

– лінія $U_{cв} = U_{cвнас}$, що відокремлює область насичення від області режиму з відкритим каналом;

– лінія $I_c = f(U_{cв})$ при $U_{зв} = U_{зв відс}$, що обмежує область відсічення;

– лінія $U_{cв} = U_{cвmax}$, що відокремлює ділянки пробою $p-n$ -затвора;

– лінія $I_{c max} = \frac{P_{c max}}{U_{cв}}$, що, як і у випадку біполярного транзистора, відокремлює область теплового пробою. Положення цієї лінії залежить від

максимально припустимої потужності розсіювання $P_{c max}$;

– лінія $I_c = f(U_{cв})$ при $U_{зв} = 0$, що розмежує області прямого і зворотного зміщення $p-n$ -затвора.

Видно, що припустима робоча область є частиною області насичення ПТ. Якщо струми та напруги ПТ виходять за межі цієї області, то виникають неприпустимі перекручування форми посилюваних сигналів або ПТ виходить із ладу (тепловий чи електричний пробій затвора). Виключення складають

випадки роботи ПТ у складі так званих ключових схем. У цих схемах робочою є область відсічення й область режиму з відкритим каналом.

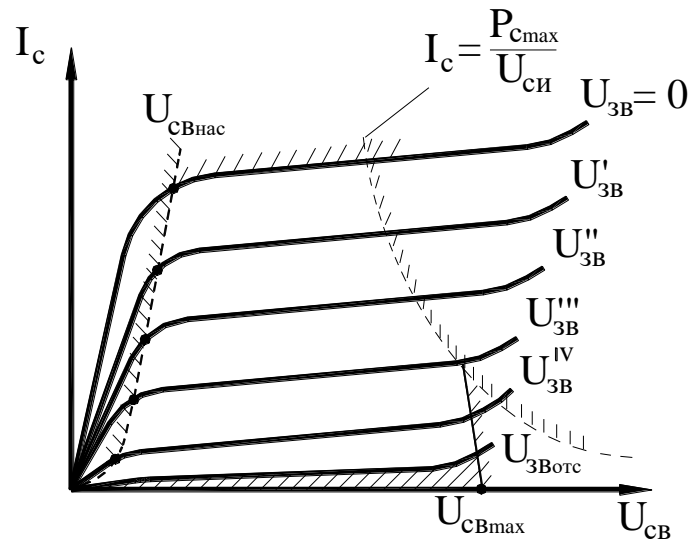


Рисунок 5.9 – Припустима робоча область польового транзистора

Параметри ПТ. Під час роботи в режимі великих змінних сигналів параметрами, що характеризують властивості транзисторів, є:

- напруга відсічення $U_{зв.відс.}$;
- початковий струм стоку $I_{с.поч.}$;
- максимально припустима потужність розсіювання на стоці $P_{сmax.}$;
- максимально допустиме напруження на стоці $U_{св.max.}$.

Для оцінки властивостей ПТ у режимі малого сигналу вводяться диференційні (малосигнальні) параметри, названі також статичними. До них належать крутизна S , внутрішній опір r_i і коефіцієнт підсилення μ .

Статична крутизна визначається як відношення малого приросту струму стоку ΔI_c до приросту напруги на затворі $\Delta U_{зв}$ з постійною напругою на стоці:

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зв}} \text{ при } U_{св} = \text{const.} \quad (5.7)$$

Статична крутизна S дає зв'язок між змінним струмом стоку та змінною напругою на затворі, коли відсутнє навантаження ($R_H = 0$; $U_{св} = E_{св} = \text{const}$). (Малі прирости струмів і напруг, наприклад, ΔI_c і $\Delta U_{зв}$, можна розглядати як амплітуди малих змінних сигналів).

Якщо ж $R_H \neq 0$, то струм стоку зменшується відповідно до виразу (5.5), і робоча крутизна S_p буде менше статичної:

$$S_p < S.$$

Статична крутизна ПТ із p - n -затворами складає зазвичай кілька одиниць міліампер на вольт.

Внутрішній опір r_i характеризує вплив напруги U_{cb} на величину струму стоку й визначається із співвідношення:

$$r_i = \frac{\Delta U_{cb}}{\Delta I_c} \text{ при } U_{zb} = \text{const.} \quad (5.8)$$

Значення r_i у режимі насичення, складає десятки – сотні кілоом. Іноді замість внутрішнього опору вводиться вихідна провідність:

$$G_i = \frac{1}{r_i}$$

Статичний коефіцієнт підсилення μ визначають співвідношенням:

$$\mu = \frac{\Delta U_{cb}}{\Delta U_{zb}} \text{ при } I_c = \text{const.} \quad (5.9)$$

Коефіцієнт підсилення μ визначається в режимі, коли у вихідному колі опір навантаження відсутній $R_n = 0$.

Робочий коефіцієнт підсилення K_u , вимірюваний при кінцевому навантаженні $R_n \neq 0$, завжди менший статичного:

$$K_u < \mu.$$

Малосигнальні параметри S , r_i , μ зв'язані між собою співвідношенням:

$$\mu = S r_i. \quad (5.10)$$

Знаючи два з них, за формулою (5.10) завжди можна обчислити третій.

Запитання й завдання для самопідготовки

1. Які характеристики ПТ із p - n -затвором у схемі СВ називають вихідними?
2. Наведіть вихідні характеристики ПТ у схемі СВ.
5. Покажіть на вихідних характеристиках ПТ у схемі СВ області, що відповідають різним режимам роботи транзистора.
4. Поясніть хід вихідної характеристики ПТ, що відповідає напрузі затвора $U_{zb} = 0$.
5. Порівняйте визначення режиму насичення для польових і біполярних транзисторів.
6. Поясніть, чому в ПТ у режимі насичення струм стоку I_c змінюється незначно за істотних змін напруги стоку U_{cb} .
7. Поясніть вплив напруги затвора U_{zb} на вихідні характеристики.

8. Які характеристики ПТ із $p-n$ -затвором у схемі СВ називають передатними?
9. Наведіть передатні характеристики ПТ у схемі СВ і поясніть їх.
10. Чому під час зміни температури властивості ПТ із $p-n$ -затвором змінюються менше, ніж властивості БТ?
11. Наведіть передатні характеристики ПТ при високих та низьких температурах, вказавши на них термостабільну напругу затвора U_T .
12. Наведіть схему підсилювального каскаду на ПТ з СВ за наявності навантаження у вихідному колі.
15. Які характеристики ПТ називають навантажувальними?
14. Напишіть і поясніть вираз, що зв'язує вихідний струм стоку I_c із вихідною напругою $U_{св}$ за наявності навантаження у вихідному колі.
15. Чому для побудови НХ достатньо знати положення менше двох точок цієї характеристики?
16. Визначте координати точок навантажувальної характеристики на осях ординат і абсцис.
17. Побудуйте НХ польового транзистора на сімействі вихідних стокових характеристик з деяким опором навантаження R_H .
18. Чим визначається положення робочої точки на НХ у режимі мовчання?
19. Покажіть, як зміниться положення робочої точки на НХ за наявності змінної напруги затвора з амплітудою $U_{зв м} = U_{вх м}$.
20. Визначіть графічно за допомогою НХ амплітуди вихідного струму $I_{св}$ і вихідної напруги $U_{св м}$ із заданою амплітудою вхідного сигналу $U_{вх м} = U_{зв м}$.
21. За проведеними у питанні 20 побудовами визначте коефіцієнт підсилення за напругою K_u .
22. Що називають припустимою робочою областю ПТ?
25. Якими межами визначається припустима робоча область ПТ?
24. На сімействі вихідних характеристик ПТ позначте межі припустимої робочої області.
25. Перелічіть і поясніть параметри, що характеризують властивості ПТ у режимі великих змінних сигналів.
26. Перелічіть параметри, що оцінюють властивості ПТ у режимі малих сигналів.
27. Дайте визначення кожному з диференціальних параметрів ПТ.
28. Чому статична крутизна S і статичний коефіцієнт підсилення за напругою μ більші, ніж робочі крутизна S_p і коефіцієнт підсилення K_u ?
29. Яке співвідношення зв'язують між собою диференціальні параметри ПТ?

5.4 Принципи дії, характеристики польових транзисторів з ізолюваним затвором

Загальні властивості МДН транзистора з індукованим каналом розглянемо на структурі з p -каналом, показаній на рис. 5.5, а. Схема включення МДН-транзистора з такою структурою для посилення змінних сигналів показана на рис. 5.10, а. Умовні позначки – на рис. 5.10, б. У випадку МДН-транзистора з n -каналом полярності джерел постійного зміщення треба змінити на протилежні.

За відсутності напруги на затворі напруга між витіком і стоком дуже велика. Вона визначається двома включеними назустріч один одному p - n -переходами на межах між областями витік–підкладка і стік–підкладка. Один з цих переходів завжди матиме зворотне зміщення.

При подачі на затвор негативної напруги $U_{зв}$ у шарі діелектрику під затвором виникає електричне поле E , що частково проникає в підкладку. Під його дією електрони відштовхуються всередину підкладки, а дірки – (неосновні носії) притягуються до її поверхні. При визначеній нарузі на затворі концентрація дірок біля поверхні стає переважною і поверхневий шар набуває інверсний (протилежний підкладці) *тип провідності*. Цей інверсний p -шар стає каналом, що з'єднує витік і стік.

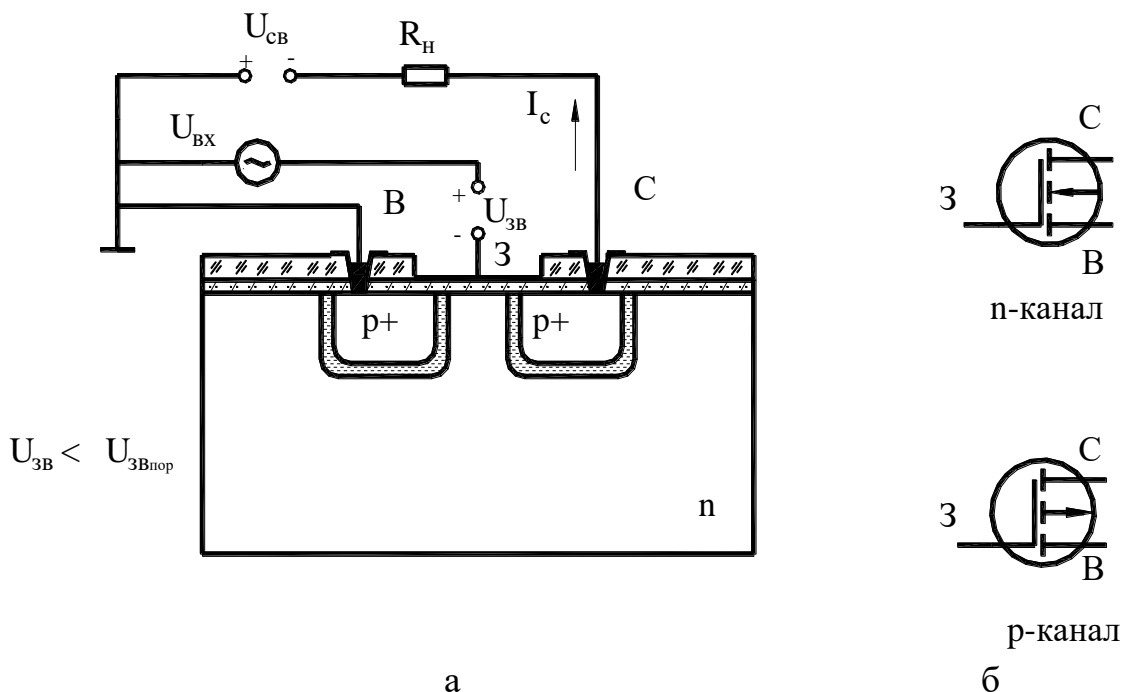


Рисунок 5.10 – Схема включення МДН транзистора з індукованим каналом (а) для посилення змінних сигналів і його умовна позначка (б)

Напруга затвора $U_{зв}$, за якої індукується канал, називається *граничною напругою* $U_{зв\text{ пор}}$. Ця напруга складає зазвичай одиниці вольт при товщині підзатворного діелектрика біля 0,1 мкм.

Подальше підвищення негативної напруги на затворі збільшує приплив дірок у канал і його опір зменшується. У такий спосіб можна керувати опором каналу, а значить і вихідним струмом стоку. Режим, за якого концентрація носіїв у каналі зростає, називається *режимом збагачення*.

Процеси в МДН-транзисторі з індукованим каналом *n*-типу проходять аналогічно. Відмінність лише в полярності робочих напруг: для утворення каналу в такого транзистора на затвор необхідно подавати позитивну напругу.

Незважаючи на розходження в структурі, є багато спільного між ПТ із *p-n*-затворами і МДН-транзисторами. Як і ПТ із *p-n*-затворами, МДН-транзистори з індукованим каналом експлуатуються в трьох схемах включення: СЗ, СВ, і СС. Основною з них є схема СВ.

Крім того, залежно від величини напруг, поданих на електроди, МДН-транзистор може працювати в трьох характерних режимах:

- з відкритим каналом;
- у режимі насичення;
- у режимі відсічення.

Визначення кожного з цих режимів таке ж як і у випадку ПТ із *p-n*-затвором робочим режимом є режим насичення.

Принцип дії МДН-транзистора і його підсилювальні властивості визначаються так само, як ПТ із *p-n*-затвором. Дуже мала величина вхідного струму затвора I_z забезпечується в МДН-транзисторах тим, що в колі затвора є шар діелектрика. У ПТ із *p-n*-затвором струм затвора I_z малий, тому що в колі затвору включено *p-n*-перехід із зворотним зміщенням.

На відміну від ПТ із *p-n*-затвором МДН-транзистор з індукованим каналом:

- працює з напругою на затворі та стоці однакової полярності;
- режим відсічення відповідає малим напругам на затворі $U_{зв} < U_{зв.пор}$
- $U_{зв} > U_{зв.відс}$ для ПТ із *p-n*-затвором;
- має значно більший вхідний опір, що знижує втрати потужності на керування каналом і збільшує посилення сигналу за потужністю.

Статичні характеристики МДН-транзисторів з індукованим каналом показано на рис. 5.11, за зовнішнім виглядом і суттю фізичних процесів вони подібні ВАХ ПТ із *p-n*-затвором. Тому можна розглядати лише деякі їх особливості.

Передатні характеристики МДН-транзисторів з індукованим каналом показані на рис. 5.11, а. Вони зміщені від початку координат на величину

граничної напруги $U_{зв\text{ пір}}$. При напругах $|U_{зв}| < |U_{звпор}|$ канал відсутній і $I_c \approx 0$. При подачі напруги $|U_{зв}| > |U_{звпор}|$ струм I_c зростає в зв'язку з появою каналу і збагаченням його носіями.

Характеристики передачі будують для режиму насичення транзистора, тому що саме цей режим є робочим. У режимі насичення напруга $U_{св}$ на величину струму стоку впливає порівняно слабо.

Вихідні характеристики МДН-транзистора наведено на рис. 5.11, б. Розгляд їх зручно починати з області відсічення, коли напруга на затворі $|U_{зв}| < |U_{звпор}|$. При таких напругах канал відсутній, струм стоку дуже малий і вихідні ВАХ практично зливаються з віссю абсцис. При подачі на затвір напруги $|U_{зв}| > |U_{звпор}|$ в структурі виникає індукований канал і вихідні ВАХ зміщуються в область великих струмів I_c . Причому чим більше $|U_{зв}|$, тим вище йде характеристика. Характерні ВАХ в області $|U_{зв}| > |U_{звпор}|$ такі ж, як і в ПТ із p - n -затвором: початкова крута ділянка відповідає роботі з відкритим каналом, а пологіста – режиму насичення.

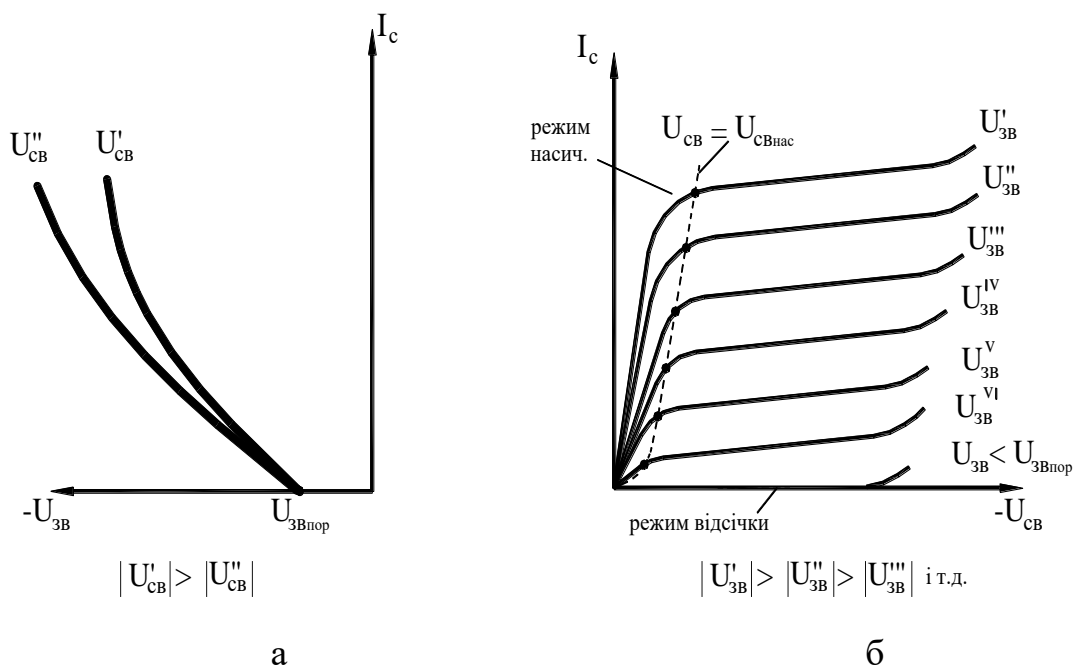


Рисунок 5.11 – Статичні характеристики МДН-транзистора з індукованим каналом

В області великих напруг на стоці $U_{св}$ виникає пробій підзатворного діелектрика. До особливостей МДН-транзисторів належить те, що причиною пробою можуть бути статичні електричні заряди, що накопичуються на виводах

під час транспортування чи монтажу. Тому, під час монтажу МДН-транзисторів на руку оператора необхідно надягати заземлюючий браслет, а під час транспортування їхні виводи мають закорочуватися.

МДН-транзистори з вбудованим каналом працюють за тим самим принципом, що і транзистори з індукованим каналом: струм у колі їхнього стоку змінюється електричним полем затвора.

Структура транзистора показана на рис. 5.5, б, а схема СВ посилення змінних сигналів і умовні позначки транзистора на рис. 5.12.

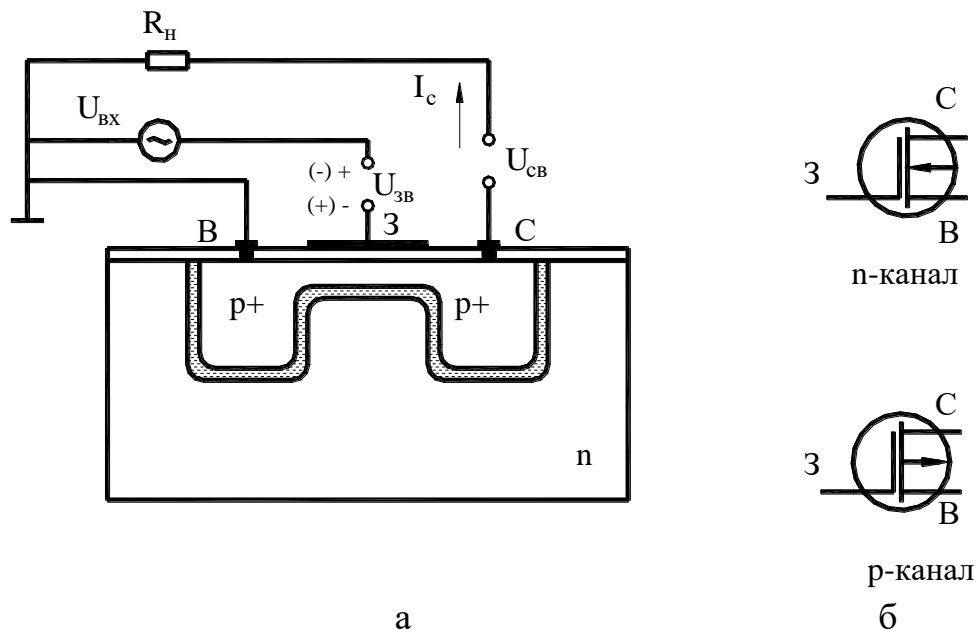


Рисунок 5.12 – Схема включення МДН транзистора з вбудованим каналом (а) для посилення змінних сигналів і його умовна позначка (б)

Основна відмінність розглянутого транзистора в тому, що в його структурі існує канал, що з'єднує області стоку й виток. Тому МДН-транзистори з вбудованим каналом можуть працювати при постійних зміщеннях на затворі $U_{зв}$ як позитивних, так і негативних.

При подачі на затвор транзистора з каналом p -типу напруги $U_{зв} < 0$ канал збагачується дірками, що відповідає його роботі в режимі збагачення. Якщо на затвор цього ж транзистору подати напругу $U_{зв} > 0$, то під дією виниклого електричного поля дірки ідуть з каналу. Такий режим називають режимом збідніння. При напругах $U_{зв} > U_{зв\ пор}$ канал цілком зникає.

Статичні характеристики МДН-транзистора з вбудованим каналом показані на рис. 5.13, істотно не відрізняються від характеристик транзистора з індукованим каналом.

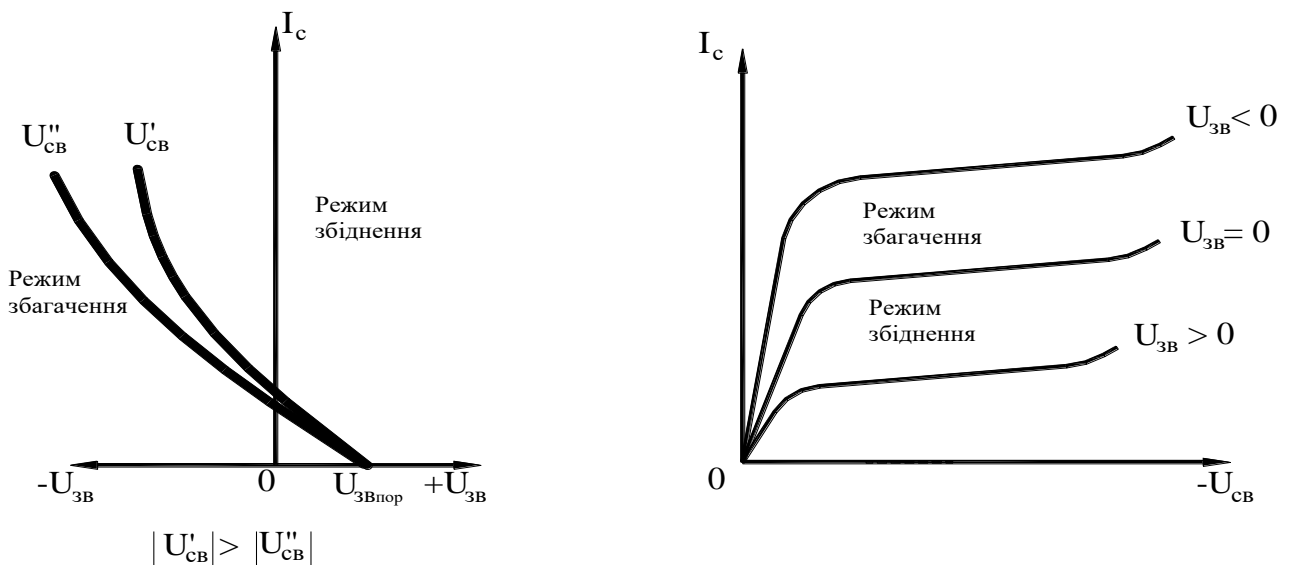


Рисунок 5.13 – Статичні характеристики МДН-транзистора з вбудованим каналом

Передатні характеристики (рис. 5.13, а) за загальним виглядом подібні до характеристик інших польових транзисторів з p - n -затвором і з індукованим каналом. Але вони зсунуті уздовж осі абсцис. Вісь ординат, на якій $U_{zb} = 0$, є межею, яка поділяє режим збіднення й режим збагачення.

Вихідні ВАХ (рис. 5.13, б) теж аналогічні вихідним ВАХ МДН-транзистора з індукованим каналом. Можна відзначити одну особливість: область насичення на ВАХ таких транзисторів розбивають на дві підобласті, що відповідають роботі транзистора в режимі збагачення та збіднення. На вихідних ВАХ ці підобласті розмежовуються характеристикою $I_c = f(U_{cb})$ при $U_{zb} = 0$. При цьому верхня частина сімейства вихідних ВАХ відповідає режиму збагачення, а нижня – збіднення.

Параметри. За невеликими виключеннями для оцінки МДН-транзисторів використовується система параметрів, введена для ПТ із p - n -затвором. Існує практично повна аналогія в їх температурних властивостях.

Запитання й завдання для самоперевірки

1. Наведіть структуру МДН-транзистора з індукованим каналом p -типу і його умовну позначку.
2. Наведіть структуру МДН-транзистора з індукованим каналом n -типу і його умовну позначку.
3. Наведіть схему ЗД в МДН-транзисторі з індукованим каналом для посилення змінних сигналів.
4. Як вибирають полярність напруги на затворі?

5. Поясніть як утворюється (індукується) канал у структурі МДН-транзистора з індукованим каналом.
6. Яку напругу затвору називають граничною?
7. Який режим називають режимом збагачення?
8. Для одержання режиму збагачення яку за знаком і величиною напругу потрібно подати на затвор структури з p -каналом і структури з n -каналом?
9. За яких режимів роботи залежно від стану каналу експлуатуються МДН-транзистори?
10. Який режим МДН-транзистора є робочим у схемах для посилення змінних сигналів?
11. Чим забезпечується мала величина вхідного струму затвора в підсилювальних схемах на МДН-транзисторах?
12. Наведіть і поясніть передатні ВАХ МДН-транзисторів з індукованим каналом.
13. Чому напруга стоку $U_{св}$ слабо впливає на передатні характеристики?
14. Наведіть вихідні ВАХ МДН-транзистора з індукованим каналом.
15. Покажіть на вихідних ВАХ МДН-транзистора області, що відповідають режиму з відкритим каналом, режиму насичення та режиму відсічення (відсутність каналу).
16. Який специфічний вид пробою існує в МДН-транзисторах?
17. Які міри необхідно застосовувати в ході поводження з МДН-транзисторами для попередження пробою статичними зарядами?
18. Наведіть структуру МДН-транзистора з вбудованим каналом p -типу і його умовну позначку.
19. Наведіть структуру МДН-транзистора з вбудованим каналом n -типу і його умовну позначку.
20. Наведіть схему СВ посилення змінних сигналів на МДН-транзисторі з вбудованим каналом.
21. Поясніть, чому на затвор МДН-транзистора із вбудованим каналом можна подавати і позитивну, і негативну напругу?
22. Який режим називають режимом збагачення, а який – режимом збідніння в МДН-транзисторах із вбудованим каналом?
23. Наведіть і поясніть передатні ВАХ МДН-транзистора із вбудованим каналом.
24. Наведіть і поясніть вихідні ВАХ МДН-транзистора із вбудованим каналом.
25. Якими параметрами оцінюють властивості МДН-транзисторів?

5.5 Еквівалентна схема польових транзисторів. Частотні і шумові властивості

Еквівалентна схема. Як і будь-який інший напівпровідниковий прилад, польовий транзистор може бути замінений спрощеною моделлю чи еквівалентною схемою. Один із варіантів такої схеми для ПТ із p - n -затвором показано на рис. 5.14.

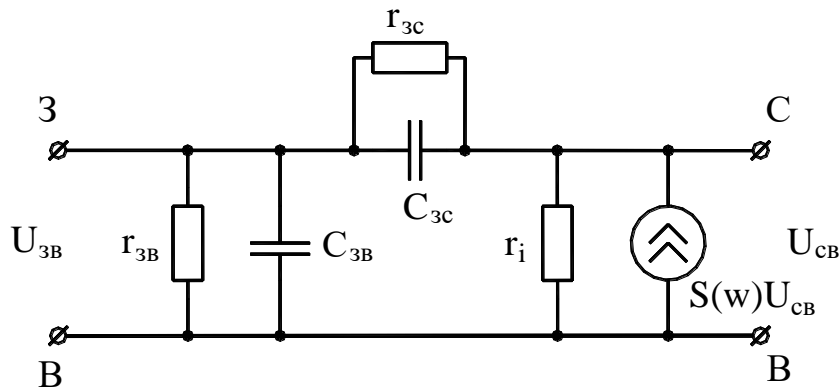


Рисунок 5.14 – Еквівалентна схема польового транзистора

Наведена схема складена, виходячи з устрою ПТ, і придатна для режиму роботи з малими змінними сигналами.

