МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ

Курс лекцій

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітніми програмами
«Акустичні електронні системи та технології обробки акустичної інформації» та
«Електронні системи мультимедіа та засоби Інтернету речей»
спеціальності 171 Електроніка

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол №6 від 25.02.2021 р.)

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2021

Фізичні основи електроніки: курс лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 171 «Електроніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: К.С. Дрозденко, – Електронні текстові данні (1 файл: 8,58 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 153 с.

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол №6 від 25.02.2021 р.) за поданням Вченої ради факультету електроніки (протокол № 02/2021 від 22.02.2021 р.)

Електронне мережне навчальне видання

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ

Курс лекцій

Укладач: *Дрозденко Катерина Сергіївна*, канд. техн. наук

Відповідальний редактор *Найда С. А.*, д-р техн. наук, проф.

Рецензент: *Клен К.С.*, канд. техн. наук, доц., доцент кафедри електронних пристроїв та систем КПІ ім. Ігоря Сікорського

Посібник присвячено вивченню фізичних процесів, на яких грунтується робота основних напівпровідникових, акусто- та п'єзоелектронних пристроїв. Розглянуті основи фізики напівпровідників, будова, принципи функціонування, основні характеристики та електричні параметри різних типів діодів, польових та біполярних транзисторів. Наведені базові поняття мікроелектроніки. Приділена увага основним приладам акусто- та п'єзоелектроніки. Викладений матеріал супроводжується прикладами розв'язку задач, що може бути корисними в здобутті навичок вирішення практичних завдань.

Курс лекцій містить теоретичні відомості до 17 лекцій та список рекомендованої літератури. Наведені матеріали можуть використовуватись для самостійної роботи студентів, а також для підготовки до лабораторних робіт.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021

ЗМІСТ

Вступ…… …4
Лекція 1. Загальні відомості про кредитний модуль – мета та задачі. Ключові етапи розвитку електроніки…… …5
Лекція 2. Основи електронної теорії……..…….10
Лекція 3. Електропровідність власних і домішкових напівпровідників……..…16
Лекція 4. Енергетичні діаграми домішкових напівпровідників. Дрейфовий та дифузійний струми в напівпровіднику……..…26
Лекція 5. Формування електронно-діркового переходу. Енергетична діаграма p-n-переходу…….……33
Лекція 6. Властивості та характеристики p-n-переходу……..…..40
Лекція 7. Напівпровідникові діоди.…….……50
Лекція 8. Застосування напівпровідникових діодів для випрямлення змінних струмів…….…60
Лекція 9. Напівпровідниковий стабілітрон. Стабістор……..…73
Лекція 10. Варикап. Тунельний діод. Фотодіод. Світлодіод…….83
Лекція 11. Транзистори……..….92
Лекція 12. Статичні характеристики транзистора. Динамічний режим роботи транзистора. Транзистор як активний чотириполюсник…102
Лекція 13. Температурні та частотні властивості транзистора. Власні шуми транзистора……114
Лекція 14. Польові транзистори……120
Лекція 15. Фізичні основи та прилади п'єзоелектроніки……130
Лекція 16. Фізичні основи та прилади акустоелектроніки……..…137
Лекція 17. Мікроелектроніка……..143
Список літератури……..…153

ВСТУП

Навчальна дисципліна «Фізичні основи електроніки» відноситься до циклу базової підготовки. Вона має суттєве значення у формуванні професійних знань та умінь бакалаврів, які оволодівають спеціальністю 171 Електроніка за освітньою програмою «Акустичні електронні системи та технології обробки акустичної інформації» та "Електронні системи мультимедіа та засоби Інтернету речей".

Дисципліна базується на знаннях, що набуті при вивченні відповідних розділів "Фізики" та "Вищої математики", тісно пов'язана з "Теорією електричних кіл" і є базовою для подальшого вивчення кредитних модулів "Схемотехніка" та "Основи конструювання в електроніці".

Предметом дисципліни «Фізичні основи електроніки» є фізичні основи побудови і функціонування основних напівпровідникових та електронних пристроїв, методи розрахунку та вимірювання їх характеристик і електричних параметрів.

ЛЕКЦІЯ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО КРЕДИТНИЙ МОДУЛЬ - МЕТА ТА ЗАДАЧІ. КЛЮЧОВІ ЕТАПИ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОНІКИ

Метою навчальної дисципліни є формування у студентів здатностей:

– визначати розрахунковим шляхом параметри основних напівпровідникових та електронних пристроїв;

– вимірювати параметри та виконувати дослідження характеристик основних напівпровідникових пристроїв;

– обирати необхідні напівпровідникові компоненти для розв'язання конкретних практичних задач, користуючись сучасними джерелами довідникової інформації.

Згідно з вимогами програми навчальної дисципліни студенти після засвоєння кредитного модуля мають продемонструвати наступні результати навчання:

1) знання про:

– фізичні основи побудови і функціонування основних напівпровідникових та електронних пристроїв;

– основні технічні характеристики та особливості застосування основних напівпровідникових та електронних пристроїв;

– методи розрахунку та вимірювання характеристик і електричних параметрів основних напівпровідникових та електронних пристроїв;

– класифікацію, умовні графічні позначення та маркування основних напівпровідникових та електронних пристроїв.

2) уміння:

– визначати розрахунковим шляхом параметри основних напівпровідникових та електронних пристроїв;

– вимірювати параметри та виконувати дослідження характеристик основних напівпровідникових пристроїв;

– обирати необхідні напівпровідникові компоненти для розв'язання конкретних практичних задач, користуючись сучасними джерелами довідникової інформації.

3) досвід:

– розрахунок схем, що містять напівпровідникові діоди, стабілітрони, варикапи, біполярні та польові транзистори;

–вимірювання параметрів і дослідження характеристик напівпровідникових діодів, стабілітронів, варикапів, біполярних та польових транзисторів.

Ключові етапи розвитку електроніки. Електроніка – це галузь фізики та техніки, в якій досліджуються електронні процеси, що пов'язані з утворенням та керуванням руху вільних електронів та/або інших заряджених частинок в різноманітних середовищах (вакуум, тверде тіло, газ, плазма) та на їх границях, а також проблеми і методи розробки електронних приладів різного призначення.

Становлення і розвиток електроніки стали можливим завдяки наполегливим зусиллям багатьох учених-фізиків.

Електроніка бере свій початок в давній Греції, де 600-х роках до н.е. Фалесом Мілетським було виявлено, що бурштин, потертий об вовну, притягає легкі предмети. Від давньогрецького слова, що в перекладі означає бурштин і виникла назва «електрика».

Початок активного розвитку електроніки, як науки, пов'язують з розробленням теорії електромагнітних хвиль (1865 рік, Джеймс Максвел), відкриттям явищ термоелектронної емісії (1883 рік, Томас Едісон) і фотоелектронної емісії (1887 рік, Генріх Герц).

В 1897 році – Джозеф Джон Томпсон відкрив електрон і виміряв його основні характеристики:

1) питомий заряд $\frac{e}{m_e} = 1{,}759 \cdot 10^{11}\, Кл / кг$;

2) масу електрона $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}\ кг$.

Значення заряду електрона $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл виміряв американський фізик Роберт Мілікен.

Подією, що значно вплинула на розвиток електроніки, був винахід першого у світі радіоприймача. Питання першості у відкритті радіо у різних країнах трактується по-різному. Теоретичні засади радіо були сформульовані Джеймсом Максвеллом в 1878 році. Практичне підтвердження теорії Максвела в 1886 році здійснив Генріх Герц, який побудував передавач і приймач радіохвиль. Це дало потужний поштовх для практичного використання отриманих результатів і побудови досконаліших приймальних та передавальних пристроїв. Практичну розробку та застосування радіопристроїв здійснювали Нікола Тесла в Америці, Олівер Лодж, Гульєльмо Марконі в Європі, Олександр Попов в Росії, Микола Пильчиков, Семен Айзенштейн, Сергій Жидковськийв Україні та інші.

Потреби радіотехніки в значній мірі стимулювали створення й удосконалення різних електронних приладів. В 1897 році Карл Фердинанд Браун винайшов осцилографічну трубку. В 1904 році англійський учений Джон Амброз Флемінг винайшов першу двохелектродну лампу. Через три роки після цього американський учений Лі де Форест ввів у лампу Флемінга керуючий електрод – сітку і створив тріод, що дозволяє генерувати і підсилювати електричні сигнали.

В наступні роки спостерігався стрімкий розвиток електроніки: удосконалювались електронні лампи, водночас розроблялися електронно-променеві, іонні, фотоелектронні, напівпровідникові прилади.

В 30-ті роки 20 ст. почалось активне вивчення напівпровідникових матеріалів з метою їх використання в електроніці. Англійський фізик Алан Вільсон у 1931 році запропонував класифікувати кристали на метали, напівпровідники і діелектрики, ввів розподіл напівпровідників на власні і домішкові, сформулював уявлення про донорні та акцепторні провідності, проаналізував провідність домішкових напівпровідників, побудував квантову теорію напівпровідників. У 40-х роках було налагоджено виробництво германієвих та кремнієвих діодів, напівпровідникових терморезисторів і фоторезисторів.

Наприкінці 1948 року вчені Волтер Браттейн, Джон Бардін і Вільям Шоклі відкрили транзисторнй ефект. У 1949 році з'явилися перші промислові зразки транзисторів. У 50-ті роки були створені польові транзистори з керуючим р-п-переходом, сонячні батареї, оптрони, тунельні діоди, тиристори.

Після цього почалося інтенсивне використання напівпровідникових приладів у багатоелементних пристроях, наприклад в ЕОМ, що дозволило в кілька разів зменшити габаритні розміри, підвищити надійність роботи, знизити витрату електроенергії.

Сучасний етап розвитку електронної техніки характеризується значним ускладненням електронної апаратури. Звичайні (дискретні) компоненти електронних схем вже не можуть у деякій мірі задовольнити вимоги підвищення надійності, зменшення габаритів, маси, вартості та споживаної потужності, підвищення швидкодії та чутливості. Усе більш широкий розвиток одержує мікро- і наноелектроніка – галузі електроніки, що займаються мініатюризацією електронної апаратури на основі широкого застосування плівкових і особливо напівпровідникових інтегральних схем (ІС). ІС є сукупністю декількох взаємозв'язаних елементів (транзисторів, резисторів, конденсаторів та інших), виготовлених у спільному технологічному циклі на одній підкладці для виконання певних функцій перетворення інформації.

Таким чином, у розвитку технічної електроніки можна виділити три основних етапи:

1) лампової електроніки;

2) напівпровідникової електроніки;

3) мікро- і наноелектроніки.

Кожний наступний етап розвитку вносив корінні зміни в елементну базу електронної апаратури, але у той же час не заперечував досягнень попередніх етапів.

У 70-х роках 20 ст. були розроблені перші зразки великих інтегральних мікросхем (ВІС), що містять від кількох сотень до декількох тисяч компонентів в одному кристалі напівпровідника. Найбільш ефективне

застосування ВІС було зв'язано зі створенням у середині 70-х років мікропроцесора.

Прогрес в області технології виробництва інтегральних мікросхем неухильно продовжується і наразі спостерігається перехід від мікроелектроніки до наноелектроніки, в якій розмір окремого елемента інтегральної схеми обчислюється вже не мікрометрами, а нанометрами.

ЛЕКЦІЯ 2. ОСНОВИ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕОРІЇ

Модель і будова атома. Відповідно до електронної теорії всі оточуючі нас речовини складаються з атомів. Будову атома можна представити за допомогою пласкої моделі (рис.2.1), що є спрощенням просторової (планетарної) моделі атома, розробленої Ернестом Резерфордом у 1911 році.

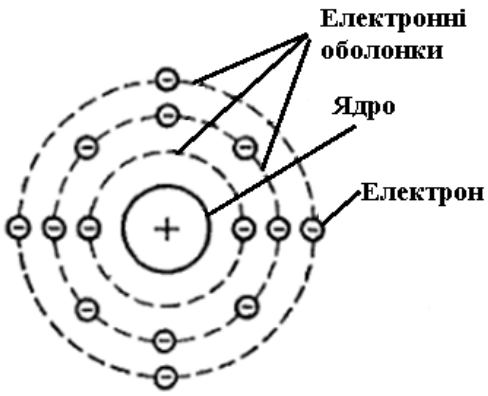


Рис. 2.1. Модель атома

Атом складається з ядра та електронів. В ядрі, що містить протони і нейтрони, зосереджена практично вся маса атома. Протони мають позитивний електричний заряд, електрони – негативний, рівний по величині заряду протона, а нейтрони електрично нейтральні, їх заряд дорівнює нулю.

Електрони рухаються навколо ядра по певних замкнутих траєкторіях – орбітах. Позитивний заряд ядра і негативний заряд всіх електронів, що обертаються навколо цього ядра перебувають у рівновазі, тому ізольований атом у нормальному стані електрично нейтральний.

Кількість протонів, нейтронів та електронів в атомі залежить від типу хімічного елемента, складовою частиною якого він є. Число електронів, що обертаються навколо ядра, завжди дорівнює порядковому номеру елемента в періодичній системі хімічних елементів Менделєєва.

Наприклад, в атомі гідрогену навколо ядра обертається один електрон, в атомі міді – 29, в атомі золота – 79.

Сумарний заряд електронів в атомі визначається атомним числом елемента.

Орбіти, по яких обертаються електрони, точно визначені, і жоден електрон в атомі не може обертатися в просторі між ними.

Електронні оболонки атомів охоплюють відповідні групи орбіт (s, p, d). Оболонки позначають послідовно, починаючи від ядра, буквами K, L, M, N. Кожна оболонка може містити чітко визначену кількість електронів. Ця кількість визначається формулою:

$$N = 2n^2,$$

де n – номер оболонки.

Наприклад, оболонка K має тільки одну орбіту і може містити до двох електронів, L – до 8, M – до 18 і т.д.

На кожній наступній орбіті електрони можуть перебувати лише в тому випадку, якщо попередні оболонки заповнені. Тільки остання, зовнішня оболонка, яка називається ***валентною***, може бути не повністю заповнена. Електрони, що перебувають на ній, називають ***валентними.***

Електрони, які розташовані на зовнішніх орбітах, пов'язані з ядром слабше, ніж електрони, що перебувають на внутрішніх, близьких до ядра орбітах. Тому під дією сусідніх атомів або внаслідок інших причин зовнішні електрони можуть покинути свою орбіту, що спричинить зміну електричного стану атома.

Електрони, що звільнилися від внутрішньоатомних зв'язків, одержали назву ***вільних електронів***. Вони переміщуються усередині речовини між атомами в різних напрямках з різними швидкостями. При наявності зовнішнього електричного поля рух вільних електронів стає впорядкованим – виникає електричний струм. Чим більше вільних електронів має речовина, тим вище її електропровідність.

Кожній орбіті відповідає певна енергія електронів, або ***енергетичний рівень***. Чим далі від ядра перебуває електрон, тим більша його енергія. Найбільшу енергію мають валентні електрони. Електрон при переході на орбіту, розташовану ближче до ядра, тобто на нижчий енергетичний рівень, віддає частину своєї енергії у зовнішнє середовище у вигляді кванта енергії, тобто при цьому його енергія зменшується. Надаючи електронам енергію ззовні

(температура, випромінювання), можна викликати їхні переходи на оболонки з більш високими енергетичними рівнями (більш віддалена від ядра орбіта). Електрон, що отримав додаткову енергію, називається ***збудженим***. Певна доза енергії, що надається ззовні, може зробити електрон незалежним від сил притягання ядра тоді електрон відривається від ядра і лишає атом. В цьому випадку утворюється ***позитивний іон*** – атом, позбавлений електрона. Процес виникнення іонів називається ***іонізацією.*** Процес з'єднання іона з електроном (зворотнє явище) називається ***рекомбінацією***.

Постулати квантової теорії. В основу квантової теорії покладені наступні теоретичні положення:

1. Гіпотеза Планка;
2. Постулати Бора;
3. Принцип невизначеності Гейзенберга;
4. Гіпотеза де Бройля.
5. Принцип заборони Паулі.

Зонна модель ізольованого атома (рис. 2.2) – це діаграма енергетичних рівнів атома, яка характеризує його енергетичні властивості.

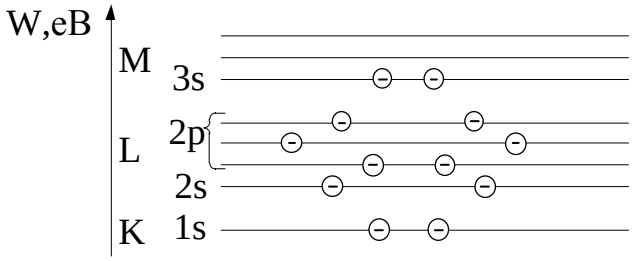


Рис. 2.2. Діаграма енергетичних рівнів ізольованого атома

Для кожної оболонки K, L, M, ... на цій діаграмі вказується чисельне значення енергії електронів, що перебувають на ній. Енергія виражається в електрон-вольтах [eB].

Один електрон-вольт відповідає роботі електрона, що витрачається при

подоланні різниці потенціалів, рівної 1 В. Діаграма енергетичних рівнів відображає закони квантової механіки, з яких слідує, що кожен енергетичний рівень може бути зайнятий певним числом електронів. Орбіта К містить один енергетичний рівень, орбіта L – два розташовані поруч рівні (s – внутрішній, який вимагає для заповнення двох електронів, p – зовнішній – шести електронів), M – три рівні (s, p, d) і т д. Представлена на рис. 2.2 діаграма справедлива тільки до ізольованого атома. Якщо атом перебуває в близькому сусідстві з іншими атомами, наприклад у твердому тілі, то діаграма енергетичних рівнів змінюється.

Зонна модель твердого тіла. У твердому тілі (кристалі) суміжні атоми розташовані настільки близько один до одного, що їх зовнішні електронні орбіти стикаються або навіть перетинаються, між ними відбувається взаємодія. При цьому на електрони впливає не тільки ядро власного атома, але й ядра сусідніх атомів. Як наслідок – змінюється характер руху електронів і відбувається зміщення і розщеплення енергетичних рівнів, що призводить до створення дозволених енергетичних зон.

На рис. 2.3 схематично показано розщеплення енергетичних рівнів на енергетичні зони (заповнена зона, валентна зона, заборонена зона, зона провідності, вільна зона).

Заповнені зони – рівні енергії, зайняті електронами при температурі абсолютного нуля і відсутності зовнішніх впливів.

Валентна зона – сукупність енергетичних рівнів валентних електронів. Дозволені рівні енергії, які залишаються не зайнятими при температурі абсолютного нуля, становлять ***вільну зону.***

Зона провідності – нижня частина вільної зони, яка при температурі абсолютного нуля порожня або частково заповнена електронами.

Заборонена зона – область значень енергій, які не можуть мати електрони твердого тіла.

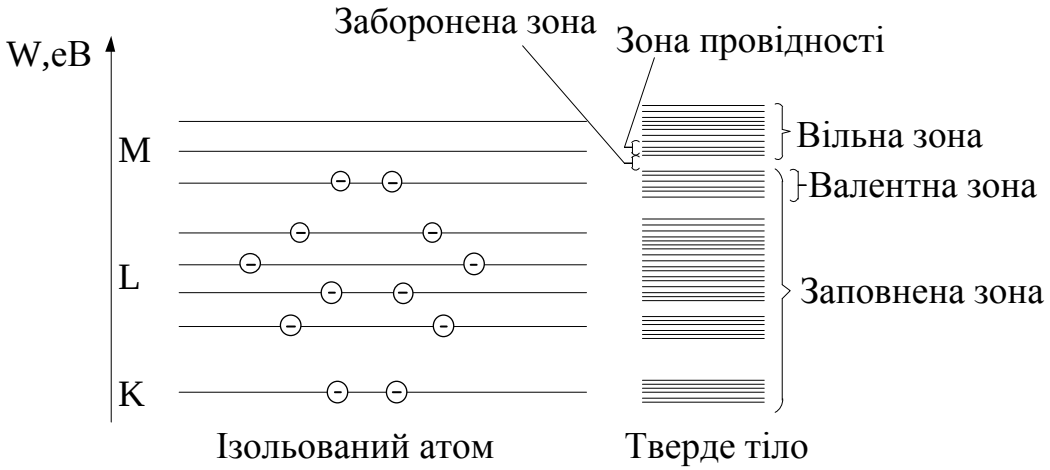


Рис. 2.3. Утворення енергетичних зон у твердому тілі

Провідність тієї або іншої речовини визначається тією енергією, яку потрібно надати валентним електронам, щоб вони могли перейти на вищий енергетичний рівень в зоні провідності. Іншими словами, електропровідність матеріалу визначається шириною забороненої зони.

Зонна енергетична структура твердих тіл дозволяє пояснити фізичну сутність поділу їх на провідники, діелектрики та напівпровідники. На рис. 2.4 показані типові діаграми енергетичних зон для провідника (тверде тіло, що проводить електричний струм), діелектрика (матеріал, що не проводить електричний струм) та напівпровідника.

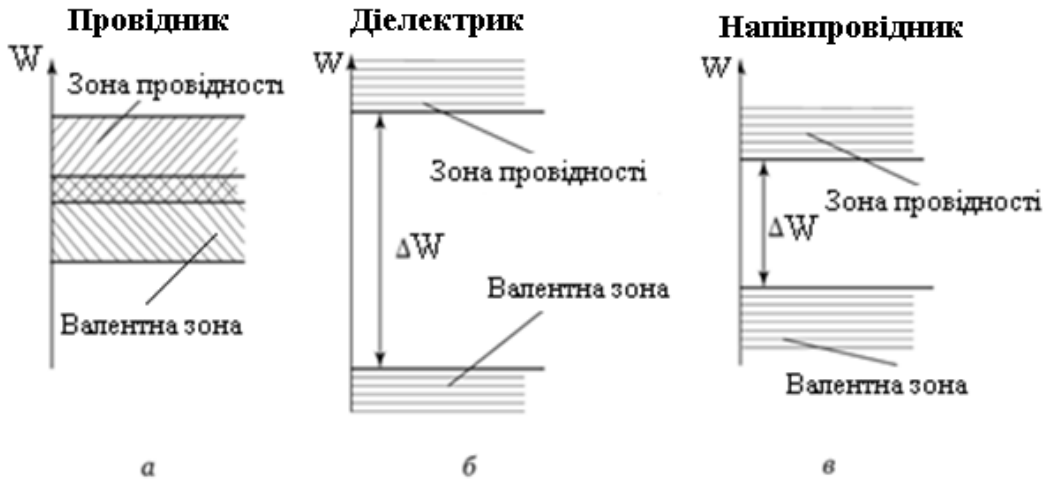


Рис. 2.4. Енергетичні діаграмми:

а – провідник; б – діелектрик; в – напівпровідник

У провідників зона провідності і зона валентних електронів прилягають одна до одної або навіть перекриваються, тобто заборонена зона відсутня і валентні електрони легко переходять у зону провідності.

У діелектриків ширина забороненої зони ΔW велика і для переходу валентних електронів у зону провідності їм потрібно надати значну енергію (не менше 3 еВ).

Для напівпровідників ширина забороненої зона ΔW відносно невелика (приблизно 0,5-3 еВ), і під дією зовнішніх факторів (тепло, світло, електричне поле) електрони за рахунок зміни запасу енергії можуть перейти з валентної зони в зону провідності. Електропровідність напівпровідників нестійка і сильно залежить від зовнішніх факторів.

ЛЕКЦІЯ 3. ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ ВЛАСНИХ І ДОМІШКОВИХ НАПІВПРОВІДНИКІВ

Основні властивості та характеристики напівпровідників. На сьогоднішній день найбільшого поширення в електроніці набули напівпровідникові прилади.

Приклади напівпровідникових речовин – кремній, германій, селен, фосфор, миш'як, сурма, сплави та хімічні з'єднання типу арсенід галію, карбід кремнію, сульфід кадмію та ін.

Напівпровідниками називаються тверді речовини, які за значенням питомої електропровідності займають проміжне місце між провідниками та діелектриками.

З точки зору зонної теорії будови твердої речовини, до напівпровідників відносяться речовини, ширина забороненої зони яких складає приблизно 0,5-3 еВ.

Для напівпровідників характерна кристалічна будова – зв'язані між собою атоми розташовуються строго певним чином на однакових відстанях один від одного, в наслідок чого утворюються кристалічні гратки твердого тіла. Між сусідніми атомами в кристалічній гратці існують ***ковалентні*** зв'язки, які утворюються їх валентними електронами.

Кристалічна гратка, в якій кожен валентний електрон зв'язаний ковалентними зв'язками з іншими атомами речовини, є ***ідеальною***. У такому кристалі всі валентні електрони міцно зв'язані між собою і вільних електронів, які могли б брати участь у переносі зарядів, немає. Такі кристалічні гратки мають всі хімічно чисті бездомішкові напівпровідники при температурі абсолютного нуля (- 273° С).

Питома електропровідність – величина, обернена до питомого електричного опору.

$$\sigma = 1/\rho$$

Основні властивості питомої електропровідності напівпровідників:

1. Приймає значення $10^{-8}..10^{5}$ См/м;
2. Значно залежить від дії зовнішніх факторів.

Власна провідність напівпровідників. Під дією зовнішніх факторів (підвищення температури, вплив світла, іонізуючого випромінювання) деякі валентні електрони здобувають енергію, достатню для звільнення від ковалентних зв'язків. Вони стають вільними і залишають атом, який перетворюється у позитивний іон. На діаграмі енергетичних рівнів це відповідає переходу електрона з валентної зони в зону провідності. Цей процес носить імовірнісний характер.

Імовірність того, що енергетичний рівень з енергією W при даній температурі T буде зайнятий електроном, знаходять за допомогою функції Фермі-Дірака:

$$p(W,T)=\frac{1}{\exp\left(\frac{W-W_F}{kT}\right)+1}, \qquad (3.1)$$

де W_F – енергія рівня Фермі; k – стала Больцмана ($k=1{,}38\cdot10^{-23}$ Дж/К).

Рівень Фермі – це енергетичний рівень, який за будь-якої температури може бути зайнятий (або не зайнятий) електроном з імовірністю 0,5. Для власного напівпровідника визначається виразом:

$$W_F=\frac{\Delta W}{2}-\frac{3kT}{4e}\ln\frac{m_p}{m_n}, \qquad (3.2)$$

де ΔW – ширина забороненої зони; e – заряд електрона ($e=1{,}6\cdot10^{-19}$ Кл); m_p, m_n – ефективні маси відповідно дірок та електронів (довідникові величини).

Зі збільшенням температури концентрація вільних електронів у напівпровіднику (кількість вільних електронів в одиниці об’єму хімічно

чистого напівпровідника) зростає за експоненціальним законом:

$$n_i = n_0 \exp\left(-\Delta W / 2kT\right), \qquad (3.3)$$

де ΔW – ширина забороненої зони; n_0 – коефіцієнт, що залежить від типу речовини.

Таким чином, якщо ззовні буде надана енергія, достатня для переходу електрона через заборонену зону, то напівпровідник буде мати певну провідність.

Енергетична діаграма чистого напівпровідника і розподіл Фермі-Дірака при різних температурах показані на рис. 3.1.

При звільненні електроном ковалентного зв'язку в останньому виникає вільне місце – так звана ***дірка***, що має позитивний заряд, рівний по абсолютній величині заряду електрона.

Процес утворення пари електрон-дірка одержав назву ***генерації зарядів***. Оскільки дірка має позитивний заряд, вона може приєднати до себе електрон сусіднього заповненого ковалентного зв'язку.

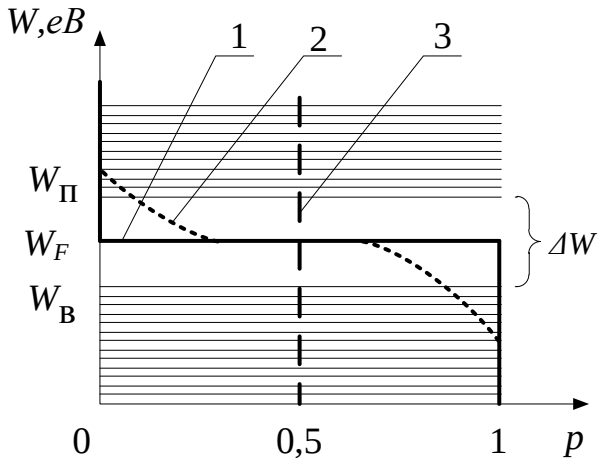


Рис. 3.1. Зміна розподілу Фермі-Дірака при різних температурах:
1 – при температурі абсолютного нуля; 2 – при кімнатній температурі; 3 – при значному зростанні температури

У результаті цього відновлюється один зв'язок (цей процес називають ***рекомбінацією***) і руйнується сусідній або, іншими словами, заповнюється одна дірка і одночасно із цим виникає нова в іншому місці. Такий генераційно-рекомбінаційний процес безупинно повторюється і дірка, переходячи від одного зв'язку до іншого, буде переміщуватися по кристалу, що рівносильно переміщенню позитивного заряду, рівного по величині заряду електрона.

Якщо зовнішнє електричне поле відсутнє, електрони і дірки переміщуються в кристалі хаотично. У цьому випадку струм у напівпровіднику не виникає. Якщо ж на кристал діє електричне поле, то рух дірок і електронів стає впорядкованим і у кристалі виникає електричний струм.

Таким чином, провідність напівпровідника обумовлена переміщенням як вільних електронів, так і дірок. У першому випадку носії зарядів негативні, у другому – позитивні. Відповідно розрізняють два види провідності напівпровідників – ***електронну***, або провідність типу n (від слова negative – негативний), і ***діркову***, або провідність типу p (від слова positive – позитивний).

Напівпровідник без домішок називається ***власним напівпровідником***, а його провідність, що обумовлена генерацією пар електрон-дірка – ***власною провідністю.***

У власному напівпровіднику концентрація дірок завжди дорівнює концентрації вільних електронів

$$n_i = p_i \qquad (3.4)$$

і електричний струм утворюється в результаті одночасного переносу зарядів обох знаків. При цьому загальний струм у напівпровіднику дорівнює сумі електронного і діркового струмів.

$$J = J_n + J_p,$$

де J – густина струму; J_n – густина електронної складової струму; J_p –

густина діркової складової струму.

Питома електропровідність власного напівпровідника визначається формулою:

$$\sigma_{вл.} = e\left(\mu_n n_i + \mu_p p_i\right), \tag{3.5}$$

де μ_n, μ_p – відповідно рухливість електронів і дірок.

Враховуючи (3.3) і (3.4)

$$\sigma_{вл.} = e\left(\mu_n + \mu_p\right) n_0 \exp\left(-\Delta W / 2kT\right), \tag{3.6}$$

Ця формула показує, що питома електропровідність напівпровідника залежить від типу речовини і від температури. Чим вище температура, тим вище питома електропровідність, причому ця залежність носить експоненціальний характер.

Домішкова провідність напівпровідників. Процес введення до напівпровідника домішки називається ***легіруванням.*** Провідність, викликана присутністю в кристалі напівпровідника домішок атомів з іншою валентністю, називається ***домішковою***. Домішки, що викликають у напівпровіднику збільшення вільних електронів, називаються ***донорними***, а ті, що викликають збільшення дірок – ***акцепторними***.

Напівпровідники, електропровідність яких підвищилася завдяки утворенню надлишку вільних електронів при введенні домішки, називаються ***напівпровідниками з електронною провідністю***, або скорочено ***напівпровідниками типу n***.

Для напівпровідників типу *n* концентрація електронів в зоні провідності дорівнює

$$n_n = n_i + N_Д, \tag{3.7}$$

де $N_Д$ – концентрація атомів донорної домішки.

Оскільки $N_Д \gg n_i$, то

$$n_n \approx N_Д \,.\, p_n = n_i^2 \,/\, N_Д \ll p_i \,. \tag{3.8}$$

Концентрація дірок

$$p_n = n_i^2 \,/\, N_Д \ll p_i \,. \tag{3.9}$$

Більшість рухомих носіїв заряду в напівпровіднику ***типу n*** **–** електрони, їх називають ***основними носіями заряду***, а дірки – ***неосновними***.

Напівпровідники, електропровідність яких обумовлена рухом дірок, називаються ***напівпровідниками з дірковою провідністю***, або скорочено ***напівпровідниками типу p***.

Концентрація дірок у напівпровіднику *p*-типу дорівнює

$$p_p = p_i + N_A,\; p_n = n_i^2 \,/\, N_Д \ll p_i \,. \tag{3.10}$$

де N_A – концентрація атомів акцепторної домішки.

Внаслідок того що $p_i \ll N_A$, одержуємо

$$p_p \approx N_A \,.\, p_n = n_i^2 \,/\, N_Д \ll p_i \,. \tag{3.11}$$

Концентрація електронів при цьому визначається співвідношенням:

$$n_p = n_i^2 \,/\, N_A \ll n_i \;\; p_n = n_i^2 \,/\, N_Д \ll p_i \,. \tag{3.12}$$

Таким чином, на відміну від напівпровідників з донорною домішкою, в напівпровідниках типу *p* дірки є основними носіями заряду, а електрони – неосновними.

Приклад 3.1

Визначити концентрації основних (n_n, p_p) та неосновних (p_n, n_p) носіїв заряду при легіруванні кремнію з концентрацією вільних електронів $n_i = 1{,}5 \cdot 10^{16}$ м$^{-3}$ донорними та акцепторними домішками з концентраціями відповідно $N_Д = 7 \cdot 10^{18}$ м$^{-3}$ і $N_A = 10^{22}$ м$^{-3}$.

Розв'язання:

Концентрація основних носіїв заряду:

- Для напівпровідника *n*-типу:

$$n_n = n_i + N_Д = 1{,}5 \cdot 10^{16} + 7 \cdot 10^{18} = 7{,}015 \cdot 10^{18}\ м^{-3}.$$

- Для напівпровідника *p*-типу:

$$p_p = p_i + N_A = n_i + N_A = 1{,}5 \cdot 10^{16} + 10^{22} = 10^{22}\ м^{-3}.$$

Концентрація неосновних носіїв заряду:

- Концентрація дірок в напівпровіднику *n*-типу:

$$p_n = \frac{n_i^2}{N_Д} = \frac{\left(1{,}5 \cdot 10^{16}\right)^2}{7{,}015 \cdot 10^{18}} = 3{,}2 \cdot 10^{13}\ м^{-3}.$$

- Концентрація електронів в напівпровіднику *p*-типу:

$$n_p = \frac{n_i^2}{N_A} = \frac{\left(1{,}5 \cdot 10^{16}\right)^2}{10^{22}} = 2{,}25 \cdot 10^{10}\ м^{-3}.$$

Повна електропровідність домішкових напівпровідників в загальному випадку дорівнює сумі власної і домішкової провідностей.

Для напівпровідника типу *n:*

$$\sigma_{пов.n} = \sigma_{вл.} + \sigma_{дом.n},$$

$$\sigma_{дом.n} \approx e\mu_n N_Д.$$

Для напівпровідника типу *p:*

$$\sigma_{пов.p} = \sigma_{вл.} + \sigma_{дом.p},$$

$$\sigma_{дом.p} \approx e\mu_p N_A.$$

Приклад 3.2

Визначити питому електропровідність германія при температурі 20^0C, якщо концентрація вільних електронів $n_i = 2{,}5 \cdot 10^{13}$ *см*$^{-3}$, рухливість електронів $\mu_n = 0{,}39 м^2 / В \cdot с;$ рухливість дірок $\mu_p = 0{,}19 м^2 / В \cdot с.$

Як зміниться питома електропровідність при легіруванні германія:

1) індієм з концентрацією $n_p = 5 \cdot 10^{22}$ $м^{-3}$;
2) сурмою з концентрацією $n_n = 2 \cdot 10^{21} м^{-3}$.

Розв'язання:

Для власного напівпровідника:

$$\sigma_{вл.} = e\left(\mu_n n_i + \mu_p p_i\right) = en_i\left(\mu_n + \mu_p\right) = 1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 2{,}5 \cdot 10^{19}\left(0{,}39 + 0{,}19\right) = 2{,}32 \ См / м$$

Для напівпровідника з домішкою у вигляді індія (напівпровідник типу *p*)

$$\sigma_{дом.p} \approx e\mu_p N_A;$$

$$n_p = \frac{n_i^2}{N_A} \rightarrow N_A = \frac{n_i^2}{n_p} = \frac{\left(2{,}5 \cdot 10^{19}\right)^2}{5 \cdot 10^{22}} = 1{,}25 \cdot 10^{16}\ м^{-3}.$$

$$\sigma_{дом.р} \approx 1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 0{,}19 \cdot 1{,}25 \cdot 10^{16} = 3{,}8 \cdot 10^{-4}\ См/м;$$

$$\sigma_{пов.р} = \sigma_{вл.} + \sigma_{дом.р} = 2{,}32 + 3{,}8 \cdot 10^{-4} = 2{,}32\ См/м.$$

Для напівпровідника з домішкою у вигляді сурми (напівпровідник типу *n*)

$$\sigma_{дом.n} \approx e\mu_n N_Д;\ n_n \approx N_Д.$$

З підстановкою числових значень:

$$\sigma_{дом.n} = 1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 0{,}39 \cdot 2 \cdot 10^{21} = 124{,}8\ См/м;$$

$$\sigma_{пов.n} = \sigma_{вл.} + \sigma_{дом.n} = 2{,}32 + 124{,}8 = 127{,}12\ См/м.$$

Температурна залежність провідності домішкових напівпровідників. На рис. 3.2. наведена залежність повної питомої електропровідності домішкового напівпровідника від температури (крива 1).

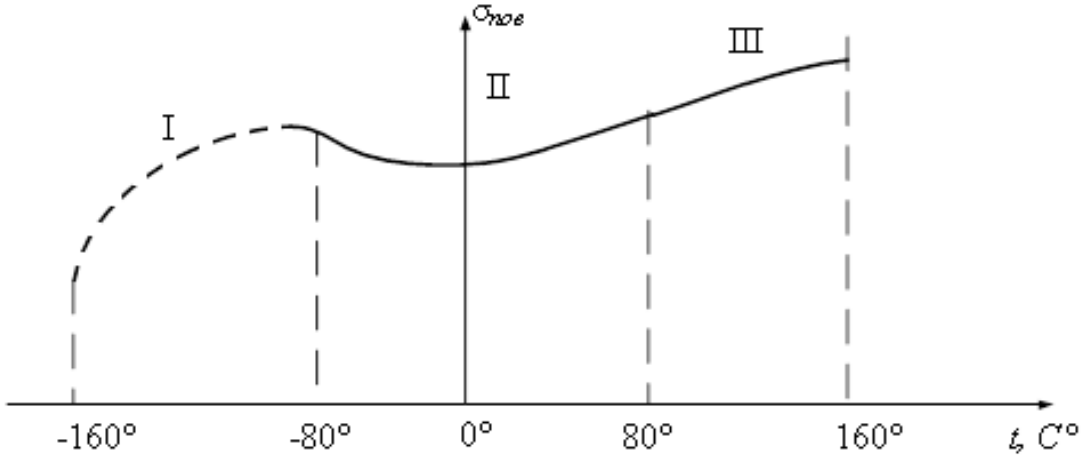


Рис. 3.2. Залежність провідності домішкових провідників від температури

На графіку можна виділити три характерні області: I – домішкової (при

відносно низьких температурах), II – змішаної, III – власної провідності.

Лише на ділянці II електропровідність домішкового напівпровідника залишається відносно стабільною. Саме цю ділянку намагаються використовувати при побудові більшості напівпровідникових приладів. На інших ділянках електропровідність змінюється досить істотно, що може призвести до порушення нормального режиму роботи напівпровідникових пристроїв.

ЛЕКЦІЯ 4. ЕНЕРГЕТИЧНІ ДІАГРАМИ ДОМІШКОВИХ НАПІВПРОВІДНИКІВ. ДРЕЙФОВИЙ ТА ДИФУЗІЙНИЙ СТРУМИ В НАПІВПРОВІДНИКУ

Енергетичні діаграми для домішкових напівпровідників. На рис. 4.1. показані енергетичні діаграми напівпровідника відповідно з донорною (рис. 4.1, а) і акцепторною (рис. 4.1, б) домішками, а також розподіл Фермі-Дірака для цих випадків.

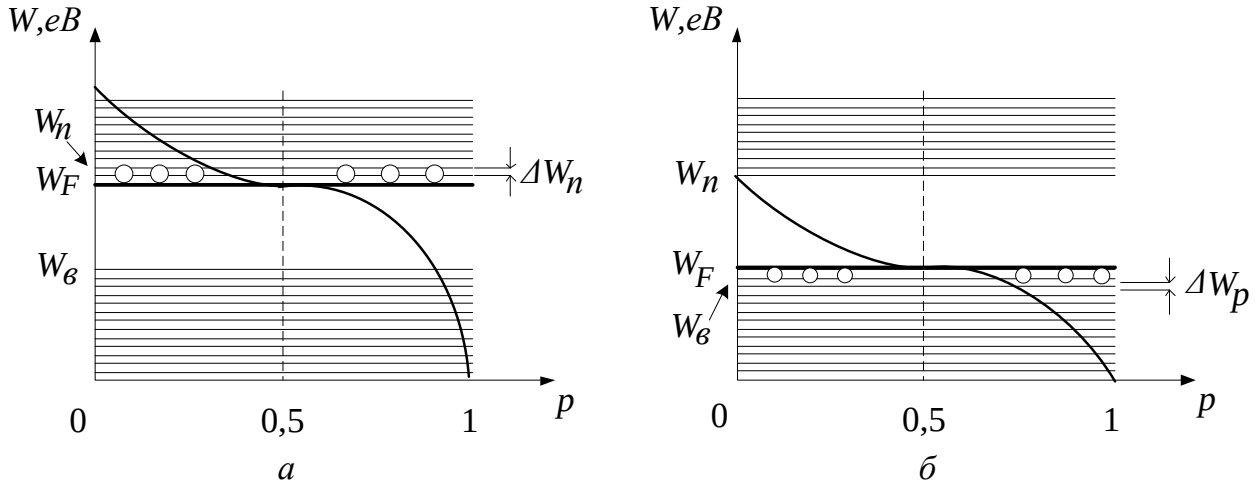


Рис. 4.1. Енергетичні діаграми домішкових напівпровідників:
а – напівпровідник *n*-типу; б – напівпровідник *p*-типу

Атоми домішки мають енергетичні рівні, що відрізняються від рівнів власного напівпровідника. Так, в **напівпровідник типу *n*** енергетичні рівні валентних електронів домішки (миш'яку, сурми, бора) розташовані поблизу зони провідності основного напівпровідника. Величина ΔW_n між енергетичним рівнем валентних електронів домішкових атомів (цей рівень звичайно називають домішковим) і нижнім енергетичним рівнем зони провідності напівпровідника становить приблизно 0,05 *eB*. Тому вже при кімнатній температурі майже всі електрони із домішкового рівня переходять у зону провідності. У зв'язку із цим крива розподілу Фермі-Дірака, а також рівень Фермі W_F зміщуються вгору. Положення рівня Фермі в даному випадку визначається виразом:

$$W_{Fn} = \frac{\Delta W}{2} - \frac{kT}{e}\ln\frac{n_n}{n_i} \approx \frac{\Delta W}{2} - \frac{kT}{e}\ln\frac{N_Д}{n_i}. \qquad (4.1)$$

В напівпровіднику типу *p* в тривалентних атомах акцепторної домішки (індію, галію, алюмінію), валентні електрони розташовані на енергетичному рівні, що перебуває в безпосередній близькості від зони валентних електронів власного напівпровідника. Величина ΔW_p становить приблизно 0,05 *еВ*. У зв'язку з цим електрони валентної зони легко переходять на домішковий рівень. Отже, у валентній зоні з'являється велика кількість дірок. Вони будуть заповнюватися іншими електронами валентної зони, на місці яких утворяться нові дірки, і т.д. Таким чином, з'являється можливість послідовного зсуву електронів у валентній зоні, що обумовлює підвищення провідності напівпровідника. Крива розподілу Фермі-Дірака і рівень Фермі в цьому випадку зміщуються вниз. Положення рівня Фермі визначається виразом:

$$W_{Fp} = \frac{\Delta W}{2} + \frac{kT}{e}\ln\frac{p_p}{n_i} \approx \frac{\Delta W}{2} + \frac{kT}{e}\ln\frac{N_A}{n_i}. \qquad (4.2)$$

Приклад 4.1

Визначити положення рівня Фермі при температурі 20 ^{0}С у власному напівпровіднику, напівпровіднику *n*-типу та напівпровіднику *p*-типу, якщо напівпровідник – арсенід галія, а при легіруванні використовувались домішки – бор з концентрацією $N_Д = 10^{22}$ *м*$^{-3}$ та індій з концентрацією $N_А = 5\cdot10^{21}$ м$^{-3}$. Відомо, що для арсеніду галія $\Delta W|_{20^\circ C} = 1{,}42$ *еВ*; $m_p = 4{,}37\cdot10^{-31}$ *кг*; $m_n = 6{,}1\cdot10^{-32}$ *кг*; $n_i = 10^{12}$ м$^{-3}$.

Побудувати енергетичні (зонні) діаграми напівпровідників, прийнявши за початок відліку нижній рівень зони провідності ($W_{пр} = 0$).

Розв’язання:

Для власного напівпровідника:

$$W_F = \frac{\Delta W}{2} - \frac{3kT}{4e}\ln\frac{m_p}{m_n} = \frac{1,42}{2} - \frac{3\cdot 1,38\cdot 10^{-23}\cdot 293}{4\cdot 1,6\cdot 10^{-19}}\ln\frac{4,37\cdot 10^{-31}}{6,1\cdot 10^{-32}} = 0,67\,eB.$$

Для напівпровідника *n*-типу:

$$W_{Fn} = \frac{\Delta W}{2} - \frac{kT}{e}\ln\frac{n_n}{n_i} \approx \frac{\Delta W}{2} - \frac{kT}{e}\ln\frac{N_Д}{n_i} = \frac{1,42}{2} - \frac{1,38\cdot 10^{-23}\cdot 293}{1,6\cdot 10^{-19}}\ln\frac{10^{22}}{10^{12}} = 0,128\,eB.$$

Для напівпровідника *p*-типу:

$$W_{Fp} = \frac{\Delta W}{2} + \frac{kT}{e}\ln\frac{p_p}{n_i} \approx \frac{\Delta W}{2} + \frac{kT}{e}\ln\frac{N_A}{n_i} = \frac{1,42}{2} + \frac{1,38\cdot 10^{-23}\cdot 293}{1,6\cdot 10^{-19}}\ln\frac{5\cdot 10^{21}}{10^{12}} =$$

$$= 1,274\,eB.$$

Графічне подання енергетичних рівнів, що відповідають розв'язку задачі, наведені на рис. 4.2.

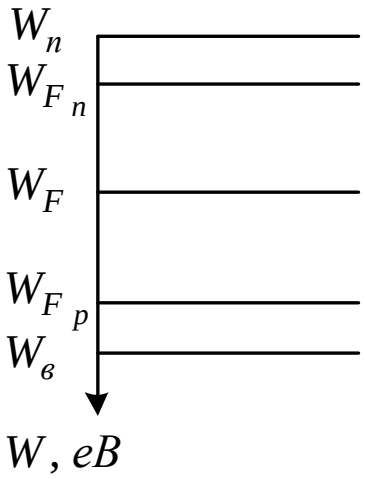


Рис. 4.2. Енергетичні (зонні) діаграми напівпровідників

Дрейфовий та дифузійний струми в напівпровіднику. Струм у напівпровіднику з'являється внаслідок спрямованого переміщення носіїв заряду. Розрізняють два можливих випадки появи струму в напівпровіднику.

Струм, обумовлений зовнішнім електричним полем, називається

***дрейфовим струмом*.**

Струм, що виникає в результаті дифузії носіїв з області, де їх концентрація підвищена, в область з більш низькою концентрацією, називається ***дифузійним струмом***. Нерівномірність концентрації носіїв зарядів у напівпровіднику може виникнути під дією світла, нагрівання, електричного поля тощо.

Густина електронного та діркового дрейфового струму дорівнюють відповідно

$$J_{n\ др} = en\mu_n E, \tag{4.3}$$

$$J_{p\,др} = ep\mu_p E, \tag{4.4}$$

де n, p – концентрації відповідно електронів і дірок у напівпровіднику, E – напруженість електричного поля.

Сумарна густина дрейфового струму електронів і дірок дорівнює:

$$J_{др} = e\left(\mu_n n + \mu_p p\right)E\ . \tag{4.5}$$

Механізм виникнення ***дифузійного струму:***

припустимо, що за деяких умов концентрація електронів у різних точках напівпровідника неоднакова. Очевидно, що імовірність зіткнення електронів один з одним більше там, де вища їх концентрація. Тому електрон, здійснюючи хаотичний тепловий рух, буде намагатися перейти в область менших зіткнень, тобто в область з меншою концентрацією. В результаті носії заряду будуть переміщуватись в область із меншою концентрацією, що призведе до виникнення дифузійного струму.

Густина дифузійного струму електронів і дірок визначається наступними співвідношеннями:

$$J_{n\,диф} = eD_n \frac{dn}{dx}; \qquad (4.6)$$

$$J_{p\,диф} = -eD_p \frac{dp}{dx}, \qquad (4.7)$$

де D_n, D_p – коефіцієнти дифузії відповідно електронів і дірок, що залежать від типу напівпровідника, концентрації домішок, температури і стану кристалічних граток; $\frac{dn}{dx}$, $\frac{dp}{dx}$ – градієнти концентрацій електронів і дірок (відношення зміни концентрації до зміни відстані, на якій спостерігається це явище).

Знак мінус в виразі (4.7) показує, що дифузія відбувається в напрямку зменшення концентрації, а оскільки дірки несуть позитивний заряд, то дифузійний струм повинен бути додатній при $\frac{dp}{dx} < 0$).

Таким чином, у загальному випадку, в напівпровіднику варто розглядати чотири складові струму: дрейфовий і дифузійний для носіїв кожного знака.

Загальна густина струму в напівпровіднику:

$$J = J_{n\,др} + J_{n\,диф} + J_{p\,др} + J_{p\,диф} = en\mu_n E + eD_n \frac{dn}{dx} + ep\mu_p E - eD_p \frac{dp}{dx}. \qquad (4.8)$$

Якщо під дією зовнішнього впливу динамічна рівновага концентрацій електронів і дірок у напівпровіднику порушена, то з'являється додаткова нерівновагова концентрація носіїв заряду. Після припинення зовнішнього впливу відбувається процес рекомбінації і напівпровідник приходить у рівновагу.

Середній час існування носіїв заряду в напівпровіднику називають ***часом життя носіїв***, а середня відстань, яку за час життя проходять носії називають ***дифузійною довжиною*** носіїв заряду.

Дифузійні довжини для електронів і дірок дорівнюють відповідно:

$$L_n = \sqrt{\tau_n D_n} \ ,$$

$$L_p = \sqrt{\tau_p D_p} \ ,$$

де τ_n, τ_p – час життя відповідних носіїв.

Величина $1/\tau$ називається ***швидкістю рекомбінації.***

Розрізняють кілька видів рекомбінації носіїв у напівпровідниках.

У найпростішому випадку рекомбінація може розглядатися, як прямий перехід електрона з зони провідності у валентну зону на наявний там вільний рівень (рис.4.3, а). Різниця енергії при цьому виділяється у виді кванта електромагнітного випромінювання або передається кристалічним ґраткам у виді механічних коливань.

Другий варіант рекомбінації пов'язаний з поетапним переходом електрона через заборонену зону: спочатку електрон із зони провідності переходить на деякий проміжний рівень, розташований усередині забороненої зони, а потім уже з цього рівня переходить у валентну зону (рис.4.3, б).

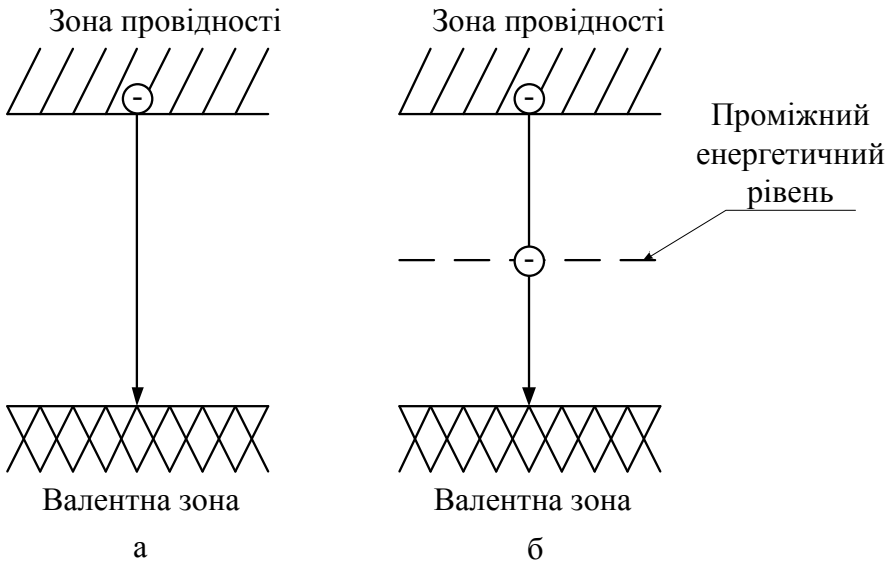


Рис. 4.3. Види рекомбінації носіїв у напівпровідниках:
а – прямий перехід електрона; б – поетапний перехід електрона

Проміжні рівні можуть з'явитися, якщо в кристалічних ґратках є дефекти, обумовлені тепловим порушенням атомів, наявністю домішок, недосконалістю поверхні напівпровідника, впливом на напівпровідника часток з більшою енергією (α-променів чи β-частинок).