Керуючий p - n -перехід затвору поданий двома RC-колами:

- один, що складається з диференціального опору $r_{зи}$ і бар'єрної ємності $C_{зв}$, моделює ту частину p - n -переходу, що примикає до витоку;
- інший, складений з диференціального опору $r_{зс}$ і бар'єрної ємності $C_{зс}$, моделює частину p - n -переходу, що з'єднується із стоком.

Оскільки p - n -переходи затвора мають зворотне зміщення, то опори $r_{зс}$ і $r_{зи}$, які визначають вхідний опір ПТ, мають величину в декілька мегаом. Ємності $C_{зв}$ і $C_{зс}$ не перевищують одиниць пікофарад.

Канал наведено на схемі диференціальним внутрішнім опором ПТ r_i . Підсилювальні властивості ПТ відображаються генератором струму $S \cdot U_{зв}$.

Наведена еквівалентна схема чи схема заміщення придатна для розрахунку й аналізу в широкому діапазоні частот. На низьких частотах її можна спростити, виключивши з її складу всі ємнісні елементи.

Розглянуту схему використовують як еквівалентну і для МДН-транзисторів.

Частотні властивості. Із зростанням частоти вхідного сигналу підсилювальні властивості польових транзисторів погіршуються, а під час роботи з імпульсними сигналами вони мають обмежену швидкодію.

Як впливає з принципу дії польових транзисторів, у них, на відміну від біполярних транзисторів, відсутні такі явища як нагромадження неосновних носіїв, а також повільні процеси їхньої дифузії.

Причинами погіршення підсилювальних властивостей або інерційності польових транзисторів є такі фізичні фактори:

- кінцевий час руху носіїв у каналі;
- кінцевий час перезарядження бар'єрних ємностей $C_{зв}$ і $C_{зс}$;
- структури польових транзисторів.

Інерційність ПТ визначається насамперед процесами перезарядження ємностей $C_{зв}$ і $C_{зс}$. При цьому характер їхніх дій різний. Ємність $C_{зв}$ шунтує вхід ПТ. Із зростанням частоти її опір зменшується, що призводить до пропорційного зменшення вхідного опору. Втрати потужності вхідного сигналу на керування ПТ зростають і його посилення падає.

Ємність $C_{зс}$ утворює коло частотно-залежного зворотного зв'язку в транзисторі: з підвищенням частоти його опір падає, і частина потужності вихідного сигналу через це коло попадає на вхід, а не в навантаження. Тому, в ході виробництва ПТ приймають усі можливі міри, що сприяють зменшенню ємностей $C_{зв}$ і $C_{зс}$.

На частотні властивості ПТ впливає також кінцевий час руху носіїв у каналі t_k . На схемі рис. 5.14 цей фактор враховується тим, що крутизна ПТ вважається частотозалежною величиною виду:

$$S(\omega) = \frac{S_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_S}},$$

де S_0 – значення крутості на низьких частотах;

$$\omega_S = \frac{2\pi}{t_k} \text{ – гранична частота ПТ.}$$

На частоті $\omega = \omega_S$ крутизна S приймає значення $0,0707S_0$. Частота $\omega_S = 2\pi f_S$ – частотний параметр ПТ.

Час поширення сигналу в каналі t_k значною мірою залежить від рухливості основних носіїв каналу. Оскільки електрони в кристалі напівпровідника мають більш високу рухливість, ніж дірки, то транзистори з каналами n -типу мають більш високі значення граничних частот. Ці транзистори можуть працювати на більш високих частотах.

Частотні властивості ПТ із p - n -затвором і МДН-транзистори істотно не розрізняються, і приблизно такі ж, як і у біполярних транзисторів. Найкращі частотні властивості отримують у ПТ з арсеніду галію з переходами Шотки.

Шумові властивості ПТ визначаються такими шумами як теплові та надлишкові. У них відсутні дробові шуми та шуми струморозподілення, які є в біполярних транзисторах поряд з тепловими й надлишковими. Тому за рівнем шуму ПТ істотно кращі ніж БТ.

Якщо порівнювати за шумовими властивостями МДН-транзистори і ПТ із *p-n*-затвором, то слід зазначити, що власні шуми МДН-транзисторів, аж до частот порядку 100 кілогерц, є надлишковими і за своїми рівнями перевершують шуми ПТ із *p-n*-затвором.

Шумові властивості польових транзисторів оцінюють коефіцієнтом шуму $K_{ш}$ (п. 2.4). Величина $K_{ш}$, як і у випадку БТ, залежить від опору джерела сигналу R_c . Мінімум $K_{ш}$ для ПТ забезпечується при опорах $R_{c\text{ опт}}$ порядку десятків – сотень кілоом.

Під час роботи з високоомними джерелами польові транзистори вносять додаткового шуму значно менше, ніж біполярні.

5.6 Порівняння біполярних і польових транзисторів

В електричних схемах польові та біполярні транзистори виконують однакові функції. Але властивості цих типів транзисторів розрізняються, що обумовлено розходженнями в їхньому устрої, принципах дії, конструкції.

Порівнюючи ці властивості, можна виділити такі переваги польових транзисторів:

- великий вхідний опір (понад 10 мегаом);
- малі вхідні струми і вхідні потужності, внаслідок великого вхідного опору. Це дозволяє здійснювати керування електронними схемами на ПТ безпосередньо від мікросхем без проміжного посилення;
- добра термостабільність вольтамперних характеристик, обумовлена тим, що вихідний струм ПТ утворений основними носіями;
- наявність на передатних характеристиках термостабільної точки;
- більш низький порівняно з БТ рівень власних шумів;
- більш висока порівняно з БТ радіаційна стійкість, що оцінюється як здатність зберігати основні експлуатаційні властивості в заданих межах під час радіаційного опромінення. Ця якість також обумовлена тим, що вихідний струм у ПТ створюється основними носіями;
- виробництво ПТ простіше; вони мають менші габарити; якщо використовувати їх в інтегральних мікросхемах (ІМС), то можна домогтися більш високого ступеня інтеграції;

– надійність ПТ вища надійності БТ. Надійністю називають здатність приладу зберігати загальні властивості в заданих межах протягом визначеного часу.

Недоліки ПТ:

– чутливість до електростатичних зарядів, що накопичуються на затворі і викликають пробій підзатворного діелектрика;

– нестабільність (дрейф) статичних характеристик, викликана фізичними процесами в діелектрику під дією електричного поля затвору.

Таким чином, можна сказати, що застосування польових транзисторів поліпшує економічні показники виробу. За прогнозами фахівців, особливо широке застосування знайдуть МДН-транзистори як в пристроях дискретної, так і в пристроях інтегральної електроніки.

Запитання й завдання для самоперевірки

1. Зобразіть еквівалентну схему ПТ для режиму малих змінних сигналів.
2. Поясніть, які області ПТ моделює кожний з елементів еквівалентної схеми.
3. Як і чому змінюються підсилювальні властивості ПТ під час підвищення частоти вхідного сигналу?
4. Якими фізичними факторами обумовлена зміна властивостей ПТ під час роботи на високих частотах?
5. В чому полягає вплив на властивості ПТ на високих частотах ємності $C_{зв}$?
6. В чому полягає вплив на властивості ПТ на високих частотах ємності $C_{зс}$?
7. Від чого залежить час руху носіїв заряду в каналі?
8. Поясніть фізичний зміст такого параметру ПТ як «гранична частота».
9. Чому ПТ із n -каналом мають більш високі робочі частоти, ніж ПТ із p -каналом?
10. Які джерела власних шумів є в ПТ?
11. Чому шумові властивості ПТ кращі, ніж у БТ?
12. Запишіть вираз для коефіцієнта шуму та поясніть його фізичний зміст.
13. Як залежить коефіцієнт шуму від опорного джерела сигналу?
14. Порівняйте польові транзистори з біполярними.

6 НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПРИЛАДИ З НЕГАТИВНИМ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИМ ОПОРОМ

6.1 Загальні властивості приладів з негативним диференціальним опором

Диференціальним опором називається опір, який завдає прилад змінному сигналу невеликої амплітуди (чи малому сигналу) у деякій заданій робочій точці.

Якщо малі амплітуди струму й напруги розглядати як невеликі прирости ΔI і ΔU , то диференціальний опір $r_{\text{диф}}$ визначають у такий спосіб:

$$r_{\text{диф}} = \frac{\Delta U}{\Delta I}. \quad (6.1)$$

У деяких напівпровідникових приладах можливі такі режими, коли під час *невеликого збільшення напруги* – приріст $\Delta U > 0$, тобто позитивний, відбувається *невелике зменшення струму* – приріст $\Delta I < 0$, тобто негативний.

Можлива і зворотна ситуація: з невеликим зменшенням напруги ($\Delta U < 0$) відбувається невелике збільшення струму ($\Delta I > 0$). Для таких випадків диференціальний опір:

$$r_{\text{диф}} = \frac{\Delta U}{\Delta I} < 0,$$

його називають *негативним*.

Диференціальний опір за фізичним змістом визначає реакцію приладу на невеликі зміни струму або напруги, тобто є опором приладу малому змінному сигналу. Його не слід ототожнювати з опором приладу постійному струму:

$$r_0 = \frac{U}{I} > 0 \quad (6.2)$$

у заданій робочій точці. Опір r_0 визначає втрати потужності в приладі і завжди позитивний.

Напівпровідникові прилади, в яких у визначених режимах з'являється негативний диференціальний опір, мають специфічні вольтамперні характеристики. На ВАХ таких приладів є ділянки з негативним диференціальним опором. За виглядом ВАХ виділяють прилади з характеристиками S- і N-типу (рис. 6.1). на рис. 6.1, а ділянка негативного диференціального опору знаходиться між двома значеннями струму:

$$I_{\text{зр}} < I < I_{\text{зал}},$$

де $I_{\text{зр}}$ – струм зриву, а $I_{\text{зал}}$ – залишковий струм.

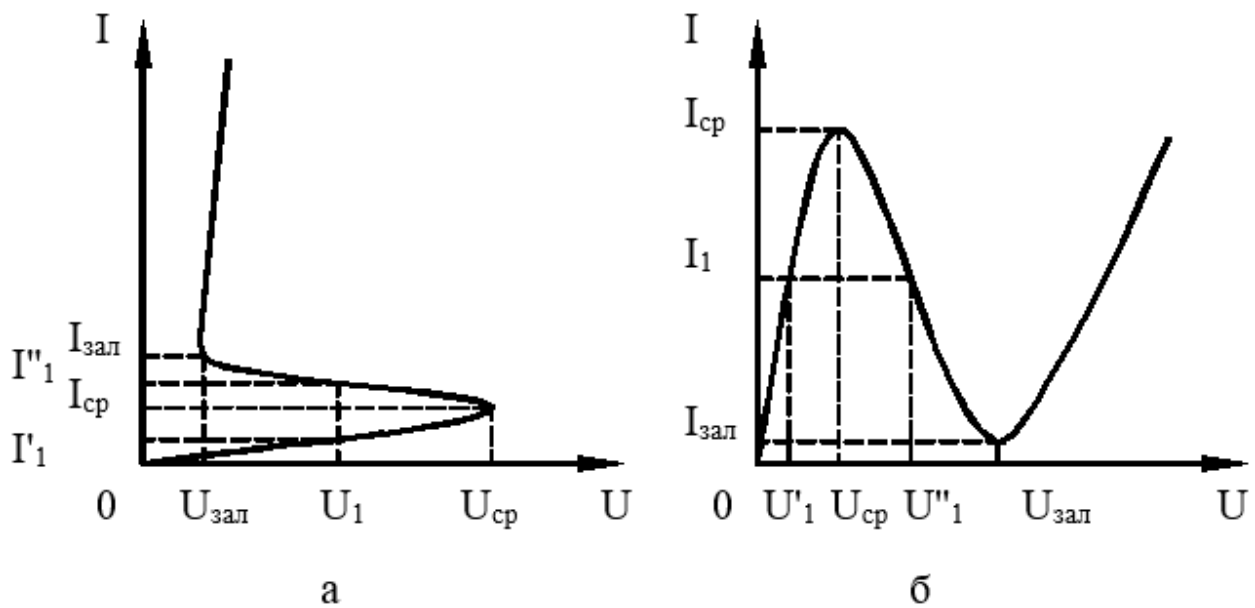


Рисунок 6.1 – Вольтамперні характеристики S-типу (а) і N-типу (б)

На рис. 6.1,б ділянка негативного диференційного опору знаходиться між значень напруг:

$$U_{\text{зр}} < U < U_{\text{зал}}.$$

На цих ділянках на рис. 6.1, а та 6.1, б із зростанням напруги струм зменшується, тобто позитивному проросту напруги відповідає негативний приріст струму і $r_{\text{диф}} < 0$.

На ВАХ S-типу кожному значенню струму відповідає одне і те саме значення напруги, що легко перевірити за рис. 6.1, а. Але одному значенню напруги може відповідати два (а іноді і більше) різних значення струму. Таким чином, якщо задати напругу U_1 , то в приладі з характеристикою S-типу може протікати як струм I_1^I , так і струм I_1^{II} (рис. 6.1, а). Такі прилади називають приладами, керованими струмом.

На ВАХ N-типу кожна точку можна однозначно визначити тільки значенням напруги. Струм же одного значення, наприклад, I_1 (рис. 6.1, б) може протікати в приладі як із напругою U_1^I , так і з напругою U_1^{II} . Прилади з характеристикою N-типу називають приладами, керованими напругою. Замість негативного диференціального опору в приладах із характеристиками N-типу використовують поняття «негативна диференціальна провідність»:

$$g_{\text{диф}} = \frac{1}{r_{\text{диф}}}.$$

Загальною властивістю приладів з негативним диференціальним опором є наявність у них позитивного зворотного зв'язку.

Позитивний зворотний зв'язок означає, що частина вихідного сигналу подається на вхід в однаковій фазі з вхідним сигналом.

У приладах з негативним опором позитивний зворотний зв'язок створюється фізичними процесами, що проходять всередині приладів. Такий зв'язок називають внутрішнім зворотним зв'язком.

Прилади з негативним опором дуже зручні для створення на них підсилювальних та інтегральних пристроїв. Такі пристрої містять істотно менше елементів, ніж під час використання, наприклад, звичайних транзисторів.

Запитання й завдання для самоперевірки

1. Які опори називають диференціальними?
2. Поясніть, за яких умов диференціальний опір приладу вважають негативним.
3. Чи може бути негативним статичний опір приладу?
4. Яких двох типів бувають ВАХ у приладів з негативним диференціальним опором?
5. Наведіть характеристики S- і N-типу і покажіть на них ділянки негативного диференціального опору.
6. Чому прилади з ВАХ S-типу вважають керованими струмом?
7. Чому прилади з ВАХ N-типу вважають керованими напругою?
8. Що означає поняття «позитивний зворотній зв'язок»?
9. В яких пристроях застосовують прилади з негативним диференціальним опором?

6.2 Тунельні діоди

Тунельні діоди – це напівпровідникові діоди, на ВАХ яких є ділянка диференціального опору.

Робота цих діодів основана на тунельному ефекті, що пояснюється наявністю в електронів хвильових властивостей. Ефект в тому, що завдяки хвильовим властивостям електрон за певних умов може пройти через потенційний бар'єр, не змінюючи своєї енергії. При цьому на іншій стороні бар'єра має існувати вільний дозволений енергетичний рівень. Необхідною умовою тунельного ефекту є також мала ширина потенційного бар'єра – порядку 0,01 мкм. Найбільш сприятливі умови для тунельного ефекту створюються в різких *p-n*-переходах при високих рівнях легування *p*- і *n*-областей

структури, коли запірний шар має малу ширину. Тунельні діоди створюють на p - n -переходах у вироджених напівпровідниках.

Концентрації домішок у n - і p -областях таких переходів знаходяться в межах $10^{19} \dots 10^{21} \text{ см}^{-3}$. Завдяки цьому ширина p - n -переходу тунельного діода складає зазвичай $0,01 \dots 0,02 \text{ мкм}$, що створює необхідні умови для руху носіїв заряду через потенційний бар'єр за рахунок тунельного ефекту.

ВАХ тунельного діода (рис. 6.2) не схожа на характеристики звичайних діодів.

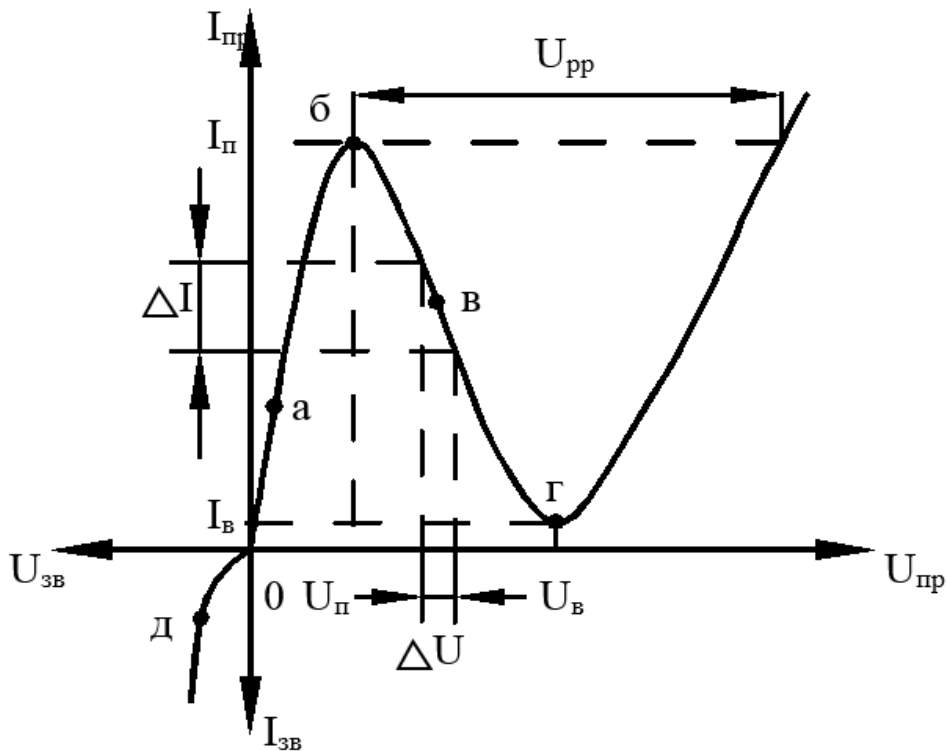


Рисунок 6.2 – Вольтамперна характеристика тунельного діода

Під час подачі на нього зворотної напруги діод не запирається, а навпаки – через нього протікає великий зворотний струм. Пряма область ВАХ має «падаючу» ділянку, на якій зі збільшенням напруги струм зменшується. Це ділянка негативного диференціального опору, тому що для неї $r_{\text{диф}} = \frac{\Delta U}{\Delta I} < 0$.

Для того, щоб пояснити ВАХ тунельного діода, необхідно розглянути енергетичні діаграми p - n -переходу на вироджених напівпровідниках з різними зовнішніми напругами (рис. 6.3). У вироджених напівпровідниках у результаті дуже великої концентрації домішок окремі домішкові дозволені рівні розщеплюються в домішкові зони.

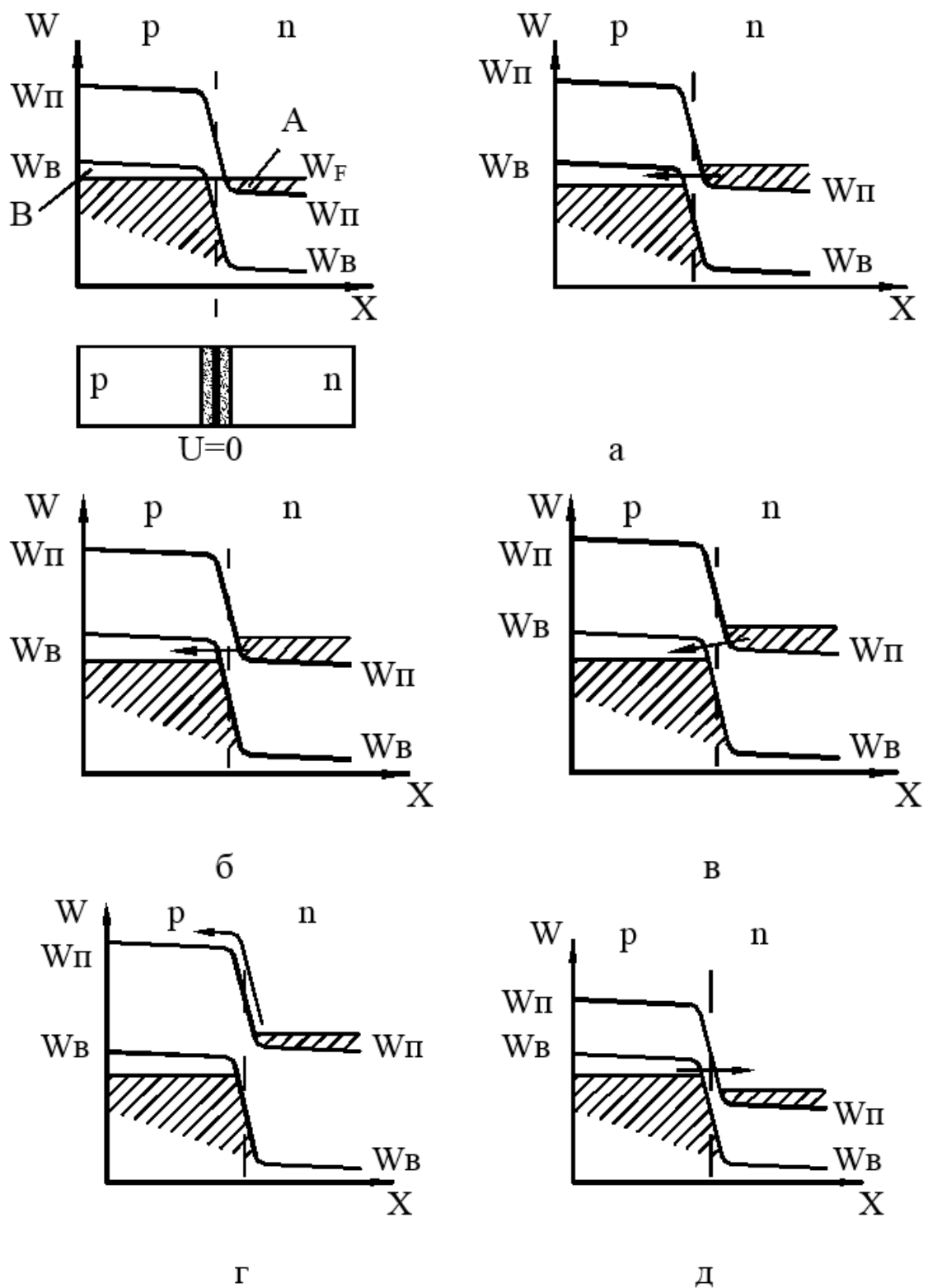


Рисунок 6.3 – Зонні енергетичні діаграми p - n -переходу тунельного діода

Ці зони з'єднуються з найближчими дозволеними зонами – зоною провідності в напівпровіднику n -типу і валентною зоною в напівпровіднику p -типу. Рівень Фермі W_F , що визначає середню енергію носіїв заряду в кристалі, виявляється розташованим у дозволений зоні. У напівпровіднику n -типу він

знаходиться в зоні провідності, тобто трохи вище рівня W_{Π} . У напівпровіднику p -типу рівень Фермі знаходиться у валентній зоні, тобто нижче рівня W_B .

Зонна енергетична діаграма p - n -переходу тунельного діода в стані термодинамічної рівноваги показана на рис. 6.3 при $U=0$, тобто за відсутності зовнішньої напруги. У цьому стані рівень Фермі однаковий для всього кристала. Це призводить до того, що на зонній діаграмі спостерігається мов би «перекриття» дозволених зон – дно зони провідності W_{Π} n -шару лежить нижче стелі валентної зони W_p p -шару. У зоні провідності n -шару рівні, зайняті електронами (показані штрихуванням) – в основному, між W_{Π} і W_F (ділянка А). У валентній зоні p -шару рівні, вільні від електронів, тобто зайняті дірками, теж, в основному, між W_B і W_F .

У стані термодинамічної рівноваги при $U=0$ струм через p - n -перехід не іде, тому що для тунельного ефекту немає необхідних умов. На зонній діаграмі видно, що навпроти зайнятих електронами рівнів розташовані теж зайняті рівні. На ВАХ цей стан відповідає точці – початку координат.

Нехай тепер на p - n -перехід подано невелику пряму напругу (точка «а» на рис. 6.2). При цьому потенційний бар'єр трохи знижується. Енергетичні зони на зонній діаграмі зміщуються так, що навпроти зайнятих рівнів зони провідності n -напівпровідника виявляються вільні рівні валентної зони p -напівпровідника (рис. 6.3, а). Цим створюються умови для тунельного переходу електронів із n -напівпровідника в p -напівпровідник. Виникає струм, який називають тунельним. У цьому випадку через перехід протікає і звичайний дифузійний струм, але його значення мале порівняно зі значенням тунельного струму. Це зумовлено високим потенційним бар'єром для основних носіїв заряду.

За деякої прямої напруги U_{Π} (напруга «піку» ВАХ) (точка «б» на рис. 6.2) положення енергетичних зон таке, що ділянка А із зайнятими рівнями виявляється навпроти ділянки В з вільними рівнями (рис. 6.3, б). Тунельний струм у цій точці досягає максимуму і називається піковим струмом I_{Π} .

З подальшим збільшенням прямої напруги (точка «в» на рис. 6.2) перекриття ділянок А і В зменшується (рис. 6.3, в). Частина зайнятих електронами рівнів у зоні провідності n -напівпровідника виявляється напроти забороненої зони і не може брати участь у тунельному струмі. Значення тунельного струму падає, що й обумовлює наявність падаючої ділянки на ВАХ.

Починаючи з напруги U_B (напруга «западини» рис. 6.2, г) ділянки А і В зовсім не «перекриваються» (рис. 6.3, г). Усі рівні, зайняті електронами, знаходяться навпроти забороненої зони. Тунельний струм припиняється. Струм, який протікає при цьому, I_B , називаний струмом западини, має

дифузійну природу. Він обумовлений дифузією основних носіїв через потенційний бар'єр, як і в звичайних p - n -переходах. Якщо прямі напруги перевищують величину U_B , то характеристика тунельного діоду не відрізняється від характеристики звичайного p - n -переходу.

Зі зворотними напругами (точка «0» на рис. 6.2) збільшується висота потенційного бар'єру p - n -переходу. Зайняті рівні валентної зони p -шару виявляються навпроти вільних рівнів зони провідності n -шару (рис. 6.3, д). Це створює умови для протікання значного тунельного струму. Причому із зростанням зворотної напруги зазначене перекриття рівнів збільшується і струм різко зростає.

Параметри тунельного діоду визначаються координатами екстремальних точок його ВАХ (рис. 6.2):

- піковий струм I_P – прямий струм у точці максимуму ВАХ; величина його може бути від часток мА до сотень мА;
- струм западини I_B – прямий струм у точці мінімуму ВАХ;
- відношення струмів I_P/I_B ; для діодів із різних матеріалів це відношення може бути від декількох одиниць (для германієвих діодів) до 10 і більше (для діодів з арсеніду галію);
- напруга піку U_P ; має величину від декількох десятків мілівольт до ста і більше мілівольт для діодів із різних матеріалів;
- напруга западини U_B ; величина її – кілька сотень мілівольт залежно від матеріалу;
- диференціальний опір $r_{\text{диф}}$ на падаючій ділянці ВАХ; модуль цього опору для різних діодів має величину від одиниць Ом до декількох сотень Ом;
- гранична резистивна частота $f_{\text{рез}}$ – така частота, до якої на зовнішніх виводах тунельного діоду існує негативний диференціальний опір.