ЛЕКЦІЯ 5. ФОРМУВАННЯ ЕЛЕКТРОННО-ДІРКОВОГО ПЕРЕХОДУ. ЕНЕРГЕТИЧНА ДІАГРАМА p-n-ПЕРЕХОДУ

Область, що розділяє напівпровідник на дві частини з різнотипною провідністю, називається електронно-дірковим переходом, або ***p – n – переходом*** (рис. 5.1).

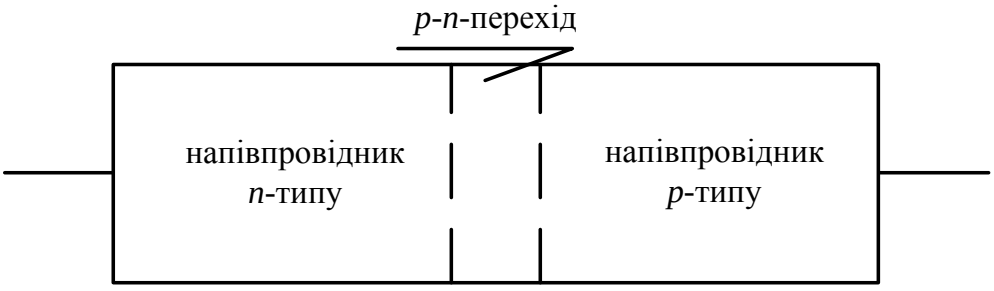


Рис. 5.1. Електронно-дірковий перехід

Формування p – n – переходу. Розглянемо явища, що виникають при контакті між напівпровідниками $n-$ і $p-$типу з однаковою концентрацією донорних і акцепторних домішок (рис. 5.2, а, б). Вважатимемо, що на межі розподілу (перетин x_0) тип домішки різко змінюється (рис. 5.2, б). Внаслідок значної різниці концентрацій основних та неосновних носіїв заряду в електронній та дірковій області, викликає ***дифузійний струм електронів*** із $n-$області в $p-$область (потік 1, рис. 5.2, а) і ***дифузійний струм дірок*** з $p-$області в $n-$області (потік 2 на рис.5.2, а). Крім струму, обумовленого рухом основних носіїв заряду, через межу розподілу напівпровідників можливий струм неосновних носіїв (електронів з $p-$області в $n-$область і дірок з області n в область p). Потоки неосновних носіїв на рис. 5.2, а позначені відповідно 3 і 4. Струм, обумовлений основними носіями заряду, буде переважати над струмом неосновних носіїв.

Відхід електронів із приконтактної $n-$області призводить до зниження в ній концентрації n_n, що спричиняє виникнення некомпенсованого позитивного заряду іонів донорной домішки (рис. 5.2, в).

Аналогічно, в $p-$області, внаслідок відходу дірок знижується

концентрація p_p у приконтактному шарі і виникає некомпенсований негативний заряд іонів акцепторної домішки.

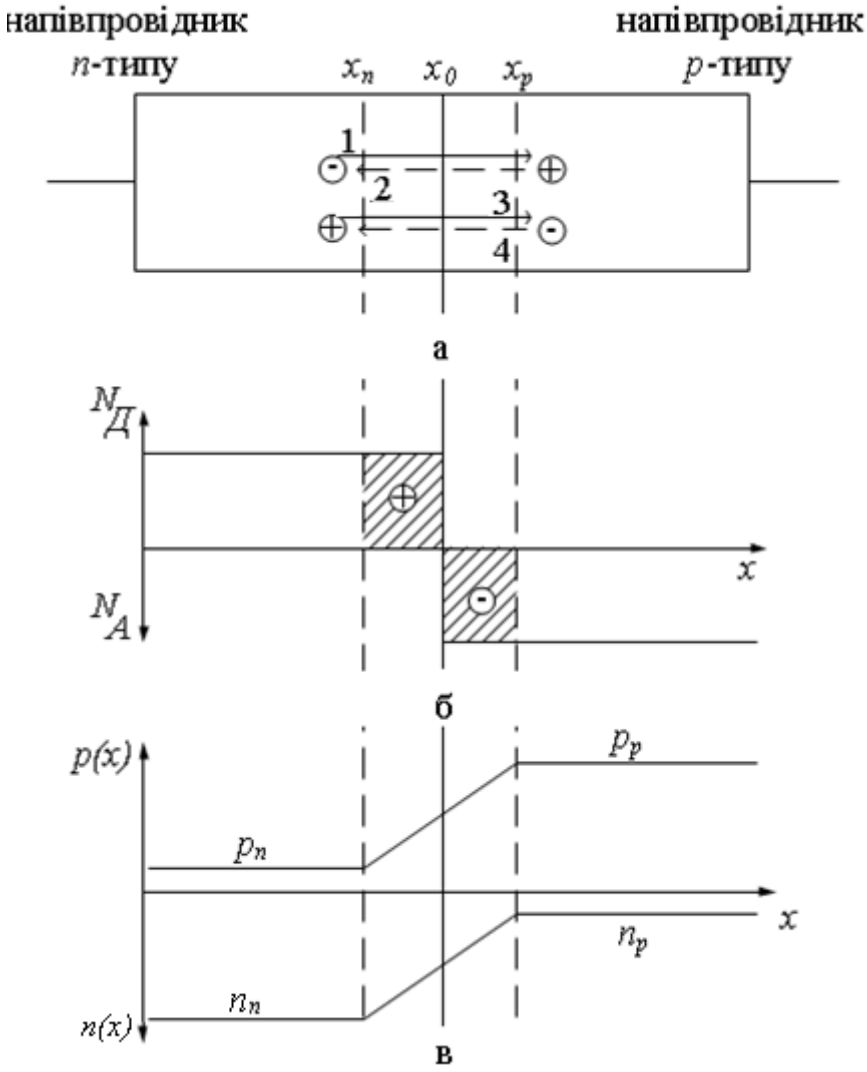


Рис. 5.2. Явища, що виникають в $p-n-$переході:
а – виникнення дифузійного струму; б – зміна типу домішки на межі розподілу;
в – зміна концентрацій носіїв заряду в приконтактних шарах

Таким чином, на межі областей $n-$ і $p-$типу утворюються два шари протилежних за знаком зарядів. Область просторових зарядів, що утворилися, і являє собою $p-n$-перехід.

Просторові заряди в електронно-дірковому переході утворюють електричне поле напруженістю Е (рис. 5.3, а, б), спрямоване від позитивно

заряджених іонів донорів до негативно заряджених іонів акцепторів. Це поле прискорює основні носії заряду і гальмує неосновні.

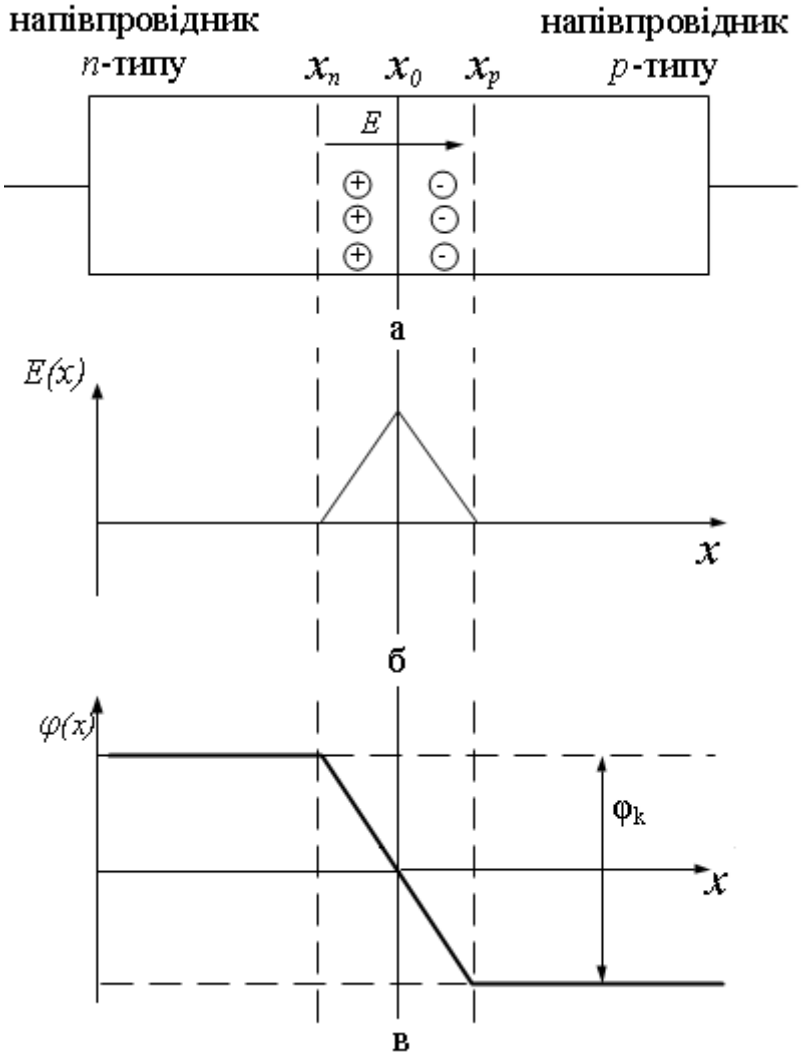


Рис. 5.3. Формування електричного поля в $p-n$-переході:
а – виникнення просторових зарядів; б – графік напруженості електричного поля; в – контактна різниця потенціалів

Потенціальна діаграма $p-n$-переходу показана на рис. 5.3, в. За межами переходу електричне поле відсутнє і $\varphi(x)=const$. Різниця потенціалів в переході дорівнює контактній різниці потенціалів:

$$\varphi_k = \frac{kT}{e}\ln\left(\frac{N_A N_Д}{n_i^2}\right) = \frac{kT}{e}\ln\left(\frac{p_p}{p_n}\right) = \frac{kT}{e}\ln\left(\frac{n_n}{n_p}\right).$$

Величину φ_k зазвичай називають ***потенціальним бар'єром***, оскільки він перешкоджає переміщенню основних носіїв заряду.

При кімнатній температурі деяка кількість основних носіїв заряду у кожній з областей напівпровідника має енергію, достатню для подолання потенціального бар'єра. Це призводить до того, що через $p-n$-перехід дифундує (явище дифузії) незначна кількість електронів і дірок, утворюючи відповідно електронну $J_{n\,диф}$ і діркову $J_{p\,диф}$ складові дифузійного струму. Крім того, через $p-n$-перехід безперешкодно проходять неосновні носії, для яких електричне поле $p-n$-переходу є прискорювальним. Ці заряди утворять відповідно електронну $J_{n\,др}$ і діркову $J_{p\,др}$ складові дрейфового струму. Напрямок дрейфового струму неосновних носіїв протилежний напрямку дифузійного струму основних носіїв. Загальна густина струму в напівпровіднику:

$$J_{n\,диф} - J_{n\,др} + J_{p\,диф} - J_{p\,др} = 0.$$

Ширина $p-n$-переходу визначається виразом:

$$\delta_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon\varphi_к}{e}\left(\frac{1}{N_А} + \frac{1}{N_Д}\right)},$$

де ε_0=8,85·10^{-12} Ф/м – електрична стала; ε – відносна діелектрична проникність.

Приклад 5.1

Визначити контактну різницю потенціалів при температурі 300 *K* для германієвого *p-n*-переходу з концентрацією $N_Д$=10^3N_A, якщо на кожні 10^8 атомів

германія приходиться один атом акцепторної домішки. Для розрахунків прийняти, що концентрація атомів германія $N = 4{,}4 \cdot 10^{22}$ *см*$^{-3}$, $n_i = 2{,}5 \cdot 10^{13}$ *см*$^{-3}$.

Розв'язання

Контактна різниця потенціалів:

$$\varphi_k = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{N_A N_Д}{\mathrm{n}_i^2}\right) = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{p_p}{p_n}\right) = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{n_n}{\mathrm{n}_p}\right),$$

де k = 1,38·10^{-23} Дж/К; Т = 300 К; е = 1,6·10^{-19} Кл.

Концентрація атомів акцепторної домішки:

$$N_A = \frac{N}{10^8} = \frac{4{,}4 \cdot 10^{22}}{10^8} = 4{,}4 \cdot 10^{14}\ \text{см}^{-3}.$$

Концентрація атомів донорної домішки:

$$N_Д = 10^3 \cdot N_A = 4{,}4 \cdot 10^{17}\ \text{см}^{-3}.$$

Тоді

$$\varphi_k = \frac{1{,}38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1{,}6 \cdot 10^{-19}} \ln\left(\frac{4{,}4 \cdot 10^{14} \cdot 4{,}4 \cdot 10^{17}}{(2{,}5 \cdot 10^{13})^2}\right) = 0{,}329\ \text{В}.$$

Приклад 5.2

Питомий опір *p*-області германієвого *p-n*-переходу $\rho_{дом\ p}$ = 2 *Ом·см*. Питомий опір *n*-області $\rho_{дом\ n}$ = 1 *Ом·см*. Обчислити висоту потенціального бар'єру при температурі *T* = 300 *K*, якщо рухливості електронів і дірок в германії дорівнюють $\mu_n = 0{,}39$ *м*^{2}*/В·с*, $\mu_p = 0{,}19$ *м*^{2}*/В·с*, а $n_i = 2{,}5 \cdot 10^{13}$ *см*$^{-3}$.

Розв'язання:

Питомий опір *p*-області напівпровідника:

$$\rho_{\text{дом}p} = \frac{1}{\sigma_{\text{дом}p}} = \frac{1}{N_{\text{А}} e\ \mu_{\text{р}}} =>$$

Концентрація атомів акцепторної домішки:

$$N_{\text{А}} = \frac{1}{\rho_p e\ \mu_{\text{р}}} = \frac{1}{2 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 0{,}19 \cdot 10^{-2}} = 1{,}64 \cdot 10^{21}\ \text{м}^{-3} = 1{,}64 \cdot 10^{15}\ c\text{м}^{-3}.$$

Аналогічно, концентрація атомів донорної домішки:

$$N_{\text{д}} = \frac{1}{\rho_{\text{дом}\,n} e\ \mu_{\text{n}}} = \frac{1}{1 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 0{,}39 \cdot 10^{-2}} = 1{,}6 \cdot 10^{21}\ \text{м}^{-3} = 1{,}6 \cdot 10^{15}\ c\text{м}^{-3}.$$

Висота потенціального бар'єру:

$$\varphi_{\text{к}} = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_{\text{А}} \cdot N_{\text{д}}}{n_i^2} =$$

$$= \frac{1{,}38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1{,}6 \cdot 10^{-19}} \ln \frac{1{,}64 \cdot 10^{21}\ \cdot 10^{-6} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{21}\ \cdot 10^{-6}}{(2{,}5 \cdot 10^{13})^2} =$$

$$= 0{,}216\ \text{В}.$$

Енергетична діаграма $p-n$***- переходу.*** Після утворення $p-n$-переходу і виникнення деякої контактної різниці потенціалів φ_k встановлюється теплова рівновага, при якій результуючий струм через $p-n$-перехід дорівнює нулю. При цьому імовірність проходження носіїв заряду через електронно-дірковий-перехід в обох напрямках стає однаковою. Отже, енергетичні діаграми $n-$і $p-$ областей напівпровідника в процесі встановлення теплової рівноваги зміщуються одна відносно одної так, щоб рівень Фермі був постійним по всьому переходу, тобто рівень Фермі $p-$області W_{Fp} та $n-$області W_{Fn} повинні розташуватися в одну лінію. При цьому енергетична діаграма $p-n$-переходу має вигляд, показаний на рис. 5.4.

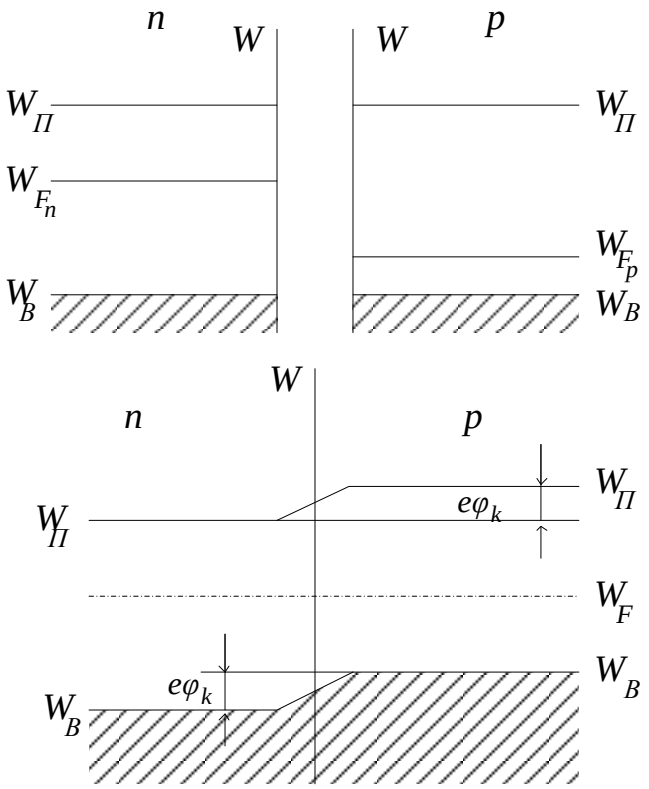


Рис.5.4. Енергетична діаграма $p-n$-переходу

Висота потенційного бар'єра в $p-n$- переході визначається положенням рівня Фермі в $n-$ і $p-$областях, тобто концентрацією домішок $N_Д$ і N_A.

ЛЕКЦІЯ 6. ВЛАСТИВОСТІ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ p-n-ПЕРЕХОДУ

Властивості $p-n$- переходу за наявності зовнішньої напруги

1. Пряме під'єднання до джерела енергії. У даному випадку джерело під'єднується таким чином, що поле, створюване зовнішньою напругою в $p-n$ -переході, спрямоване назустріч власному полю $p-n$-переходу (рис. 6.1).

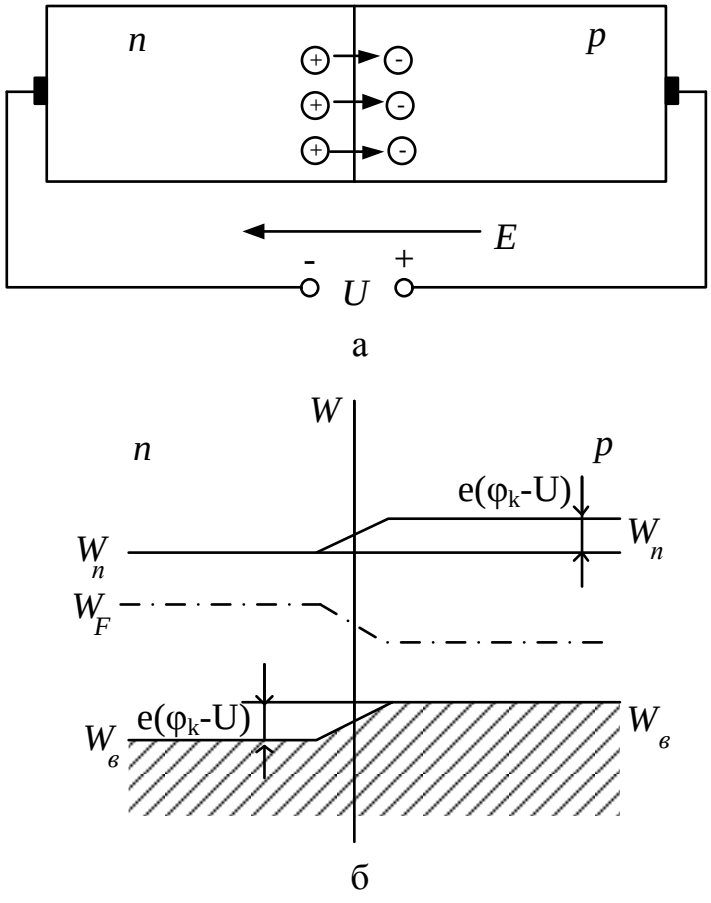


Рис. 6.1. Пряме підключення джерела енергії:
а – схема; б – енергетична діаграма

Це призводить до зниження висоти потенціального бар'єру до значення $\Delta\varphi_k = \varphi_k - U$.

З рис. 6.1, б видно, що в цьому випадку рівень Фермі в $n-$області піднімається, а в $p-$області знижується. Частина основних носіїв, що мають найбільші значення енергії, може подолати невисокий потенціальний бар'єр і

перейти через межу, що розділяє напівпровідники $n-$ і $p-$типу. Це призводить до зменшення ширини $p-n$-переходу

$$\delta_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon \Delta\varphi_к}{e}\left(\frac{1}{N_А} + \frac{1}{N_д}\right)}$$

і порушення рівноваги між дрейфовим і дифузійним струмами. Дифузійна складова струму стає більше дрейфової, і результуючий прямий струм через перехід стає відмінним від нуля:

$$I_{пр} = I_{диф} - I_{др}.$$

По мірі збільшення зовнішньої напруги прямий струм через перехід може зрости досить значно, оскільки він обумовлений головним чином рухом основних носіїв, концентрація яких в обох областях велика.

Носії заряду, що подолали потенціальний бар'єр, потрапляють в область напівпровідника, для якої вони є неосновними.

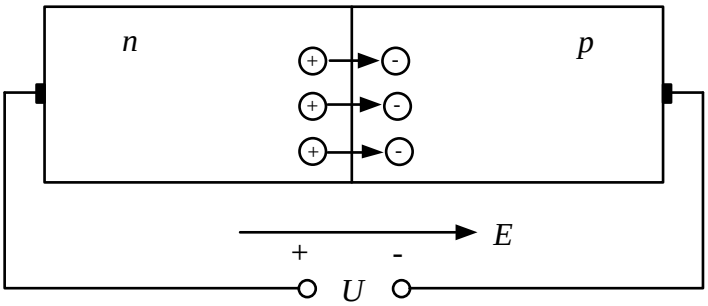
Процес введення носіїв заряду в область напівпровідника, де вони є неосновними, називається ***інжекцією.***

Інжектовані носії дифундують вглиб відповідної області напівпровідника, рекомбінуючи з основними носіями цієї області.

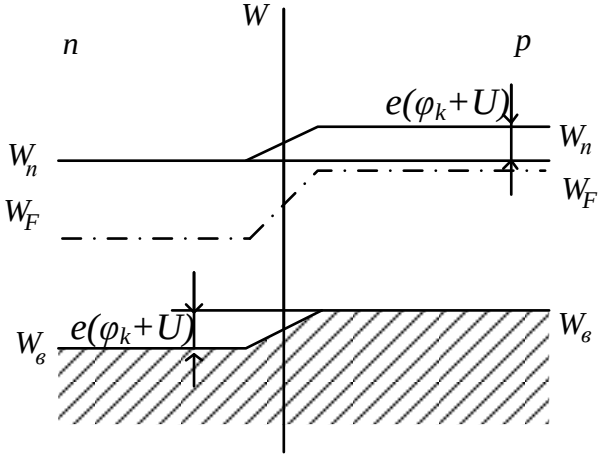
Одночасно з інжекцією дірок в $n-$область відбувається інжекція електронів у р-область. Процеси, що протікають при цьому, аналогічні.

2. Зворотне під'єднання до джерела енергії. В даному випадку електричне поле, створюване джерелом, співпадає з полем $p-n$-переходу (рис. 6.2).

Потенціальний бар'єр між $p-$ і $n-$областю зростає до значення $\Delta\varphi_k = \varphi_k + U$.



а



б

Рис. 6.2. Зворотне підключення джерела енергії:

а – схема; б – енергетична діаграма

З рис. 6.2, б видно, що рівень Фермі в $n-$області знижується, а в $p-$області піднімається. Кількість основних носіїв, здатних подолати дію результуючого поля, зменшується. Відповідно, зменшується і струм дифузії основних носіїв заряду. Під дією електричного поля, створюваного зовнішнім джерелом, основні носії будуть віддалятися від приконтактних шарів вглиб напівпровідника. У результаті ширина $p-n$- переходу збільшується:

$$\delta_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon \Delta\varphi_к}{e}\left(\frac{1}{N_А} + \frac{1}{N_д}\right)}.$$

Для неосновних носіїв (дірок у $n-$області й електронів у $p-$області)

потенціальний бар'єр в електронно-дірковому переході відсутній і вони будуть втягуватися полем в область $p-n$- переходу. Процес введення носіїв заряду в область напівпровідника, де вони є основними, називається ***екстракцією***.

При зворотному включенні переважну роль відіграє дрейфовий струм. Цей струм називається ***зворотнім струмом***:

$$I_{звор} = I_{др} - I_{диф}.$$

Величина зворотного струму практично не залежить від зовнішньої зворотньої напруги.

Приклад 6.1

Визначити висоту потенціального бар'єру та ширину електронно-діркового переходу в стані рівноваги і при зворотному під'єднанні *p-n*-переходу до джерела напруги, якщо перехід кремнієвий, з параметрами: $N_Д = 7 \cdot 10^{18}$ $м^{-3}$; $N_A = 10^{22}$ $м^{-3}$; $U = 4$ $В$; $T = 293$ $К$; $n_i = 1{,}5 \cdot 10^{16}$ $м^{-3}$; відносна діелектрична проникність кремнію ε = 12.

Розв'язання

В стані рівноваги (при відсутності напруги)

$$\varphi_к = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_А N_д}{n_i^2} = \frac{1{,}38 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{1{,}6 \cdot 10^{-19}} \ln \frac{10^{22} \cdot 7 \cdot 10^{18}}{(1{,}5 \cdot 10^{16})^2} = 0{,}494 \text{ В}.$$

Ширина *p-n*-переходу:

$$\delta_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon \varphi_к}{e} \left(\frac{1}{N_А} + \frac{1}{N_д}\right)} = \sqrt{\frac{2 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12} \cdot 12 \cdot 0{,}494}{1{,}6 \cdot 10^{-19}} \left(\frac{1}{10^{22}} + \frac{1}{7 \cdot 10^{18}}\right)} =$$

$$= 9{,}68 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

При під'єднанні джерела напруги:

$$\Delta\varphi = \varphi_{\text{к}} + U = 0{,}494 + 4 = 4{,}494 \text{ В}.$$

$$\delta_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon \Delta\varphi_{\text{к}}}{e}\left(\frac{1}{N_{\text{А}}} + \frac{1}{N_{\text{д}}}\right)} = \sqrt{\frac{2 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12} \cdot 12 \cdot 4{,}494}{1{,}6 \cdot 10^{-19}}\left(\frac{1}{10^{22}} + \frac{1}{7 \cdot 10^{18}}\right)} =$$

$$= 29 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Вольт-амперна характеристика $p-n$***-переходу.*** Властивості електронно-діркового переходу наочно ілюструються його ***вольт-амперною характеристикою (ВАХ)*** – залежністю струму через $p-n$-перехід від величини та полярності прикладеної напруги (рис. 6.3).

Аналітично ВАХ $p-n$-переходу описується виразом:

$$I = I_0\left(\exp\left(eU/kT\right) - 1\right),$$

де I_0 – зворотний струм насичення $p-n$- переходу, обумовлений фізичними властивостями напівпровідникового матеріалу; e – заряд електрона; U – напруга, прикладена до $p-n$ - переходу**;** k – стала Больцмана; T – абсолютна температура $p-n$-переходу.

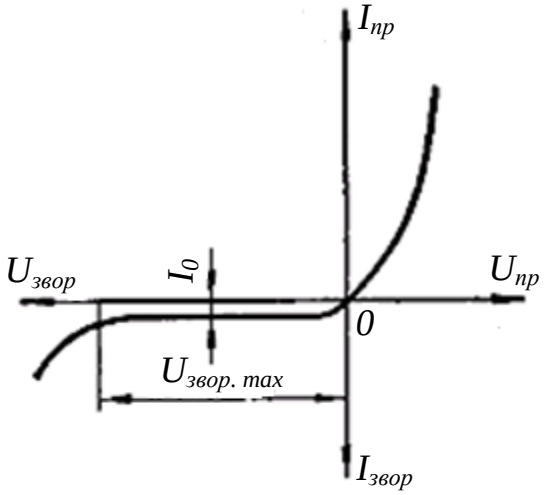


Рис. 6.3. Вольт-амперна характеристика $p-n$-переходу

При значеннях зворотної напруги $U_{\text{звор}} > U_{\text{звор.}max}$ відбувається пробій $p-n$-переходу.

Пробоєм p-n-переходу називається явище різкого збільшення зворотного струму при досягненні зворотною напругою деякого критичного значення.

Розрізняють наступні види пробою: електричний та тепловий.

Електричний пробій обумовлений фізичними процесами, що відбуваються в $p-n$ - переході в сильних електричних полях, а тепловий – процесами, пов'язаними з нагріванням $p-n$ - переходу при протіканні через нього зворотного струму.

Електричний і тепловий пробої $p-n$-перехода в багатьох випадках відбуваються одночасно.

При надмірному розігріві переходу, коли відбувається зміна структури кристала, $p-n$-перехід виходить із ладу. Цей процес є незворотнім.

Якщо ж при виникненні пробою струм через $p-n$-перехід обмежений опором зовнішнього кола і потужність, що виділяється на переході, невелика, то пробій оборотний. У цьому випадку можна керувати зворотним струмом шляхом зміни зовнішньої напруги, що подається на перехід.

Аналіз ВАХ $p-n$-перехода дозволяє розглядати його як нелінійний елемент, опір якого змінюється залежно від величини та полярності прикладеної напруги (рис.6.4).

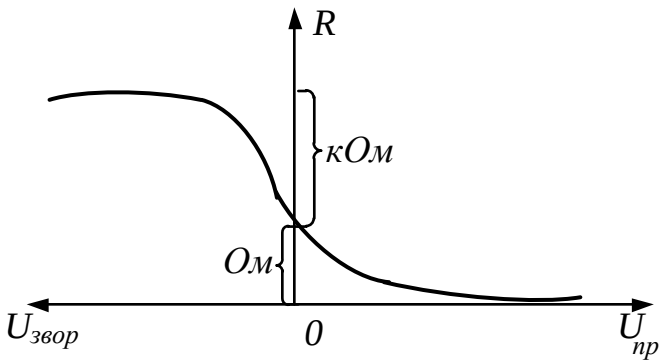


Рис. 6.4. Залежність опору $p-n$-переходу від напруги

При збільшенні прямої напруги опір $p-n$-переходу зменшується. Зі зміною полярності і величини прикладеної напруги опір $p-n$-перехода стрімко зростає. Отже, пряма лінійна залежність між напругою і струмом (закон Ома) для $p-n$-переходів не виконується. Нелінійні властивості $p-n$-переходів лежать в основі роботи напівпровідникових приладів, що використовуються для випрямлення змінного струму, перетворення частоти, обмеження амплітуд тощо.

Приклад 6.2

Германієвий *p*-*n*-перехід має зворотній струм насичення I_{01} = 1*мкА*, а кремнієвий з такими ж розмірами – струм $I_{02} = 10^{-8}A$. Обчислити і порівняти прямі напруги на переходах при T = 293 *K*, якщо через *p*-*n*-перехід тече струм 100 *мА*.

Розв'язання

ВАХ *p*-*n*-переходу описується виразом:

$$I = I_0\left(\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1\right).$$

З цього виразу

$$U = \frac{kT}{e}\ln(\frac{I}{I_0} + 1).$$

Для германієвого переходу:

$$U = \frac{1{,}38 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{1{,}6 \cdot 10^{-19}}\ln\left(\frac{100 \cdot 10^{-3}}{10^{-6}} + 1\right) = 0{,}29 \text{ В}.$$

Для кремнієвого переходу:

$$U = \frac{1{,}38 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{1{,}6 \cdot 10^{-19}} \ln\left(\frac{100 \cdot 10^{-3}}{10^{-8}} + 1\right) = 0{,}407 \text{ В}.$$

Температурна і частотна властивості $p-n$***-переходу***

1. Температурна залежність. Властивості $p-n$-переходу істотно залежать від температури навколишнього середовища. Це наочно показують ВАХ германієвого $p-n$-переходу, зняті за різних температур (рис.6.5).

При підвищенні температури прямий і зворотний струми зростають, а $p-n$-перехід втрачає свою основну властивість – однобічну провідність.

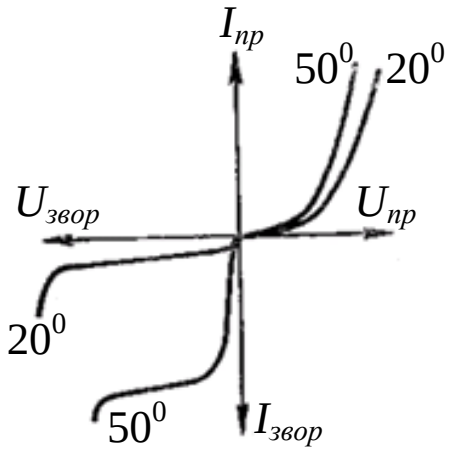


Рис. 6.5. Температурна залежність струмів і напруг $p-n$- переходу

Прямий струм $p-n$-переходу при нагріванні збільшується не так стрімко, як зворотний струм. Це пояснюється тим, що прямий струм обумовлений головним чином, наявністю домішкової провідності, а концентрація домішки від температури не залежить. Температурна залежність прямої вітки ВАХ визначається змінами зворотного струму насичення і показника експоненти.

Для германієвих приладів верхня температурна межа становить $70^0..90^0$ С. У кремнієвих – від 120° С до 150° С.

2. Частотна залежність. Властивості $p-n$- переходу залежать також

від частоти прикладеної напруги. Це обумовлене наявністю власної ємності між шарами напівпровідника з різними типами провідності.

В режимі зворотної напруги $p-n$- перехід являє собою ємність, величина якої пропорційна площі $p-n$- переходу, концентрації носіїв заряду та діелектричній проникності матеріалу напівпровідника. Цю ємність називають ***бар'єрною*** $(C_б)$.

$$C_{\text{б}} = \frac{Q_{\text{звор}}}{U_{\text{звор}}}$$

де $Q_{\text{звор}}$ – об'ємний заряд, що створюється іонізованими атомами донорної та акцепторної домішки; $U_{\text{звор}}$ – значення зворотної напруги.

На практиці для знаходження ємності $p-n$- переходу за зворотної напруги часто використовується формула:

$$C_{\text{б}} = S\sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon \text{e}}{2}\left(\frac{N_{\text{А}} N_{\text{д}}}{N_{\text{А}} + N_{\text{д}}}\right)\frac{1}{\Delta\varphi}},$$

де S – площа; ε_0 – електрична стала; ε – відносна діелектрична проникність середовища.

При прямій напрузі $p-n$- перехід, крім бар'єрної ємності має ***дифузійну ємність*** $C_{диф}$. Ця ємність обумовлена накопиченням рухомих носіїв заряду в $n-$ і $p-$областях.

$$C_{диф} = \frac{Q_{диф}}{U_{пр}},$$

де $Q_{диф}$ – величина заряду, накопиченого в області $p-n$- переходу за рахунок дифузії носіїв через перехід; $U_{пр}$ – значення прямої напруги, якій відповідає

$Q_{диф}$.

Еквівалентна схема $p-n$- переходу (схема заміщення) для змінного струму має вигляд, показаний на рис.

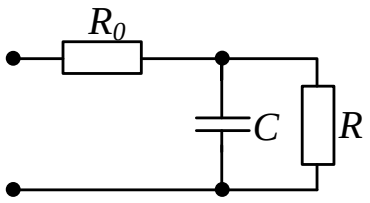


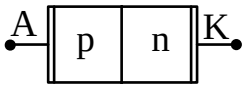
Рис. 6.6. Схема заміщення $p-n$- переходу для змінного струму

На цій схемі R_0 – опір товщі напівпровідників $n-$і $p-$ типу і виводів від них (близько 1 Ом); R – опір переходу, що залежить від величини та полярності прикладеної напруги; C – сума бар'єрної та дифузійної ємностей.

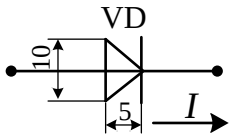
ЛЕКЦІЯ 7. НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДІОДИ

Напівпровідниковий діод – це напівпровідниковий прилад з одним електронно-дірковим переходом і двома зовнішніми виводами – анодом і катодом.

Електрод діода, під'єднаний до p – області, називається ***анодом***, а під'єднаний до n – області – ***катодом*** (рис. 7.1, а). Умовне графічне позначення напівпровідникового діода наведено на рис. 7.1, б.



а



б

Рис. 7.1. Напівпровідниковий діод:

а – позначення виводів діода; б – умовне графічне позначення

Діоди широко використовуються у пристроях детектування, перемноження процесів, перетворювачах частоти, комутаційних пристроях, стабілізаційних приладах.

Класифікують напівпровідникові діоди за наступними ознаками:

1. за методом виготовлення переходу – сплавні, дифузійні, планарні, точкові, діоди Шоткі, площинні;
2. за матеріалом – германієві, кремнієві, арсенідо-галлієві, селенові;
3. за фізичними процесами, на використанні яких заснована робота діода – тунельні, фотодіоди, світло діоди;

4. за призначенням – випрямні, імпульсні, варикапи, стабілітрони, детекторні, помножувальні, перемикальні, підсилювальні, генераторні тощо.

Будь-який напівпровідниковий діод характеризується системами трьох параметрів – *функціональними, граничними* та *параметрами надійності.*

Функціональні параметри визначають функціональні можливості діодів у нормальному режимі роботи (довготривала робота).

Граничні параметри визначають зону безпечної роботи діоду (короткотривала робота).

Параметри надійності визначають можливість діодів виконувати свої функції протягом заданого часу у тих чи інших умовах експлуатації.

Напівпровідниковий діод – нелінійний прилад, його ВАХ описується виразом $I = I_0\left(\exp\left(eU/kT\right)-1\right)$ і представлена на рис. 7.2.

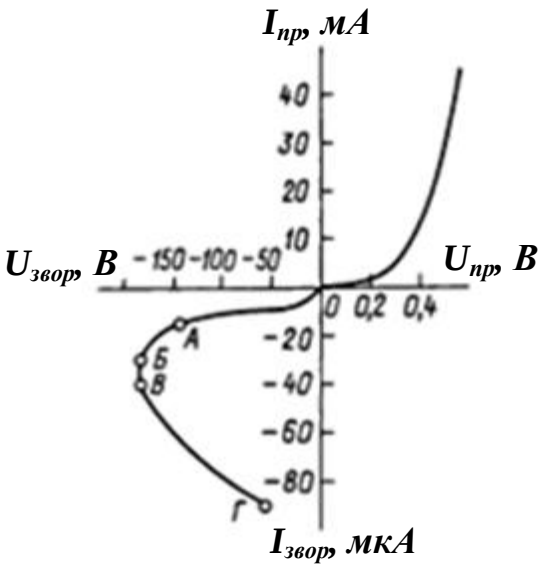


Рис. 7.2. ВАХ діода

Характеристика для прямого струму спочатку має значну нелінійність, потім, зі зростанням прямої напруги, характеристика стає майже лінійною.

Зворотний струм при збільшенні зворотної напруги до сотень вольт спочатку зростає і становить одиниці або десятки мікроампер. Це відповідає опору кілька сотень кілоом і більше. Однак при подальшому підвищенні

зворотної напруги струм росте незначно. Зростання струму відбувається внаслідок нагрівання переходу.

При деякому значенні зворотної напруги виникає ***пробій p-n-переходу***. На рис. 7.2 ділянка А-Б-В відповідає області електричного пробою. Робота діода в режимі електричного пробою припустима.

Області теплового пробою на рис. 7.2 відповідає ділянка В-Г. Тепловий пробій необоротний, тому що він супроводжується руйнуванням структури речовини в місці *n-p*-переходу.

Приклад 7.1

Германієвий діод, що має зворотний струм насичення I_0 = 0,25 *мкА*, працює при прямому зміщенні, що дорівнює 0,1 *В*, і температурі 300 *К*. Визначити опір діода постійному струму.

Розв'язання

Опір діода постійному струму (статичний опір) визначається співвідношенням:

$$R = \frac{U}{I},$$

де $U = 0{,}1$ В, а струм знаходимо з виразу для ВАХ діода:

$$I = I_0\left(exp^{\frac{eU}{kT}} - 1\right) = 0{,}25 \cdot 10^{-6}\left(exp^{\frac{1{,}6\cdot 10^{-19}\cdot 0{,}1}{1{,}38\cdot 10^{-23}\cdot 300}} - 1\right) =$$

$$= 1{,}167 \cdot 10^{-3}\ \text{А}$$

Тоді

$$R = \frac{0{,}1}{1{,}167 \cdot 10^{-3}} = 85{,}67\ \text{Ом}.$$

Приклад 7.2

Визначити, чому дорівнює напруга напівпровідникового діода, якщо зворотний струм досягає 90% значення зворотного струму насичення при температурі *Т* = 300 *К*.

Для того ж діода знайти відношення струмів при значеннях напруги $U = \pm 0{,}05\ B$.

Розв’язання

ВАХ діода для зворотного струму має вигляд:

$$-I = I_0\left(exp^{eU/kT} - 1\right) => exp^{eU/kT} = -\frac{I}{I_0} + 1 =>$$

$$U = \ln(-\frac{I}{I_0} + 1)\ {kT}/{e}.\ \text{За умовою } \frac{I}{I_0} = 0{,}9$$

Тоді

$$U = \ln\left(\frac{-I}{I_0} + 1\right) \cdot {kT}/{e} = \ln(-0{,}9 + 1) \cdot \frac{1{,}38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1{,}6 \cdot 10^{-19}} = -0{,}06\ \text{В};$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{I_0\left(exp^{\frac{1{,}6\cdot10^{-19}\cdot0{,}05}{1{,}38\cdot10^{-23}\cdot300}} - 1\right)}{I_0\left(exp^{\frac{1{,}6\cdot10^{-19}\cdot(-0{,}05)}{1{,}38\cdot10^{-23}\cdot300}} - 1\right)} = \frac{5{,}9}{-0{,}855} = -6{,}9 \approx -7$$

Ємність діода. Напівпровідниковий діод характеризується бар'єрною та дифузійною ємністю. Бар’єрна ємність визначається як

$$C_б = \frac{Q_{звор}}{U_{звор}},$$

де $Q_{звор}$ – об’ємний заряд, що створюється іонізованими атомами донорної та акцепторної домішки; $U_{звор}$ – зворотна напруга.

Бар’єрна ємність зростає при збільшенні площі *p-n*-переходу, діелектричної проникності та зменшенні товщини *p-n*-переходу. Дана величина може приймати значення від одиниць до сотень пікофарад. Особливість бар'єрної ємності полягає в тому, що вона нелінійна, тобто змінюється при зміні зворотної напруги на переході (рис. 7.3).

При прямих напругах діод крім бар'єрної ємності має ще і дифузійну ємність $C_{диф}$, яка також є нелінійною і зростає при збільшенні $U_{пр}$:

$$C_{диф} = \frac{Q_{диф}}{U_{пр}},$$

де $Q_{диф}$ – заряд, що утворюється в *n*-області за рахунок дифузії носіїв через перехід; $U_{пр}$ – пряма напруга.

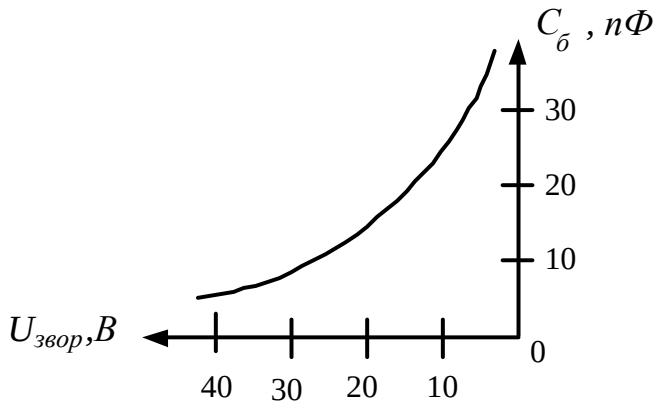


Рис. 7.3. Залежність бар’єрної ємності від зворотної напруги

Дифузійна ємність приймає значення на декілька порядків вище ніж бар'єрна і не так значно впливає на роботу діода, оскільки шунтується малим опором *n*-*p*-переходу.

Еквівалентна схема напівпровідникового діода. Під час розрахунків деяких складних електричних схем змінного струму напівпровідниковий діод доводиться замінювати його еквівалентною схемою (рис. 7.4), що складається з резисторів, котушок індуктивності та конденсаторів і відображає основні електрофізичні процеси, що відбуваються в даному пристрої.

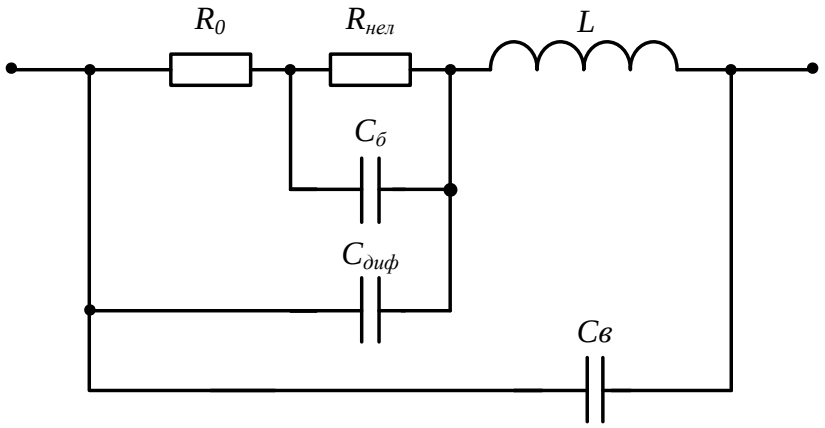


Рис. 7.4. Еквівалентна схема напівпровідникового діоду:

$\boldsymbol{R_o}$ – сумарний опір *n*- та *p*-областей, а також контактів цих областей з виводами; нелінійний опір $R_{нел}$ – опір *p*-*n*-переходу (дорівнює $R_{пр}$ – при прямих напругах, або $R_{звор}$ – при зворотних напругах); $C_{диф}, C_б$ – дифузійна та бар'єрна ємності відповідно; L – індуктивність; $C_в$ – ємність між виводами діоду.

Наведена еквівалентна схема в різних окремих випадках може бути спрощена (рис. 7.5).

Температурні властивості напівпровідникових діодів. На електропровідність напівпровідників значно впливає температура. При підвищенні температури підсилюється генерація пар носіїв заряду, тобто збільшується концентрація носіїв, відповідно, провідність росте. Тому властивості напівпровідникових діодів значно залежать від температури. Це наочно показують ВАХ, зняті при різній температурі (рис. 7.6).

При підвищенні температури прямий і зворотний струми ростуть. Дуже стрімко збільшується зворотний струм, що обумовлено посиленням генерації пар носіїв:

$$I_{звор} = I_{звор\left(20^0 C\right)} 2^{(t-20)/10}.$$

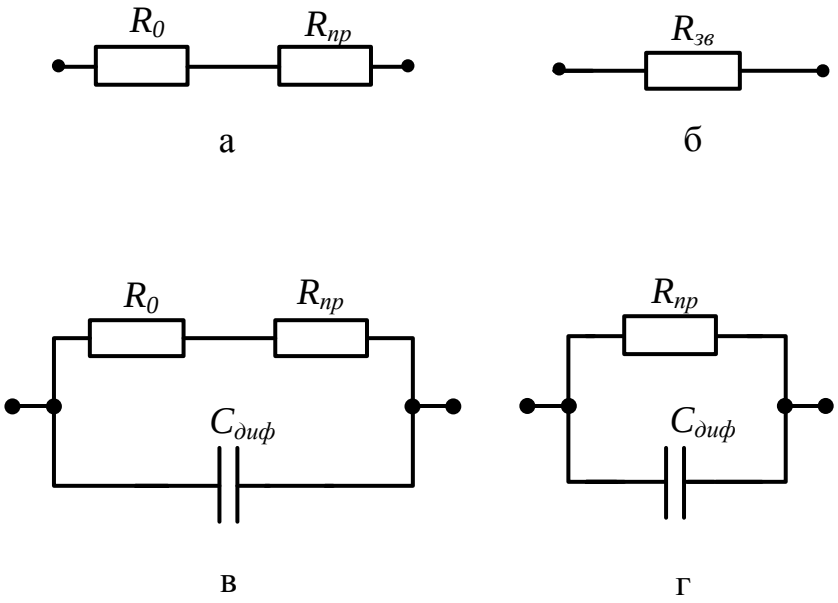


Рис. 7.5. Можливі варіанти еквівалентної схеми діода:
а – на низьких частотах при прямій напрузі; б – на низьких частотах при зворотній напрузі; в – на високих частотах при прямій напрузі; г – на високих частотах при зворотній напрузі

Прямий струм при нагріванні діода зростає не так сильно, як зворотний. Це пояснюється тим, що прямий струм виникає головним чином за рахунок домішкової провідності, а концентрація атомів домішки не залежить від температури. Незначне зростання прямого струму обумовлене генерацією власних носіїв заряду.

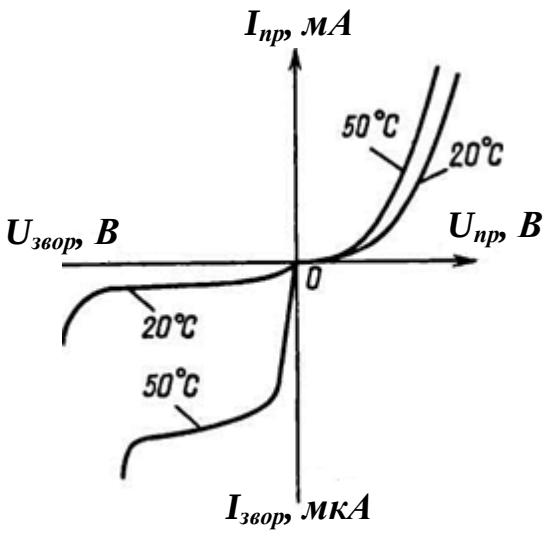


Рис. 7.6.Температурна залежність ВАХ діода

Розрахунок робочого режиму діода. Режим роботи діода з навантаженням називається ***робочим режимом діода*** (рис. 7.7).

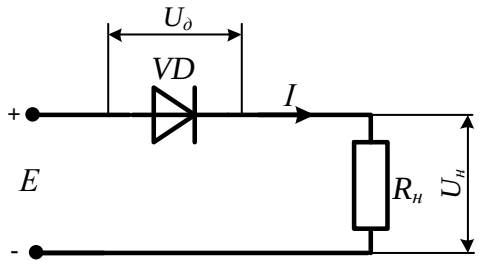


Рис. 7.7. До розрахунку робочого режиму діода

Постановка задачі: Дано: E, $R_н$, ВАХ діода. Знайти: струм в колі I і напругу на діоді $U_д$.

Розв'язання

Оскільки діод має нелінійний опір, значення $R_{пр}$ у нього змінюється при зміні струму. Тому розрахунок струму проводять графічно.

Для цього в одній координатній площині малюють ВАХ діода і пряму, що пов'язує струм і напругу на навантаженні (рис. 7.8). Зв'язок між струмом і напругою на навантаженні задається законом Ома:

$$I = U_н / R_н = \left(E - U_д\right) / R_н .$$

Ця пряма проходить через дві точки – точку Б (відповідає режиму холостого ходу), координати якої $I_{пр} = 0$ при $U_{пр} = E$ та точку А (відповідає режиму короткого замикання) з координатами $I_{пр} = E / R_н$ при $U_{пр} = 0$.

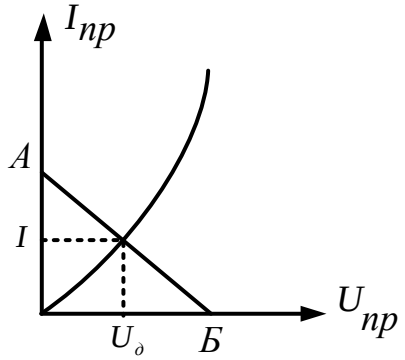
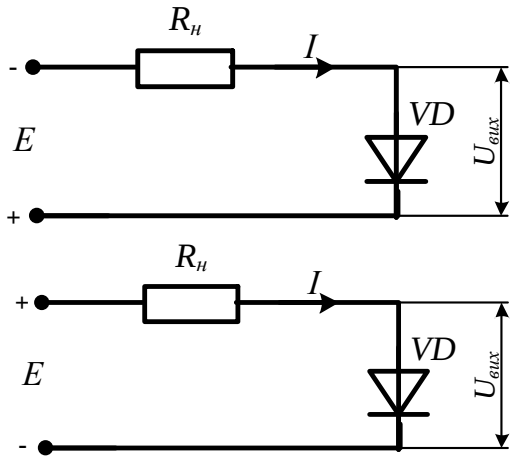


Рис. 7.8. Графічне визначення струму в колі I і напруги на діоді $U_д$

Точка перетину ВАХ і характеристики навантаження *АБ* буде розв'язком задачі.