Частотні властивості. Тунельний діод – малоінерційний прилад, він має дуже високу швидкодію і застосовується в пристроях, що працюють на надвисоких частотах (НВЧ). Це пояснюється тим, що тунельний перехід основних носіїв відбувається зі швидкістю істотно більшою ніж швидкості дифузії й дрейфу. У діоді відсутні процеси накопичення й розсмоктування неосновних носіїв заряду, які визначають швидкодію напівпровідникових діодів. Робоча частота тунельного діоду обмежується лише ємністю p - n -переходу й індуктивністю виводів. Еквівалентна схема тунельного діода для малих змінних сигналів показана на рис. 6.4.

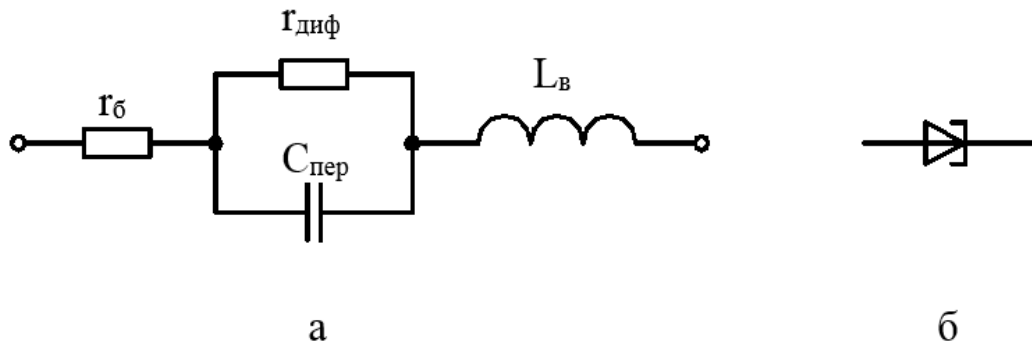


Рисунок 6.4 – Еквівалентна схема (а) та умовна позначка (б) тунельного діоду

На цьому рисунку $r_б$ – опір тих нейтральних областей кристала, що знаходяться поза p - n -переходом. Власне p - n -перехід поданий диференціальним опором $r_{диф}$ і ємністю $C_{пер}$, $L_в$ – індуктивність виводів.

Якщо робоча точка діода встановлена на падаючій ділянці ВАХ, то $r_{диф} < 0$. Але на зовнішніх виводах діоду повний опір через вплив реактивностей $C_{пер}$ і $L_в$ містить активну та реактивну складові залежні від частоти. На деякій резистивній частоті f_p активна частина повного опору, незважаючи на вибір робочої точки, стає рівною нулю. На частоті $f > f_p$ – активна частина повного опору – позитивна. Отже діод можна використовувати як прилад із негативним диференціальним опором лише на частотах $f < f_p$. Розрахунок показує, що:

$$f_p \approx I_{II} / C_{ПЕР} ,$$

тобто відношення пікового струму I_{II} до ємності переходу $C_{пер}$ є важливим параметром, що характеризує частотні властивості окремого діода.

Частота f_p складає звичайно десятки і сотні тисяч МГц. Щоб зменшити ємність, роблять малу площу p - n -переходу, тому тунельні діоди, як правило, малопотужні. Індуктивності виводів тунельних діодів теж роблять якнайменшими.

Застосування тунельних діодів. Основні властивості тунельного діода обумовлені наявністю на його ВАХ ділянки з негативним диференціальним опором. На приладах з таким опором створюють схеми переключення струмів і напруг у різних логічних пристроях, схеми генерування й посилення електричних сигналів.

Найважливіша властивість тунельного діоду – висока швидкодія, обумовлена тунельним ефектом. Крім того, тунельний діод досить добре зберігає свої експлуатаційні властивості як під час зміни температури навколишнього середовища, так і під час впливу радіації. Це температурно стабільний і радіаційно стійкий прилад. Такі цінні властивості обумовлені тим,

що тунельний діод працює на основних носіях заряду, концентрація яких незначно залежить від температури та радіації в робочому діапазоні.

Виготовляють тунельні діоди з таких напівпровідникових матеріалів як германій, арсенід галію й антимонід галію.

Запитання й завдання для самоперевірки

1. Поясніть сутність тунельного ефекту.
2. Чому тунельний ефект спостерігається в *p-n*-переходах на високолегованих напівпровідниках?
3. Які напівпровідники називають виродженими та яку ширину *p-n*-переходів мають такі напівпровідники?
4. Зобразіть ВАХ тунельного діода і вкажіть її відмінність від ВАХ звичайних, наприклад, випрямляючих, діодів.
5. Де знаходиться рівень Фермі на зонних енергетичних діаграмах напівпровідників *n*- і *p*-типу?
6. Зобразіть та поясніть зонну енергетичну діаграму *p-n*-переходу тунельного діода в стані термодинамічної рівноваги.
7. Поясніть за допомогою зонної діаграми першу висхідну гілку ВАХ діода ($U < U_B$).
8. Поясніть за допомогою зонної діаграми пік характеристики діода.
9. Поясніть за допомогою зонної діаграми дільницю негативного диференціального опору на ВАХ діода.
10. Поясніть за допомогою зонної діаграми западину характеристики діода.
11. Поясніть за допомогою зонної діаграми зворотну гілку характеристики діода.
12. В якій області ВАХ струм діода є не тунельним, а дифузійним?
13. Якими параметрами користуються для оцінки експлуатаційних властивостей діода?
14. Як пояснити високу швидкодію тунельного діода?
15. Наведіть і поясніть еквівалентну схему для малих змінних сигналів.
16. Якими факторами обмежуються частотні властивості тунельного діода?
17. Чому тунельні діоди, як правило, є малопотужними приладами?
18. Як пояснити температурну стабільність тунельних діодів?
19. З яких матеріалів виготовляються тунельні діоди?

6.3 Лавино-пролітні діоди

Лавино-пролітні діоди (ЛПД) – це напівпровідниковий діод, що працює в режимі лавинного розмноження носіїв заряду під час зворотного зміщення p - n -переходу.

ЛПД призначені, як правило, для генерації НВЧ-діапазону. Відмінність ЛПД від тунельних діодів, насамперед, у тому, що негативний диференціальний опір у них виявляється тільки в діапазоні НВЧ.

ЛПД є діодами із широкими p - n -переходами, час руху носіїв у яких є порівняним з періодом робочих НВЧ-коливань.

Приклад структури ЛПД типу p^+-n-n^+ і схема його включення показані на рис. 6.5, а.

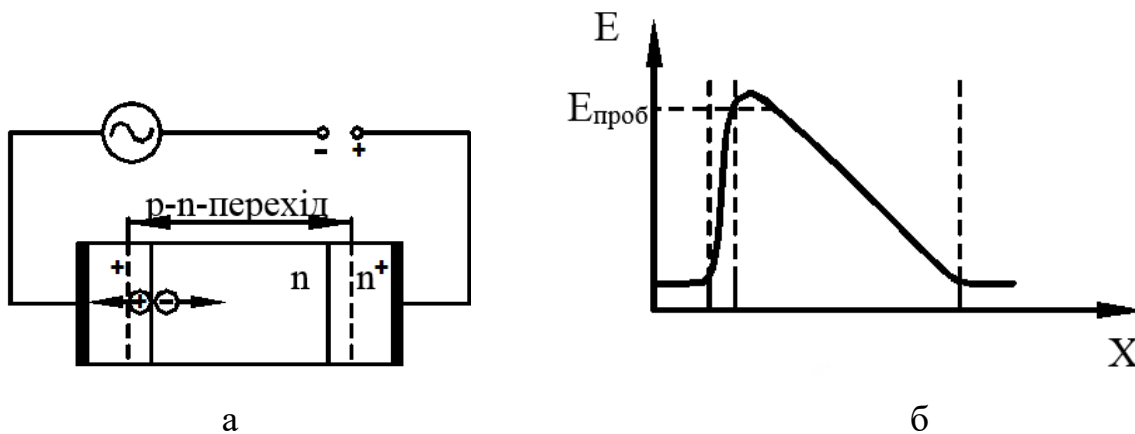


Рисунок 6.5 – Структура ЛПД (а) і напруженість електричного поля (б)

Як правило, ЛПД розміщують в об'ємний резонатор, що є мов би коливальним контуром діапазону НВЧ. До електродів діода прикладено напругу зворотного зміщення U_0 і змінну напругу з амплітудою U_m , яка існує в резонаторі. Величини цих напруг вибирають з умови:

$$U_m < U_0 < U_{\text{проб}} \text{ і } (U_m + U_0) > U_{\text{проб}}. \quad (6.5)$$

Крім того, величина U_0 має бути такою, щоб запірний шар займав усю n -область і невеликі ділянки в p^+ - і n^+ -областях.

На рис. 6.5, б показано розподіл напруженості електричного поля E в структурі. Найбільшу величину напруженість поля E має біля межі p^+ - і n^+ -областей. Коли сумарна напруга постійної та змінної складових, прикладена до p^+ - n -переходу, перевищує пробивну напругу $U_{\text{проб}}$, починається процес ударної іонізації у переході – лавинний пробій (рис. 6.6). Пробій призводить до лавиноподібного збільшення концентрації носіїв заряду – електронів і дірок. Ці носії заряду під дією електричного поля E дрейфують у протилежних напрямках: дірки в p^+ -область, де рекомбінують, а електрони –

у n -область (*пролітний простір*), а потім у n^+ -область (рис. 6.5 а). Час дрейфу дірок – малий, тому що вони проходять невелику відстань. Електрони ж рухаються через протяжний n -шар у n^+ -область і витрачають на це більше часу.

Пробій продовжується тільки протягом того проміжку часу, доки:

$$(U_m + U_0) > U_{\text{проб}}$$

На рис. 6.6 – це час Δt .

Електрони, що рухаються в пролітному просторі, утворюють імпульс струму тривалістю Δt . За час прольоту τ_n носіїв заряду через пролітний простір напруга на діоді може встигнути зменшитися, якщо частота змінної складової велика. У діапазоні НВЧ час прольоту порівняльний з періодом коливань.

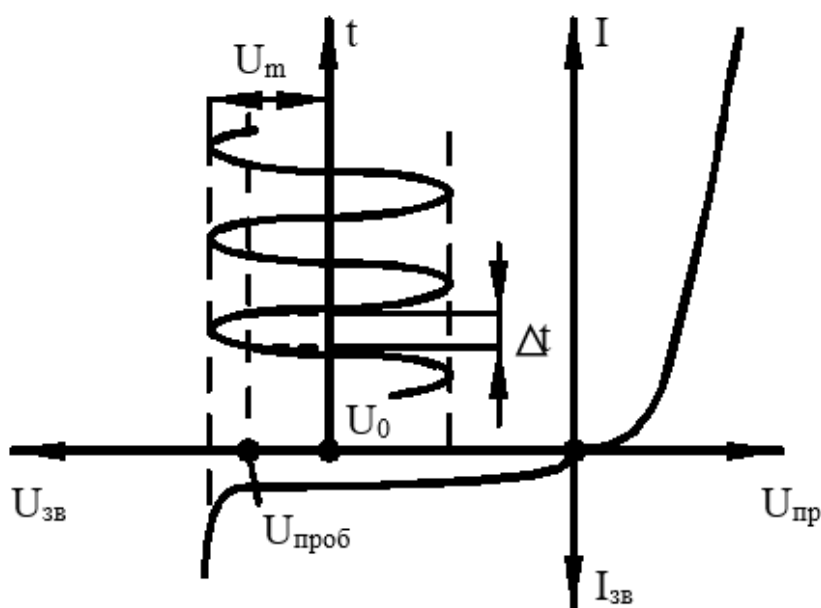


Рисунок 6.6 – Епюра, що пояснює принцип роботи ЛПД

Таким чином, через те, що час прольоту носіїв (у даному випадку електронів) кінцевий, з'являється фазовий зсув між струмом, що проходить через діод і прикладеною до цього діода змінною напругою високої частоти.

Фазовий зсув між струмом і напругою визначається не тільки часом прольоту τ_n , але і кінцевим часом, необхідним для розвитку процесу ударної іонізації (лавини) $\tau_{\text{л}}$. Ці два відрізки часу τ_n і $\tau_{\text{л}}$ для даної конструкції діода постійні, а період високочастотних коливань залежить від частоти. Тому фазовий зсув ϕ буде різним на різних частотах.

Припустимо, що час прольоту τ_n разом з часом розвитку лавини $\tau_{\text{л}}$ дорівнює половині періоду коливань деякої частоти змінної напруги (рис. 6.7). У цьому випадку змінний струм через діод відставатиме на півперіоду від

змінної напруги, що його викликала. Збільшення напруги супроводжується зменшенням струму, а зменшення напруги, навпаки, зростанням струму. Це означає, що для даної частоти змінної напруги протягом усього періоду коливань виконується умова негативного диференціального опору.

На інших частотах, будуть інші значення фазового зсуву і негативний диференціальний опір може з'являтися в ЛПД протягом тільки частини періоду високочастотних коливань. Аналіз показує, що диференціальний опір ЛПД є негативним на тих частотах, де фазовий зсув задовольняє умову:

$$90^\circ < \varphi < 270^\circ.$$

Цей діапазон частот досягає сотень тисяч МГц.

Таким чином, ЛПД має негативний диференціальний опір тільки для НВЧ-коливань. Статична ВАХ їх подібна до ВАХ звичайних діодів (рис. 6.6).

ЛПД використовують у підсилювачах і генераторах НВЧ-діапазону. Як матеріали для ЛПД застосовують германій, кремній, арсенід галію.

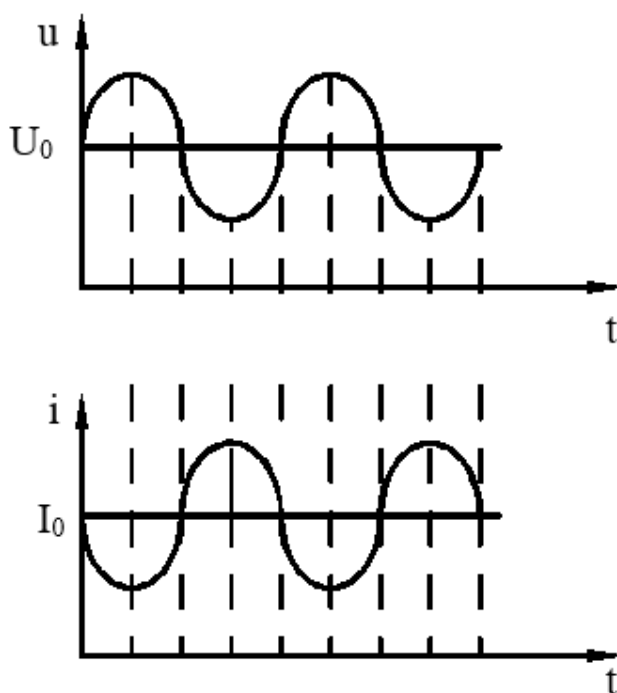


Рисунок 6.7 – Елюра змінних струмів і напруг на ЛПД під час зрушення фаз $\varphi = 180^\circ$

Запитання й завдання для самоперевірки

1. Які діоди називають лавино-пролітними?
2. Зобразіть приклад структури ЛПД і схему його включення.
3. Наведіть розподіл напруженості електричного поля в структурі ЛПД і поясніть його.

4. Наведіть ВАХ ЛПД і епюри постійної та змінної напруг, прикладених до діода.
5. Яка умова має виконуватися при виборі постійної та змінної напруги на діоді?
6. Поясніть фізичні процеси в ЛПД у режимі лавинного пробію.
7. В результаті яких фізичних процесів з'являється в ЛПД зсув фаз між змінним струмом і змінною напругою, прикладеним до діода?
8. Наведіть епюри змінних струмів і напруг ЛПД під час зсуву фаз на 180° .
9. За яких значень зсуву фаз між змінною напругою та струмом ЛПД має негативний диференціальний опір?
10. В яких пристроях застосовують ЛПД?
11. З яких матеріалів виготовляють ЛПД?

6.4 Діоди Ганна

Діод Ганна – це напівпровідниковий прилад, у якого під дією сильного електричного поля з'являється негативний диференціальний опір. Діоди Ганна застосовують для посилення та генерації змінних сигналів НВЧ-діапазону.

Свою назву діоди Ганна отримали за прізвиськом вченого, який вперше спостерігав фізичний ефект, використовуваний у цих приладах. У діоді Ганна немає *p-n*-переходу, діодами ці прилади називають тому, що вони, як і діоди, є двополюсними, тобто мають два виводи.

Ефект Ганна полягає в тому, що при прикладенні до кристала однорідного напівпровідника постійної напруги певної величини в ньому виникає змінний струм частоти НВЧ-діапазону.

Але цей ефект спостерігається не у всіх напівпровідниках, а тільки в тих, які мають складну структуру зони провідності. Структуру необхідного вигляду мають такі матеріали як арсенід галію (GaAs), фосфід індію (In), телурид кадмію (CdTe) і деякі інші.

На рис. 6.8 наведено зонну діаграму арсеніду галію. Особливість зони провідності полягає в тому, що в ній є дві так називані долини – нижня та верхня. Верхня долина відповідає більш високим енергіям зони провідності і відстоїть від нижньої долини на $\Delta W = 0,56$ еВ.

Електрони, які знаходяться в нижній долині, називають «легкими» (або «холодними»), тому що вони мають досить високу рухливість μ_1 .

Значення $\mu_1 \approx 5000 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$.

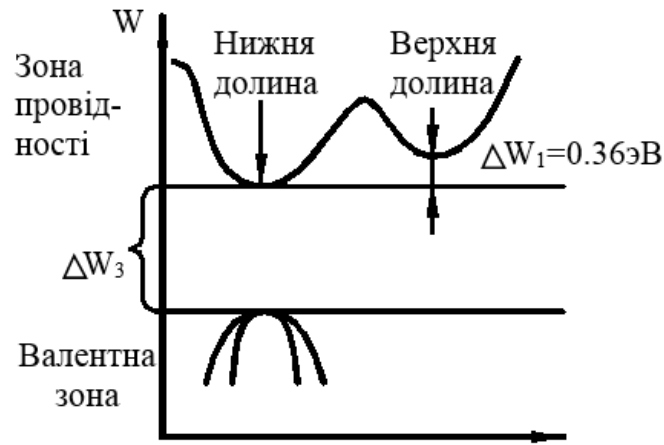


Рисунок 6.8 – Зонна енергетична діаграма арсеніду галію

Електрони верхньої долини називають «важкими» (або «гарячими»), тому що їх рухливість μ_2 істотно менше рухливості μ_1 . Значення $\mu_2 \approx 100 \dots 200 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$.

Позначимо концентрацію легких електронів у деякому зразку напівпровіднику з арсеніду галію n_1 , рухливість їх – μ_1 . Концентрацію важких електронів у цьому ж кристалі позначимо n_2 , рухливість їх – μ_2 . Повна концентрація електронів $n_0 = n_1 + n_2$. Нехай до напівпровідника прикладене слабе електричне поле напруженістю E , меншою деякого граничного значення напруженості $E < E_{\text{гр}}$. У цьому випадку практично всі електрони знаходяться в нижній долині і можна вважати, що $n_1 \approx n_0$. Щільність дрейфового струму, що протікає при цьому в кристалі:

$$I_1 = qn_0\mu_1 E. \quad (6.4)$$

Залежність дрейфового струму від напруженості електричного поля або ВАХ розглянутого кристала показана на рис. 6.9.

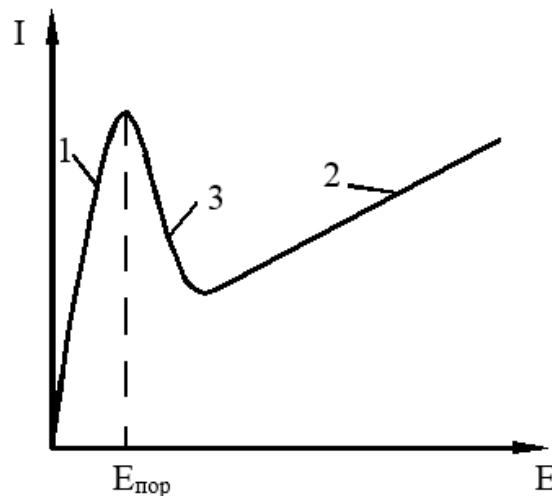


Рисунок 6.9 – ВАХ напівпровідника з багатодоменною структурою зони провідності

Ділянка 1 вольтамперної характеристики відповідає режиму слабого електричного поля.

Якщо в напівпровіднику створено сильне електричне поле $E_2 > E_{пор}$, то електрони під дією цього поля здобувають додаткову енергію $\Delta W/\Delta W_1$ (рис. 6.8), переходять у боковий домен і стають важкими. При сильних полях $E \gg E_{пор}$ можна вважати, що практично всі електрони одержують достатню додаткову енергію і з'являться в боковому домені. Так що концентрація їх $n_2 \approx n_0$. Щільність дрейфового струму в цьому випадку:

$$I_2 = qn_0\mu_2E. \quad (6.5)$$

Режиму сильного електричного поля відповідає ділянка 2 вольтамперної характеристики (рис. 6.9).

Із середніми напруженостями електричного поля, які не набагато перевищують $E_{пор}$, деяка частина електронів знаходиться в нижньому домені, інша частина – у верхньому домені. Загальне значення їхньої концентрації:

$$n_0 = n_1 + n_2$$

залишається незмінним. Щільність струму визначатиметься співвідношенням між концентрацією легких електронів n_1 і важких електронів n_2 .

Такий режим відповідає ділянці 5 вольтамперної характеристики (рис. 6.9). На цій ділянці кристал напівпровідника має *негативний диференціальний опір*. Цей опір обумовлений переходом електронів зони провідності з долини з високою рухливістю в долину з низькою рухливістю під дією сильного електричного поля.

Принцип роботи діода Ганна розглянемо на зразку арсеніду галію *n*-типу. Однорідно легований зразок має два омичних контакти, їх називають – катод (К) і анод (А) (рис. 6.10). Нехай на зразок подано постійну напругу, яка утворить у кристалі електричне поле напруженості E . Подана напруга такої величини, що напруженість поля E ненабагато перевищує граничне значення $E_{гр}$:

$$E > E_{гр}.$$

При цьому усі вільні електрони в кристалі є легкими і щільність струму через кристал має максимальне значення:

$$I_{max} = qn_0\mu_1E. \quad (6.6)$$

Біля омичних контактів завжди існують дефекти кристалічних решіток, що обумовлює в цих місцях трохи підвищений опір кристалу. На цих приконтактних областях падає велика напруга і створюється дещо більша напруженість поля. Оскільки прикладена до зразка напруга постійна, то підвищення напруженості поля біля контактів неминуче призводить до зниження напруженості в обсязі кристалу (рис. 6.10, в). Таким чином у перший

момент після подачі постійної напруги поле з напруженістю $E > E_{гр}$ буде біля контактів. Під дією цього поля електрони дрейфують від катода до анода. При цьому легкі електрони переходять з нижнього домену у верхній і стають важкими. Біля катода з'являється шар важких електронів, які утворюють негативний об'ємний заряд, який повільно дрейфує до анода. Ті легкі електрони, що знаходяться за шаром об'ємного негативного заряду з боку анода, швидко рухаються до анода. Це призводить до того, що з'являється шар некомпенсованих позитивних іонів донорів.

Як наслідок, у кристалі з'являється домен, що рухається від катода до анода, який складається з двох шарів об'ємних зарядів – шару негативно заряджених електронів і шару позитивно заряджених іонів донорів. Швидкість руху домена дорівнює швидкості важких електронів V_2 .

Всередині домену існує своє електричне поле $E_{дом}$ (рис. 6.11, а). Це поле збігається за напрямком з полем E кристала, тому в області домену результуюче електричне поле збільшується. Це призводить до зменшення поля поза доменом, а значить і до зменшення швидкості електронів поза доменом.

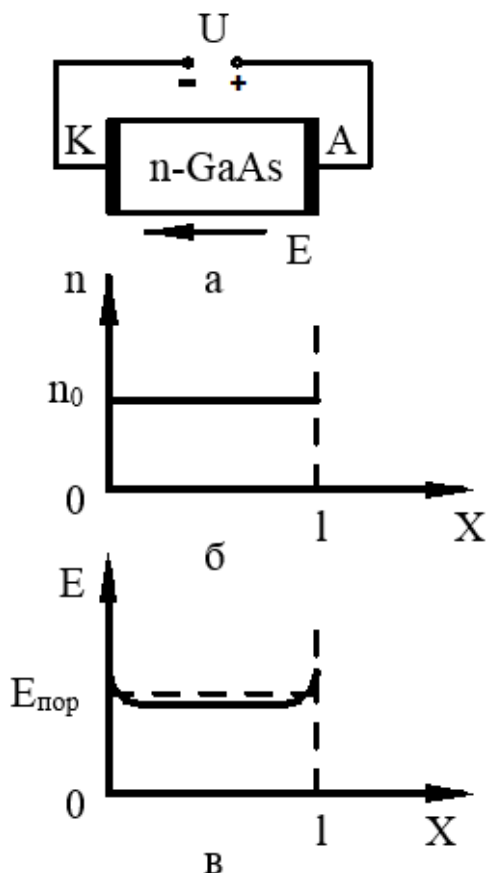


Рисунок 6.10 – Розподіл концентрації електронів і напруженості електричного поля в кристалі в перший момент після подачі постійної напруги

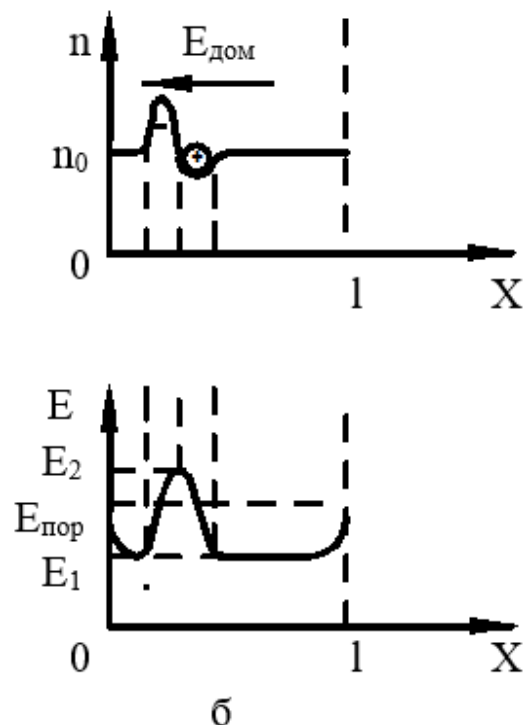


Рисунок 6.11 – Розподіл концентрації електронів і напруженості електричного поля в кристалі після утворення домена

Швидкість домену $V_2 = \mu_2 E_2$ збільшується, а швидкість руху електронів $V_1 = \mu_1 E_1$ зменшується (E_2 – результуюча напруженість поля всередині домену, E_1 – напруженість поля поза доменом, рис. 6.11, б).

У деякий момент часу ці швидкості порівнюються:

$$V_1 = V_2 = \mu_2 E_2 = \mu_1 E_1. \quad (6.7)$$

З цього моменту припиняється надходження в домен легких електронів, що наздоганяють його зі сторони катода, і «оголення» позитивних іонів з боку аноду. На цьому закінчується формування домену, і він із постійною швидкістю рухається до анода. Струм, що протікає при цьому через кристал:

$$I_{\min} = qn_0\mu_1 E_1. \quad (6.8)$$

Оскільки $E_1 < E$, то $I_{\min} < I_{\max}$.

Мінімальне значення щільності струму зберігається протягом усього часу руху домену через кристал. Цей час називають часом прольоту і визначають співвідношенням:

$$t_{\text{пр}} = \frac{l}{V_2}, \quad (6.9)$$

де l – довжина кристала.

Коли домен досягає анода, він руйнується, і щільність струму збільшується до значення I_{\max} . Відразу після цього біля катода утвориться новий домен, струм зменшується до I_{\min} ; процес повторюється. Залежність струму, що проходить через кристал, від часу показана на рис. 6.12.

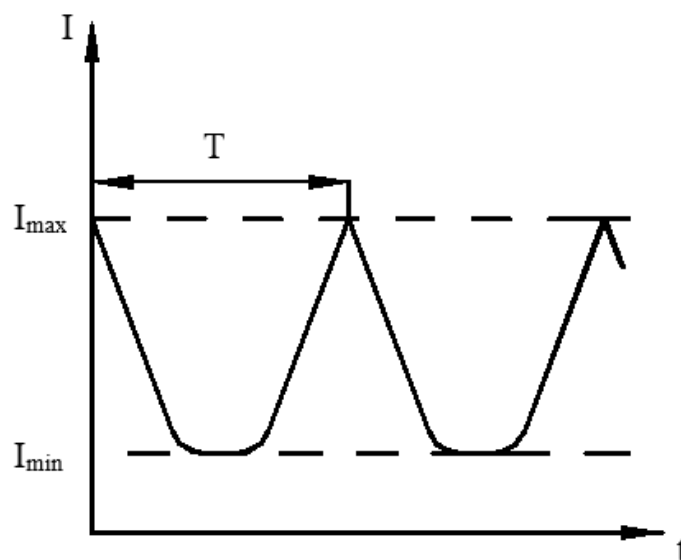


Рисунок 6.12 – Залежність струму через діод Ганна від часу

Струм є періодичною послідовністю імпульсів, частота яких визначається періодом T . У свою чергу:

$$T = t_{\text{пр}},$$

тобто залежить для даного матеріалу від довжини зразка кристала l . Довжину l вибирають такою, щоб частота отриманих коливань струму відповідала НВЧ-діапазону.

Розглянутий режим роботи діода Ганна, у якому частоти коливань визначаються довжиною кристалу, називається пролітним режимом.

Існує ще ряд режимів, під час роботи на яких, домагаються незалежності частоти коливань від розміру кристала, чи отримують можливість регулювати частоту коливань у деяких межах.

Основними параметрами діода Ганна є частота коливань генерації, вихідна потужність і коефіцієнт корисної дії (ККД). Діоди Ганна широко застосовуються для генерації НВЧ-сигналів у діапазоні частот 1...90 ГГц. Вихідна потужність залежно від режиму роботи може складати від сотень міліват до сотень ват, ККД – до 20%.

Запитання й завдання для самоперевірки

1. Які напівпровідникові прилади називають діодами Ганна?
2. В чому полягає ефект Ганна?
3. Яку зонну діаграму повинен мати напівпровідниковий кристал, щоб у ньому спостерігався ефект Ганна?
4. Наведіть і поясніть зонну діаграму арсеніду галію n -типу.
5. Чому ефект Ганна спостерігається тільки при сильних електричних полях?
6. Яка напруженість електричного поля називається граничною?
7. Наведіть і поясніть залежність дрейфового струму в кристалі арсеніду галію від напруженості електричного поля (ВАХ).
8. Яка побудова діода Ганна та схема його включення?
9. Поясніть, який струм протікає в діоді Ганна відразу після подачі постійної напруги?
10. Поясніть, як утворюється домен у діоді Ганна.
11. Поясніть розподіл концентрації електронів у кристалі діода Ганна після утворення домену.
12. Поясніть розподіл напруженості електричного поля в кристалі діода Ганна після утворення домену.
13. Поясніть який струм проходить в діоді Ганна під час руху домена від катода до анода.
14. Наведіть і поясніть залежність від часу струму в діоді Ганна.
15. Що називається пролітним часом у діоді Ганна?

16. Від чого залежить пролітний час?
17. Який режим роботи діода Ганна називають пролітним?
18. Чим визначається частота коливань, яку генерує діод Ганна у пролітному режимі?
19. Якими параметрами оцінюють діод Ганна?

6.5 Тиристори

Тиристор – напівпровідниковий прилад, структура якого містить три або більше електронно-діркових переходів. Основна галузь його застосування – ключові схеми та пристрої перетворювальної техніки.

Побудова. Основу тиристора складає чотиришарова *n-p-n-p*-структура (рис. 6.13, а). Крайні *n*- і *p*-області називають емітерами, і вони, подібно емітеру біполярного транзистора, містять підвищену концентрацію домішок, тобто леговані більше, ніж внутрішні області. Внутрішні області називають відповідно *n*- базою і *p*- базою. Вони, подібні базі біполярного транзистора, мають малу ширину. Переходи Π_1 і Π_5 – емітерні, середній перехід Π_2 – колекторний. Електрод, що здійснює контакт із *n*-емітером, вважають катодом, а з *p*-емітером – анодом.

Якщо тиристор має лише два зовнішні виводи – катод і анод, його називають *динистором*. Тиристор, що має, крім катода й анода, вивід від однієї з баз, частіше *p*-базі, називають *тринистором*. Чотириелектродний тиристор із зовнішніми виводами від двох баз називають *бинистором* чи *тетродним тиристором*.

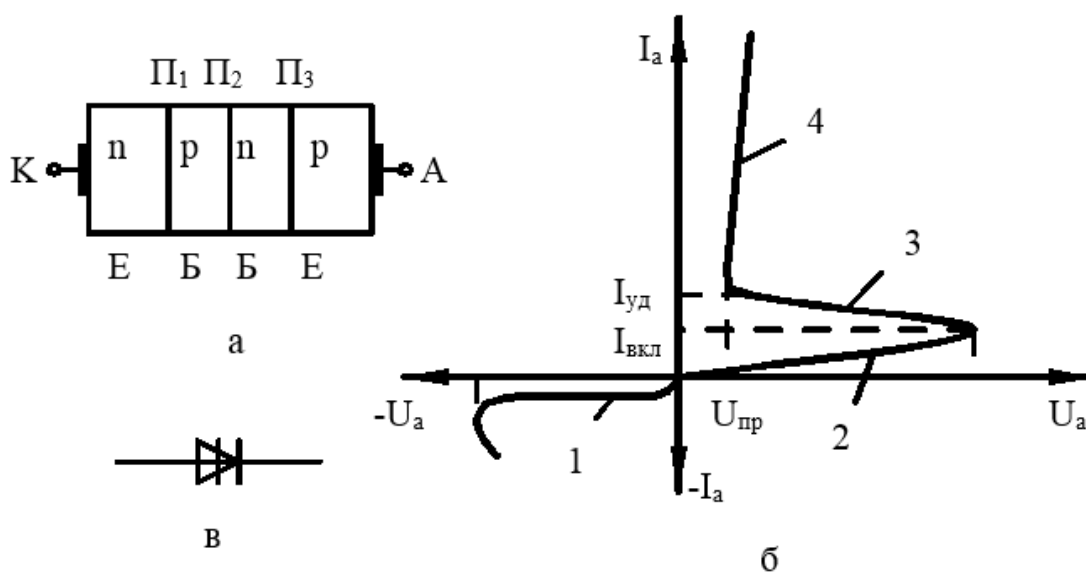


Рисунок 6.13 – Структура (а), вольтамперна характеристика (б) і умовне позначення (в) динистора

Вольтамперна характеристика динистора показана на рис. 6.13, б. Під час подачі негативної напруги на анод емітерні переходи П₁ і П₅ будуть закритими, а колекторний перехід П₂ – відкритий. Опір динистора визначається в цьому режимі двома закритими *p-n*-переходами, включеними послідовно один з одним. ВАХ у цьому режимі подібна характеристиці діода зі зворотним зміщенням (область 1 рис. 6.13, б).

Струм, що проходить через прилад, дуже малий, і, як і у випадку діода, визначається процесами екстракції і теплової генерації неосновних носіїв у *p-n*-переходах. Якщо негативна анодна напруга перевищить величину $U_{\text{проб}}$, відбувається пробій емітерних переходів і прилад може вийти з ладу.

За позитивних анодних напругах характеристика має S-подібний вигляд і на ній можна виділити три області:

- в області 2 – напруга на приладі велика, а струм, що протікає, малий, такий стан приладу називають «закритим»;

- в області 4 – прилад «відкритий», через нього протікає великий струм з малою напругою;

- в області 3 – прилад виявляє негативний диференціальний опір, коли зростанню струму відповідає зменшення напруги. Це перехідний режим – із «закритого» стану в «відкритий».

З позитивною анодною напругою в області 2, меншої деякої напруги включення $U_{\text{вкл}}$ ($U_a < U_{\text{вкл}}$), емітерні переходи П₁, П₅ – відкриті, колекторний перехід П₂ – закритий. Опір переходу П₂ великий, і на ньому падає практично вся зовнішня напруга.

Переходи П₁, П₅ працюють подібно до емітерного переходу біполярного транзистора, а П₂ – подібно колекторного переходу.

Електрони, інжектвані *n*-емітером у *p*-базу, дифундують до колектора і його електричним полем перекидаються в *p*-базу. Подальшому їхньому просуванню по динистору перешкоджає невеликий потенційний бар'єр між *p*-емітером і *n*-базою. Тому в *n*-базі відбувається накопичення негативного заряду електронів. Цей заряд знижує потенційний бар'єр *p*-емітеру і збільшує його інжекцію.

Аналогічні процеси відбуваються з дірками, інжектованими *p*-емітером у *n*-базу. Вони дифундують до колектора, під дією його прискорюючого поля переходять у *p*-базу і затримуються тут невеликим потенційним бар'єром відкритого емітерного переходу П₁. У *p*-базі відбувається накопичення позитивного заряду дірок. У результаті цього знижується потенційний бар'єр *n*-емітера і зростає його інжекція.

Таким чином, емітерні переходи як би «розраховують» один одного: збільшення інжекції переходу П5 викликає зростання інжекції переходу П1.

Іншими словами, у приладі існує внутрішній позитивний зворотний зв'язок. Дія позитивного зворотного зв'язку призводить до того, що при $U_a = U_{\text{вкл}}$ у приладі починається лавиноподібне наростання струму.

Починаючи з точки $U_a = U_{\text{вкл}}$ динистор переходить у хитливий стан – область 3 ВАХ, де він має негативний диференціальний опір.

З подальшим зростанням струму збільшуються заряди нерівноважних носіїв у базах: негативний заряд електронів у n -базі і позитивний заряд дірок у p -базі. Ці заряди зменшують зворотне зміщення колекторного переходу П2. Процес завершується тим, що структура стрибком переходить у стан, який відповідає області 4 ВАХ. В цій області надлишкові заряди в базах досягають такої величини, що відкривається колекторний перехід П2. Тепер прилад є три послідовно включених p - n -переходи, які працюють у режимі прямого зміщення. Тому у відкритому стані динистор здатний пропускати великі струми з напругою в частки або одиниці вольт. Величина прямого струму визначається площею p - n -переходів і умовами охолодження. З відповідною конструкцією значення прямого струму може доходити до 1000 А.

Умовне позначення динистора показана на рис 6.13, в.

Тринистор – це тиристор, одна з баз якого має невідпрямляючий вивід – омичний контакт (рис. 6.14, а).

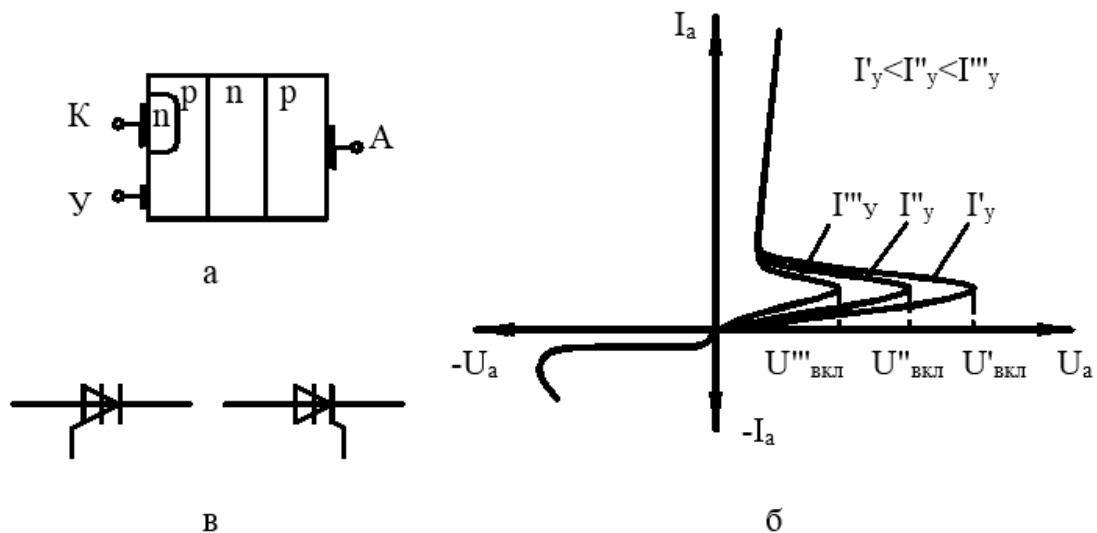


Рисунок 6.14 – Структура (а), вольтамперна характеристика (б) і умовне позначення (в) тринистора

Базовий вивід називають керуючим електродом і з його допомогою змінюють напругу включення $U_{\text{вкл}}$. Отримані при цьому вольтамперні характеристики наведені на рис. 6.14, б.

При подачі на керуючий електрод напруги можна змінювати струм найближчого до нього емітера, тим самим регулювати заряд неосновних носіїв у базі. Із зростанням струму керування I_k цей заряд збільшується, і включення відбувається з меншою анодною напругою.

Струм I_k , що протікає в колі керуючого електрода, і затрачена на керування потужність малі, тому тринистор можна використовувати для посилення потужності електричних сигналів. Вхідним колом у цьому випадку є коло керуючого електрода, а опір навантаження включають в анод. Коефіцієнт підсилення за потужністю може бути порядку $10^4 \dots 10^5$.

Порівняно з транзисторами тринистори можуть забезпечувати більший коефіцієнт підсилення за струмом, більший робочий струм (до тисяч ампер), великі робочі напруги (до декількох кіловольт).

Параметри тиристора. Основними параметрами тиристора є (рис. 6.13, б):

- напруга включення $U_{вкл}$ з нульовим струмом керуючого електрода I_k ; у різних приладів вона може складати величину від десятків до тисяч вольт;
- напруга відкритого приладу $U_{пр}$; у різних приладів – долі–одиниці вольт;
- струм включення $I_{вкл}$;
- утримуючий струм $I_{ут}$ – мінімальний струм, за якого прилад знаходиться у відкритому стані.

Дуже цінними властивостями тиристора є його ключові властивості, тобто швидка здатність переходити із закритого стану (малий струм, великий опір) у відкритий стан (великий струм, мала напруга) і навпаки.

Ключові властивості приладу оцінюються такими параметрами:

- час включення $\tau_{вкл}$, необхідний для переходу приладу із закритого у відкритий стан;
- час вимикання $\tau_{вим}$, необхідний для переходу з відкритого в закритий стан.

Ці часи визначаються процесами накопичення й розсмоктування надлишкових носіїв заряду в базах тиристора. Для малопотужних приладів вони складають долі–одиниці мікросекунд. У потужних приладів – трохи більше.

Сьогодні як вихідний матеріал тиристорних структур використовують тільки кремній.

Умовні позначення тиристорів із керуванням по аноду й катоду показані на рис. 6.14, в.

Симетричний тиристор (семістор). Динистори й тринистори відкриваються напругою однієї полярності, що не завжди зручно.

Так звані симетричні тиристори чи триаки (їх ще називають семісторами) можуть пропускати робочий струм у двох напрямках. Основою симетричного тиристора є п'ятишарова напівпровідникова структура $n-p-n-p-n$ (рис. 6.15, а).

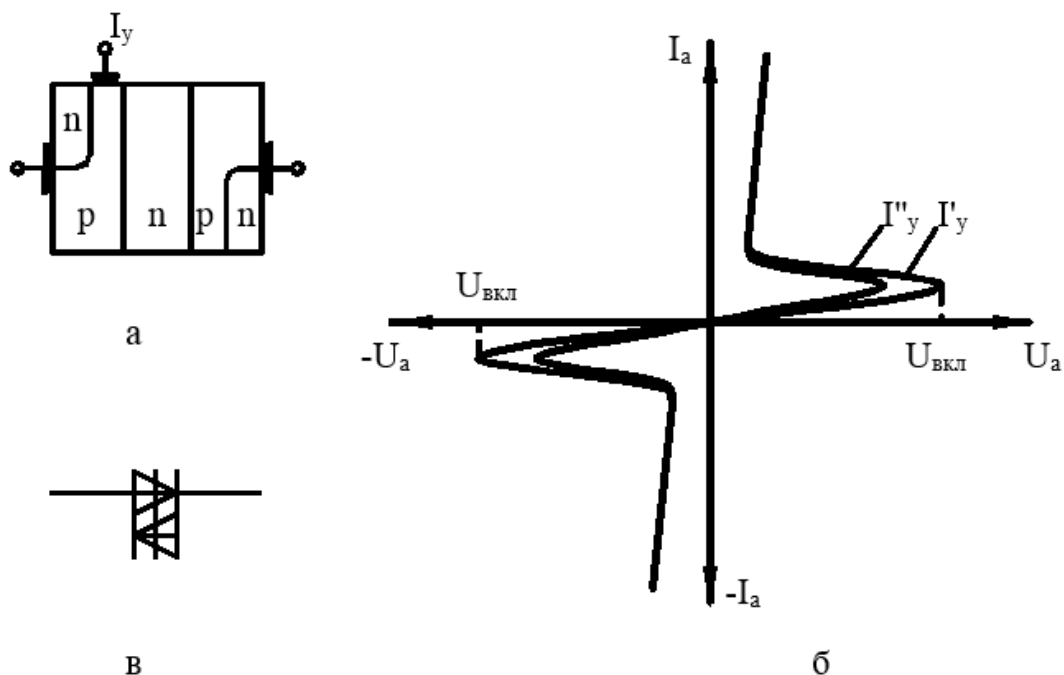


Рисунок 6.15 – Структура (а), вольтамперна характеристика (б) і умовне позначення (в) симетричного тиристора

Вона аналогічна двом динисторам, включених паралельно.

Перевагою такого приладу є здатність його переходити із закритого стану у відкритий з будь-якою полярністю напруги включення $U_{вкл}$.

Вольтамперні характеристики приладу наведені на рис. 6.15, б. Симетричний тиристор можна зробити керуючим, якщо одну з областей з електропровідністю p -типу оснастити керуючим електродом.

Умовне позначення симетричного тиристора показана на рис. 6.15, в.

Запитання й завдання для самоперевірки

1. Який напівпровідниковий прилад називають тиристором?
2. Нарисуйте та поясніть структуру тиристора.
3. Як відрізняються за ступенем легування емітерні та базові області тиристора?
4. Чим відрізняються один від одного такі різновиди тиристорів, як динистор, тринистор, і біністор?
5. Наведіть вольтамперну характеристику динистора, покажіть на ній ділянку негативного диференціального опору.

6. Поясніть ВАХ динистора з позитивною анодною напругою.
7. Виділіть і поясніть в області ВАХ динистора при позитивній анодній напрузі.
8. Поясніть фізичні процеси і ВАХ динистора при $U_a < U_{\text{вкл}}$.
9. Поясніть фізичні процеси і ВАХ динистора, коли анодна напруга U_a досягає величини напруги включення $U_{\text{вкл}}$.
10. Поясніть фізичні процеси і ВАХ динистора, коли він знаходиться у відкритому стані ($I_a > I_{\text{ут}}$).
11. Чому у відкритому стані динистор пропускає великі струми з невеликою напругою?
12. Нарисуйте умовне позначення динистора.
13. Наведіть і поясніть структуру динистора.
14. Поясніть фізичні процеси керування напругою включення в тринисторі.
15. Як можна використовувати тринистор для посилення електричних сигналів?
16. Перелічіть фізичні величини, що обумовлюють параметри тиристора, і покажіть їх на ВАХ.
17. Які параметри оцінюють ключові властивості тиристора?
18. Якими фізичними процесами в тиристорі визначаються час його включення та вимикання $\tau_{\text{вим}}$?
19. Наведіть умовне позначення тиристора.
20. Який прилад називають симетричним тиристором або семістором?
21. Наведіть і поясніть структуру симетричного тиристора.
22. Наведіть і поясніть вольтамперні характеристики симетричного тиристора.

7 ПРИЛАДИ ТВЕРДОТІЛЬНОЇ ОПТОЕЛЕКТРОНІКИ

7.1 Джерела випромінювання. Світлодіоди, лазери

Оптоелектронними називають пристрої електронної техніки, які забезпечують передачу й обробку інформації з використанням світлових променів.

Елементну базу оптоелектронних пристроїв складають:

- джерела світла, що перетворюють вхідні електричні сигнали у світлові сигнали;
- оптичні середовища й хвилеводи, у яких проводиться обробка або передача світлових сигналів;
- фотоприймачі, у яких відбувається перетворення світлових сигналів в електричні, тобто вони відновлюють первісну форму електричних сигналів.

Джерело світла й фотоприймач можуть бути виконані в одному корпусі. Такий пристрій називають оптроном чи оптронною парою.

Оптичний діапазон електромагнітних коливань включає в себе:

- ультрафіолетове випромінювання, яке становить коливання з довжинами хвиль від 1 нм до 0,58 мкм ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$; $1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$);
- видиме випромінювання, яке становить коливання з довжинами хвиль від 0,58 до 0,78 мкм;
- інфрачервоне випромінювання з довжинами хвиль від 0,78 мкм до 1 мм.

Оптичне випромінювання може бути когерентним (монохроматичним) і некогерентним. *Когерентним* вважають таке випромінювання, яке складається з електромагнітних коливань однієї довжини хвилі. Ці коливання мають визначений напрямок. *Некогерентне* випромінювання містить електромагнітні коливання різних значень довжини хвилі або, що те ж саме, різних частот. Такі коливання не мають точної спрямованості.

Джерела випромінювання розрізняються, по-перше, по діапазону того випромінювання, яке вони забезпечують. По-друге, когерентним чи ні є це випромінювання.

Світлодіоди – це напівпровідникові діоди, які випромінюють світло під час проходження через них прямого струму.

У режимі прямого зміщення *p-n*-переходу відбувається інжекція неосновних носіїв: дірки дифундують з *p*- у *n*-область, електрони – навпаки, із *n*-області в *p*-область. Концентрація носіїв заряду біля *p-n*-переходу збільшується, що обумовлює їхню підвищену рекомбінацію. В ході рекомбінації двох носіїв

електрони із зони провідності переходять на більш низькі енергетичні рівні валентної зони і мають звільнитися від частини своєї енергії. Такий перехід може відбуватися безпосередньо з зони в зону (рис 7.1, 1). Виділена при цьому енергія hf_1 не менше, ніж ширина забороненої зони ΔW_3 :

$$hf_1 \geq \Delta W_3.$$

Більш імовірною є рекомбінація через проміжні дозволені рівні в забороненій зоні – пастки (рис. 7.1). При цьому електрон якийсь час знаходиться на цьому рівні – пастці, рекомбінація з діркою відбувається в момент часу, коли вона виявляється в тому ж місці кристалу, де і рівень пастки. Виділена при такій рекомбінації енергія:

$$hf_2 \leq \Delta W_3.$$

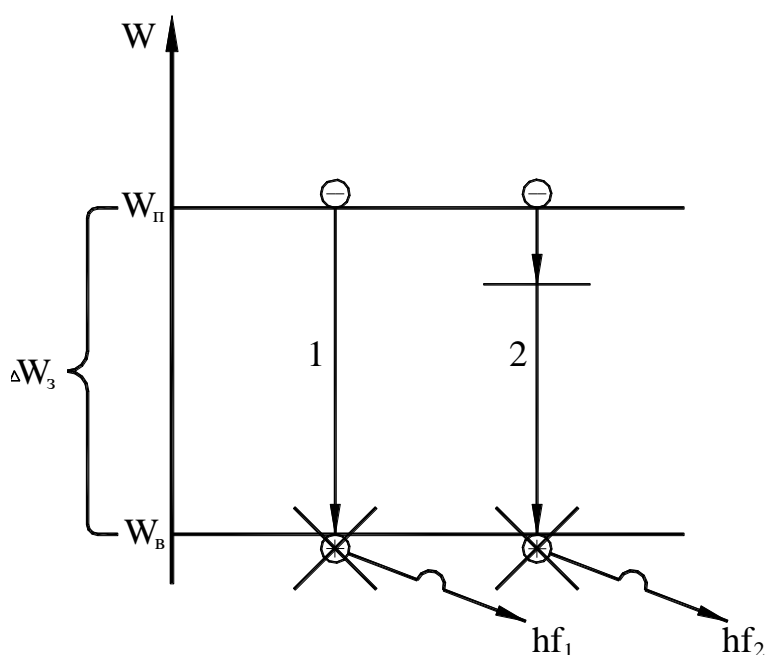


Рисунок 7.1 – Акти рекомбінації із зони в зону (1) і через проміжні рівні (2)

Рекомбінація називається випромінювальною, якщо енергія виділяється у вигляді кванта електромагнітного випромінювання. Якщо енергія виділяється у вигляді тепла, рекомбінацію називають безвипромінювальною.

Особливістю світлодіодів є те, що вони створюються в напівпровідникових кристалах, для яких найбільш імовірна випромінювальна рекомбінація.

Як видно з рис. 7.1, енергія квантів i , відповідно, довжина хвилі випромінювання світлодіоду, однозначно визначається шириною забороненої зони напівпровідникового матеріалу. Залежно від величини цього параметру випромінювання світлодіоду може знаходитися в інфрачервоній, видимій чи ультрафіолетовій області оптичного спектра. Для одержання інфрачервоного

випромінювання придатні напівпровідники з $\Delta W_3 < 1,61$ еВ; ультрафіолетового – з $\Delta W_3 > 3,18$ еВ; а для випромінювання у видимій частині спектра:

$$1,61 < \Delta W_3 < 3,18 \text{ еВ.}$$

Германій, кремній і арсенід галію, що найбільше освоєні в електроніці, мають відповідні заборонені зони 0,72 еВ; 1,12 еВ і 1,45 еВ, і тому непридатні для одержання видимого випромінювання. Ширина забороненої зони визначає і колір світіння. Видиме випромінювання отримують у кристалах бінарних напівпровідників: карбіду кремнію SiC (жовте світіння), фосфіду галію GaP (зелене світіння), нітриду галію GaN (фіолетове світіння), а також у так званих «твердих розчинах» – три- та чотирикомпонентних сполуках, що утворені з бінарних напівпровідників (GaAlAs, InAlAs, GaAsP, InGaAsP тощо).

Структури світлодіодів створюються в кристалах прямокутної чи напівсферичної форми (рис. 7.2). Конструкція має бути такою, щоб по можливості знизити втрати на відображення в ході виведення світла. Герметизація світлодіодів забезпечується металевими корпусами з прозорими вікнами для виведення світла або шляхом їх запресовування у фокусує скляні та пластикові лінзи.

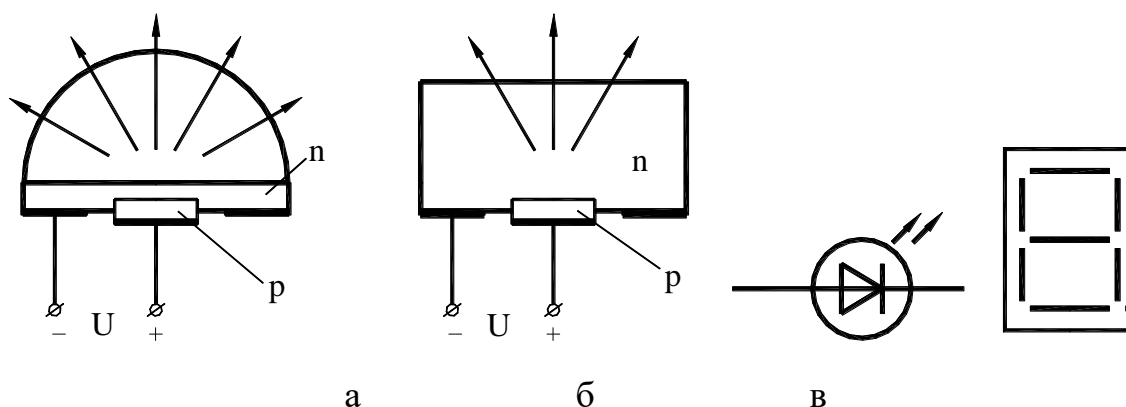


Рисунок 7.2 – Структури (а), умовне позначення світлодіодів (б), світлодіодна матриця (в)

Світлодіоди можуть мати не один, а кілька *p-n*-переходів на одному кристалі. Такі конструкції називають матричними (рис. 7.2, б). Подаючи пряме зміщення на різні сполучення *p-n*-переходів, можна отримувати різні букви, знаки, цифри. Так на основі світлодіодів створюють знакові індикатори.

Характеристики. Основною характеристикою світлодіоду є *яскравісна характеристика* – залежність яскравості світіння V від струму I , що протікає через діод:

$$V = f(I).$$

Ця характеристика показана на рис. 7.3, а.