Приклад 7.3

Визначити вихідну напругу схеми якщо:



1) E =15 $В$; $R_н$ = 1 $кОм$

2) E =15 $В$; T = 293 $К$; $R_н$ = 20 $кОм$;

I_0 = 10 мкА, діод кремнієвий

Розв’язання

1) На діод подається зворотна напруга, при цьому зворотний опір діода складає сотні кілоом, тобто $R_д >> R_н$. Тому можна вважати, що практично вся напруга падає на діоді = > $U_{вих}$=15 $В$.

2) Оскільки на діод подана пряма напруга, то $R_д << R_н$ і струм в схемі буде визначатися опором резистора навантаження.

$$I = \frac{E}{R_H} = \frac{40}{20 \cdot 10^3} = 2 \cdot 10^{-3}\ \text{А}$$

Вираз, що пов'язує струм та напругу на діоді – це ВАХ діода:

$$I = I_0\left(exp^{eU/kT} - 1\right) => U = \ln(\frac{I}{I_0} + 1)\ \cdot kT/e$$

$$U = \ln\left(\frac{2 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-6}} + 1\right) \cdot \frac{1{,}38 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{1{,}6 \cdot 10^{-19}} = 0{,}13\ \text{В}.$$

Приклад 7.4

Діод, у якого при прямій напрузі 0,8 B максимальний прямий струм $I_{пр\ \ max}$ = 100 мА, з'єднаний послідовно з навантажувальним резистором $R_н$ = 100 Ом (рис. 7.7).

Визначити найбільше значення напруги джерела, при якій діод буде працювати в безпечному режимі.

Розв'язання

Падіння напруги на резисторі при максимальному струмі:

$$U_{\text{н}} = I_{\text{пр}max}\text{R}_{\text{н}} = 100 \cdot 10^{-3} \cdot 100 = 10\ \text{В}$$

З врахуванням прямої напруги на діоді, амплітуда напруги джерела не повинна перевищувати

$$E_{max} = U_{\text{н}} + U_{\text{пр}} = 10 + 0{,}8 = 10{,}8\ \text{В}.$$

ЛЕКЦІЯ 8. ЗАСТОСУВАННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ДІОДІВ ДЛЯ ВИПРЯМЛЕННЯ ЗМІННИХ СТРУМІВ

Випрямний діод – це напівпровідниковий діод, призначений для перетворення змінного струму в постійний. Принцип дії випрямних діодів ґрунтується на властивості *p-n*-переходу проводити струм в одному напрямку (добре проводять струм в прямому напрямку і погано в зворотному). Можна сказати, що випрямний діод є споживачем енергії змінного струму і генератором постійного струму.

Основні параметри, що характеризують випрямні діоди:

1. Максимальний прямий струм $I_{пр\ max}$;
2. Падіння напруги на діоді $U_{пр}$ при заданому значенні прямого струму $I_{пр}$ ($U_{пр} \approx 0{,}3...\ 0{,}7$ В для германієвих діодів та $U_{пр} \approx 0{,}5...1$ В – для кремнієвих);
3. Максимально припустима постійна зворотна напруга діода $U_{звор\ max}$;
4. Зворотний струм $I_{звор}$ при заданій зворотній напрузі $U_{звор}$;
5. Бар'єрна ємність діода $C_б$ при прикладенні до нього зворотної напруги деякої величини;
6. Діапазон частот, у якому значення випрямленого струму не зменшується нижче заданого рівня;
7. Робочий діапазон температур.

Найпростіша схема для випрямлення змінного струму зображена на рис. 8.1 і носить назву ***однонапівперіодної схеми випрямлення***.

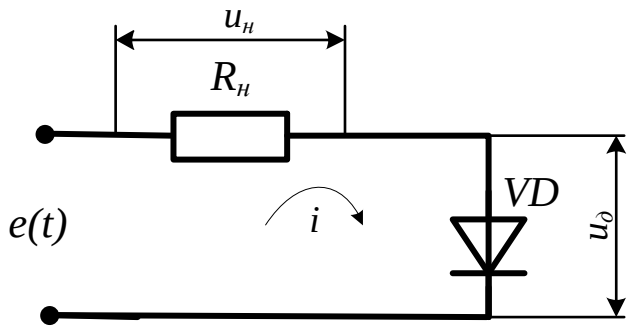


Рис. 8.1. Однонапівперіодний випрямляч

Робота однонапівперіодного випрямляча відбувається наступним чином. З виходу генератора на вхід кола подається синусоїдна ЕРС $e(t) = E_m \sin \omega t$ (рис. 8.2, а). Вважатимемо, що внутрішній опір генератора $R_i = 0$ і ним можна знехтувати.

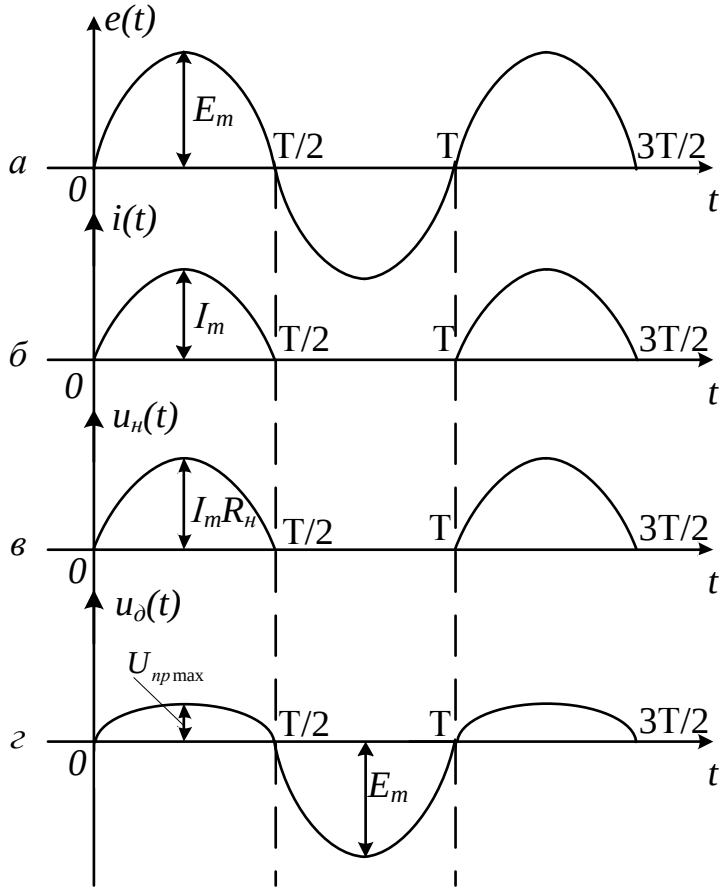


Рис. 8.2. Часові діаграми електричних процесів у колі однонапівперіодного випрямляча

Протягом першого напівперіоду напруга для діода є прямою і в колі тече струм, що створює на резисторі $R_н$ падіння напруги $u_н$. Протягом наступного напівперіоду напруга для діоду є зворотною, струму в колі практично немає і $u_н = 0$ (рис. 8.2, б, в).

Таким чином, через напівпровідниковий діод, навантажувальний резистор і джерело енергії проходить пульсуючий струм у вигляді імпульсів, що тривають півперіоду, розділених проміжками також у півперіоду. Цей струм називають ***випрямленим струмом*** (рис. 8.2, б). Зазвичай опір навантаження в багато разів більше опору діода, що дозволяє знехтувати нелінійністю діода.

У цьому випадку випрямлений струм має форму імпульсів, близьку до напівсинусоїди з максимальним значенням I_{m}. Він створює на навантажувальному резисторі $R_{\text{н}}$ випрямлену напругу $u_н$ (рис. 8.2, в), причому $U_{нm} = I_m R_н$.

На рис. 8.2, г зображена часова залежність напруги на діоді. Ця напруга має несинусоїдну форму. Амплітуди додатніх і від'ємних напівхвиль неоднакові. Амплітуда додатніх напівхвиль дуже мала. Це обумовлено тим, що коли проходить прямий струм, то більша частина напруги джерела виділяється на навантажувальному резисторі $R_{\text{н}}$, опір якого значно перевищує опір діода. У цьому випадку

$$U_{пр\text{m}} = E_m - U_{н\text{m}} = E_m - I_{\text{m}} R_н << E_m .$$

При від'ємній напівхвилі напруги струму практично немає і падіння напруги на резисторі $R_н$ дорівнює нулю. Вся напруга джерела прикладена до діода і є для нього зворотною. Таким чином, максимальне значення зворотної напруги дорівнює амплітуді ЕРС джерела.

Розглянемо детальніше випрямлену напругу (усе, що буде показане для неї, буде справедливе і для випрямленого струму). Із графіка на рис. 8.2, в видно, що ця напруга сильно пульсує. Протягом другого півперіода напруги зовсім немає. Корисною складовою такої напруги є її ***постійна складова***, або ***середнє значення*** $U_{сер}$ (рис. 8.3).

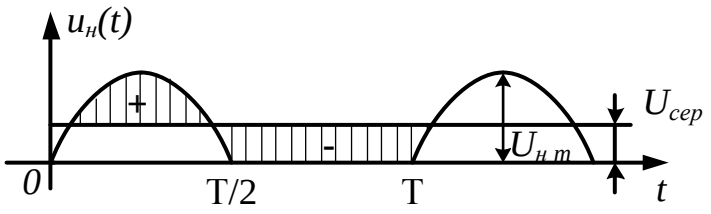


Рис. 8.3. Випрямлена напруга на навантажувальному резисторі

Для напівсинусоїдного імпульсу з максимальним значенням напруги E_m середнє значення за період:

$$U_{сер} = \frac{1}{T}\int_0^T u_н(t)dt = \frac{1}{T}\int_0^{T/2} E_m \sin\omega t dt = -\frac{E_m}{\omega T}\cos\omega t\Big|_0^{T/2} \approx \frac{E_m}{\pi} = 0,318E_m.$$

Віднімаючи від випрямленої пульсуючої напруги її середнє значення, одержимо змінну складову $U_{змін}$, що має несинусоїдну форму. Для неї нульовою віссю є пряма лінія, що зображує постійну складову (рис. 8.3). Напівхвилі змінної складової заштриховані.

Змінна складова є «шкідливою» складовою випрямленої напруги. Для її зменшення в навантажувальному резисторі, тобто для згладжування пульсацій випрямленої напруги, використовують спеціальні пристрої – згладжуючі фільтри. Найпростішим є ємнісний фільтр, що являє собою конденсатор досить великої ємності, ввімкнений паралельно до навантаження.

Конденсатор потрібно обирати такий, щоб його реактивний опір був набагато менше опору резистора навантаження $X_C = \frac{1}{2\pi fC} \ll R_н$. В цьому випадку пульсації напруги на навантаженні малі і припустимо вважати, що ця напруга постійна.

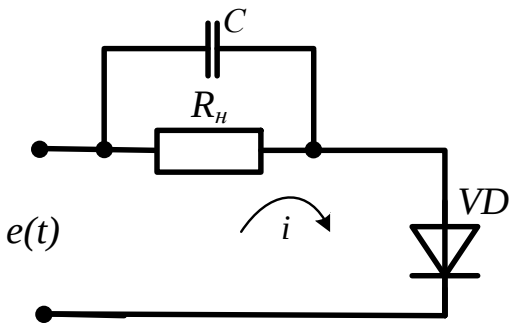


Рис. 8.4. Однонапівперіодний випрямляч з фільтром

Роботу випрямляча зі згладжуючим конденсатором ілюструє рис. 8.5, де наведені графіки ЕРС джерела *e(t)*, і напруги на конденсаторі u_C, що дорівнює

напрузі на навантаженні $u_н$.

Протягом деякої частини додатного напівперіоду, коли напруга на діоді, що визначається виразом $u_д = e - u_C$ пряма (додатня), через діод проходить струм, що заряджає конденсатор до напруги, близької до E_m. Заряд конденсатора через порівняно малий опір діода $R_д \ll R_н$ відбувається швидко з постійною часу $\tau_{зар} = CR_д$. Цьому режиму відповідає інтервал часу $t_1 - t_2$.

Протягом інтервалу часу $t_2 - t_3$ напруга $u_C(t) > e(t)$, діод закритий, а конденсатор розряджається через навантажувальний резистор $R_н$ з постійною часу $\tau_{роз} = CR_н$. При цьому напруга $u_н(t)$ знижується до деякого найменшого значення (не до нуля). Розряд на великий опір навантаження відбувається набагато повільніше, ніж заряд. Внаслідок цього напруга на конденсаторі і включеному паралельно йому навантаженню пульсує незначно. Крім того, конденсатор значно збільшує постійну складову випрямленої напруги. При відсутності конденсатора $U_{сер} \approx 0,3E_m$, а при наявності конденсатора досить великої ємності $U_{сер} \approx (0,8...0,95)E_m$.

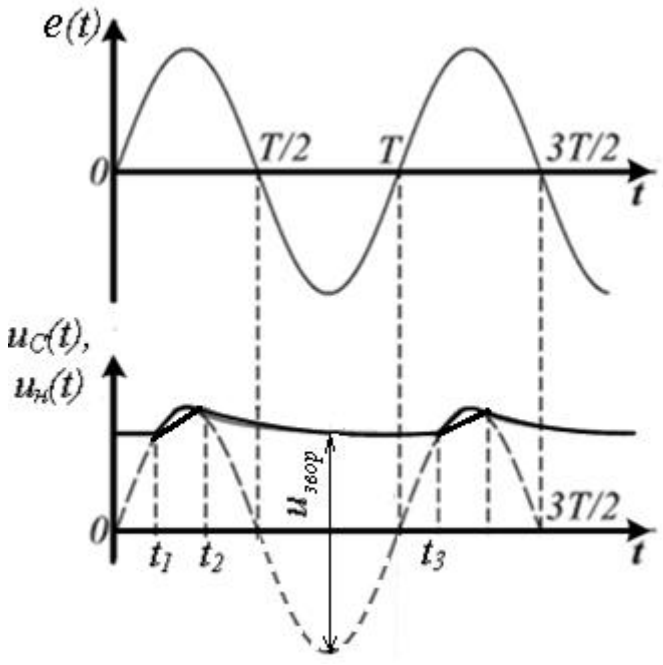


Рис. 8.5. Часові діаграми електричних процесів у колі однонапівперіодного випрямляча з фільтром

Максимальна зворотна напруга на діоді в даному випадку дорівнює сумі напруг на конденсаторі і амплітудного значення ЕРС джерела (вона близька до значення $2E_m$.

Приклад 8.1

Розрахувати однонапівперіодний випрамляч (рис. 8.6), якщо $R_{\text{н}} = 3$ кОм; $U_{\text{н}_{\text{сер}}} = 180$ В; $U_1 = 220$ В; діод ідеальний.

Розв'язання

Розрахунок випрямляча, показаного на рисунку, полягає в знаходженні значень $I_{\text{пр. сер.}}, I_{\text{пр. }m}, U_{\text{звор.}max}$, виборі діоду, що відповідає отриманим параметрам, а також визначенні коефіцієнту трансформації.

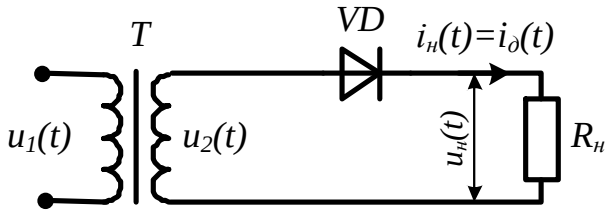


Рис. 8.6. Схема до прикладу 8.1

Ідеальний діод – рівносильний моделі ідеального вентиля: при прямому включенні повністю відкритий, при зворотному включенні повністю закритий. В закритому стані $I_{\text{звор.}} = 0, r_{\text{диф}} = \infty$; у відкритому стані $U_{\text{пр}} = 0, r_{\text{диф}} = 0$. Модель «ідеального діоду» зручно використовувати для аналізу схем випрямлячів з великими значеннями амплітуд випрямлених напруг, коли нелінійністю початкової ділянки прямої вітки ВАХ і наявністю невеликого зворотнього струму можна знехтувати.

Струми і напруги на різних ділянках схеми зображені на рис. 8.7.

Струм навантаження – це середнє значення струму:

$$I_{\text{н}} = I_{\text{пр.сер.}} = \frac{U_{\text{н}_{\text{сер}}}}{R_{\text{н}}} = \frac{180}{3 \cdot 10^3} = 60 \cdot 10^{-3} \text{ А};$$

Максимальне (амплітудне) значення струму через діод:

$$I_{\text{пр.}m} = \pi \cdot I_{\text{пр.сер.}} = 3{,}14 \cdot 60 \cdot 10^{-3} = 188{,}5 \cdot 10^{-3}\ \text{А};$$

Максимальне значення зворотної напруги:

$$U_{\text{звор.}max} = \pi \cdot U_{\text{н}_{\text{сер}}} = 3{,}14 \cdot 180 = 565{,}49\ \text{В};$$

Отриманим значенням задовольняє діод КД209Б.

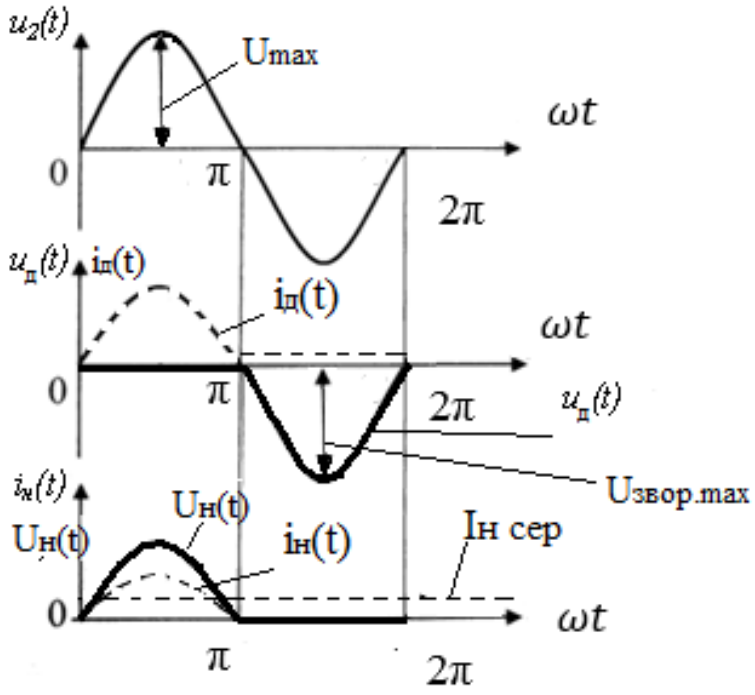


Рис. 8.7. Струми і напруги в однонапівперіодній схемі випрямлення

Для визначення коефіцієнта трансформації $К_{тр} = \frac{U_2}{U_1}$ знайдемо діюче значення напруги.

$$U_2 = \frac{U_{\text{звор.}max}}{\sqrt{2}} = \frac{565{,}49}{\sqrt{2}} = 399{,}86\ B;$$

$$К_{тр} = \frac{399.86}{220} = 1{,}82.$$

Приклад 8.2

Розрахувати однонапівперіодний випрямляч з фільтром (рис. 8.8), якщо: $R_{\text{н}} = 150$ Ом; $U_{\text{н}_{\text{сер}}} = 15$ В; $U_1 = 220$В; $f = 50$ Гц; діод кремнієвий.

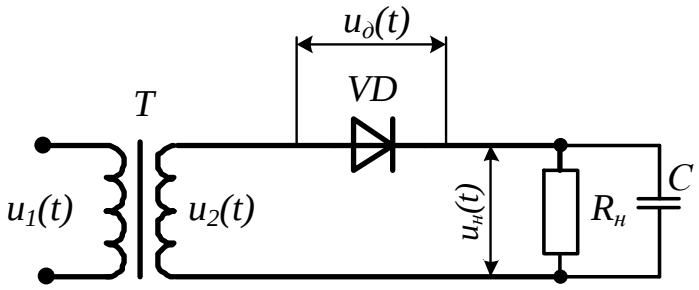


Рис. 8.8. Схема до прикладу 8.2

Розв’язання

Знаходимо середнє значення випрямленого струму:

$$I_{\text{пр.сер.}} = I_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}_{\text{сер}}}}{R_{\text{н}}} = \frac{15}{150} = 0{,}1 \text{ А};$$

Максимальне (амплітудне) значення струму через діод:

$$I_{\text{пр.}\,max} = \pi \cdot I_{\text{пр.сер.}} = 3{,}14 \cdot 0{,}1 = 314 \text{ мА};$$

Знайдемо амплітудне значення напруги U_{2m} з виходу трансформатора:

$$U_{\text{н}_{\text{сер}}} + U_{\text{д}} = 0{,}9 \cdot U_{2m}.$$

Значення прямої напруги на кремнієвому діоді приймає значення з інтервалу $[0{,}5 \ldots 1$ В$]$. Нехай $U_{\text{д}} = 0{,}7$ В. Коефіцієнт 0,9 враховує той факт, що конденсатор заряджається не до амплітудного значення, к=[0,8…0,95].

Тоді

$$U_{2m} = \frac{U_{\text{н}_{\text{сер}}} + U_{\text{д}}}{0{,}9} = \frac{15 + 0{,}7}{0{,}9} = 17{,}44 \text{ В};$$

$$U_{\text{звор}.max} = U_{2m} + U_{\text{н}_{\text{сер}}} = 17{,}44 + 15 = 32{,}44 \text{ В}.$$

Обираємо діод за отриманими значеннями $I_{\text{пр}.max}, I_{\text{пр.сер.}}, U_{\text{звор}.max}$, наприклад, Д203.

Коефіцієнт трансформації:

$$\text{К}_{\text{тр}} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{U_{2m}}{U_1 \cdot \sqrt{2}} = \frac{17.44}{\sqrt{2} \cdot 220} = 0{,}06.$$

Знайдемо значення ємності:

$$\frac{1}{\omega \text{с}} \ll R_{\text{н}} => \frac{1}{2\pi f c} = \frac{R_{\text{н}}}{10} =>$$

$$c = \frac{10}{2 \cdot 3.14 \cdot 50 \cdot 150} = 212{,}2 \text{ мкФ}.$$

Послідовне і паралельне з'єднання діодів. Якщо необхідно отримати випрямлення високої напруги з амплітудним значенням E_m при відсутності високовольтних діодів, тобто коли $E_m \geq U_{звор.max}$, доводиться з'єднувати низьковольтні діоди послідовно (рис. 8.9).

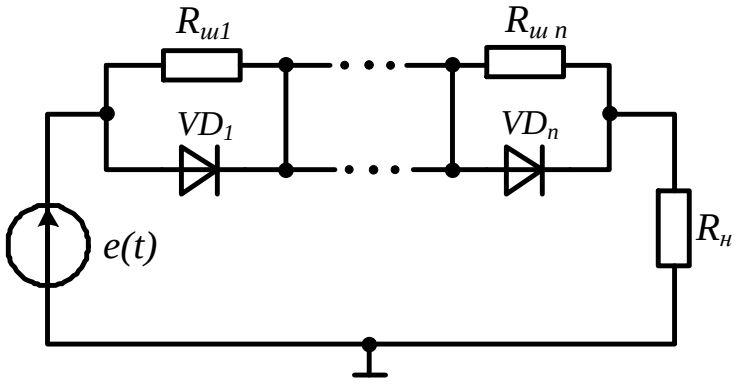


Рис. 8.9. Послідовне з'єднання напівпровідникових діодів

Необхідна кількість діодів визначається за формулою

$$n = \frac{E_m}{k_U U_{звор.max}}, \qquad (8.1)$$

де k_U – коефіцієнт навантаження діодів по напрузі; $k_U \in [0,5...0,8]$.

Якщо отримане значення n дробове, округлюють до найближчого більшого цілого числа.

Різні екземпляри діодів одного типу мають великий розкид значень зворотних опорів і пробивних напруг. Крім того, зворотні вітки вольт-амперної характеристики діодів по-різному можуть змінюватися при зміні температури і з часом. Все це призводить до того, що прикладена до послідовно з'єднаних діодів напруга виділяється в основному на діоді з найбільшим зворотним опором, при цьому вона може виявитися вище граничної $U_{звор.max}$. У результаті можливий незворотній пробій. Вихід з ладу одного з діодів в послідовному колі веде до пробою інших.

Для того, щоб зворотна напруга розподілялася рівномірно між діодами, незалежно від їх зворотних опорів, застосовують шунтування резисторами. Опори $R_ш$ резисторів повинні бути однакові і значно менше найменшого із зворотних опорів діодів. Але разом з тим $R_ш$ не повинні бути занадто малими, щоб не погіршилося випрямлення.

$$R_ш \le \frac{nU_{звор.max} - 1,1E_m}{(n-1)I_{звор.max}}. \qquad (8.2)$$

Зазвичай шунтуючі резистори мають опір від декількох десятків до декількох сотень кілоом.

Приклад 8.3

Розрахуйте і зобразіть схему електричного кола для випрямлення синусоїдної напруги з амплітудним значенням E_m = 990 *В*, використовуючи діоди, у яких $U_{звор.max}$ = 600 *В* і $I_{звор.max}$ = 100 *мкА*.

Розв'язок

Оскільки $E_m > U_{звор.max}$, необхідно використати послідовне з'єднання діодів. За формулою (8.1), обравши коефіцієнт навантаження діодів по напрузі $k_U = 0,7$, визначаємо необхідну кількість діодів:

$$n = \frac{E_m}{k_U U_{звор.max}} = \frac{990}{0,7 \cdot 600} = 2,36.$$

Округлюємо отриману кількість до найближчого більшого цілого, *n* = 3.
Опори шунтуючих резисторів визначаємо за формулою (8.2):

$$R_ш \le \frac{nU_{звор.max} - 1,1E_m}{(n-1)I_{звор.max}} = \frac{3 \cdot 600 - 1,1 \cdot 990}{(3-1) \cdot 100 \cdot 10^{-6}} = 3,56 \text{ МОм.}$$

Розрахована схема випрямляча наведена на рис. 8.10.