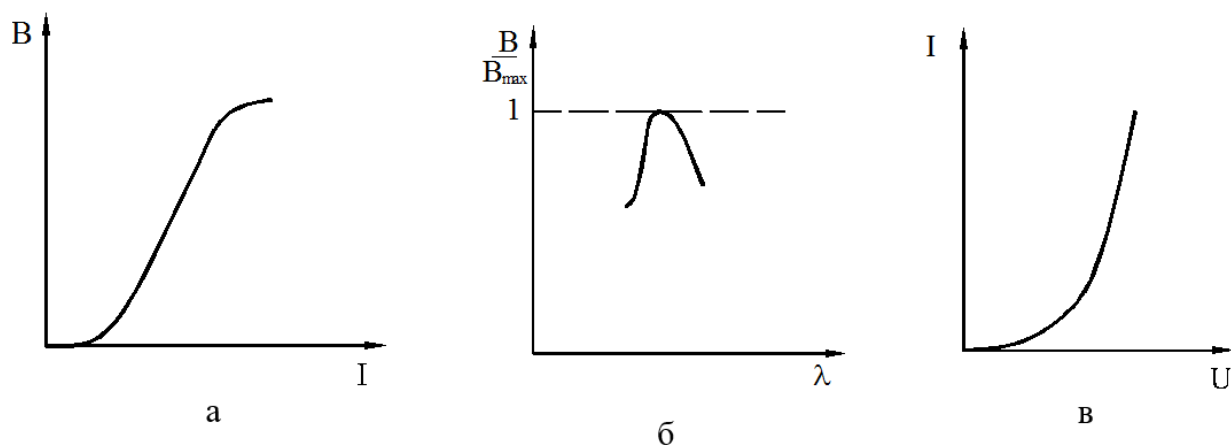


Рисунок 7.3 – Характеристики світлодіоду

Характеристика нелінійна при малих і великих значеннях струму, що пояснюється особливостями рекомбінаційних процесів при малих і великих концентраціях інжектованих носіїв заряду. У цілому, лінійність характеристики на значній ділянці зміни струму – дуже цінна якість світлодіоду.

Світлодіод дає некогерентне випромінювання, яке містить електромагнітні коливання різних частот. Залежність яскравості V від довжини хвилі випромінювання λ :

$$V = f(\lambda),$$

має максимум. Ця залежність визначає *спектральну характеристику* світлодіоду (рис. 7.3, б). Максимум спектральної характеристики спостерігається на тих частотах, де енергія кванта фотона hf дорівнює ширині забороненої зони матеріалу. У зв'язку з різною шириною забороненої зони у різних напівпровідників різними виходять і частоти f (чи довжини хвиль λ), максимумів випромінювання.

Вольтамперна характеристика світлодіоду є залежністю струму I від прикладеної до діода напруги U :

$$I = f(U).$$

Вона подібна ВАХ діода з прямим зміщенням і показана на рис. 7.5, в.

Параметри. Функціональні властивості світлодіоду оцінюють такими параметрами:

- яскравість випромінювання (до сотень $\text{кд} / \text{см}^2$);
- робоча напруга (одиниці вольт);
- максимально припустимий прямий струм (десятки міліампер);
- колір світіння;
- максимально припустима зворотна напруга (одиниці вольт);
- діапазон робочих температур (від -60 до $+70$ $^{\circ}\text{C}$).

Світлодіоди надійні в експлуатації, довговічні, споживають невелику потужність, мають малі габарити й вагу.

Застосовують світлодіоди як індикатори в радіоелектронній апаратурі, а також як елементи оптронних пар.

Лазери – це напівпровідникові прилади, що дають когерентне випромінювання.

У сучасній оптоелектроніці джерелами когерентного випромінювання є тільки лазери. Лазерне випромінювання винятково направлене й монохроматичне.

У напівпровідникових лазерах випромінювання, як і у світлодіодах, виникає в результаті випромінювальної рекомбінації електронів і дірок. Але випромінювальна рекомбінація у світлодіодах відбувається мимовільно, без якого-небудь спеціального електромагнітного впливу. Таку рекомбінацію називають мимовільною. Акти рекомбінації при цьому мають випадковий характер, і випромінювання виходить некогерентним.

Перехід електрона на більш низький енергетичний рівень з випромінюванням кванта світла може відбутися за допомогою спеціального електромагнітного впливу, наприклад, кванта світла з визначеною частотою. Таку рекомбінацію (такий перехід) називають *змушеною* чи *стимульованою*. При цьому випромінювання відбувається на тій самій частоті і в тому ж напрямку, що і змушуюче його випромінювання, тобто є когерентним.

Для роботи лазера необхідна перевага змушеної випромінювальної рекомбінації над поглинанням квантів світла. Ця перевага залежить від положення електронів на дозволених енергетичних рівнях напівпровідника. У рівноважних умовах у напівпровіднику кількість електронів на більш низьких рівнях завжди менша, ніж на більш високих. Для переваги вимушеної рекомбінації необхідно, щоб верхні енергетичні рівні були заповнені електронами більше, ніж нижні.

Стан напівпровідника, за якого число електронів на одному з енергетичних рівнів із більшою енергією більше числа електронів на рівні з меншою енергією, називається *станом з інверсною населеністю*. Та частина напівпровідникового кристалу, у якій здійснена інверсія населеності, називається *активним середовищем*.

Одним із способів створення інверсної населеності в напівпровіднику є інжекція носіїв заряду при прямому включенні *p-n*-переходу. Цей спосіб використовують у так званих інжекційних лазерах.

Структура й принцип дії інжекційного лазера. Структура наведена на рис. 7.4. Він містить *p-n*-перехід, одна з областей якого містить велику концентрацію домішок, тобто є виродженою. При подачі на *p-n*-перехід

прямого зміщення відбувається інжекція неосновних носіїв заряду. З деяким значенням прямого струму, який називається *граничним*, в області *p-n*-переходу утвориться активне середовище. На рис. 7.4. область активного середовища з інверсною населеністю позначено цифрою 1. Тут створюються умови для переважно змушеної рекомбінації.

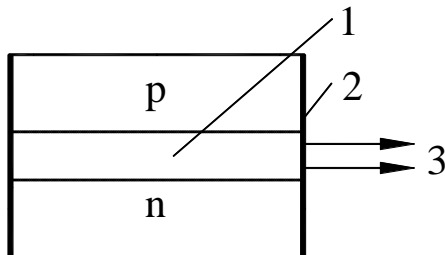


Рисунок 7.4 – Структура інжекційного лазера

Протилежні грані кристалу напівпровідника роблять суворо рівнобіжними й ретельно відполірованими (вони позначені цифрою 2 на рис. 7.4). У такому кристалі кожен квант світла проходить у площині *p-n*-переходу декілька разів, відбиваючись від рівнобіжних торців. Це істотно збільшує число актів змушеної рекомбінації. Після багаторазового проходження уздовж *p-n*-переходу світло йде з напівпровідника.

Ті кванти світла, що рухаються суворо перпендикулярно торцям кристалу, проходять активну область багато разів і створюють велику лавину квантів світла. Ті кванти світла, що рухаються не вздовж *p-n*-переходу, ідуть з активної області і не викликають змушеної рекомбінації.

Випромінювання (5 на рис. 7.4) лазера когерентне і суворо спрямоване.

Для виготовлення інжекційних лазерів використовують такі напівпровідникові матеріали як арсенід галію, фосфід індію й ін.

Характеристика й параметри лазера. Найважливішими характеристиками лазера є спектральна і яскравісна.

Спектральну характеристику показано на рис. 7.5, а.

Вона є залежністю інтенсивності випромінювання (як правило, у відносних одиницях) від довжини хвилі λ :

$$I_{\text{вип.}} = f(\lambda).$$

Яскравісна характеристика – залежність інтенсивності випромінювання від струму I , який проходить через лазер:

$$I_{\text{вип.}} = f(I).$$

Вона показана на рис. 7.4, б і є майже лінійною залежністю в діапазоні струмів вище граничного, коли забезпечуються умови для вимушеної рекомбінації.

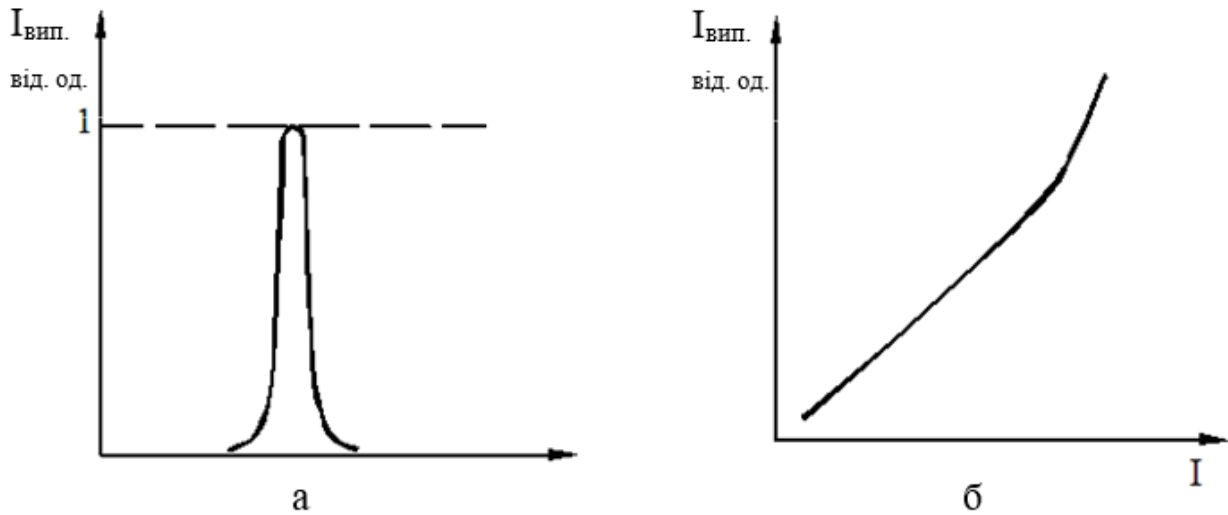


Рисунок 7.5 – Спектральна і яскравісна характеристики лазера

Параметри. До параметрів лазера належать такі величини, як гранична щільність струму й коефіцієнт корисної дії (ККД).

Гранична щільність струму залежить від температури інжекційного лазера. Для її зменшення необхідно глибоке охолодження лазера. Наприклад, у лазерів з арсеніду галію гранична щільність струму при $T = 4,2\text{K}$ складає 10^2 A/cm^2 , а при $T = 77\text{K}$ – 10^4 A/cm^2 .

ККД інжекційних лазерів – кілька десятків відсотків.

Запитання й завдання для самоперевірки

1. Які пристрої називають оптоелектронними?
2. З яких пристроїв складається елементна база оптоелектроніки?
3. На які піддіпазони розділяють оптичний діапазон?
4. Яке випромінювання називають когерентним, а яке некогерентним?
5. Який прилад називають світлодіодом?
6. Покажіть на зонній діаграмі акти рекомбінації з зони в зону і через пастки.
7. У режимі якого зміщення працює світлодіод?
8. Яку рекомбінацію називають випромінювальною, а яку безвипромінювальною?
9. Яка рекомбінація відбувається у світлодіодах?
10. Від чого залежить діапазон частот випромінювання світлодіоду?
11. Матеріали, із якою шириною забороненої зони використовують для одержання видимого випромінювання?
12. Від чого залежить кольоровість випромінювання?

13. Зобразіть і поясніть структури світлодіоду.
14. Що називають діодними матрицями і для чого їх застосовують?
15. Наведіть і поясніть яскравісну характеристику світлодіоду.
16. Наведіть і поясніть спектральну характеристику світлодіода.
17. Наведіть і поясніть ВАХ світлодіода.
18. Перелічіть і поясніть параметри світлодіода.
19. Які прилади називають лазерами?
20. Чим відрізняється лазерне випромінювання від випромінювання світлодіоду?
21. Яку рекомбінацію називають мимовільною?
22. Яку рекомбінацію називають змушеною?
23. Що називають станом з інверсною населеністю?
24. З якою метою створюють у напівпровідниках стан з інверсною населеністю?
25. Які лазери називають інжекційними?
26. Наведіть і поясніть структуру інжекційного лазера
27. Поясніть принцип дії інжекційного лазера
28. Наведіть і поясніть характеристики інжекційного лазера
29. Якими параметрами оцінюють інжекційний лазер?

7.2 Фотоелектронні прилади

Фотоелектронні прилади призначені для перетворення сигналів, що надходять у вигляді випромінювання, в електричні сигнали.

Серед напівпровідникових фотоприладів найбільш широко застосовують фоторезистори, фотодіоди й фототранзистори. Їхня робота заснована на явищі внутрішнього фотоэффекту.

Внутрішній фотоэффект полягає в генерації електронно-діркових пар у напівпровідниках під дією випромінювання. Це призводить до зміни електропровідності напівпровідника або виникнення ЕРС.

Фоторезистори (*ФР*) – це резистивні елементи, опір яких визначається інтенсивністю перетворених світлових сигналів.

Побудову ФР показано на рис. 7.6.

На пластину 1 ізолятора наносять шар фоточутливого матеріалу 2 і омичні контакти 5 для зовнішніх виводів. Як матеріали для фотошару використовують сірчистий свинець PbS, сірчистий кадмій CdS, селенід кадмію CdSe і деякі інші напівпровідники.

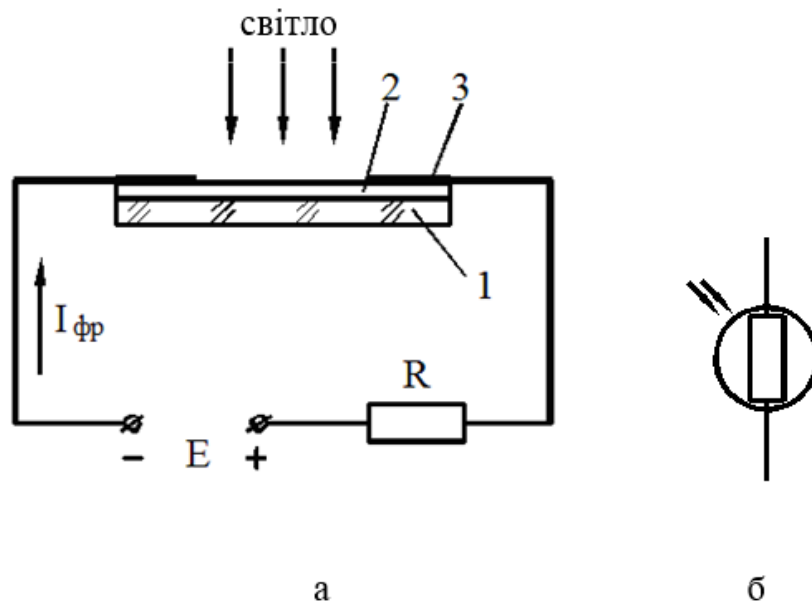


Рисунок 7.6 – Побудова, схема включення (а) і умовне позначення (б) фоторезистора

Опір ФР, який вимірюваний у темряві, називають темновим. Він досить великий і складає, зазвичай, $10^4 \dots 10^6$ Ом і більше. Тому при подачі напруги $U_{\text{фр}}$ на неосвітлений ФР у його колі протікатиме невеликий темновий струм $I_{\text{т}}$.

Якщо ФР опромінити світлом, енергія квантів якого перевищує ширину забороненої зони матеріалу фотошару $\Delta W_{\text{з}}$, то в ньому генеруватимуться пари фотоносіїв (електрони й дірки). Опір ФР різко зменшиться. Струм під час висвітлення $I_{\text{фр}}$ дорівнює сумі темнового струму $I_{\text{т}}$ і фотоструму $I_{\text{ф}}$:

$$I_{\text{фр}} = I_{\text{т}} + I_{\text{ф}}. \quad (7.1)$$

Із заданою напругою $U_{\text{фр}}$ значення фотоструму пропорційне світловому потоку Φ (у люменах), що падає на фотошар:

$$I_{\text{ф}} = K \Sigma \Phi, \quad (7.2)$$

де $K \Sigma$ – коефіцієнт пропорційності. Він називається інтегральною чуттєвістю і є важливим параметром ФР.

Характеристики ФР. Експлуатаційні властивості ФР визначаються його спектральними, світловими і статичними вольтамперними характеристиками.

Спектральна характеристика ФР – це залежність фотоструму від довжини хвилі λ монохроматичного світла з постійним світловим потоком:

$$I_{\text{ф}} = f(\lambda) \text{ при } \Phi = \text{const.}$$

Вид спектральних характеристик ФР, які відрізняються матеріалами фотошару, показано на рис. 7.7, а.

Видно, що на всіх цих характеристиках є чітко виражений максимум.

Максимум фотоструму досягається при опроміненні ФР світлом із такими довжинами хвиль, енергія квантів яких ненабагато перевищує ширину забороненої зони ΔW_3 фотошару. Енергія квантів:

$$W_{\text{кв}} = hf = h \frac{c}{\lambda}, \quad (7.5)$$

де h – постійна Планка;

f – частота електромагнітних коливань падаючого випромінювання;

c – швидкість світла;

λ – довжина хвилі падаючого випромінювання.

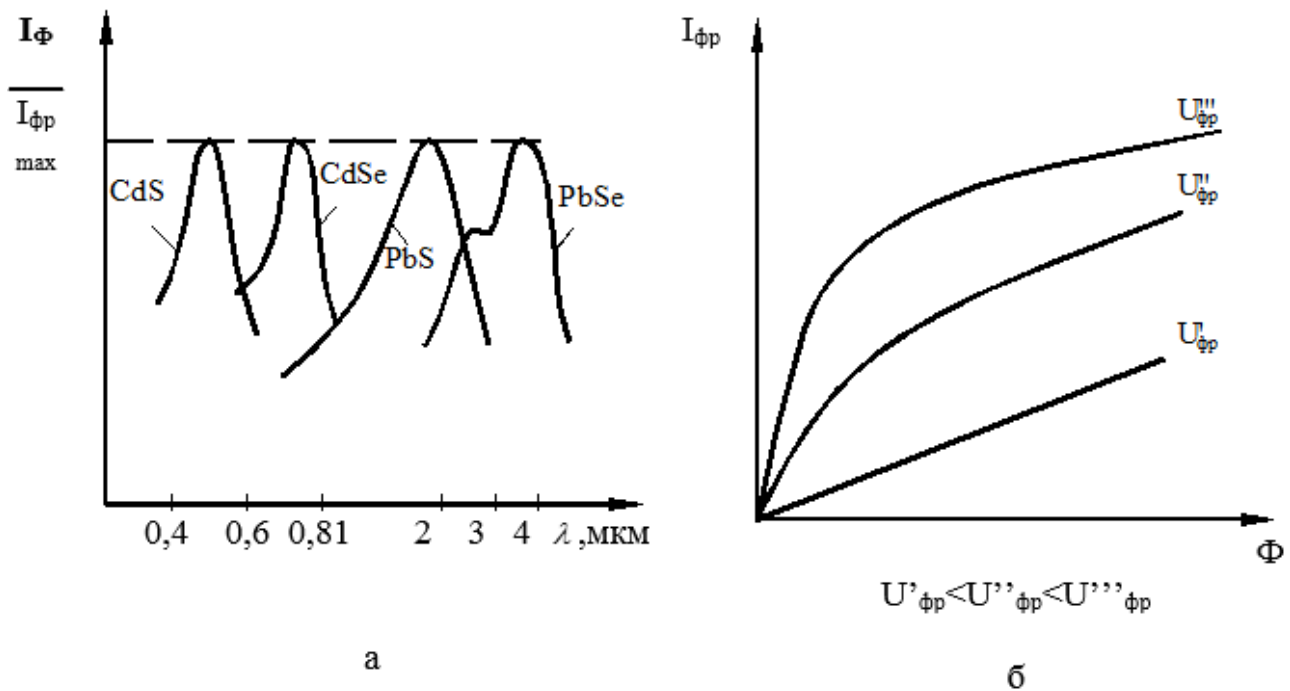


Рисунок 7.7 – Спектральні й світлова (загальна) характеристики фоторезисторів

Енергія квантів відповідно до формули (7.5) обернено пропорційна довжині хвилі. Тому для матеріалів із малою шириною забороненої зони ΔW_3 максимум фотоструму розташовуватиметься в довгохвильовій області спектра. Для матеріалів із великою шириною забороненої зони ΔW_3 – у короткохвильовій області.

Хід спектральної характеристики можна пояснити так. При зміщенні від максимуму в бік великих довжин хвиль енергія кванта зменшується і стає недостатньою для утворення фотоносіїв. Тому, із зростанням довжини хвилі падаючого випромінювання величина фотоструму різко зменшиться. Спад фотоструму в області малих довжин хвиль пояснюється тим, що короткохвильове випромінювання проникає у фотошар тільки на невелику глибину. Фотоносії, що утворилися поблизу поверхні фотошару, швидко рекомбінують і не вносять помітного внеску у величину фотопровідності.

Світлова характеристика ФР є залежністю фотоструму I_ϕ від світлового потоку Φ з постійною напругою:

$$I_\phi = f(\Phi) \text{ при } U_{\phi p} = \text{const.}$$

Характеристики показані на рис. 7.7,б; їхня нелінійність – недолік ФР.

Режим роботи ФР вибирається, як правило, у межах початкової, близької до лінійної, ділянки світлової характеристики. При цьому світлові сигнали перетворюються в електричні з мінімальними перекручуваннями форми сигналу.

Статичні ВАХ – це залежність фотоструму I_ϕ від напруги $U_{\phi p}$ з постійним світловим потоком Φ :

$$I_\phi = f(U_{\phi p}) \text{ при } \Phi = \text{const.}$$

Ця характеристика – лінійна, що є перевагою ФР (рис. 7.8).

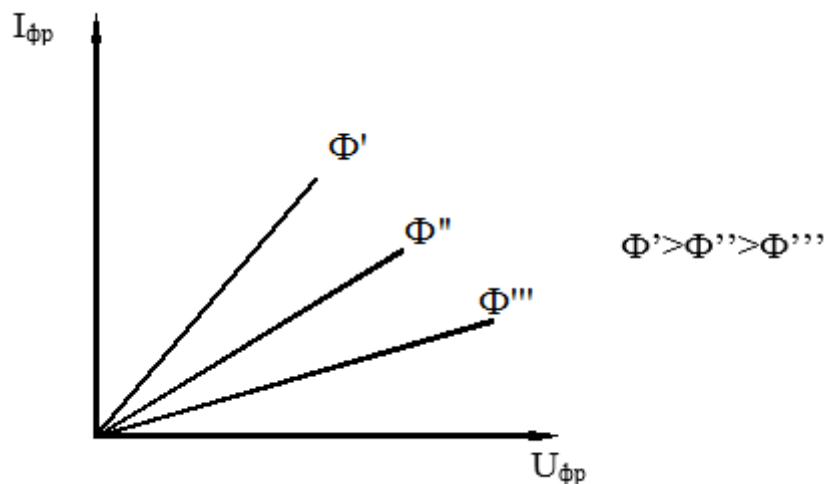


Рисунок 7.8 – Статичні вольтамперні характеристики фоторезистора

Параметри ФР:

- інтегральна чутливість: $K_\Sigma = \frac{I_\phi}{\Phi}, \frac{\text{мкА}}{\text{лм}}$;
- питома інтегральна чутливість: $K = \frac{I_\phi}{\Phi U_{\phi p}}, \frac{\text{мкА}}{\text{лмВ}}$;
- величина темнового опору : R_T ;
- максимальна робоча напруга: $U_{\text{раб max}} (U_{\text{раб max}} \leq 500 \text{ В})$.

Якщо світловий сигнал (випромінювання), що падає на ФР, змінюється в часі, тобто є змінним, то ФР виявляє інерційність. Фотострум I_ϕ не повторює форму вхідного світлового сигналу. На рис. 7.9, як приклад, показана зміна світлового потоку Φ у вигляді одиночного імпульсу (рис. 7.9, а). Фотострум I_ϕ має форму, що відрізняється від форми світлового потоку Φ (рис. 7.9, б). Фотострум зростає протягом визначеного часу наростання t_n , і спадає –

за час спаду $t_{сп}$. Інерційність ФР обумовлена кінцевим часом життя носіїв заряду, а також механізмами їхньої рекомбінації. Тому ФР працюють до частот у десятки кілогерц.

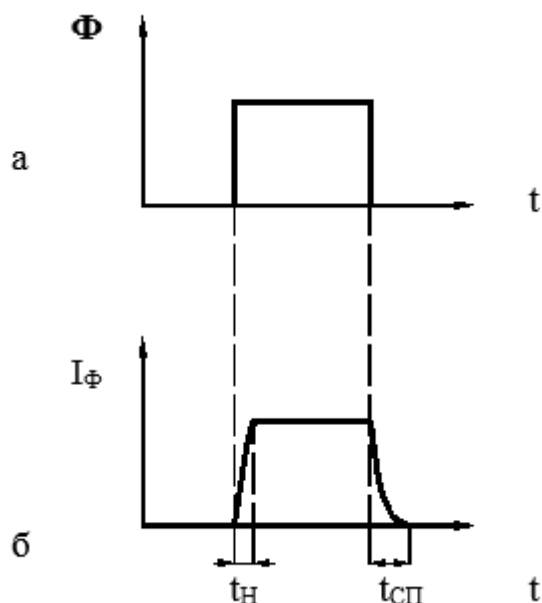


Рисунок 7.9 – Форма фотоструму фоторезистора із змінним у часі світловим потоком

Властивості ФР залежать від температури, як у будь-якого напівпровідника. Перевагою ФР є їхня дешевизна, простота виготовлення, малі габарити та вага.

Недоліки – невисока чутливість, нелінійність світлової характеристики, інерційність, низька термостабільність.

На основі ФР створюють різноманітні схеми вимірювальної техніки, телекерування та сигналізації. Один із прикладів застосування ФР – датчики систем автоматичного керування вуличним освітленням. Оскільки опір освітленого ФР на два–три порядки менше темного, то їх використовують також у ключових схемах.

Фотодіод (ФД) – це напівпровідниковий діод, зворотний струм якого залежить від падаючого на нього випромінювання.

Побудова ФД. Від звичайних діодів відрізняється в основному тим, що в їхніх корпусах вбудовуються прозорі для світла вікна. Проникаюче через ці вікна світло впливає на кристал ФД і викликає зміну струму в їхніх зовнішніх виведеннях. При цьому використовується два варіанти освітлення кристалів ФД – паралельно площині *p-n*-переходу (рис. 7.10, а) і перпендикулярно площині переходу (рис. 7.10, б). Як матеріали для ФД використовують монокристали кремнію, германію, арсеніду галію.

Принцип дії ФД. У робочому режимі ФД на його *p-n*-перехід подається зворотне зміщення. Тому, якщо ФД не освітлений, через нього протікає звичайний зворотний струм I_0 *p-n*-переходу, утворений неосновними носіями.

Під час освітлення *p-n*-переходу і прилягаючих до нього областей у кристалі ФД генеруються фотоносії – електрони й дірки. Оскільки вони утворюються парами, то незалежно від місця утворення, один із них буде неосновним. Отже, під час освітлення в кристалі ФД зростає концентрація неосновних носіїв. Це призводить до пропорційного збільшення зворотного струму *p-n*-переходу. Отримане при цьому збільшення струму визначають як фотострум ФД.

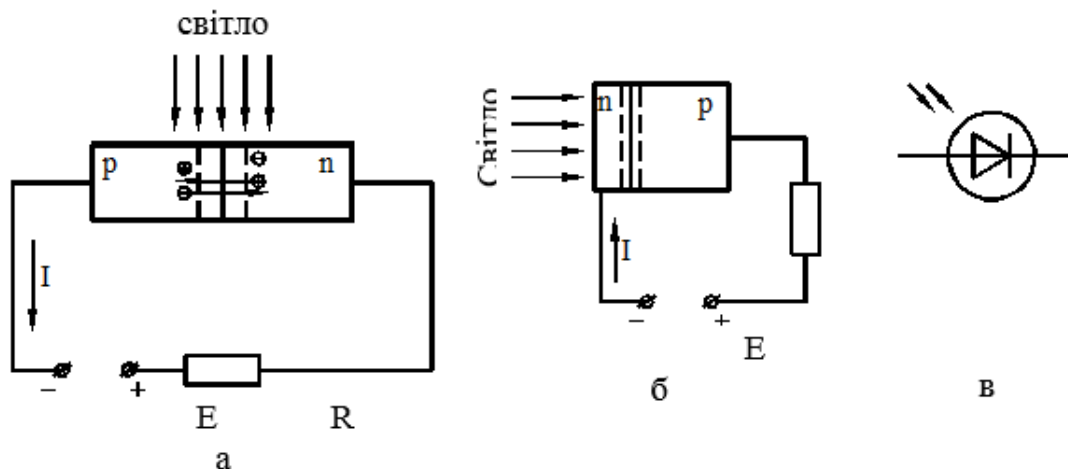


Рисунок 7.10 – Побудова, схеми включення (а, б) і умовне позначення (в) фотодіоду

Якщо за аналогією з ФР ввести інтегральну чутливість K_{Σ} , тобто для ФД I_{ϕ} визначається формулою (7.2). Тоді повний струм ФД у робочому режимі:

$$I_{\phi d} = I_0 + I_{\phi} = I_0 + K_{\Sigma}\Phi. \quad (7.4)$$

Характеристики ФД – вольтамперні, спектральні та світлові, як і у ФР.