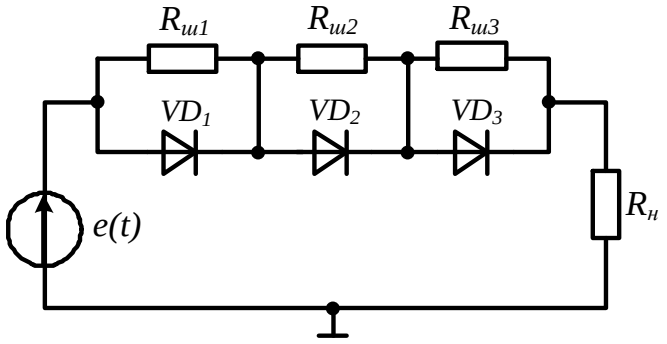


Рис. 8.10. Схема до прикладу 8.3

Паралельне з'єднання діодів (рис. 8.11) використовують в тому випадку, коли потрібно отримати випрямлений струм з амплітудним значенням $I_{випр.т}$, більший граничного струму одного діода $I_{пр.max}$.

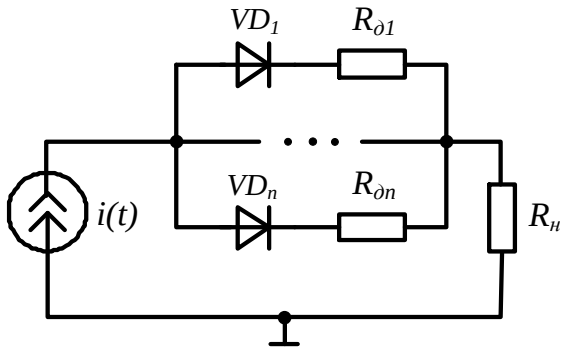


Рис. 8.11. Паралельне з'єднання напівпровідникових діодів

Необхідна кількість діодів визначається за формулою

$$n = \frac{I_{випр.т}}{k_I I_{пр.max}}, \qquad (8.3)$$

де k_I – коефіцієнт навантаження діодів по струму; $k_I \in [0,5...0,8]$.

Але якщо діоди одного типу просто з'єднати паралельно, то внаслідок розкиду прямих опорів у різних екземплярів діодів одного і того ж типу вони виявляться по-різному навантаженими і в деяких струм буде більше граничного. Для зрівняння струмів через діоди послідовно до кожного з них вмикають додаткові резистори $R_д$.

$$R_д \geq \frac{U_{пр}(n-1)}{nI_{пр.\max} - 1,1I_{випр.т}}. \qquad (8.4)$$

Приклад 8.4

Розрахуйте і зобразіть схему випрямляючого кола, що дозволяє отримати випрямлений струм $I_{випр.т}$ = 400 *мА*, використовуючи діоди у яких $U_{пр.}$ = 1 *В* і $I_{пр.max}$ = 300 *мА*.

Розв'язок

Оскільки $I_{випр.т} > I_{пр.max}$, необхідно використати паралельне з'єднання діодів. За формулою (8.3), обравши коефіцієнт навантаження діодів по струму $k_I = 0{,}8$, визначаємо необхідну кількість діодів:

$$n = \frac{I_{випр.т}}{k_I I_{пр.max}} = \frac{400 \cdot 10^{-3}}{0{,}8 \cdot 300 \cdot 10^{-3}} = 1{,}67 \Rightarrow n = 2.$$

Значення опорів додаткових резисторів знаходимо за формулою (8.4):

$$R_д \geq \frac{U_{пр}(n-1)}{nI_{пр.\max} - 1{,}1 I_{випр.т}} = \frac{1 \cdot (2-1)}{2 \cdot 300 \cdot 10^{-3} - 1{,}1 \cdot 400 \cdot 10^{-3}} = 6{,}25\ Ом.$$

Розрахована схема випрямляча наведена на рис. 8.12.

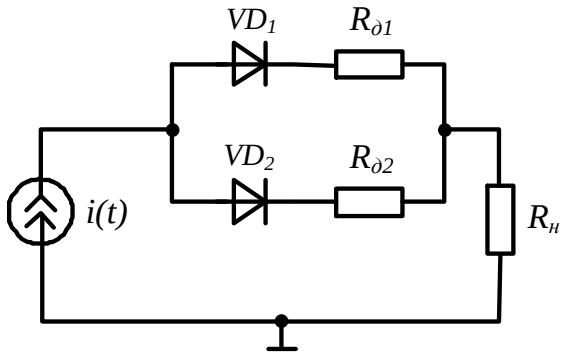
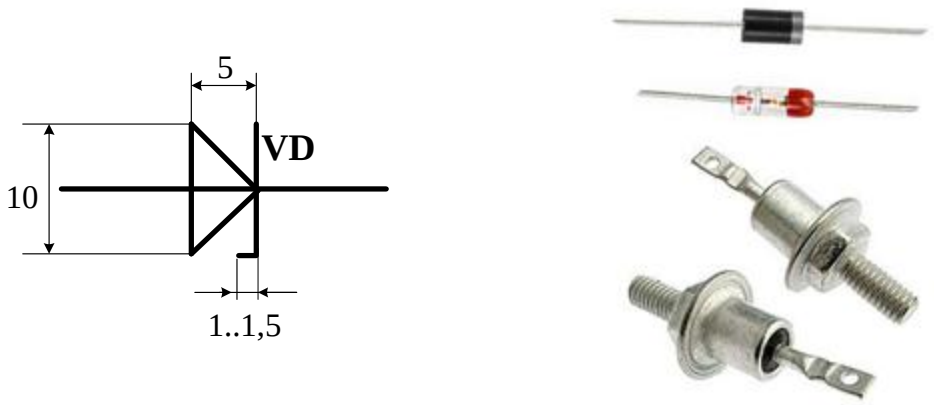


Рис. 8.12. Схема до прикладу 8.4

ЛЕКЦІЯ 9. НАПІВПРОВІДНИКОВИЙ СТАБІЛІТРОН. СТАБІСТОР

Напівпровідниковий стабілітрон (опорний діод) – це напівпровідниковий діод, призначений для стабілізації напруги, робочою ділянкою якого є ділянка електричного пробою зворотної вітки ВАХ.

Умовне графічне позначення стабілітрону і приклади зовнішнього вигляду наведені на рис. 9.1.



а б

Рис. 9.1. Напівпровідниковий стабілітрон:
а – умовне графічне позначення; б – варіанти зовнішнього вигляду

Найчастіше стабілітрони виготовляють на основі кремнієвих кристалів з площинним *p*-*n*-переходом. Це обумовлено тим, що кремній має малий зворотний струм і є більш стійким до роботи в умовах підвищених температур.

Зазвичай стабілітрони використовуються для стабілізації постійної напруги в джерелах живлення, захисту електроапаратури від перенапруг, в якості джерела опорної напруги в інтегральних схемах, зокрема аналогово-цифрових перетворювачах.

Пряма вітка ВАХ стабілітрона практично не відрізняється від прямої вітки будь-якого напівпровідникового діода. Зворотна вітка має вигляд прямої вертикальної лінії, яка майже паралельна вісі струмів (рис. 9.2). Тому при зміні струмів в широких межах падіння напруги на приладі практично не змінюється.

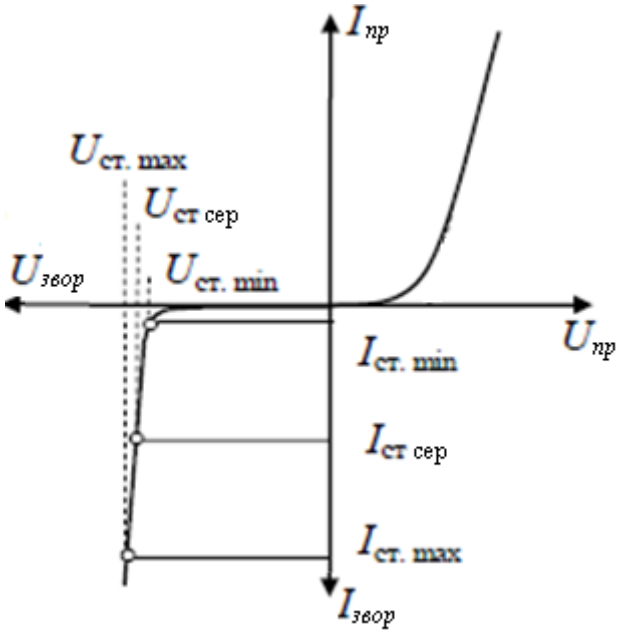


Рис. 9.2. ВАХ стабілітрона

Основні параметри напівпровідникових стабілітронів

1. ***Напруга стабілізації***, $U_{ст}$ – номінальне значення напруги на стабілітроні при заданому зворотному струмі в області пробою. Даний параметр маже приймати значення від одиниць до сотень вольт.

2. ***Динамічний (диференційний) опір стабілітрона***, $r_{ст}$ – відношення приросту напруги на стабілітроні до приросту струму в режимі стабілізації.

$$r_{ст} = \frac{\Delta U_{ст}}{\Delta I_{ст}}.$$

Величина $r_{ст}$ характеризує ступінь стабільності напруги стабілізації при зміні струму пробою. Чим менше значення приймає даний параметр, тим краща стабілізація. Динамічний опір стабілітрона може приймати значення від десятих часток до двохсот ом.

3. ***Опір постійному струму,*** $R_{ст}$ – характеризує втрати в діоді в певній робочій точці.

$$R_{ст} = \frac{U_{ст}}{I_{ст}}.$$

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

$$Q = \frac{R_{ст}}{r_{ст}} = \frac{\Delta I_{ст}}{\Delta U_{ст}} \frac{U_{ст}}{I_{ст}}.$$

Даний параметр приймає значення в діапазоні 20..100.

5. ***Температурний коефіцієнт напруги стабілізації*** α – показує зміну напруги стабілізації від температури.

$$\alpha = \frac{1}{U_{ст}} \frac{\Delta U_{ст}}{\Delta T} \cdot 100\%; \qquad [\alpha] = \frac{\%}{град}.$$

Приймає значення від 0,05 %/град до 0,09 %/град.

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

Мінімальний струм стабілізації $I_{ст\min}$ – це такий струм через стабілітрон, при якому виникає стійкий пробій.

Максимальний струм стабілізації $I_{ст\max}$ – таке значення струму через стабілітрон, при якому потужність, що розсіюється на стабілітроні, не перевищує допустимого значення.

Даний параметр може приймати значення від десятків міліампер до десятків ампер.

7. ***Максимальна потужність розсіювання*** $P_{ст\max}$ – максимальна потужність, що виділяється на *p-n*-переході, при якій не виникає тепловий пробій переходу. Приймає значення від сотень міліват до одиниць ват.

Приклад 9.1

Кремнієвий стабілітрон має напругу стабілізації $U_{ст}$ = 9,1 В, середній струм стабілізації $I_{ст.ср}$ = 30 *мА*. Яким повинен бути динамічний опір стабілітрона, щоб при зміні напруги на 1% струм через стабілітрон змінився в 1,5 рази?

Розв'язання

Динамічний опір стабілітрона:

$$r_{ст} = \frac{\Delta U_{ст}}{\Delta I_{ст}}.$$

Вважатимемо робочу ділянку ВАХ стабілітрона лінійною в області електричного пробою і знайдемо значення динамічного опору лише по додатнім приростам:

$$r_{ст} = \frac{\Delta U_{ст}}{\Delta I_{ст}} = \frac{0{,}01 \cdot 9{,}1}{I_{ст\,2} - I_{ст\,1}}.$$

Оскільки за умовою струм змінюється в 1,5 рази, то $I_{ст\,2}$ = 1,5· $I_{ст\,1}$, тоді:

$$r_{ст} = \frac{\Delta U_{ст}}{\Delta I_{ст}} = \frac{0{,}01 \cdot 9{,}1}{1{,}5 \cdot I_{ст\,1} - I_{ст\,1}} = \frac{0{,}091}{0{,}5 \cdot I_{ст\,1}} = \frac{0{,}091}{0{,}5 \cdot 30 \cdot 10^{-3}} = 6{,}06 \text{ Ом}.$$

Приклад 9.2

Температурний коефіцієнт напруги стабілізації у стабілітрона 2С156Т складає -0,04%/^{0}С. Якою буде напруга стабілізації при температурі 70^{0}С?

Розв'язання

Температурний коефіцієнт стабілізації визначається з виразу:

$$\alpha = \frac{\Delta U_{ст}}{U_{ст}\Delta T} \cdot 100\% =>$$

$$\Delta U_{cm} = \frac{\alpha U_{cm} \Delta T}{100\%},$$

де ΔU_{cm} = U_{cm2} - U_{cm1} – різниця напруг, виміряних при температурах T_2 та T_1 відповідно;

U_{cm} – номінальна напруга стабілізації, яка вимірюється при кімнатній температурі (T_1 = 20^0C). Це значення закодовано в 4-му та 5-му елементах літерно-цифрового позначення стабілітрона, тобто U_{cm} = 5,6 *В*;

$\Delta T = T_2 - T_1 = 70 - 20 = 50\ ^0$C.

Тому

$$\Delta U_{cm} = \frac{-0{,}04 \cdot 5{,}6 \cdot 50}{100} = -0{,}112 \text{ В}.$$

Знак "-" відображає той факт, що зі збільшенням температури напруга стабілізації зменшується.

При температурі T = 70^0C

$$U_{cm2} = U_{cm1} + \Delta U_{cm} = 5{,}6 - 0{,}112 = 5{,}488 \text{ В}.$$

Основні схеми підключення стабілітронів

1. Найпростіша схема стабілізації напруги (рис. 9.3). Навантаження (споживач) ввімкнено паралельно стабілітрону. Тому в режимі стабілізації, коли напруга на стабілітроні майже постійна, така ж напруга буде і на навантаженні.

На схемі $R_{обм}$ – обмежуючий опір, на якому виділяється надмірне падіння напруги:

$$R_{обм} = \frac{E_{сер} - U_{ст}}{I_{ст\ сер} + I_н},$$

причому

$$E_{сер} = \frac{1}{2}\left(E_{\min} + E_{\max}\right);$$

$$I_{ст\ сер} = \frac{1}{2}\left(I_{ст\ min} + I_{ст\ max}\right),$$

де $E_{сер}, E_{\min}, E_{\max}$ – відповідно середнє, мінімальне і максимальне значення напруги джерела; $I_{ст\ сер}$ – середній струм стабілітрона; $I_н$ – струм навантаження.

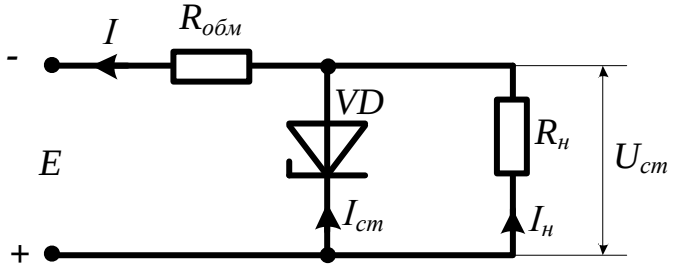


Рис. 9.3. Найпростіша схема стабілізації напруги

Приклад 9.3

Для стабілізації напруги в навантаженні використовується напівпровідниковий стабілітрон, напруга стабілізації якого $U_{ст}$ = 10 В (рис. 9.3).

Визначити припустимі межі зміни напруги живлення, якщо максимальний струм стабілізації стабілітрона $I_{ст\ max}$ = 30 *мА*, мінімальний струм $I_{ст\ min}$ = 1*мА*, опір навантаження $R_н$ = 1 *кОм* і опір обмежуючого резистора $R_{обм}$ = 0,5 *кОм*.

Розв’язання

Напруга джерела живлення:

$$E = U_{ст} + R_{обм}(I_{ст} + I_н).$$

Струм навантаження

$$\mathrm{I_н} = \frac{\mathrm{U}_{cm}}{\mathrm{R_н}} = \frac{10}{1 \cdot 10^3} = 10^{-2}\mathrm{A};$$

Тоді

$$E = 10 + 0{,}5 \cdot 10^3 \cdot (\mathrm{I}_{cm} + 10^{-2}).$$

Підставляючи в даний вираз $\mathrm{I}_{cm\max}$ та $\mathrm{I}_{cm.\min}$ отримаємо, що

$$E_{max} = 10 + 0.5 \cdot 10^3 \cdot (30 \cdot 10^{-3} + 10^{-2}) = 20{,}4\ \text{В};$$

$$E_{min} = 10 + 0.5 \cdot 10^3 \cdot (1 \cdot 10^{-3} + 10^{-2}) = 5{,}61\ \text{В}.$$

Приклад 9.4

Для схеми стабілізації напруги (рис. 9.3), в якої $R_н$ = 2,2 *кОм*, $U_{ст}$ = 13 *В*, $I_{ст.max}$ = 20 *мА*, $I_{ст.min}$ = 1 *мА*, E_{min} = 16 *В*, E_{max} = 24 *В* визначити опір обмежуючого резистора. З'ясувати, чи буде забезпечена стабілізація для всього діапазону зміни напруги джерела?

Розв'язання

$$\mathrm{R_{обм}} = \frac{E_{\text{сер}} - \mathrm{U}_{cm}}{\mathrm{I}_{cm.\text{сер}} + \mathrm{I_н}};$$

$$E_{\text{сер}} = \frac{E_{max} + E_{min}}{2} = \frac{16 + 24}{2} = 20\ \text{В};$$

$$\mathrm{I}_{cm.\text{сер}} = \frac{\mathrm{I}_{cm.max} + \mathrm{I}_{cm.min}}{2} = \frac{(1 + 20) \cdot 10^{-3}}{2} = 10{,}5\ \text{мА};$$

$$\mathrm{I_н} = \frac{\mathrm{U}_{cm}}{\mathrm{R_н}} = \frac{13}{2{,}2 \cdot 10^3} = 5{,}9 \cdot 10^{-3}\mathrm{A}.$$

Тоді

$$\mathrm{R_{обм}} = \frac{20 - 13}{(10{,}5 + 5{,}9) \cdot 10^{-3}} = 426{,}83 \text{ Ом};$$

Стабілізація забезпечується для напруг

$$E_{min} = \mathrm{U}_{cm} + \mathrm{R_{обм}} \cdot (\mathrm{I}_{cm.\min} + \mathrm{I_н}) =$$
$$= 13 + 426{,}83 \cdot (1 \cdot 10^{-3} + 5{,}9 \cdot 10^{-3}) \approx 16 \text{ В};$$

$$E_{max} = \mathrm{U_{ст}} + \mathrm{R_{обм}} \cdot (\mathrm{I_{ст.max}} + \mathrm{I_н}) =$$
$$= 13 + 426.83 \cdot (20 \cdot 10^{-3} + 5.9 \cdot 10^{-3}) \approx 24 \text{ В}.$$

Стабілізація забезпечена для всього діапазону зміни напруги живлення.

2. Схема стабілізації з пониженням напруги (рис. 9.4). Використовується, коли необхідно отримати напругу більш низьку, ніж дає стабілітрон.

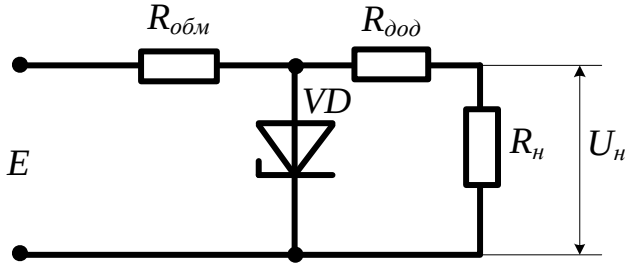


Рис. 9.4. Схема стабілізації з пониженням напруги

В цьому випадку послідовно з навантаженням вмикають додатковий резистор, опір якого розраховують за законом Ома.

Падіння напруги на навантаженні обчислюється за формулою:

$$U_н = U_{ст} \frac{R_н}{R_{дод} + R_н}.$$

3. Послідовне з'єднання стабілітронів, розрахованих на однакові струми (рис. 9.5).

Дана схема використовується для отримання більш високих стабільних напруг.

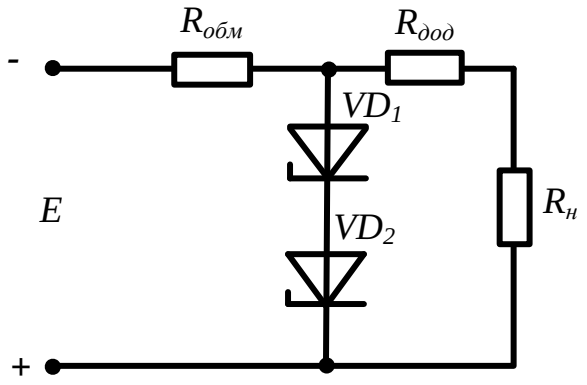


Рис. 9.5. Послідовне з'єднання стабілітронів

4. Каскадне з'єднання стабілітронів (рис. 9.6). Використовується для збільшення стабільності напруги.

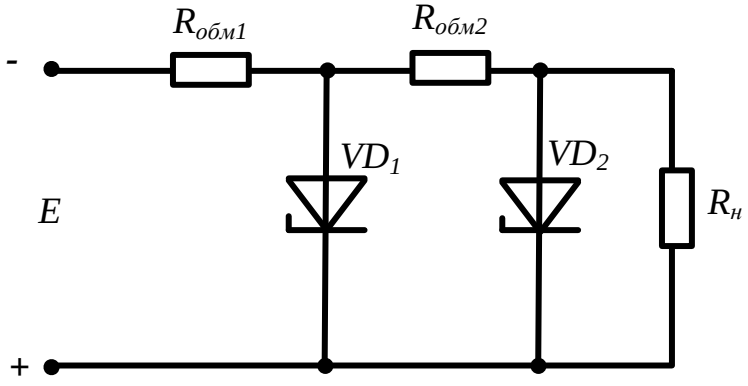


Рис. 9.6. Каскадне з'єднання стабілітронів

Необхідна умова використання каскадного з'єднання – стабілітрон VD_1 повинен мати більш високу напругу стабілізації $U_{ст1}$ ніж стабілітрон VD_2.

Недолік розглянутих схем стабілізації полягає в тому, що втрати потужності в самому стабілітроні і на $R_{обм}$ досить великі, особливо в схемі

каскадного з'єднання.

Ефективність стабілізації напруги характеризується ***коефіцієнтом стабілізації***

$$k_{ст} = \frac{\Delta E / E}{\Delta U_{ст} / U_{ст}},$$

де $\Delta E / E -$ відносний приріст напруги живлення; $\Delta U_{ст} / U_{ст} -$ відносний приріст напруги стабілізації.

Зазвичай $k_{ст} \in [10...30]$.

Стабістор

Стабістор – це напівпровідниковий діод, призначений для стабілізації напруги, робочою ділянкою якого є пряма вітка ВАХ.

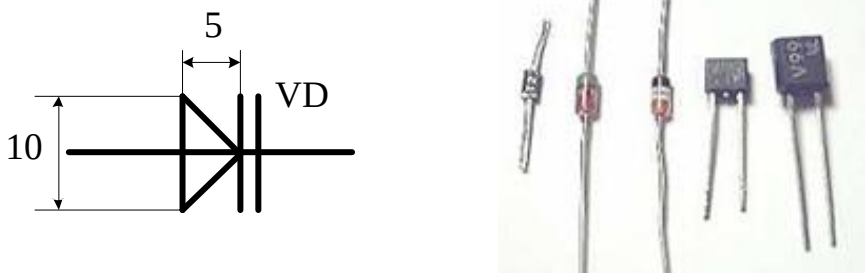
Зазвичай стабістори виготовляються із кремнію мають напругу стабілізації в середньому близько 0,7 В. Струм стабісторів може бути від 1 міліампера до декількох десятків міліампер. Для одержання стабільної напруги в одиниці вольтів, з'єднують послідовно декілька стабісторів.

Особливість стабісторів – негативний температурний коефіцієнт напруги стабілізації, тобто напруга стабілізації з підвищенням температури зменшується.

ЛЕКЦІЯ 10. ВАРИКАП. ТУНЕЛЬНИЙ ДІОД. ФОТОДІОД. СВІТЛОДІОД

Варикап (рис. 10.1) – це напівпровідниковий діод, принцип дії якого ґрунтується на залежності бар'єрної ємності $p-n$-переходу від зовнішньої напруги.

Можна сказати, що варикап – це конденсатор змінної ємності, керований зміною зворотної напруги. При зміні напруги, змінюється товщина *p*-*n*-переходу, тобто ємність між шарами напівпровідника. Сам перехід виступає в якості діелектрика.



а б

Рис. 10.1. Варикап:

а – умовне графічне позначення; б – варіанти зовнішнього вигляду

Варикапи застосовуються головним чином для настроювання коливальних контурів, а також в деяких спеціальних схемах, наприклад в параметричних підсилювачах.

Основною характеристикою варикапа є залежність його ємності від напруги – ***вольт-фарадна характеристика*** (рис. 10.2).

Залежність ємності варикапа від прикладеної напруги визначається технологією виготовлення *p*-*n*-переходу.

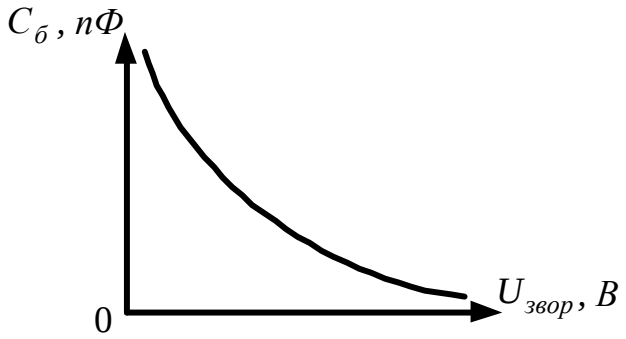


Рис. 10.2. Вольт-фарадна характеристика варикапа

Основні параметри варикапів

1. ***Номінальна ємність*** $C_{ном}$ – ємність, яку вимірюють між виводами варикапа за заданого зворотного зміщення при температурі навколишнього середовища 20°С.
2. ***Коефіцієнт перекривання за ємністю*** K_C – це відношення номінальної ємності варикапа, яку вимірюють при мінімальній зворотній напрузі, до мінімальної ємності, яку вимірюють при максимально допустимій зворотній напрузі.
3. ***Добротність*** Q – це відношення реактивного опору варикапа до активного (опору втрат).
4. ***Максимально припустима напруга*** $U_{\max}$ – максимальне миттєве значення змінної напруги, що забезпечує необхідну надійність при довготривалій роботі.
5. ***Температурний коефіцієнт ємності*** – відношення відносної зміни ємності при заданій напрузі до абсолютної зміни температури навколишнього середовища.
6. ***Максимально припустима потужність*** $P_{\max}$ – максимальне значення потужності, що розсіюється на варикапі, при якому забезпечена необхідна надійність при довготривалій роботі.

Для використання варикапа в якості конденсатора змінної ємності в

коливальному контурі він вмикається в електричне коло, як показано на схемі рис. 10.3.

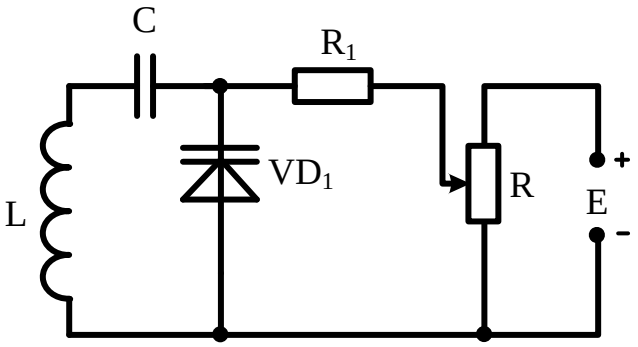


Рис. 10.3. Схема включення варикапа

Додатковий резистор R_1 з більшим опором включений для того, щоб добротність контуру помітно не знижувалася від шунтуючого впливу потенціометра R. Конденсатор С є розділовим (його ємність повинна бути в декілька десятків раз більше ємності варикапа). Змінюючи за допомогою потенціометра R зворотну напругу на варикапі, можна змінювати резонансну частоту контуру. Керуюча постійна напруга подається на варикап з потенціометра R через високоомний резистор R_1. Налаштування контуру відбувається переміщенням бігунця потенціометра.

Приклад 10.1

Яку напругу необхідно прикласти до варикапа ємністю C_1 , вольт-фарадна характеристика якого наведена на рис.10.4, щоб загальна ємність варикапа і послідовно з'єднаного з ним конденсатора ємністю C_2 =50 пФ становила 30 пФ?

Розв’язання

При послідовному з'єднанні конденсаторів загальна ємність дорівнює

$$\frac{1}{C_{заг}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \rightarrow$$

$$C_1 = \frac{C_{заг} C_2}{C_2 - C_{заг}} = \frac{30 \cdot 10^{-12} \cdot 50 \cdot 10^{-12}}{50 \cdot 10^{-12} - 30 \cdot 10^{-12}} = 75 \cdot 10^{-12}\ \text{Ф}.$$

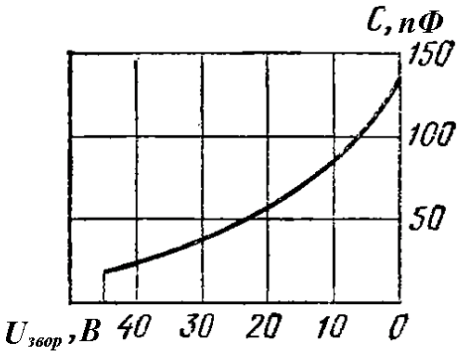


Рис. 10.4. Вольт-фарадна характеристика до прикладу 10.1

За графіком вольт-фарадної характеристики визначаємо, що ємності 75 пФ відповідає зворотна напруга 13 В.

Тунельний діод (рис. 10.5) – це напівпровідниковий діод, в якому використовується тунельний механізм переносу носіїв заряду через *p*-*n*-перехід і в вольт-амперній характеристиці якого при прямій напрузі є ділянка від'ємного диференційного опору (рис. 10.6).

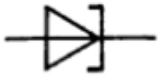


Рис. 10. 5. Умовне графічне позначення тунельного діоду

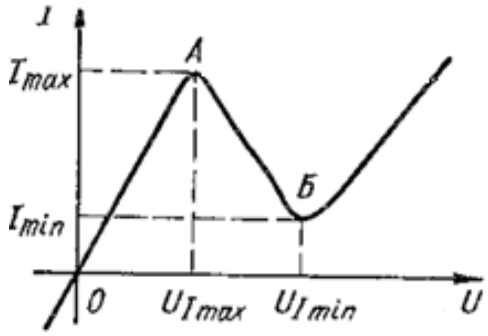


Рис. 10. 6. ВАХ тунельного діоду

Ділянка А-Б на рис. 10.6 відповідає від'ємному диференційному опору – тунельний діод може бути представлений деяким еквівалентним від'ємним опором заданої величини. Однак від'ємний опір є лише зручним математичним символом, а не реальною фізичною величиною і означає, що на деякій ділянці ВАХ приладу збільшення напруги зменшує струм (і навпаки).

Тунельний механізм полягає в тому, що електрон може пройти потенціальний бар'єр *p-n*-переходу, не змінюючи своєї енергії. Це можливо в тому випадку, якщо з іншого боку цього бар'єра є такий самий вільний енергетичний рівень, який займав електрон перед бар'єром. Імовірність тунельного переходу тим вище, ніж вужче потенціальний бар'єр і чим менше його висота.

Тунельний перехід електронів через p-n-перехід можливий в напівпровідниках, що мають високу концентрацію домішок ($10^{19}…10^{21} см^{-3}$) . За цих умов ширина *p-n*-переходу має порядок 10^{-2} *мкм*, а рівні Фермі розташовані в зоні провідності у напівпровіднику *n*-типу та у валентній зоні у напівпровідника *p*-типу.

Одностороння провідність *p-n*-переходу при тунельному ефекті повністю відсутня.

За призначенням тунельні діоди поділяються на: підсилювальні, генераторні, перемикаючі.

Переваги тунельних діодів:

1. Здатні працювати на досить високих частотах (до сотень гігагерц).
2. Більш широкий діапазон робочих температур (максимальна робоча температура може досягати значення 400^0C).
3. Споживають низьку потужність (не більше 1% потужності, що споживає звичайний напівпровідниковий діод).

Недоліком тунельних діодів є мала потужність, обумовлена низькими напругами (десяті частки вольта) і малими площами *p-n*-переходу.

Основні параметри тунельних діодів

У статичному режимі основними параметрами тунельного діода є струми і напруги в екстремальних точках ВАХ (рис. 10.6).

1. ***Струм "піка"*** – $I_{\max}$ – прямий струм у точці максимуму ВАХ.
2. ***Струм "западини"*** – $I_{\min}$ – прямий струм у точці мінімуму ВАХ;
3. ***Напруга "піка"*** – $U_{I_{\max}}$ – пряма напруга, що відповідає піковому струму.
4. ***Напруга западини*** – $U_{I_{\min}}$ – пряма напруга, що відповідає мінімальному струму.

Фотодіод (рис. 10.7) – напівпровідниковий діод, зворотний струм якого залежить від освітленості *p*-*n*-переходу.

а б

Рис. 10.7. Фотодіод:
а – умовне графічне позначення; б – зовнішній вигляд

Області застосування фотодіодів – фотометрія, фотоколориметрії, для контролю джерел світла, вимірювання інтенсивності освітлення, прозорості середовища, реєстрації і підрахунку ядерних часток, автоматичного регулювання і контролю температури та інших параметрів, зміна яких супроводжується зміною оптичних властивостей речовини або середовища. В повсякденному житті фотодіоди входять до складу пристроїв дистанційного керування, фотокамер, різноманітних сенсорних пристроїв, приладів для проведення комп'ютерної томографії тощо.

Зазвичай в якості фотодіода використовують напівпровідникові діоди з *p*-*n*-переходом, зміщеним в зворотному напрямі зовнішнім джерелом живлення.

Принцип роботи фотодіода грунтується на явищі ***фотоефекту***, який

полягає в наступному: при освітленні *p*-*n*-переходу і ділянок напівпровідників з різними типами провідності, що примикають до нього, потік падаючих на напівпровідник фотонів надає електронам (в напівпровіднику *n*-типу) і діркам (в напівпровіднику *p*-типу) додаткову енергію. Розпочинається процес генерації рухливих носіїв заряду. Частина з них, дифундуючи до переходу, досягає його межі, не встигнувши рекомбінувати. На межі переходу пари електрон-дірка розділяються електричним полем переходу. Неосновні носії, для яких поле *p*-*n*-переходу є прискорювальним, спрямовуються цим полем за межі переходу: дірки в *p*-, а електрони в *n*-область. Основні носії заряду затримуються полем переходу у своїй області. Внаслідок цього відбувається накопичення некомпенсованих зарядів і в *p*-*n*-переході створюється додаткова різниця потенціалів, яка називається ***фотоелектрорушійною силою*** (фото-ЕРС).

Величина фото-ЕРС залежить від інтенсивності світлового потоку і зазвичай становить десяті частки вольта. Якщо коло *p*-*n*-структури при цьому замкнуте, то в ньому під дією фото-ЕРС виникає електричний струм, обумовлений рухом неосновних носіїв заряду, який називається ***світловим струмом*** або ***фотострумом***.

Основні характеристики фотодіодів:

1. ***ВАХ*** (рис. 10.8) – $I = f(U)$ – визначає залежність струму фотодіоду від напруги на ньому при постійній величині світлового потоку.

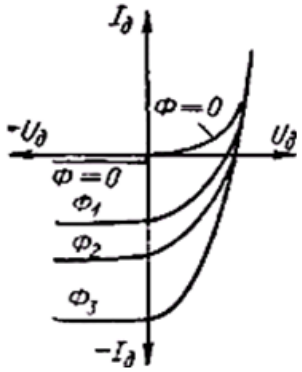


Рис. 10.8. Вольт-амперна характеристика фотодіода

2. ***Світлова характеристика*** – $I = f(\Phi)\big|_{U=const}$ – показує залежність струму фотодіоду від величини світлового потоку при постійній напрузі на

фотодіоді.

3. Спектральна характеристика – залежність спектральної чутливості від довжини хвилі падаючого на фотодіод світла.

Основні параметри фотодіодів:

1. ***Інтегральна чутливість – К*** – відношення фотоструму діода до інтенсивності падаючого світлового потоку від стандартного джерела.

2. ***Робоча напруга – $U_р$*** – напруга, прикладена до приладу у фотодіодному режимі.

3. ***Темновий струм*** – $I_{тем}$ – струм, що тече в колі діода при робочій напрузі і відсутності освітлення.

4. ***Довговічність*** – мінімальний термін служби при нормальних умовах експлуатації.

Напівпровідниковими світлодіодами (рис. 10.9) називають прилади з *p*-*n*-переходом, що випромінюють світло при проходженні через них прямого струму.

а б

Рис. 10.9. Світлодіод:
а – умовне графічне позначення; б – зовнішній вигляд

Основні області застосування – джерела світла в ліхтарях, світлофорах, елементи апаратури зв'язку, обчислювальної техніки, світлових інформаційних пристроїв, індикатори тощо.

Принцип роботи світлодіода можна пояснити наступним чином: при прикладанні до *p*-*n*-переходу прямої напруги спостерігається інтенсивна інжекція неосновних носіїв заряду: електронів у *p*-область і дірок у *n*-область.

Інжектовані носії рекомбінують з основними носіями даної області напівпровідника і їхня концентрація швидко зменшується по мірі віддалення від *p*-*n*-переходу вглиб напівпровідника. У напівпровідників, на основі карбіду кремнію, галію, миш'яку і деяких інших матеріалів, рекомбінація є випромінювальною – енергія рекомбінації виділяється у вигляді квантів випромінювання – фотонів. Тому в таких напівпровідниках проходження через *p*-*n*-перехід струму в прямому напрямку супроводжується некогерентним оптичним випромінюванням певного спектрального складу.

Залежно від ширини забороненої зони напівпровідника і особливостей рекомбінації носіїв заряду випромінювання може лежати в інфрачервоній, видимій або ультрафіолетовій частинах спектра. Найбільше поширення одержали світлодіоди, що випромінюють жовте, червоне і зелене світло. Створені також зразки світлодіодів, в яких є можливість підстроювати колір світіння.

Основні характеристики світлодіодів:

1. Спектральна характеристика – залежність відносної потужності випромінювання ($P / P_{пов}$) від довжини випромінюваної хвилі при заданій температурі середовища.
2. Характеристика направленості – визначає величину інтенсивності світлового випромінювання залежно від напрямку випромінювання.

Параметри світлодіодів:

1. Постійна пряма напруга $U_{пр}$ при максимально припустимому струмі.
2. Максимально припустимий прямий струм $I_{пр\,мах}$.
3. Яскравість світіння діода при максимально припустимому прямому струмі.
4. Повна потужність випромінювання при прямому постійному струмі певної величини.
5. Діапазон робочих температур.
6. Ширина діаграми направленості світлового випромінювання.

ЛЕКЦІЯ 11. ТРАНЗИСТОРИ

Транзистором називається напівпровідниковий елемент електронної техніки, який має два *p*-*n*-переходи, три виводи і дозволяє керувати струмом, що тече через нього, за допомогою зміни вхідної напруги або струму, поданих на один з електродів.

Основні функції, які виконують транзистори – підсилення, генерування та перетворення електричних сигналів.

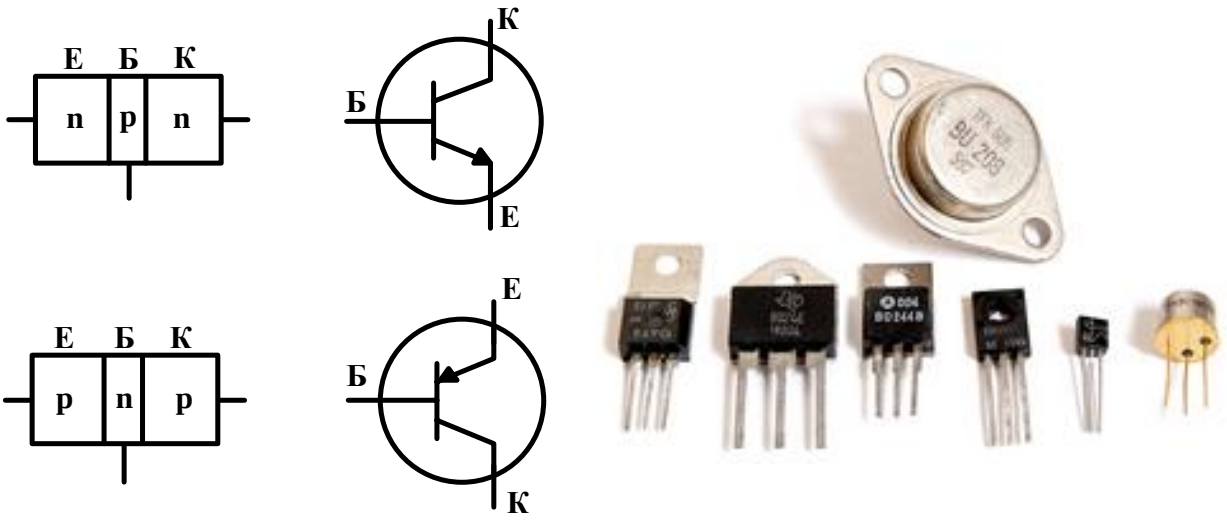
Сьогодні транзистори та багатотранзисторні інтегральні схеми є основними елементами сучасної електроніки. Вони широко використовуються в підсилювачах і логічних електронних схемах, в радіоприймачах, телевізорах, системах пожежної та охоронної сигналізації, системах вприскування палива і запалювання, системах керування, зв'язку, передачі і обробки даних, радіолокаційних системах тощо.

Класифікація транзисторів проводиться за наступними ознаками:

1. За основним напівпровідниковим матеріалом (германієві; кремнієві; арсенід-галієві).
2. За структурою (польові; біполярні; однопереходні).
3. За потужністю розсіювання (транзистори малої потужності (до 100 мВт); транзистори середньої потужності (0,1…1 Вт); потужні транзистори (більше 1 Вт)).
4. За виконанням (дискретні; транзистори в складі інтегральних схем).
5. За матеріалом і конструкцією корпусу (метало-скляні; пластмасові; керамічні).

Біполярним називається транзистор, робота якого заснована на використанні носіїв заряду обох знаків (рис. 11.1).

Біполярний транзистор (БТ) являє собою пластину германію, кремнію, або іншого напівпровідника, у якій створені три області з різною електропровідністю.



а б с

Рис. 11.1 Біполярний транзистор:
а – схематична будова; б – умовне графічне позначення; в – варіанти зовнішнього оформлення

Середня область транзистора називається ***базою***, одна крайня область – ***емітером***, інша – ***колектором***. Таким чином, у транзисторі є два *p*-*n*-переходи: емітерний (між емітером і базою) і колекторний (між базою і колектором). Від бази, емітера і колектора відходять виводи, які позначаються відповідно «Б», «Е» і «К». Струми в провідниках бази, емітера і колектора позначають відповідно $I_{Б,}\, I_{E,}\, I_{K}$. Напруги між електродами позначають подвійними індексами, наприклад напруга між базою і емітером $U_{Б-E}$, між колектором і базою $U_{K-Б}$.

На умовному графічному позначенні транзисторів *p* - *n* - *p* і *n* - *p* - *n* стрілка показує умовний (від плюса до мінуса) напрям струму в проводі емітера при прямій напрузі на емітерному переході.

У схемах із транзисторами зазвичай утворюється два кола. Вхідне, або ***керуюче, коло*** призначене для керування роботою транзистора (в нього вмикається джерело, коливання якого потрібно підсилити). У вихідному, або

керованому колі отримують підсилені коливання (у це коло вмикають навантаження).

Принцип роботи біполярного транзистора. Для розгляду принципу роботи біполярного транзистора скористаємося схемою *n-p-n* транзистора (рис. 11.2), в режимі без навантаження, коли у вхідне і вихідне кола ввімкнені тільки джерела постійних напруг живлення E_1 (в емітерному колі в прямому напрямку) та E_2 (в колекторному колі в зворотному напрямку). Зазвичай $|E_2| >> |E_1|$.

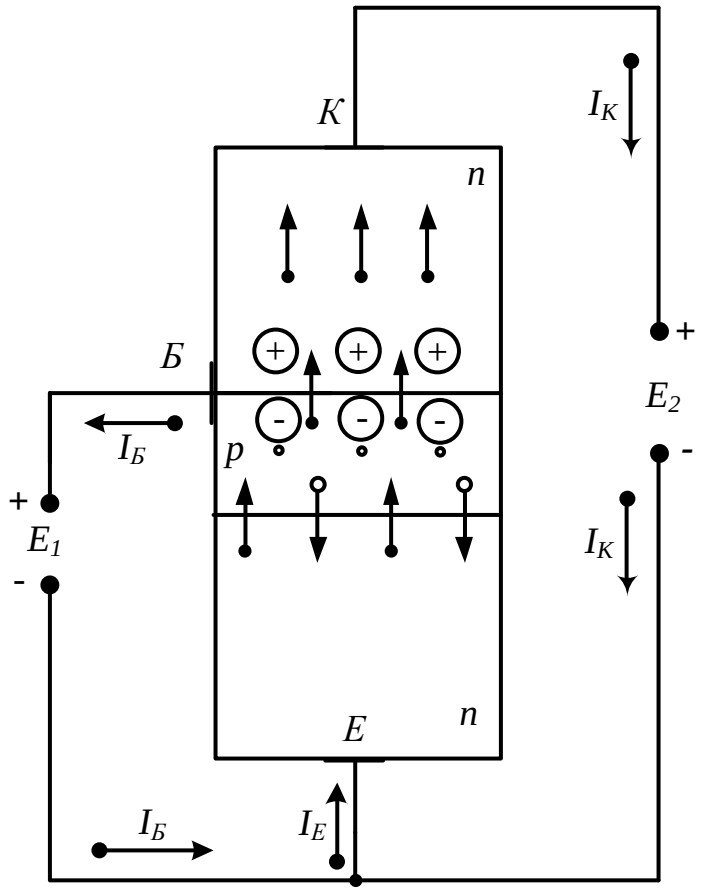


Рис. 11.2. Схема для пояснення принципу роботи транзистора

Зі схеми на рис. 11.2, а видно, що напруги між електродами транзистора пов'язані залежністю

$$U_{K-E} = U_{K-Б} + U_{Б-E}.$$

ВАХ емітерного переходу являє собою характеристику напівпровідникового діода при прямому струмі, а ВАХ колекторного переходу подібна до характеристики діода при зворотному струмі.

Принцип роботи транзистора полягає в тому, що пряма напруга емітерного переходу, тобто ділянки база-емітер ($U_{Б-E}$), істотно впливає на струми емітера і колектора: чим більше $U_{Б-E}$, тим більше I_E і I_K. При цьому зміни струму колектора лише незначно менше змін струму емітера. Таким чином, напруга $U_{Б-E}$, тобто вхідна напруга, керує струмом колектора. Підсилення електричних коливань за допомогою БТ засноване саме на цьому явищі.

Фізичні процеси в транзисторі відбуваються в такий спосіб. При збільшенні прямої вхідної напруги $U_{Б-E}$ знижується потенціальний бар'єр в емітерному переході і відповідно зростає струм через цей перехід – струм емітера I_E. Електрони цього струму інжектують з емітера в базу, для якої вони є неосновними носіями заряду. Товщина бази досить мала і концентрація дірок у ній невелика, тому більшість електронів, не встигаючи рекомбінувати з дірками при дифузії через базу, доходять до колекторного переходу. Лише невелика частина електронів рекомбінує в базі з дірками. В результаті рекомбінації виникає струм бази. На основі першого закона Кірхгофа $I_E = I_K + I_Б$. Бажано, щоб струм бази був якомога меншим (для цього базу роблять дуже тонкою і зменшують в ній концентрацію домішок) Зазвичай $I_Б << I_E$ тому $I_K \approx I_E$.

Оскільки колекторний перехід працює при зворотній напрузі, то в цьому переході виникають об'ємні заряди. Між ними виникає електричне поле. Воно сприяє просуванню (екстракції) через колекторний перехід електронів, що прийшли сюди з емітера, тобто вштовхує електрони в область колектора.

Важлива ***властивість транзистора*** – приблизно лінійна залежність між його струмами, тобто всі три струми транзистора змінюються майже пропорційно один одному.

Відповідно, до протікання фізичних процесів в БТ, ***емітером*** називається область транзистора, призначенням якої є інжекція носіїв заряду в базу. ***Колектором*** називається область, призначенням якої є екстракція носіїв заряду з бази. А ***базою*** є область, у яку інжектуються неосновні для цієї області носії заряду.

В транзисторі типу *p-n-p* відбуваються аналогічні процеси, але міняються місцями електрони і дірки, а також змінюються полярності прикладених напруг і напрями струмів.

Розрізняють чотири ***режими роботи БТ***: активний, насичення, відсікання і інверсний.

При роботі в ***активному режимі*** на емітерному переході напруга пряма, а на колекторному – зворотна.

Режим відсікання, або запирання, досягається подачею зворотної напруги на обидва переходи.

Якщо ж на обох переходах напруга пряма, то транзистор працює в ***режимі насичення.***

При ***інверсному режимі*** роботи до емітерного переходу прикладена зворотна напруга, а до колекторного – пряма.

Схеми включення транзисторів

Розрізняють три можливі схеми включення транзистора (рис. 11.3): зі спільною базою (СБ), зі спільним емітером (СЕ) і зі спільним колектором (СК). Така термінологія вказує, який з електродів транзистора є спільним для його вхідного і вихідного кіл.

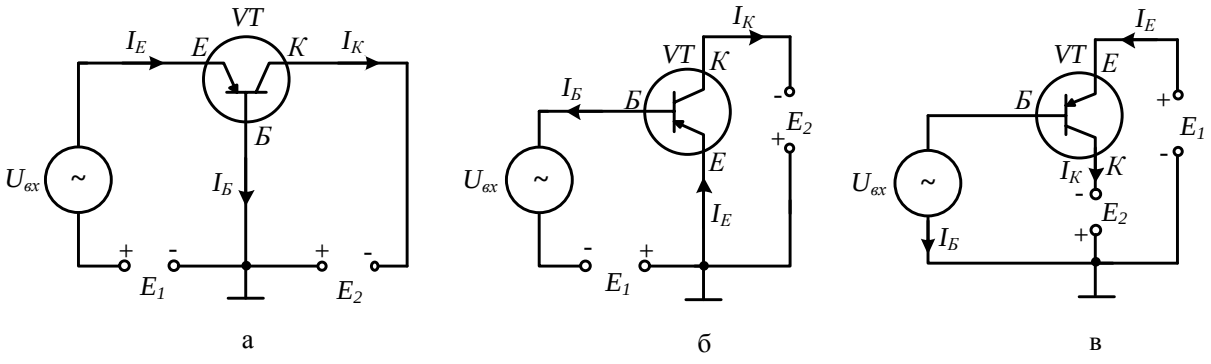


Рис. 11.3. Схеми включення транзисторів:

а – зі спільною базою; б – зі спільним емітером; в – зі спільним колектором

У ***схемі зі спільною базою (рис. 11.3, а)*** вхідний сигнал подається до виводів емітера і бази, а джерело живлення включене між виводами бази і колектора. Таким чином, база є спільним електродом для вхідного і вихідного кіл.

Істотним недоліком схеми зі СБ є низький вхідний опір (одиниці - десятки ом), оскільки в багатокаскадних схемах цей опір шунтує опір навантаження попереднього каскаду і різко знижує підсилення цього каскаду по напрузі і потужності.

У ***схемі зі спільним емітером (рис. 11.3, б)*** вхідний сигнал подається до виводів Е-Б, а джерело живлення включене між виводами Е-К. Таким чином, емітер є спільним електродом для вхідного та вихідного кіл.

Особливістю схеми зі СЕ є те, що вхідним струмом в ній є малий по величині струм $i_Б$.

Перевагою схеми зі СЕ є можливість живлення її від одного джерела напруги, оскільки на базу і на колектор подаються напруги живлення одного знака. Тому схема зі СЕ на сьогодні є найпоширенішою.

Недоліки даної схеми – погані частотні та температурні властивості, низький вхідний опір. З підвищенням частоти підсилення в схемі значно знижується, а режим роботи схеми зі СЕ значно залежить від температури.

В ***схемі зі спільним колектором (рис. 11.3, в)*** вхідний сигнал подається до виводів база-колектор. Вхідним струмом є струм $I_Б$, а вихідним – струм I_E.

Схема зі СК називається ***емітерним повторювачем***. Вона практично не дозволяє одержати підсилення по напрузі, але підсилює сигнал по потужності (по струму) і є базовою для підсилювачів потужності, джерел живлення і схем стабілізації живлення, часто застосовується в якості буферного каскаду в приймальних підсилювачах.