ВАХ фотодіоду $I_{\phi} = f(U)$ при $\Phi = \text{const}$, вони показані на рис. 7.11, а. У робочій області, що збігається з третім квадрантом системи координат, характеристики ФД нагадують статичні ВАХ біполярного транзистора в схемі з СБ. У першому квадранті, який відповідає прямому зміщенню ФД, характеристики для різних світлових потоків практично зливаються. У такому режимі ФД не використовують.

Світлова характеристика $I_{\phi} = f(U)$ при $U = \text{const}$ – практично лінійна, на відміну від світлової характеристики ФР. Лінійність світлової характеристики – перевага ФД.

Спектральна характеристика $I_{\phi} = f(\lambda)$ при $\Phi = \text{const}$ має максимум. Його положення на характеристиці залежить від матеріалу ФД.

Параметри ФД:

- інтегральна чутливість K_{Σ} вище, ніж у ФР;
- граничну інтегральну чутливість у ФД не вводять, тому що фотострум I_{Φ} практично не залежить від напруги в робочому режимі;
- темновий струм I_0 , мкА;
- припустима зворотна напруга $U_{зв доп}$.

Частотні властивості ФД кращі, за ФР. Під час використання спеціальних конструкцій ФД із тонкою базою і широким $p-n$ -переходом ($p-i-n$ -діоди) вдається домогтися того, що генерація та поділ електронно-діркових пар відбуваються безпосередньо в самому переході. Такі ФД можуть працювати до частот у тисячі мегагерц.

До недоліків ФД належить велика залежність фотоструму від температури. ФД можуть працювати майже у всіх областях застосування ФР, забезпечуючи за більшістю показників кращі результати.

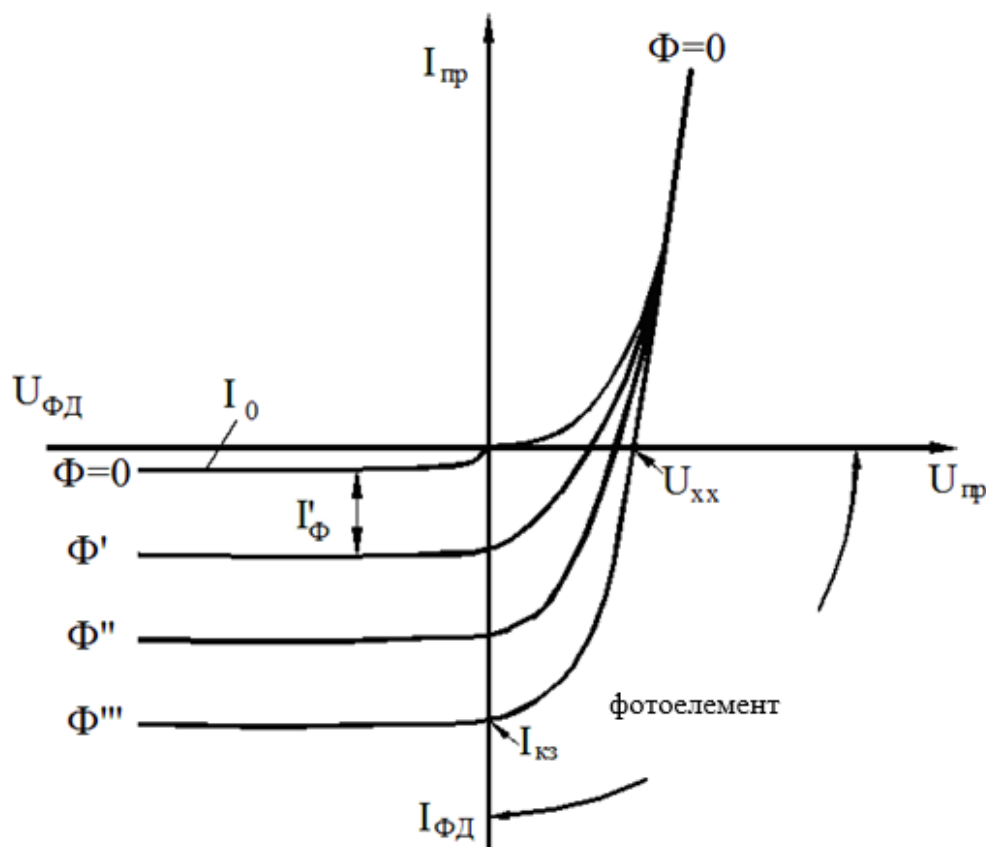


Рисунок 7.11 – Вольтамперні характеристики фотодіода й фотоелемента

Фотоелемент (ФЕ) – це фотодіод із великою площею $p-n$ -переходу, який застосовується для перетворення світлової енергії (зазвичай, сонячної) в електричну енергію.

В ході послідовного з'єднання великої кількості фотоелементів отримують фотоелектричні генератори або батареї для живлення електронних пристроїв, промислових чи побутових установок.

Основними матеріалами для фотоелементів є кремній, арсенід галію, селен.

Принцип дії ФЕ ілюструє рис. 7.12.

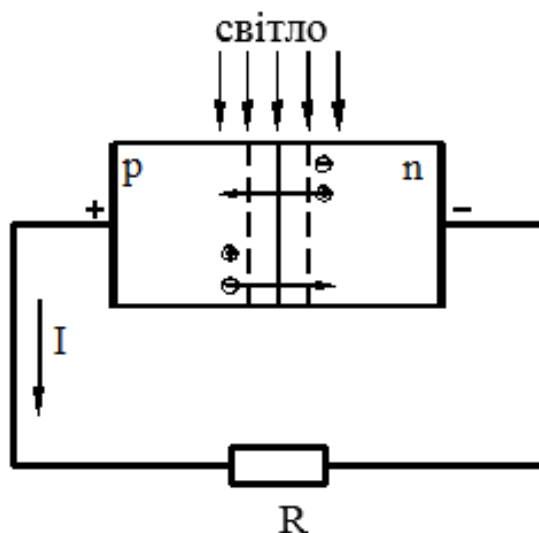


Рисунок 7.12 – Структура і схема включення фотоелемента

Структура ФЕ подібна структурі ФД, тобто в конструкції передбачене прозоре вікно для висвітлення p - n -переходу і прилягаючих до нього областей. Під дією падаючого випромінювання, як і у випадку ФД, у структурі ФЕ утворюються фотоносії – електронно-діркові пари. Під дією внутрішнього поля p - n -переходу відбувається своєрідне «сортування» фотоносіїв.

Дірки зі складу пар фотоносіїв, що утворилися в n -шарі, перекидаються в p -область, тому що внутрішнє поле p - n -переходу є прискорюючим для неосновних носіїв. Аналогічно електрони з p -області перекидаються в n -область. Тому p -шар освітленого фотоелемента заряджається позитивно, а в n -області накопичується негативний заряд. На зовнішніх виводах ФЕ виникає ЕРС. Під час підключення до фотоелемента навантаження R через нього проходить електричний струм.

Характеристики ФЕ. Найважливішою є *вольтамперна характеристика*. На рис. 7.11 робоча область ФЕ обмежується четвертим квадрантом системи координат. На ВАХ при заданому значенні світлового потоку, наприклад, Φ''' , можна визначити такі величини, як струм короткого замикання $I_{кз}$ і напругу холостого ходу $U_{хх}$. Струм $I_{кз}$ протікає в колі ФЕ, коли відсутній резистор навантаження. Напруга $U_{хх}$ встановлюється на затискачах ФЕ за відсутності струму.

Світлові характеристики показані на рис. 7.13 як залежності струму короткого замикання $I_{кз}$ чи напруги холостого ходу $U_{хх}$ від світлового потоку ФЕ:

$$I_{кз} = f(\Phi) \quad \text{або} \quad U_{хх} = f(\Phi).$$

Спектральна характеристика ФЕ має максимум, положення якого визначається матеріалом. У кремнієвих ФЕ максимум спектральної характеристики збігається з максимумом спектрального розподілу сонячного світла. Тому кремнієві ФЕ широко використовуються в сонячних батареях.

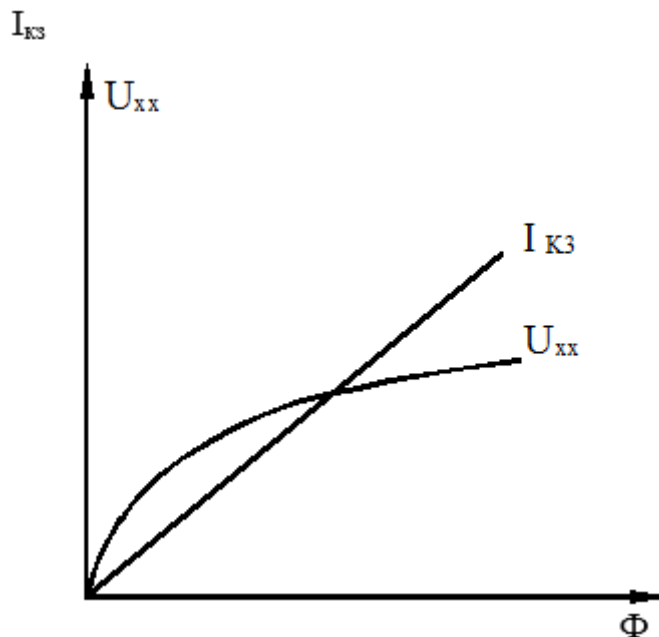


Рисунок 7.13 – Світлові характеристики фотоелемента

До основних параметрів фотоелементів належать:

- фотоерс чи ЕРС холостого ходу $U_{хх}$ (рис. 7.11). $U_{хх}$ збільшується із зростанням освітленості фотоелемента, але не може бути більше висоти потенційного бар'єру p - n -переходу. Для кремнієвих фотоелементів $U_{хх} = 1$ В;
- струм короткого замикання $I_{кз}$ (рис. 7.11), він залежить від освітленості і площі p - n -переходу і складає зазвичай десятки $\text{мА}/\text{см}^2$;
- питома електрична потужність, що віддається в навантаження з одиниці площі p - n -переходу, вона складає $7 \dots 10 \dots 10 \text{ мВт}/\text{см}^2$ для кремнієвих ФЕ;
- ККД фотоелемента дорівнює відношенню вихідної потужності до потужності падаючого світла, зазвичай, ККД сучасних ФЕ може сягати $25 \dots 30\%$.

Фототранзистори (ФТ) – це транзистори, що реагують на випромінювання і здатні підсилювати фотострум.

Структура й принцип дії ФТ. Структура, схема подачі напруги та освітлення біполярного ФТ показані на рис. 7.14.

У нормальному робочому режимі зовнішню напругу E_k на ФТ подають так, щоб забезпечити пряме зміщення емітерного та зворотного зміщення колекторного переходу.

За відсутності освітлення ФТ поводить як звичайний біполярний транзистор у схемі з СЕ при струмі бази $I_b = 0$. Струм колектору $I_{кт}$ у цьому випадку визначається виразом:

$$I_{кт} = (\beta + 1)I_{кбо}, \quad (7.5)$$

де β – коефіцієнт підсилення струму бази транзистора в схемі з СЕ;

$I_{кбо}$ – власний некерований струм колектора.

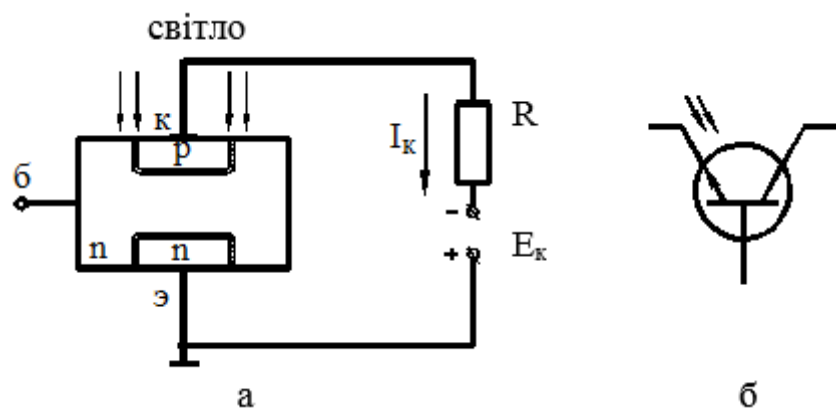


Рисунок 7.14 – Схема включення (а) фототранзистора і його умовне позначення (б)

Під дією світла в базах ФТ утворюються пари фотоносіїв – електрони та дірки. Пари, що утворилися, розділяються полем колекторного переходу. Дірки втягуються полем в область колектора, що призводить до появи звичайного фотоструму I_f . Електрони залишаються в базовій області, створюючи в ній надлишковий негативний заряд. Цей заряд зменшує висоту потенційного бар'єра емітерного переходу, викликаючи тим самим додаткову інжекцію дірок у базу.

Далі все відбувається, як і в звичайному транзисторі: інжектовані дірки дифундують до колекторного переходу, втягуються його полем у колектор і створюють компоненту I_{kf} колекторного струму, який додається до компоненти I_f .

Таким чином, струм у колекторі створюється:

– дірками, утвореними в результаті генерації електронно-діркових пар під дією випромінювання (як у фотодіоді);

– дірками, інжекттованими з емітера в базу через зниження потенційного бар'єра емітерного переходу електронами, які утворюються в базі під час генерації електронно-діркових пар під дією випромінювання.

Фотострум I_ϕ і власний некерований струм колектора $I_{кбо}$ мають однаковий напрямок і створюють власний струм колектора фототранзистора за наявності освітлення:

$$I_{K\Sigma} = I_{кбо} + I_\phi, \quad (7.6)$$

де $I_\phi = K_\Sigma \Phi$, як і у випадку фотодіоду.

Оскільки ФТ включений за схемою з СЕ, то струм у його колекторному колі при $I_б = 0$, визначається виразом:

$$I_k = (\beta+1)I_{K\Sigma} = (\beta+1)I_{кбо} + (\beta+1)K_\Sigma \Phi. \quad (7.7)$$

Перший доданок у виразі (7.7) – це некерований темновий струм $I_{кт}$ (7.5), другий доданок – струм, керований світловим потоком $I_{кф}$:

$$I_{кф} = (\beta+1)K_\Sigma \Phi = K_{\Sigma T} \Phi, \quad (7.8)$$

де $K_{\Sigma T} = (\beta+1)K_\Sigma$.

Коефіцієнт $K_{\Sigma T}$ можна розглядати як інтегральну чутливість ФТ. Вона в $(\beta+1)$ разів більша, ніж інтегральна чутливість фотодіода K_Σ . В цьому головна перевага фототранзисторів.

Характеристики та параметри. Вихідні статичні ВАХ фототранзистора показані на рис. 7.15.

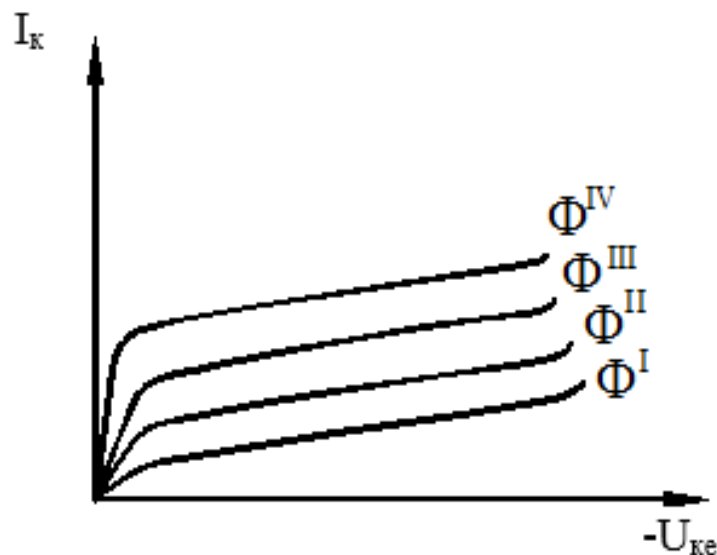


Рисунок 7.15 – Вихідні вольтамперні характеристики фототранзистора

Вони подібні вихідним характеристикам звичайного транзистора в схемі з СЕ з тією різницею, що роль базового струму відіграє світловий потік Φ .

Схема включення транзистора з вільною базою має істотний недолік: вона дуже нестабільна при зміні температури. Це пояснюється тим, що

зі збільшенням температури різко змінюється режим роботи транзистора внаслідок значного (експонентного) збільшення струму $I_{кбо}$.

Вивід бази ФТ використовують для температурної стабілізації режиму (при цьому є деяке зменшення чутливості транзистора).

Можливо й інше використання базового електрода – подача електричних сигналів на ФТ. Це дозволяє ускладнити виконувани ФТ функції: його вихідний струм керуватиметься як світловим, так і електричними сигналами.

Спектральні й світлові характеристики ФТ подібні аналогічним характеристикам фотодіоду.

Параметри ФТ:

- інтегральна чутливість $K_{\Sigma T}$ (до 500 мА/лм);
- робоча напруга $U_{ке}$ (10...15...15В);
- темновий струм $I_{кт}$ (до сотень мкА);
- робочий струм I_k (десятки мА);
- припустима потужність розсіяння $P_{к доп}$ (десятки мВт).
- гранична частота.

Основний недолік ФТ – відносно високий рівень власних шумів.

За цим параметром біполярні фототранзистори гірші від польових фототранзисторів, у яких роль р–п–затвору виконує фотодіод. У польових фототранзисторів істотно нижчий рівень власних шумів.

Запитання й завдання для самоперевірки

1. Які прилади називають фотоелектронними?
2. У чому полягає явище внутрішнього фотоефекту?
3. Що називають фоторезистором?
4. Зобразіть і поясніть побудову ФР.
5. Поясніть принцип дії ФР.
6. Чим визначається величина темного струму ФР?
7. Від чого залежить величина фотоструму?
8. Наведіть і поясніть світлові характеристики ФР.
9. Наведіть і поясніть спектральні характеристики ФР
10. Наведіть і поясніть статичні ВАХ ФР.
11. Наведіть і поясніть параметри ФР.
12. Поясніть причини інерційності ФР.
13. Перелічіть переваги та недоліки ФР.
14. Які прилади називають фотодіодами?

15. Наведіть і поясніть побудову ФД.
16. Поясніть принцип дії ФД.
17. Наведіть і поясніть статичні ВАХ ФД.
18. Наведіть і поясніть світлову та спектральну характеристики ФД.
19. Перелічіть і поясніть параметри ФД.
20. Поясніть залежність фотоструму ФД від температури.
21. Які прилади називають фотоелементами?
22. Поясніть принцип дії ФЕ.
23. Наведіть і поясніть ВАХ ФЕ.
24. Наведіть і поясніть світлову та спектральну характеристики ФЕ.
25. Перелічіть і поясніть параметри ФЕ.
26. Які прилади називають фототранзисторами?
27. Наведіть структуру та схему включення ФТ.
28. Поясніть принцип дії ФТ.
29. Чому інтегральна чутливість ФТ вище, ніж у ФД?
30. Наведіть і поясніть вихідні статичні ВАХ ФТ.
31. Як можна використовувати у ФТ базовий електрод?
32. Перелічіть і поясніть параметри ФТ.

7.5 Оптрони

Оптрон – це прилад, що складається з джерела випромінювання та приймача випромінювання, між якими є прямий оптичний зв'язок.

Оптрон, який містить один випромінювач і один приймач, називають оптопарою.

Облаштування оптрону. Як випромінювач в оптроні може бути використаний світлодіод, напівпровідниковий лазер, електролюмінесцентний випромінювач і ін. Як другий елемент оптопари – фотоприймача – можуть бути використані фоторезистор, фотодіод, фототранзистор, фототиристор і ін. Залежно від виду фотоприймального елемента розрізняють резисторні, діодні, транзисторні та тиристорні оптопари. Випромінюючий і фотоприймальний елементи оптопари розміщують у загальний корпус.

Випромінювач і фотоприймач зв'язані між собою оптично, але електрично вони ізольовані один від одного. Приклади схемного позначення різних оптопар показані на рис. 7.16.

Принцип дії оптрона засновано на подвійному перетворенні енергії. У випромінювачах енергія електричного сигналу перетворюється в оптичне

випромінювання. У фотоприймачах, навпаки, оптичний сигнал обумовлює протікання електричного струму або появу напруги.

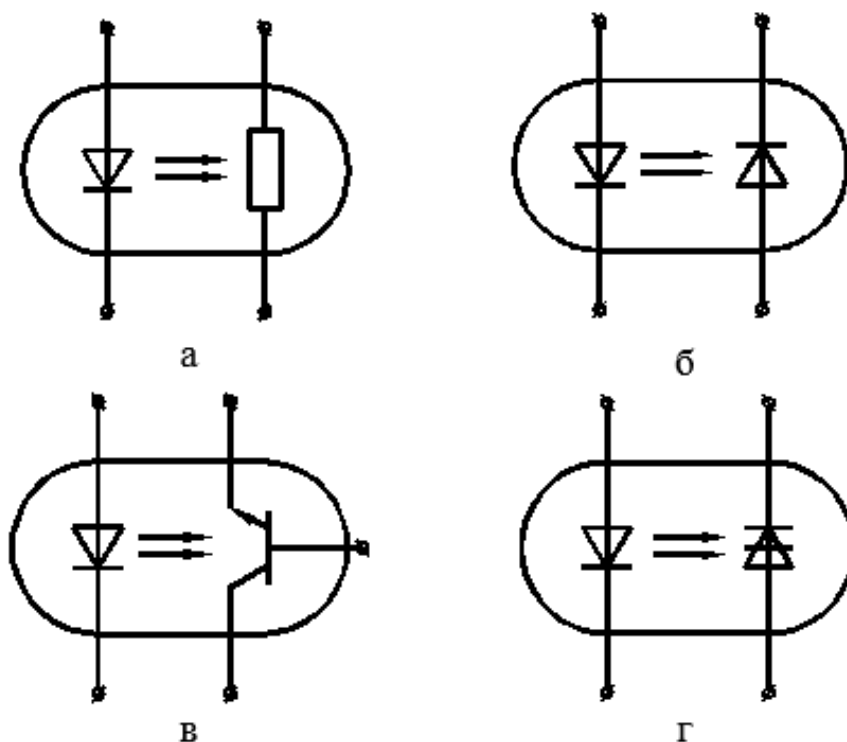


Рисунок 7.16 – Схемні позначення резисторної (а), діодної (б), транзисторної (в) і тиристорної (г) оптопар

Зміна вхідного сигналу викликає зміну потужності випромінювання, отже змінюється світловий потік, що падає на фотоприймач. При зміні опромінення фотоприймача відбувається або зміна опору фоторезистора, або зміна зворотного струму фотодіода, або поява фотоерс фотоелемента.

Якість оптрона значною мірою залежить не тільки від властивостей випромінювача та приймача, але й від властивостей оптичного каналу. Передача енергії від випромінювача до фотоприймача має бути досить ефективною, тобто мати мінімальні втрати.

В оптронах використовують такі види оптичних каналів:

- передача по повітрю (цей зв'язок дешевий і забезпечує добру електричну ізоляцію);
- передача по повітрю, але з використанням оптичного фокусування за допомогою оптичних лінз (у цьому випадку втрати на відображення менші, ніж при прямому зв'язку через повітря);
- передача з використанням спеціальних світловодів, що забезпечує найкращі параметри оптичного каналу.

Під час роботи оптрона обов'язкова погодженість фотоприймача, випромінювача та каналу за спектральними характеристиками. Максимум спектральної чутливості фотоприймача має збігатися з максимумом випромінювання випромінювача. При цьому передача випромінювання по каналу має бути максимально ефективною.

Характеристики оптрона. Вхідна характеристика – це характеристика відповідного випромінювача. Вихідна характеристика визначається фотоприймачем. Передатна характеристика – це залежність вихідного струму від вхідного:

$$I_{\text{вих}} = f(I_{\text{вх}}).$$

Як правило, передатні характеристики оптронів нелінійні. Це обумовлено нелінійністю випромінювальної (чи яскравісної) характеристик випромінювача та нелінійністю світлової характеристики фотоприймача.

Параметри оптронів можна розділити на такі групи:

- вхідні параметри (випромінювача);
- вихідні параметри (фотоприймача);
- передатні параметри (параметри передачі сигналу з входу на вихід);
- гранична частота, що визначає швидкодію оптрона;
- параметри ізоляції.

Вхідні та вихідні параметри були розглянуті в розділах, присвячених випромінюючим і фотоелектронним приладам.

Основним параметром, що характеризує передачу сигналу з входу на вихід, є коефіцієнт передачі за струмом:

$$K_I = \frac{\Delta I_{\text{вих}}}{\Delta I_{\text{вх}}}, \quad (7.9)$$

де $\Delta I_{\text{вих}}$, $\Delta I_{\text{вх}}$ – збільшення вихідного і вхідного струмів.

Швидкодія оптрона значною мірою визначається інерційністю його елементів.

Параметрами електричної ізоляції є максимально допустима напруга ізоляції U_{i3} між входом і виходом; опір ізоляції R_{i3} між входом і виходом.

Переваги оптронів:

- забезпечення безконтактного (оптичного) керування електронними пристроями;
- можливість забезпечення високої електричної ізоляції входу та виходу при сильному оптичному зв'язку;
- висока захищеність від різних зовнішніх полів;
- односпрямованість потоку інформації.

В оптронах є і визначні недоліки:

- невисокий ККД через подвійне перетворення енергії;
- залежність параметрів від зміни температури;
- досить високий рівень власних шумів.

Основна область застосування оптронів – пристрої гальванічної розв'язки між різними колами радіоелектронних схем. Крім того, оптрони мають ключові властивості.

Запитання й завдання для самоконтролю

1. Які прилади називають оптронами?
2. Наведіть і поясніть облаштування оптронів резистивного, діодного, транзисторного та тиристорного типів.
3. Поясніть принцип дії оптрона, вибравши його визначений тип.
4. Які оптичні канали використовують в оптронах?
5. Як мають бути погоджені в оптроні властивості випромінювача, фотоприймача та каналу?
6. Перелічіть і поясніть характеристики оптрона.
7. Перелічіть і поясніть параметри оптрона.
8. Перелічіть і поясніть переваги оптрона.
9. Перелічіть і поясніть недоліки оптрона.

8 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ КОМПОНЕНТІВ

8.1 Моделі, засоби і технологія комп'ютерного моделювання напівпровідникових приладів

Важливою складовою навчального процесу є практичні та лабораторні заняття. Взагалі лабораторний практикум доцільно виконувати на макетах електронних пристроїв, що містять досліджувані напівпровідникові компоненти, необхідні джерела живлення, генератори сигналів, вимірювальні прилади, комутаційні елементи. Проте, враховуючи швидку зміну номенклатури компонентної бази напівпровідникової електроніки, різке підвищення вартості лабораторного обладнання, слід звернути увагу на можливості сучасних комп'ютерних засобів моделювання електронних схем. Пакети прикладних програм з електроніки мають значно ширший асортимент кожного типу електронних компонентів порівняно з лабораторними макетами, що дозволяє використовувати індивідуальні завдання для кожного студента. Програмні пакети мають більше функціональних можливостей з дослідження характеристик та параметрів елементів за різних експлуатаційних умов. Враховуючи сказане, було визнано доцільним доповнити лабораторний практикум роботами, що виконуються на комп'ютері з використанням відкритих, демонстраційних та навчальних версій прикладних програм.

У лабораторному практикумі з дослідження напівпровідникових приладів як програмний засіб моделювання використовується демонстраційна версія системи автоматизованого проектування (САПР) OrCAD. Моделювання роботи електронних пристроїв на персональному комп'ютері (ПК) ґрунтується на математичних моделях, розроблених на основі схем заміщення напівпровідникових компонентів.

Моделювання системі OrCAD здійснюється на основі віртуальних вимірювань, які створюються за допомогою схемотехнічного редактора Capture.

У ході комп'ютерного лабораторного практикуму студенти знайомляться з можливостями САПР OrCAD та схемотехнічного редактора Capture, методикою побудови схеми вимірювань характеристик, послідовності дій для дослідження технологічного розкиду характеристик у серії компонентів та дослідження впливу експлуатаційних факторів.

Кожен студент розробляє індивідуальні файли проектів згідно з завданням, отриманого від викладача. За допомоги схемотехнічного редактора Capture складається схема вимірювань, яка зберігається у персональній директорії. Наприклад, схеми вимірювання характеристик діодів 1N4148 можуть бути збережені у вигляді *Diode1–1.orj*, *Diode1–2.orj* тощо.

Запитання й завдання для самоперевірки

1. У чому необхідність використання комп'ютерних засобів моделювання електронних компонентів?
2. Наведіть переваги комп'ютерних засобів моделювання?
3. На чому ґрунтується моделювання електронних пристроїв на персональному комп'ютері?
4. Які засоби використовують для моделювання електронних компонентів?

8.2 Методика формування файлу проекту дослідження напівпровідникового компоненту

Під час проведення досліджень за допомоги програмного пакета САПР OrCAD необхідно виконати таке:

- а) запустити редактор схем Capture CIS Demo;
- б) відкрити файл проекту, відповідний проведеним дослідженням (меню File – Open – Project).

Після запуску файлу проекту відкривається менеджер проекту, який розташований в лівій частині екрана програми Capture (рис. 8.1).

У режимі File розгортається плоска файлова структура проекту, в режимі Hierarchy – його ієрархічна структура. Файлова структура проекту містить ряд розділів:

- Design Resource – опис проекту (файл проекту *.dsn, окремі сторінки схеми, перелік компонентів Design Cache, VHDL-файли, перелік використовуваних бібліотек компонентів *.olb);
- Outputs – результати проектування;
- PSpice Resource – інформація для моделювання (Include Files, Model Library, Simulation Profiles, Stimulus Files) і ін.

Подвійне клацання лівої кнопки мишки по імені конкретного файлу або по його значку завантажує його у відповідний редактор (при виборі файлу схем завантажується редактор схем, при виборі текстового файлу – вбудований текстовий редактор).

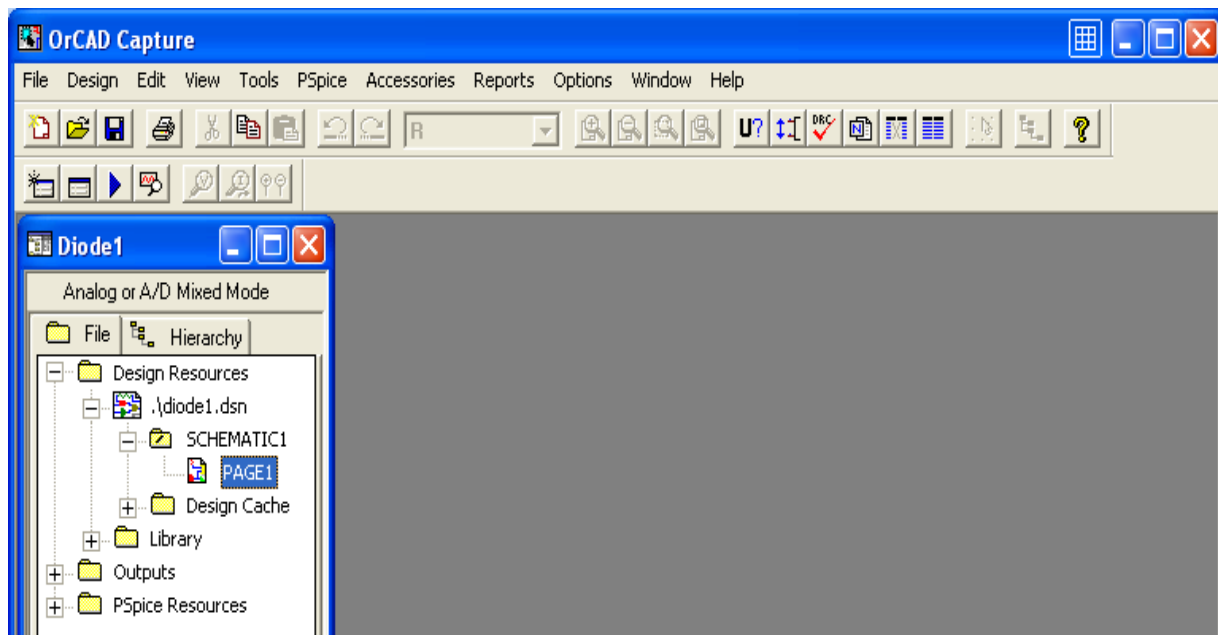


Рисунок 8.1 – Менеджер проекту

На рис. 8.2 показано вікно редактора сторінки принципової схеми, на якій розташовані додаткові панелі інструментів.

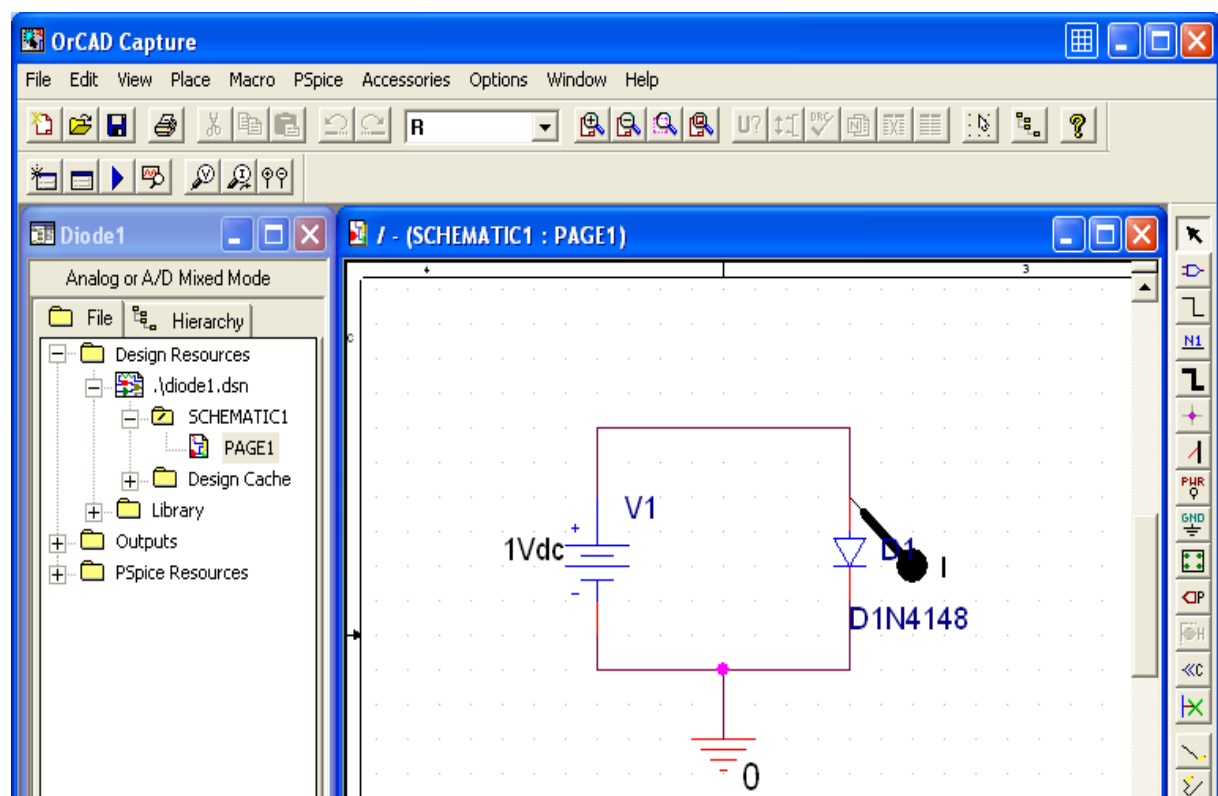






Рисунок 8.2 – Вікно редактора сторінки принципової схеми

Перелік використовуваних команд, відповідних піктограм панелі інструментів у режимі редагування схем, наведено в табл. 8.1.

Перелік команд, відповідних піктограм панелі інструментів у режимі моделювання, наведено в табл. 8.2.

Таблиця 8.1 – Піктограми панелі інструментів режиму редагування схем

Піктограма	Еквівалентна схема	Опис команди
	<i>Select</i>	Режим вибору об'єктів
	<i>Place Part</i>	Вибір в бібліотеці компонента для розміщення його символу на схемі
	<i>Place Wire</i>	Рисування електричних кіл. Під час натискання кнопки Shift можливий ввід не ортогональних кіл
	<i>Place Ground</i>	Розміщення символів виводів джерел живлення та заземлення

Таблиця 8.2 – Піктограми панелі інструментів режиму моделювання

Піктограма	Еквівалентна схема	Опис команди
	<i>New Simulation Profile</i>	Створення нового файлу завдання на моделювання
	<i>Edit Simulation Setting</i>	Редагування завдання на моделювання
	<i>Run PSpice</i>	Запуск програми PSpice на моделювання
	<i>View Simulation Results</i>	Переглянути графічні результати моделювання
	<i>Voltage / Level Marker</i>	Встановлення маркера напруги / логічного рівня
	<i>Current Marker</i>	Встановлення маркера струму
	<i>Voltage Differential Markers</i>	Встановлення двох маркерів різниці напруг

Підключення бібліотеки з математичними моделями досліджуваних радіокомпонентів здійснюється в меню Simulation setting на вкладці Libraries. Натисканням на кнопку Browse вибирається файл бібліотеки Electronica.lib, що знаходиться в каталозі Libraries, який активацією клавіші Add to Design підключається до проекту.

Нижче викладаються загальні алгоритми виконання лабораторних досліджень конкретних напівпровідникових приладів за допомоги САПР OrCAD 9.2. Користувачі, що мають навички роботи в середовищі OrCAD, можуть виконувати ці завдання відповідно з самостійно розробленими методиками.

Запитання й завдання для самоперевірки

1. Наведіть послідовність формування файлу проекту дослідження напівпровідникового компоненту?
2. Чим відрізняються режими File та Hierarchy?
3. Які команди використовують у режимі редагування схем?
4. Наведіть приклад команд, що використовують у режимі моделювання?
5. Яке призначення додатка *PSpice*?

8.3 Дослідження характеристик випрямляючих діодів засобами САПР

Дослідження ВАХ і параметрів випрямляючого діода

Для проведення дослідження ВАХ і параметрів випрямляючого діода необхідно запустити відповідний файл проекту:

- а) *Diode1-1.orj* – під час дослідження математичної моделі кремнієвого діода (файл *Diode1-1*);
- б) *Diode1-2.orj* – під час дослідження математичної моделі германієвого діода (файл *Diode1-2*).

Дослідження ВАХ і параметрів випрямляючого діода проводиться відповідно до схем вимірювань, наведених на рис. 8.3.

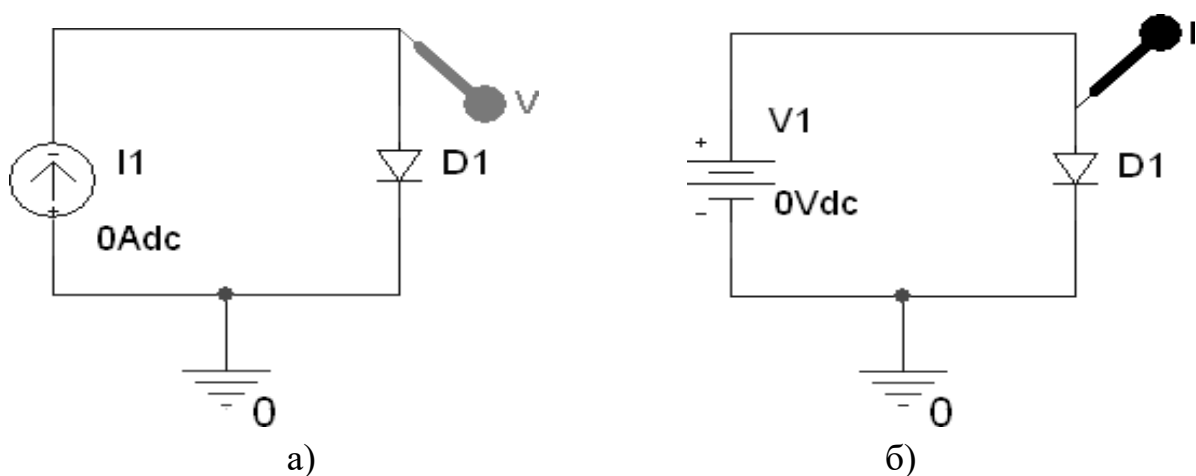


Рисунок 8.3 – Схеми вимірювань для дослідження прямої (а) і зворотної (б) гілок ВАХ випрямляючого діода

На рис. 8.3 позначено D1 – досліджуваний діод; I1 – джерело струму; V1 – джерело напруги.

Дослідження здійснюється за допомогою процедури багатоваріантного аналізу режиму розрахунку за постійним струмом DC Sweep.

Спочатку досліджуємо пряму гілку ВАХ діоду.

У меню Edit Simulation Setting на вкладці Analysis у вікні Analysis type вибирається вид аналізу DC Sweep (багатоваріантний аналіз режиму за постійним струмом). Як змінна (Sweep Variable) вказується джерело струму (Current source) I1 і задаються межі його зміни відповідно до гранично допустимих параметрів діоду.

В полі Start Value (рис. 8.4) встановлюються початкове значення струму I1, в полі End Value – кінцеве значення, в поле Increment – значення приросту I1; спосіб зміни (Sweep Type) – Linear (лінійний).

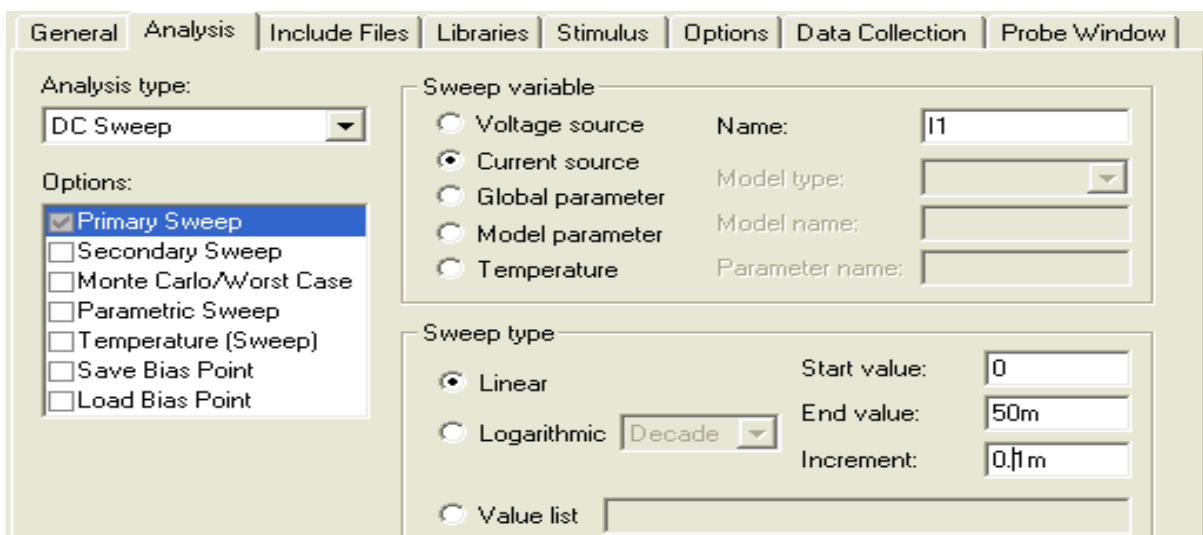


Рисунок 8.4 – Установка параметрів джерела струму I1

Активізується процес моделювання за допомогою вибору в меню Pspice пункту Run або через активацію клавіші Run PSpice на панелі інструментів схемотехнічного редактора Capture.

Результати моделювання наведені на рис. 8.5. Наведений графік відповідає прямій гілці ВАХ випрямного діода типу 1N4148.

Для відображення результатів моделювання у вигляді залежності струму діода від напруги на діоді в програмі моделювання аналогових і змішаних пристроїв PSpice A/D як аргумент по осі OX вказується напруга на діоді (меню Plot – Axis Setting – закладка X axis – клавіша Axis variable). Як змінна по осі OY встановлюється струм діода (меню Trace – Add Trace).

Для дослідження зворотної гілки ВАХ випрямного діода у меню Edit Simulation Setting на вкладці Analysis у вікні Analysis type вибирається вид аналізу DC Sweep.

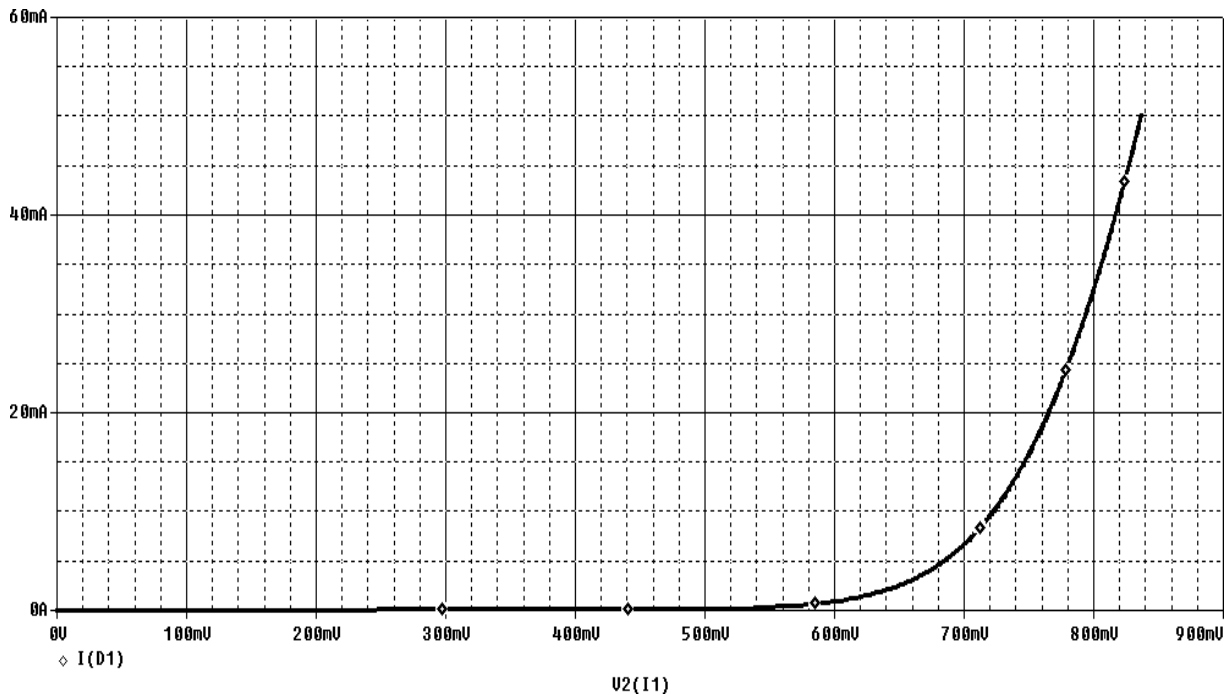


Рисунок 8.5 – Прямая гілка ВАХ діода 1N4148

Як змінна (Sweep Variable) вказується джерело напруги (Voltage source) $V1$ і задаються відповідні межі його зміни. В полі Start Value (рис. 8.6) встановлюється початкове значення $V1$, в поле End Value – кінцеве значення $V1$, в поле Increment значення приросту (0,01 Вольт); спосіб зміни (Sweep Type) – Linear (лінійний).

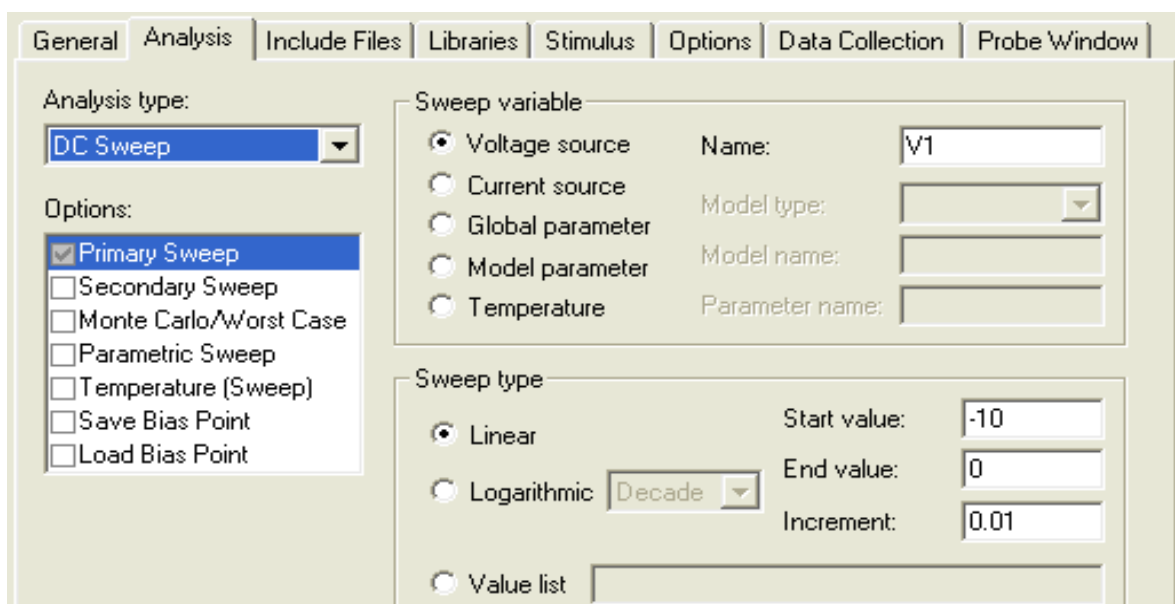


Рисунок 8.6 – Установка параметрів джерела напруги $V1$

Моделювання здійснюється за допомоги вибору в меню Pspice пункту Run або через активацію клавіші Run PSpice на панелі інструментів схемотехнічного редактора Capture.

Результати моделювання наведені на рис. 8.7. Отриманий графік відповідає зворотній гілці ВАХ випрямного діода типу 1N4148.

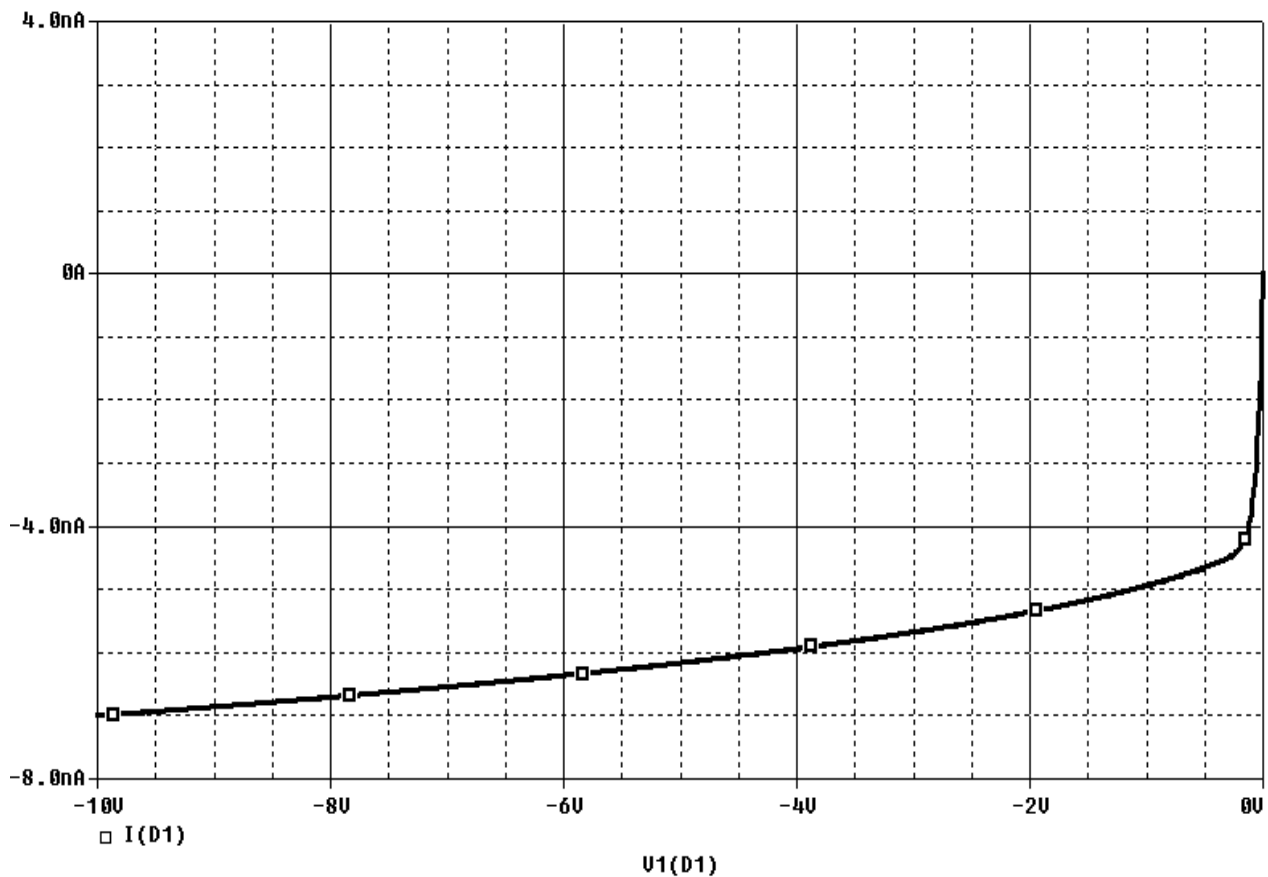


Рисунок 8.7 – Зворотна гілка ВАХ діода

Побудова ВАХ з урахуванням технологічного розкиду параметрів випрямного діода проводиться на основі схеми вимірювань, що наведено на рис. 8.3, б.

Дослідження здійснюється за допомогою процедури багатоваріантного розрахунку режиму за постійним струмом DC Sweep і статистичного аналізу за методом Монте-Карло (Monte-Carlo). Параметром технологічного розкиду є об'ємний опір RS математичної моделі діода.

На рис. 8.8 наведено приклад моделювання впливу технологічного розкиду значення об'ємного опору бази RS на пряму гілку ВАХ випрямного діода 1N4148.

Для зміни масштабу відображення в програмі моделювання аналогових і змішаних пристроїв OrCAD PSpice A/D необхідно встановити необхідні значення напруги по осі OX у меню Plot – Axis Setting – X axis.

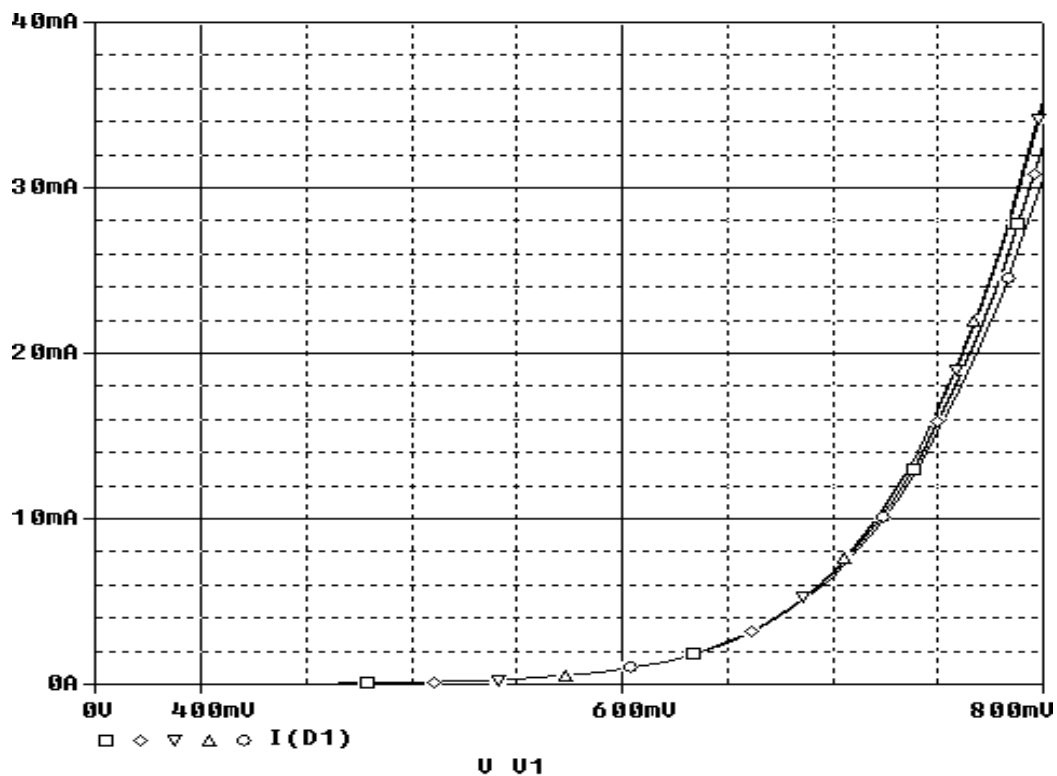


Рисунок 8.8 – Пряма гілка ВАХ випрямного діода з урахуванням технологічного розкиду

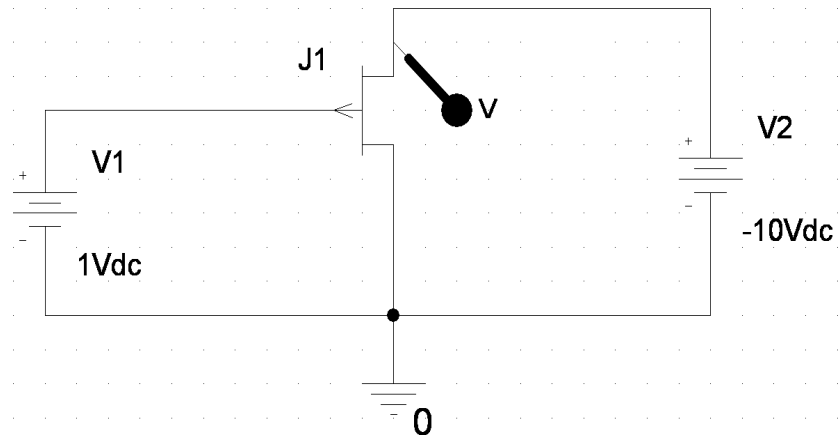
Запитання й завдання для самоперевірки

1. Наведіть послідовність кроків у ході моделювання діодів?
2. Чим відрізняються схеми дослідження прямої і зворотної гілок ВАХ випрямляючого діода?
3. Який параметр схеми вимірювання змінюють у ході побудови прямої гілки ВАХ випрямляючого діода?
4. Яке значення Sweep variable використовують у ході побудови зворотної гілки ВАХ випрямляючого діода?
5. Яке призначення статистичного аналізу за методом Монте-Карло?

8.4 Дослідження характеристик польових транзисторів за допомогою САПР OrCAD

Побудова ВАХ і інших характеристик польових транзисторів проводиться відповідно до схеми вимірювань, наведеної на рис. 8.9.

Дослідження здійснюється за допомогою процедури багатоваріантного розрахунку режиму за постійним струмом (DC Sweep). Методика розрахунку характеристик аналогічна наведеній вище для діода.



- J1 – досліджуваний польовий транзистор;
- V1 – джерело напруги в колі затвора;
- V2 – джерело напруги в колі стоку

Рисунок 8.9 – Схема вимірювань для дослідження характеристик ПТ

Результати моделювання характеристик транзистора типу 2N3331 з керуючим *p-n*-переходом і каналом *p*-типу наведені на рис. 8.10, 8.11.

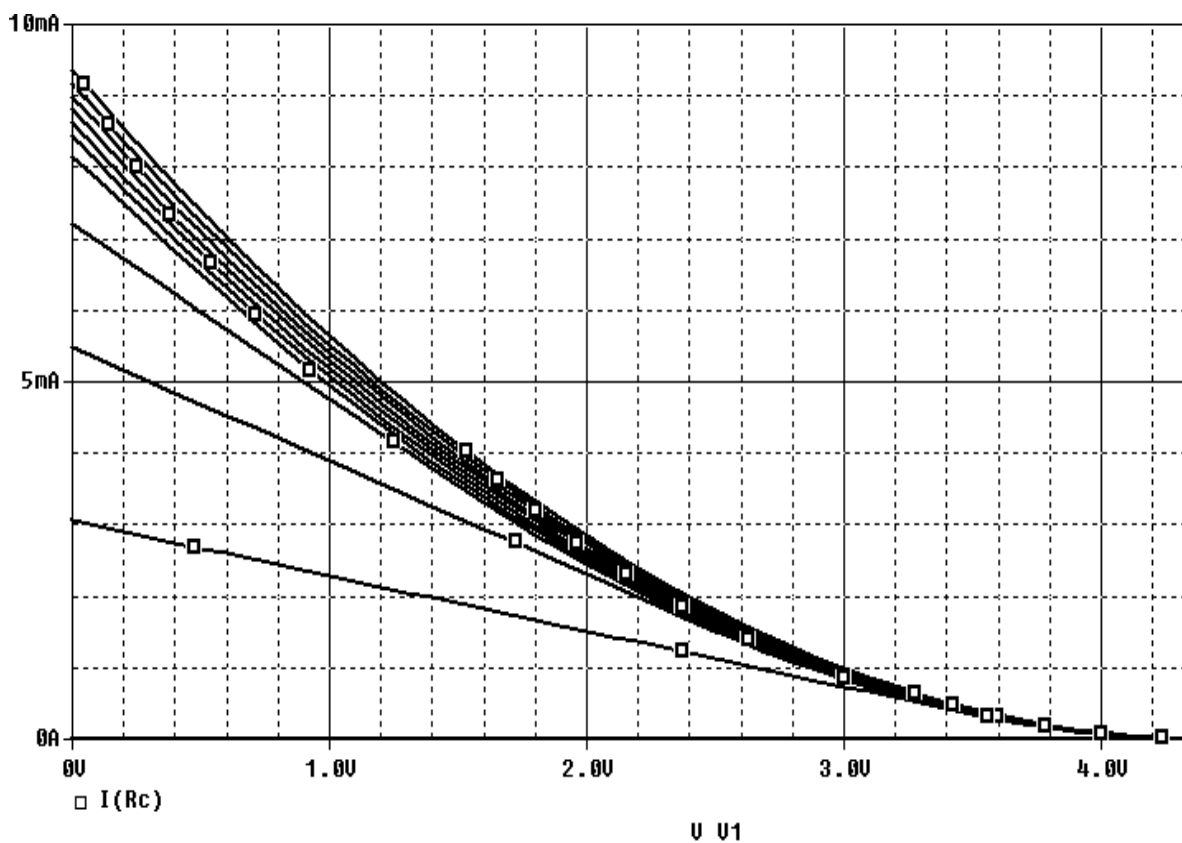


Рисунок 8.10 – Сімейство статичних передавальних ВАХ транзистора 2N3331 з керуючим *p-n*-переходом і каналом *p*-типу

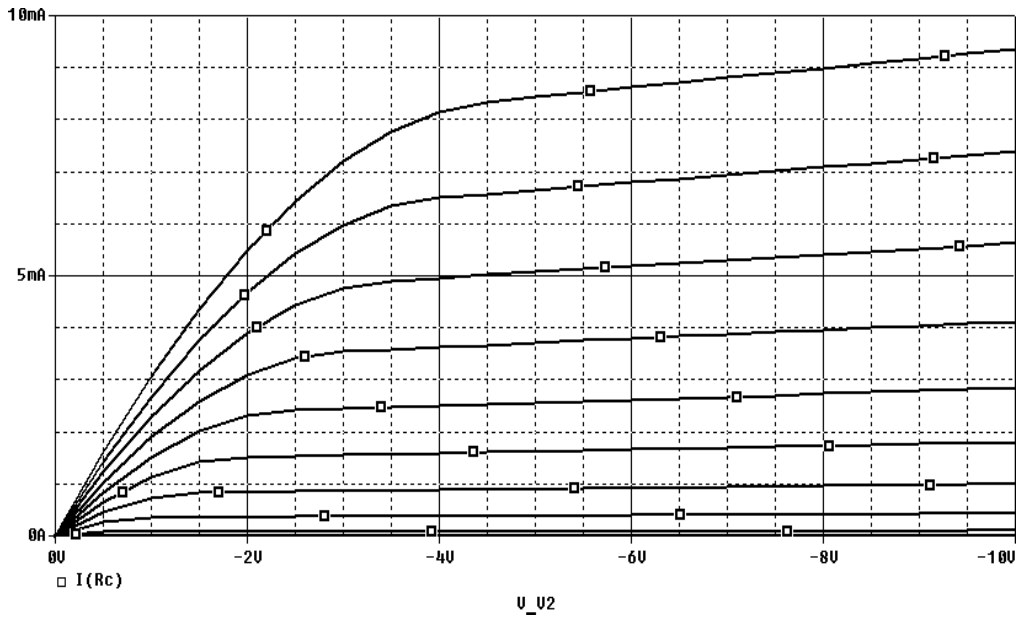


Рисунок 8.11 – Сімейство статичних вихідних ВАХ польового транзистора 2N3331 з керуючим переходом і каналом *p*-типу

8.5 Дослідження температурних залежностей характеристик напівпровідникових компонентів засобами САПР

Важливим етапом дослідження напівпровідникових компонентів є моделювання температурної залежності їхніх характеристик та параметрів. Методику такого дослідження наведемо на прикладі моделювання температурної залежності статичних передавальних ВАХ польового транзистора 2N3331 та його крутизни.

Для виконання цього завдання активізується меню Temperature (Sweep) (рис. 8.12). В полі Repeat the simulation for each of the temperatures через пробіл зазначаються температури, для яких необхідно провести розрахунки.

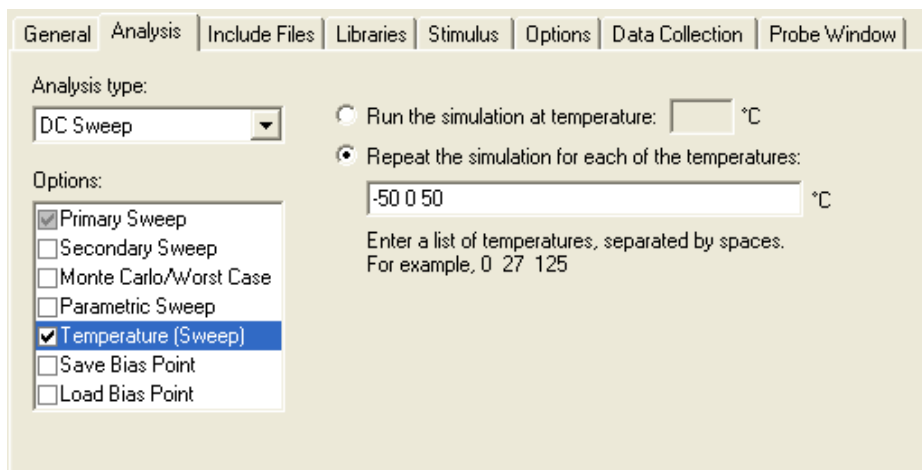


Рисунок 8.12 – Установка значень температур для розрахунку

Результати моделювання показані на рис. 8.13 та 8.14.

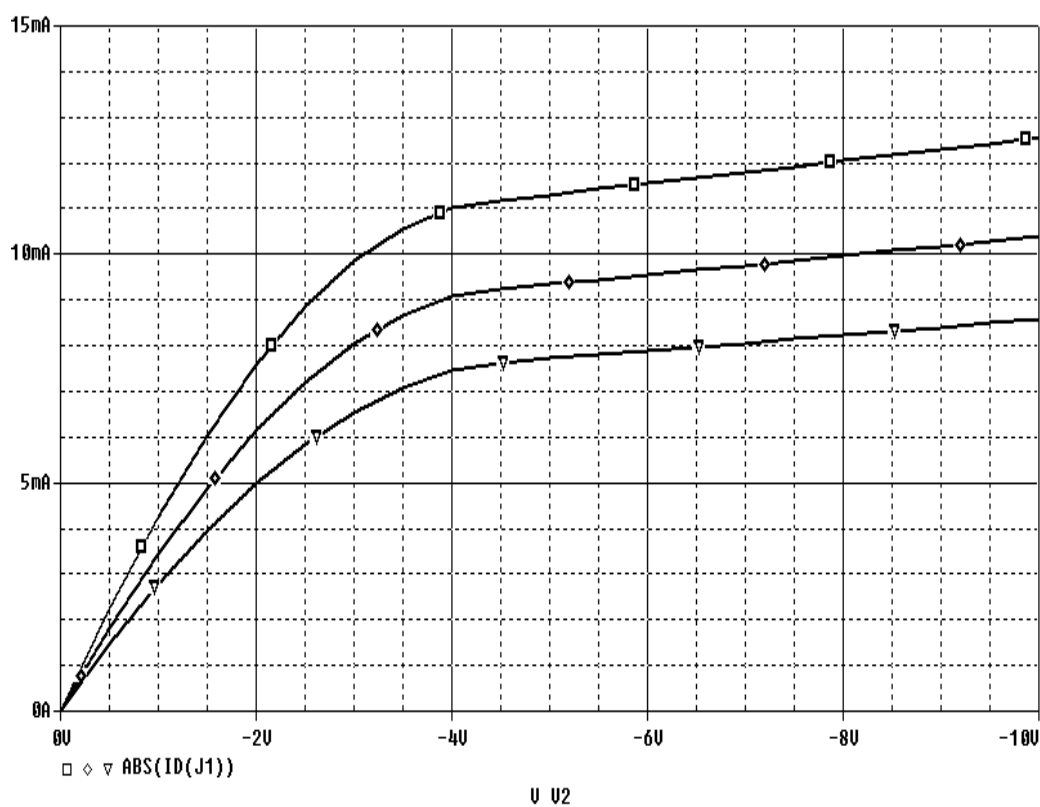


Рисунок 8.13 – Сімейство статичних передавальних ВАХ транзистора 2N3331 з керуючим переходом і каналом p -типу за різних температур

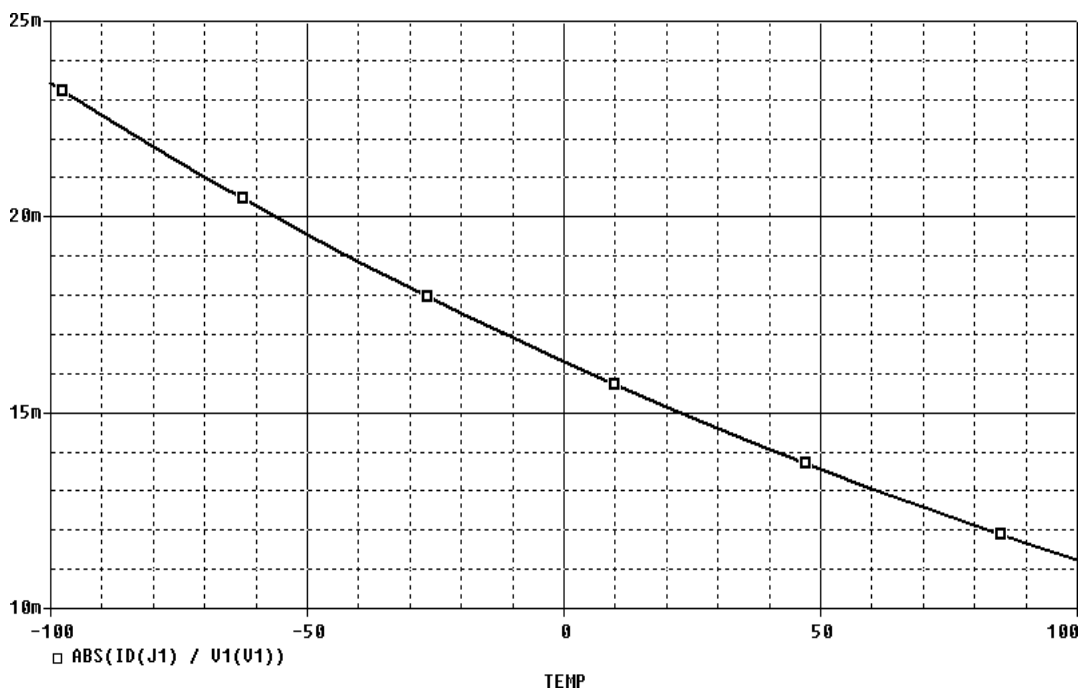


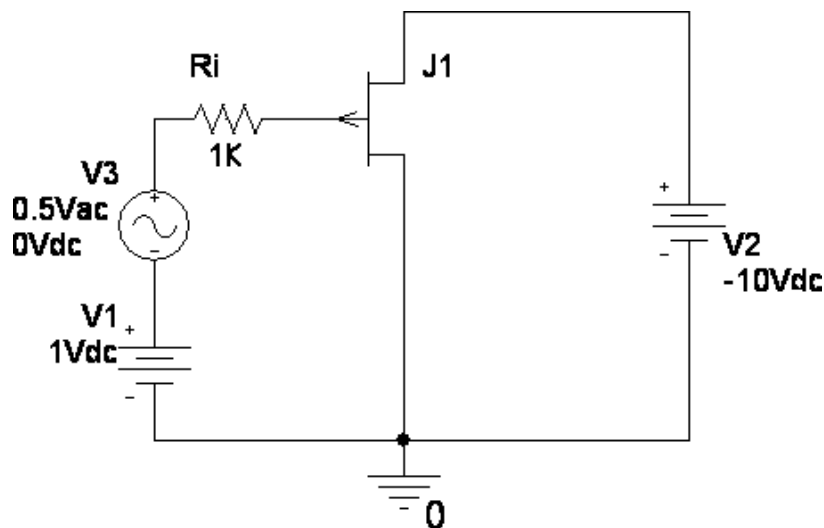
Рисунок 8.14 – Залежність крутизни транзистора 2N3331 з керуючим переходом і каналом p -типу від температури при $V_1 = 0,5$ В, $V_2 = -10$ В

Запитання й завдання для самоперевірки

1. Наведіть імовірні причини температурної залежності характеристик та параметрів напівпровідникових компонентів.
2. Яка послідовність дій під час розрахунку температурних залежностей?
3. Як статичні передавальні характеристики польового транзистора залежать від температури?

8.6 Дослідження частотних властивостей напівпровідникових компонентів

Розглянемо методику дослідження залежності параметрів напівпровідникових компонентів від частоти сигналу. Для прикладу використаємо польовий транзистор. Наведемо імітаційну схему вимірювань (рис. 8.15). З бібліотеки Source.olb вибираємо джерело змінної напруги V3(V_{AC}) та джерела постійної напруги V1, V2, з бібліотеки Analog.olb вибираємо резистор R_i, що імітує внутрішній опір джерела напруги.



- J1 – польовий транзистор з керуючим переходом;
V1, V2, V3 – джерела напруги;
R_i – внутрішній опір джерела V3

Рисунок 8.15 – Схема вимірювань для дослідження частотних властивостей польового транзистора

У меню Edit Simulation setting (рис 8.16) на вкладці Analysis у вікні Analysis type вибирається вид аналізу AC Sweep / Noise (розрахунок частотних

характеристик) і встановлюються параметри перебудови частоти. В полі Start Frequency встановлюється початкова частота розрахунку, в полі End Frequency – кінцева частота, в поле Points / Decade – число точок на декаду, спосіб зміни частоти (AC Sweep Type) – логарифмічний (logarithmic). Вибір способу зміни частоти пов’язано з дуже значним діапазоном вимірювань.

Результати моделювання залежності струму стоку польового транзистора від частоти наведені на рис. 8.17.

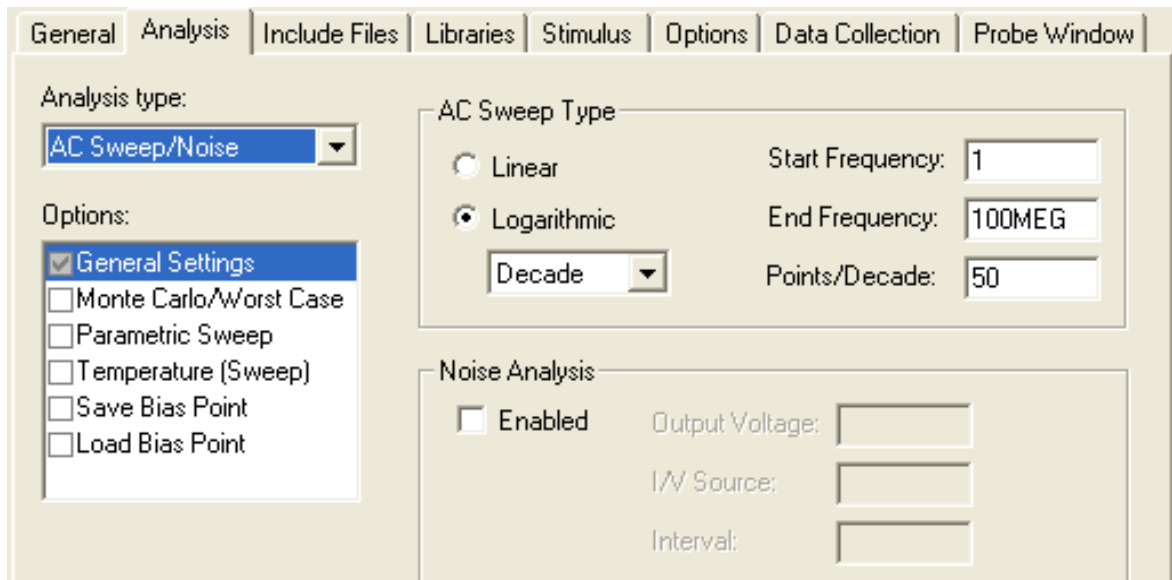


Рисунок 8.16 – Установка параметрів зміни частоти

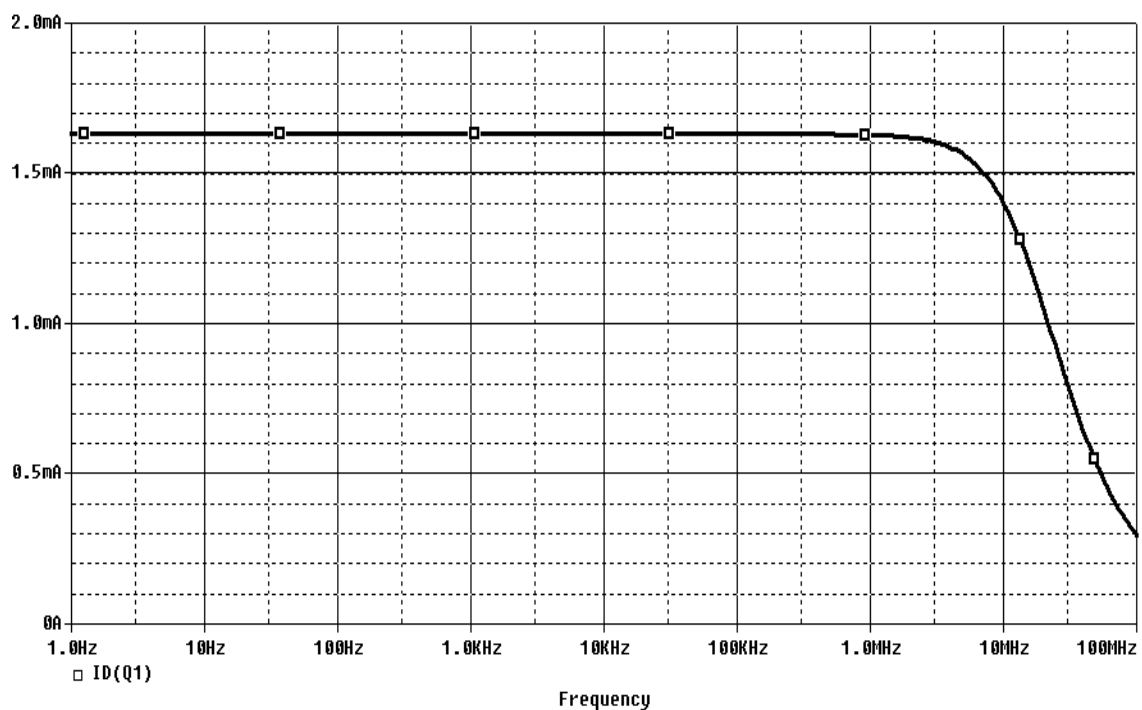


Рисунок 8.17 – Залежність струму стоку транзистора 2N3331 з керуючим переходом і каналом *p*-типу від частоти при $V_1 = 1$ В, $V_2 = -10$ В

Наведена характеристика дозволяє розрахувати максимальну частоту та вхідну ємність польового транзистора. Максимальна частота f_{\max} визначається значенням, за якого амплітуда досліджуваної функції (у даному випадку струму) зменшується у 1.41 рази відносно амплітуди при низьких частотах. Вхідну ємність польового транзистору можна визначити за формулою:

$$C = 1/(2\pi R_i f_{\max}).$$

Моделювання характеристик інших напівпровідникових компонентів принципово не відрізняється від досліджень, наведених вище для діодів та польових транзисторів.

Запитання й завдання для самоперевірки

1. Які джерела живлення потрібно використати в імітаційній схемі з дослідження частотних властивостей польового транзистора?
2. З якою метою встановлюють логарифмічний спосіб зміни частоти під час моделювання?
3. Який вид аналізу вибирають у меню Edit Simulation під час дослідження частотних властивостей?
4. Як визначити максимальну частоту передачі польового транзистору за частотною характеристикою?
5. Як розрахувати вхідну ємність польового транзистору?

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Гордієнко Ю.О., Гуржій А.Н., Бородин А.В., Бурдукова С.С. Напівпровідникові прилади, інтегральні мікросхеми та технологія їх виробництва. – Харків: Компанія СМІТ, 2004. – 620 с.
2. Дружинін А.О. Твердотільна електроніка. Фізичні основи і властивості напівпровідникових приладів: навч. посібник. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2009. – 332 с.
3. Твердотільна електроніка : підручник / О.В. Борисов, Ю.І. Якименко; за заг. ред. Ю.І. Якименка. – Київ: НТУУ «КПІ», 2015. – 484 с.
4. Бондаренко І.М., Бородин О.В., Карнаушенко В.П. Проектування напівпровідникових приладів та інтегральних схем: навч. посібник для студентів ЗВО. – Харків: ХНУРЕ. – 2019. – 177 с.
5. Прохоров Е.Д. Твердотіла електроніка: навч. посібник. – Харків: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2007. – 544 с.
6. Антонова В.А., Бородин А.В., Гордиенко Ю.Е., Слипченко Н.И. Материалы электронной техники: учеб. пособие. – Харьков: ХТУРЭ, 2001. – 160 с.
7. Викулин И.М., Стареев В.И. Физика полупроводниковых приборов. – Москва: Радио и связь, 1990. – 263 с.
8. Тугов Н.М., Глебов Б.А., Чарыков Н.А. Полупроводниковые приборы. – Москва: Энергоатомиздат, 1990. – 575 с.
9. Пашинцев П.А. Полупроводниковые радиокомпоненты. – Харьков: АО «ТИ транскрипция», 1998. – 279 с.
10. Пасынков В.В. и др. Полупроводниковые приборы. – Москва: Высш. шк., 1987. – 479 с.
11. Яцишин В.І., Бурдукова С.С. Основи фізики напівпровідникових приладів. Київ: НМК ВО, 1992. – 120 с.
12. Яцишин В.И. Бурдукова С.С. Элементы и компоненты РЭУ. Дискретные радиокомпоненты. – Киев: УМКВО, 1990. – 247 с.
13. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. 2-е издание. – Москва: Библиотека интеллектуальных знаний, 2001. – 488 с.
14. Булычев А.Л. Электронные приборы: учебн. / А.Л. Булычев, П.М. Лямин, Е.С. Тулинов. – Минск: Высш. шк., 1999. – 415 с.
15. Разевиг В.Д. Система проектирования OrCAD 9.2 / В.Д. Разевиг. – Москва: Солон-Р, 2003. – 519 с.

Навчальне видання

БОНДАРЕНКО Ігор Миколайович,
БОРОДІН Олександр Васильович,
ГАЛАТ Олександр Борисович,
КАРНАУШЕНКО Володимир Петрович

ТВЕРДОТІЛЬНА ЕЛЕКТРОНІКИ

Навчальний посібник

Відповідальний випусковий І.М. Бондаренко
Редактор Б.П. Косіковська
Комп'ютерна верстка Л.Ю. Светайло

План 2020 (друге півріччя), поз. 2.

Підп. до друку 20.05.20.	Формат 60x84 _{1/16} .	Спосіб друку – ризографія.
Умов. друк. арк. 14,0.	Облік. вид. арк. 12,4.	Тираж 40 прим.
Ціна договірна	Зам № 1-2.	

ХНУРЕ. Україна. 61166, Харків, просп. Науки, 14

Віддруковано в редакційно-видавничому відділі ХНУРЕ
61166, Харків, просп. Науки, 14