Приклад 11.1

Зобразити схеми включення транзистора зі спільною базою для випадку *p-n-p* транзистора. Показати полярності напруг живлення і напрямки струмів $I_{Б,}\, I_{E,}\, I_K$ для випадків роботи транзистора: а) в режимі відсікання; б) в активному режимі; в) в інверсному режимі.

Розв'язання

Зобразимо схему включення *p-n-p* транзистора зі СБ (рис. 11.4).

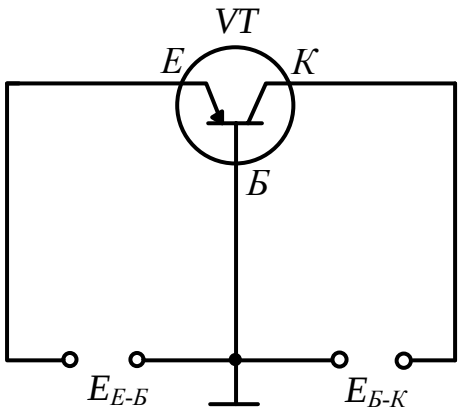


Рис. 11.4. Схема включення *p-n-p* транзистора зі СБ

Оскільки різні схеми включення транзистора відрізняються полярністю підключення джерела і, відповідно напрямками струмів, покажемо полярності напруг живлення і напрямки струмів для кожного режиму (рис. 11.5).

На умовному графічному позначенні транзистора стрілка показує умовний (від "+" до "-") напрям струму в колі емітера при прямій напрузі на емітерному переході.

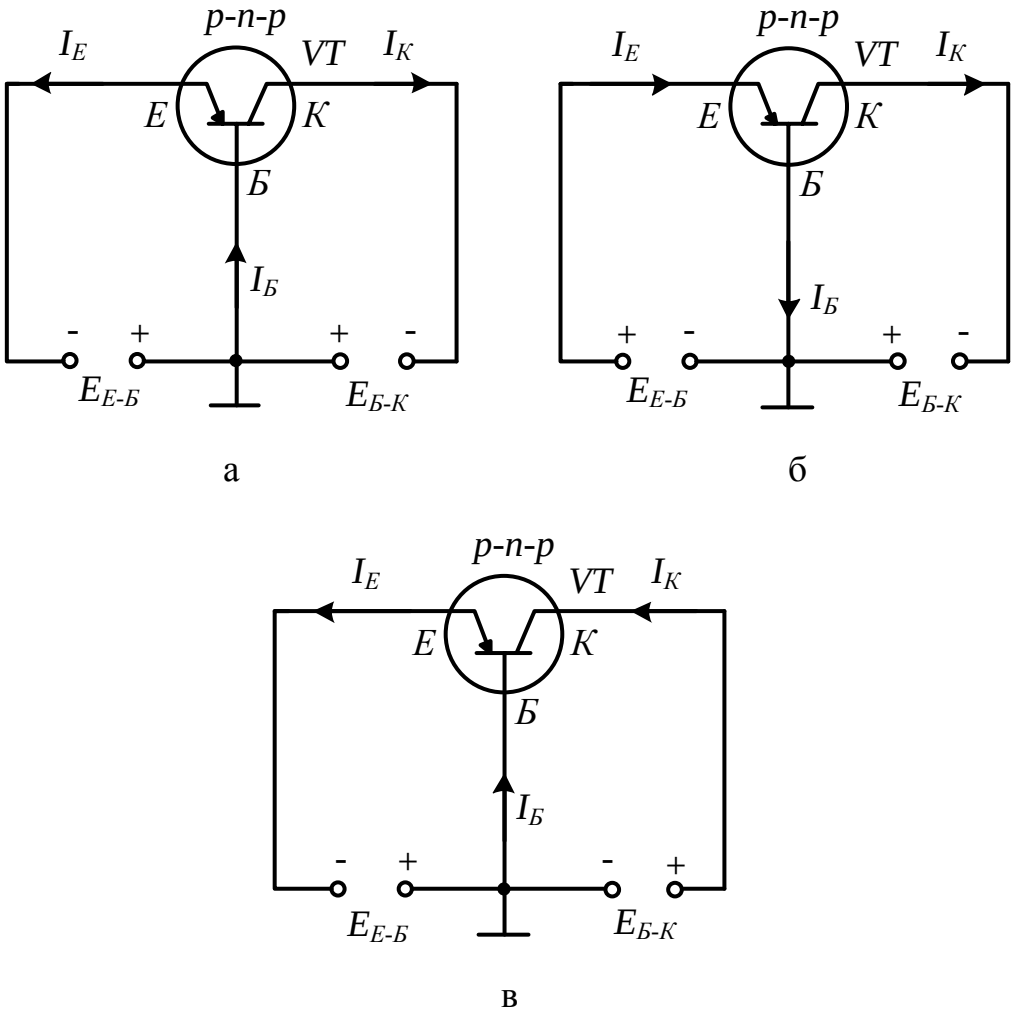


Рис. 11.5. Схема включення *p-n-p* транзистора зі СБ:
а – в режимі відсікання; б – в активному режимі; в – в інверсному режимі

Приклад 11.2

Транзистор типу *p-n-p* включений по схемі зі спільним емітером (рис. 11.6). Визначити, в якому режимі працює транзистор, якщо:

1) $U_{Б-E} = -0,4$ В; $U_{K-E} = -0,3$ В.

2) $U_{Б-E} = -0,4$ В; $U_{K-E} = -10$ В.

3) $U_{Б-E} = 0,4$ В; $U_{K-E} = -10$ В.

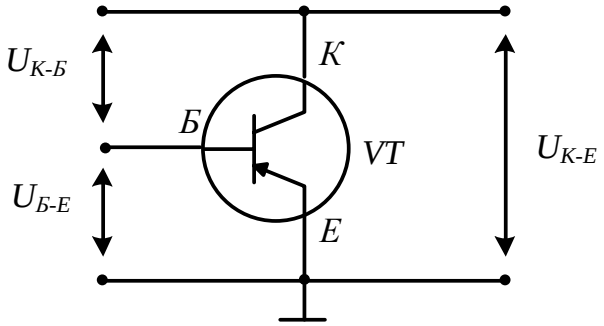


Рис. 11.6. Схема до прикладу 11.2

Розв’язання

$$U_{\text{К}-\text{Е}} = U_{\text{К}-\text{Б}} + U_{\text{Б}-\text{Е}}.$$

Для того, щоб визначити режим роботи транзистора, необхідно знати, які напруги прикладені до його емітерного та колекторного переходів, тобто знати, чому дорівнюють $U_{\text{Е}-\text{Б}}$ і $U_{\text{К}-\text{Б}}$.

$$U_{\text{Е}-\text{Б}} = -U_{\text{Б}-\text{Е}};$$

$$U_{\text{К}-\text{Б}} = U_{\text{К}-\text{Е}} - U_{\text{Б}-\text{Е}}.$$

Тоді:

1) $U_{\text{Е}-\text{Б}} = 0{,}4$ В, $U_{\text{К}-\text{Б}} = -0{,}3 - (-0{,}4) = 0{,}1$ В.

На обох переходах пряма напруга, тому режим насичення.

2) $U_{\text{Е}-\text{Б}} = 0{,}4$ В, $U_{\text{К}-\text{Б}} = -10 - (-0{,}4) = -9{,}6$ В.

На емітерному переході пряма напруга, на колекторному переході – зворотна, тому активний режим.

3) $U_{\text{Е}-\text{Б}} = -0{,}4$ В,

$U_{\text{К}-\text{Б}} = -10 - 0{,}4 = -10{,}4$ В.

На обох переходах зворотна напруга, тому режим відсікання.

ЛЕКЦІЯ 12. СТАТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНЗИСТОРА. ДИНАМІЧНИЙ РЕЖИМ РОБОТИ ТРАНЗИСТОРА. ТРАНЗИСТОР ЯК АКТИВНИЙ ЧОТИРИПОЛЮСНИК

Статичні характеристики транзистора показують залежність між струмами і напругами на його вході і виході та використовуються для розрахунку робочого режиму транзистора.

Для схеми зі СБ вхідна характеристика – це залежність струму емітера від напруги між емітером і базою при постійній величині напруги між колектором і базою.

$$I_E = f\left(U_{E-Б}\right)\Big|U_{K-Б} = const\ .$$

Типові вхідні статичні характеристики транзистора для схеми зі СБ наведені на рис. 12.1, а:

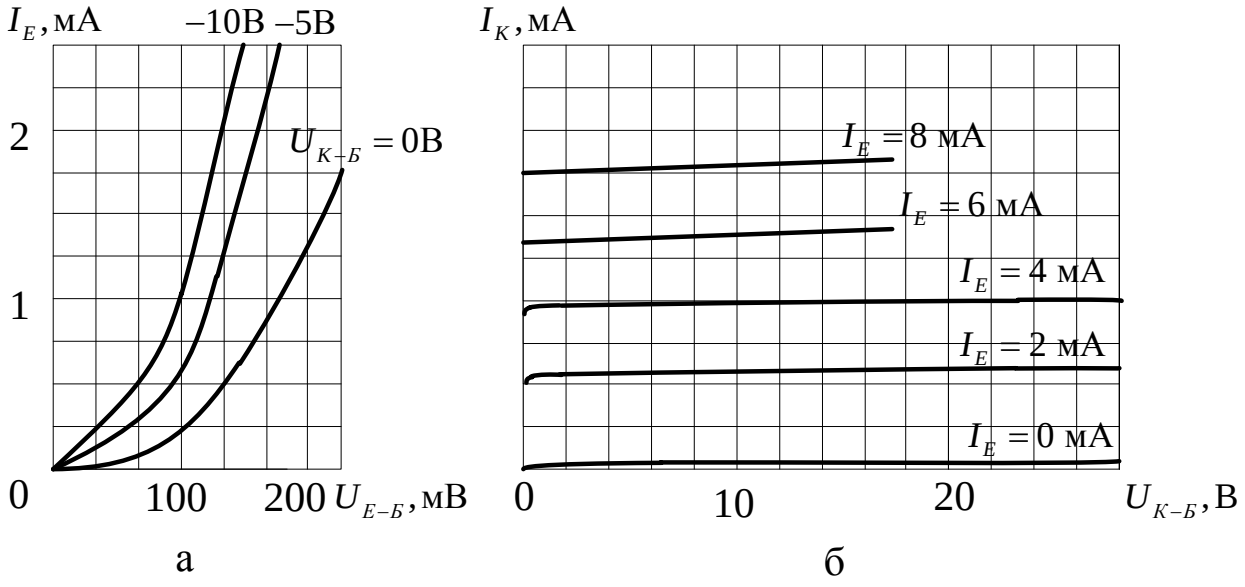


Рис. 12.1. Статичні характеристики біполярного транзистора, включеного по схемі зі СБ:

а – вхідна; б – вихідна

З графіка видно, що вхідні характеристики аналогічні ВАХ *p-n*-переходу

для прямого струму, причому зміна напруги $U_{К-Б}$ не значно впливає на струм емітера. Це пояснюється тим, що електричне поле, створюване напругою $U_{К-Б}$, в схемі зі СБ майже повністю зосереджене в колекторному переході і не впливає на проходження зарядів через емітерний перехід.

Вихідні характеристики транзистора для схеми зі СБ – це залежність струму колектора від напруги на колекторі при постійних значеннях струму емітера.

$$I_K = f\left(U_{К-Б}\right)\Big| I_E = const \ .$$

Типові вихідні статичні характеристики транзистора для схеми зі СБ наведені на рис. 12.1, б. При нормальній робочій полярності напруги $U_{К-Б}$, коли колекторний перехід працює у зворотному напрямку, вихідні характеристики являють собою майже прямі лінії, що йдуть із дуже невеликим нахилом. Це пояснюється тим, що колекторний струм виникає за рахунок дифузії носіїв зарядів, що проникають із емітера через базу в колектор. Тому величина колекторного струму визначається головним чином величиною струму емітера і незначно залежить від напруги $U_{К-Б}$, прикладеної до колекторного переходу. Навіть при $U_{К-Б} = 0$ відбувається явище екстракції і струм колектора може мати досить велике значення, що залежить від величини струму емітера.

При $I_E = 0$ характеристика виходить із початку координат, а потім іде на невеликій висоті майже паралельно осі абсцис. Вона відповідає характеристиці зворотного струму *p*-*n*-переходу.

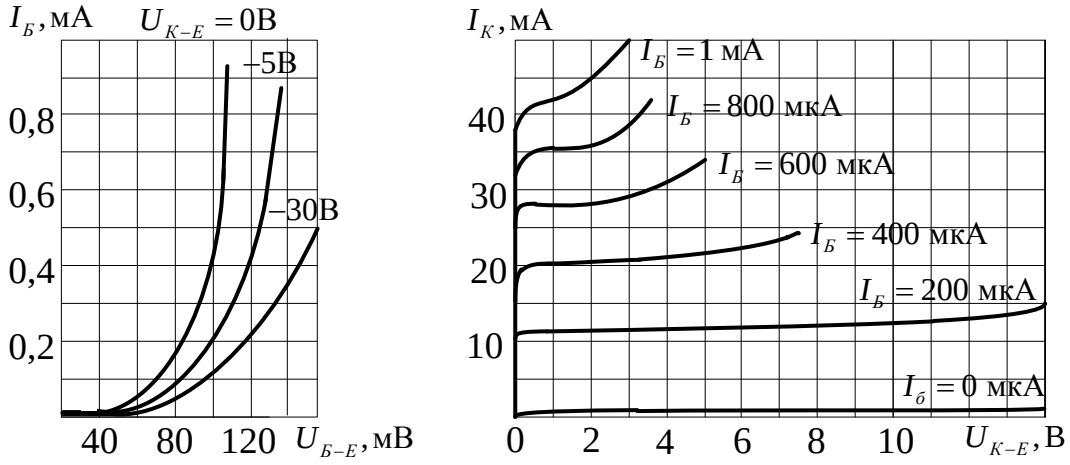
Для схеми зі СЕ статична вхідна характеристика – це залежність струму бази від напруги між базою і емітером при постійному значенні напруги між колектором і емітером.

$$I_Б = f\left(U_{Б-E}\right)\Big| U_{K-E} = const \, .$$

Вихідні характеристики транзистора для схеми зі СЕ – це залежності струму колектора від напруги між колектором і емітером при постійному струмі бази.

$$I_K = f\left(U_{K-E}\right)\Big|I_Б = const\,.$$

Типові вхідні та вихідні статичні характеристики транзистора для схеми зі СЕ показані на рис. 12.2.



а б

Рис. 12.2. Статичні характеристики біполярного транзистора, включеного по схемі зі СЕ:
а – вхідна; б – вихідна

З графіків на рис. 12.2, а видно, що зі зростанням зворотної напруги U_{K-E} струм $I_Б$ зменшується. Це пояснюється тим, що при збільшенні U_{K-E} зростає напруга, прикладена до колекторного переходу, зменшується імовірність рекомбінації носіїв заряду в базі, оскільки майже всі носії швидко втягуються в колектор.

Динамічний режим роботи транзистора

В практичних схемах транзисторних підсилювачів у вихідне коло транзистора поряд із джерелом живлення включають опір навантаження, а у вхідне – джерело сигналу, який необхідно підсилити (рис. 12.3). Напруга на емітерний перехід подається через резистор $R_{\text{Б}}$, величина якого визначає вихідний струм бази транзистора за відсутністю вхідного сигналу. Резистор $R_{\text{н}}$ – навантажувальний резистор транзисторного каскаду, призначений для подачі на коллектор транзистора електричного струму від джерела живлення.

Режим роботи транзистора з навантаженням називається ***динамічним***. У цьому режимі струми і напруги на електродах транзистора не є постійними, а невпинно змінюються.

Розглянемо роботу транзистора, включеного в підсилювальний каскад по схемі зі СЕ, в динамічному режимі.

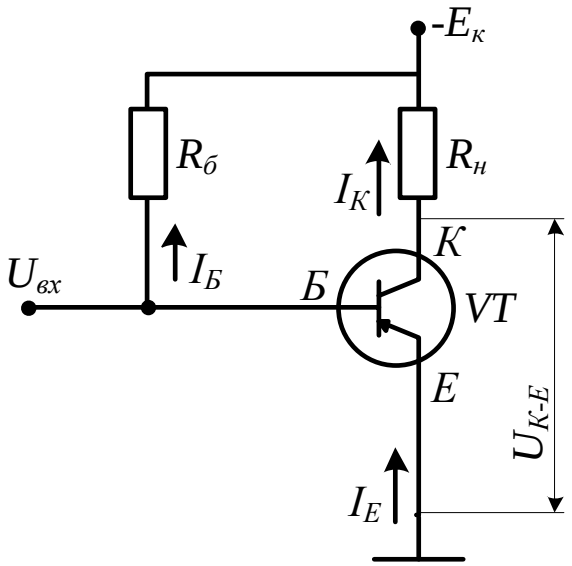


Рис. 12.3. Схема підсилювального каскаду

Напруга джерела живлення E_K розподіляється між ділянкою колектор-емітер (виходом схеми) і навантажувальним опором *Rн* таким чином, що напруга

$$U_{K-E} = E_K - I_K R_н . \qquad (12.1)$$

Вираз (12.1) являє собою ***рівняння динамічного режиму для вихідного кола***. Зміни напруги на вході транзистора викликають відповідні зміни струму емітера, бази, і відповідно, струму колектора. Це призводить до зміни напруги на опорі *Rн*, в результаті чого змінюється і напруга U_{K-E}.

Звернемо увагу на те, що живлення транзистора в розглянутій схемі (як і у будь-якій іншій схемі зі СЕ) забезпечується від одного джерела *Ек*.

Характеристики транзистора в динамічному режимі відрізняються від характеристик статичного режиму, оскільки вони визначаються не лише властивостями самого транзистора, а і властивостями елементів схеми.

Найчастіше використовують вихідні та вхідні динамічні характеристики (навантажувальні прямі). Будують їх на базі статичних вихідних та вхідних характеристик транзистора наступним чином.

При значенні $I_K = 0$ з рівняння (12.1) маємо $U_{K-E} = E_K$ (точка В на рис. 12.4, а). Ця точка відповідає випадку, коли струм колектора дорівнює нулю. При цьому струм у навантажувальному опорі відсутній і падіння напруги на опорі навантаження дорівнює нулю. Отже, вся напруга джерела живлення $E_к$ виявляється прикладеною до ділянки колектор-емітер транзистора.

При $U_{K-E} = 0$ струм $I_K = \frac{E_K}{R_н}$ (точка А на рис. 12.4, а). Оскільки навантаження $R_н$ є чисто активним, то, з'єднуючи прямою ці дві точки, отримуємо динамічну вихідну характеристику *AB*. Всі проміжні положення точок на навантажувальній прямій характеризують можливі напруги і струми у відповідних колах транзистора при подачі сигналу з врахуванням опору навантаження. Будь-якому струму бази відповідають цілком певні значення струму колектора і колекторної напруги.

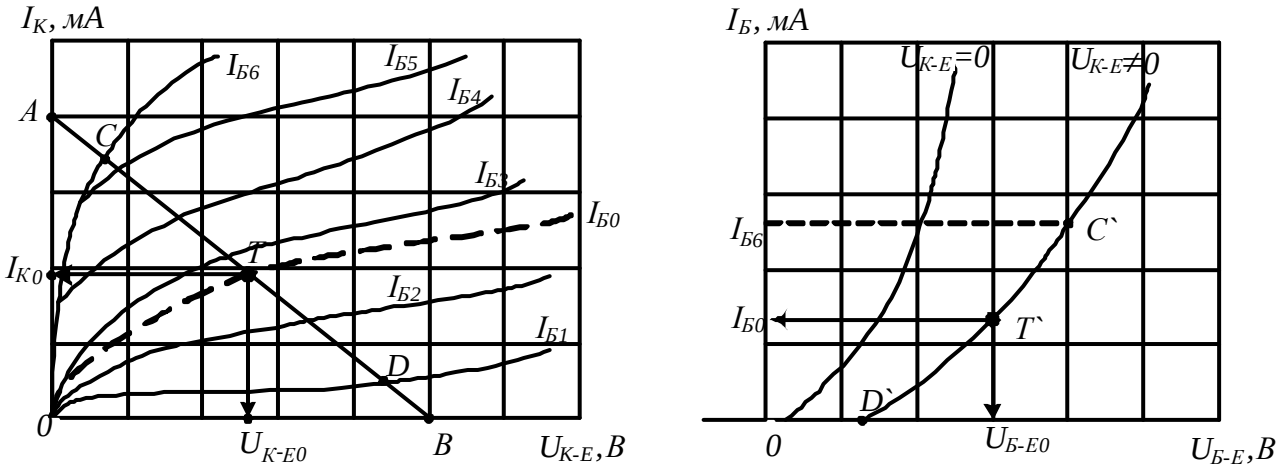


Рис. 12.4. Побудова динамічних характеристик транзистора:
а – вихідна; б – вхідна

Для отримання досить великої вихідної потужності в якості робочої ділянки доцільно розглядати відрізок *CD*. Точка *C* – це перетин навантажувальної прямої *AB* з вихідною характеристикою, що відповідає найбільшому струму бази (рис. 2.7, а), точка *D* – перетин АВ з вихідною характеристикою, що відповідає найменшому ненульовому струму бази (рис. 2.7, а).

Визначаємо струм $I_{Б0}$ що є середнім по відношенню до струмів бази в точках *C* і *D*:

$$I_{Б0} = \frac{I_{Б6} + I_{Б1}}{2}.$$

Якщо на статичних характеристиках транзистора, що використовуються для розрахунку динамічного режиму, не наведена вихідна статична характеристика для знайденого струму бази $I_{Б0}$, її потрібно добудувати самостійно (врахувати при цьому, що однаковим змінам $I_Б$ відповідають однакові зміни $I_К$).

Робоча точка лежить на перетині динамічної вихідної характеристики і статичної вихідної характеристики, що відповідає струму бази $I_{Б0}$. Координати робочої точки $T = (U_{К\text{-}Е0}; I_{К0})$ визначають значення постійної складової струму колектора $I_{К0}$ і напруги між колектором і емітером $U_{К\text{-}Е0}$ при відсутності змінного вхідного сигналу.

Будуємо динамічну характеристику на вхідних статичних характеристиках транзистора.

Якщо задано сімейство вхідних характеристик транзистора, то можна побудувати вхідну динамічну характеристику шляхом переносу по точкам на це сімейство вихідної динамічної характеристики. Якщо ж в довіднику наведені вхідні статичні характеристики тільки для двох значень напруги між колектором і емітером – $U_{К\text{-}Е} = 0$ і $U_{К\text{-}Е} \neq 0$, то в якості вхідної динамічної характеристики обирають статичну вхідну характеристику для $U_{К\text{-}Е} \neq 0$.

На цій характеристиці (рис. 12.4, б) відмічаємо точки D', T', C', що відповідають значенням $I_{Б1}$, $I_{Б0}$, $I_{Б6}$. Отримуємо координати робочої точки на вхідних характеристиках $T' = (U_{Б\text{-}Е0}; I_{Б0})$.

Транзистор як активний чотириполюсник

Чотириполюсником називається частина електричного кола, що розглядається по відношенню до будь-яких двох пар її затискачів (рис. 12.4). Чотириполюсником можна вважати будь-який пристрій з двома парами затискачів, включене між джерелом і споживачем електричної енергії, коли предметом дослідження є лише струми і напруги на затискачах пристрою (струми і напруги всередині його не цікавлять). Затискачі чотириполюсника, до яких підключають джерело називаються ***вхідними***, а затискачі, до яких підключають навантаження – ***вихідними***. Якщо чотириполюсник містить джерело енергії (має здатність підсилювати потужність електричних коливань), то він називається ***активним***, в іншому випадку – ***пасивним***.

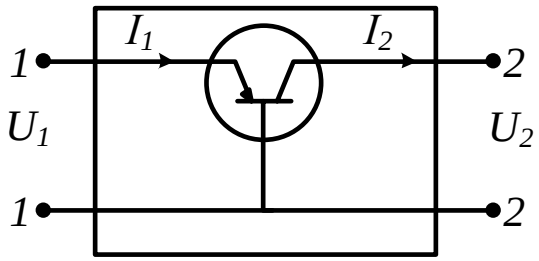


Рис. 12.5. Чотириполюсник

Транзистор у загальному випадку являє собою ***активний нелінійний чотириполюсник.***

Згідно теорії чотириполюсників, співвідношення між струмами і напругами на вході і виході чотириполюсника можуть бути записані у вигляді:

$$\begin{cases} U_1 = h_{11} I_1 + h_{12} U_2, \\ I_2 = h_{21} I_1 + h_{22} U_2. \end{cases}$$

Коефіцієнти $h_{11}, h_{12}, h_{21}, h_{22}$, що входять до цих рівнянь, називаються $h-$ параметрами транзистора, а про систему говорять, що вона записана в формі $h-$параметрів.

Кожний із цих параметрів має певний фізичний зміст.

Зокрема, параметр h_{11} являє собою величину ***вхідного опору транзистора*** при короткому замиканні на виході $(U_2 = 0)$ і вимірюється в омах:

$$h_{11} = U_1 / I_1 \big| U_2 = 0.$$

Параметр h_{12} називається ***коефіцієнтом зворотного зв'язку*** і дорівнює відношенню вхідної напруги до вихідної при розімкненому вхідному колі ($I_1 = 0$):

$$h_{12} = U_1 / U_2 \big| I_1 = 0 .$$

Параметр h_{21} називається ***коефіцієнтом підсилення по струму*** і дорівнює відношенню вихідного струму до вхідного при короткозамкненому виході ($U_2 = 0$):

$$h_{21} = I_2 / I_1 \big| U_2 = 0 .$$

Параметр h_{22} являє собою ***вихідну провідність транзистора*** при розімкнутих вхідних затискачах ($I_1 = 0$) і виміряється в См:

$$h_{22} = I_2 / U_2 \big| I_1 = 0 .$$

Якщо відомі $h-$параметри для схеми зі СБ, то легко шляхом перерахування одержати $h-$параметри для схеми зі СЕ і СК.

На сьогоднішній день $h-$параметри найбільш поширені при розрахунках транзисторних низькочастотних схем. Вони легко визначаються експериментально, а також графічно по статичним характеристикам транзистора.

Приклад 12.1.

Транзистор включений в підсилювальний каскад по схемі зі спільним емітером і має статичні характеристики, наведені на рис. 12.6. Визначити $h-$параметри в робочій точці Т.

Розв’язання

Для розрахунку $h-$параметрів по статичним характеристикам транзистора використаємо метод «двох точок», згідно якого значення параметра, визначеного вздовж відрізка, справедливе і для точки, що лежить посередині цього відрізка (робочої точки).

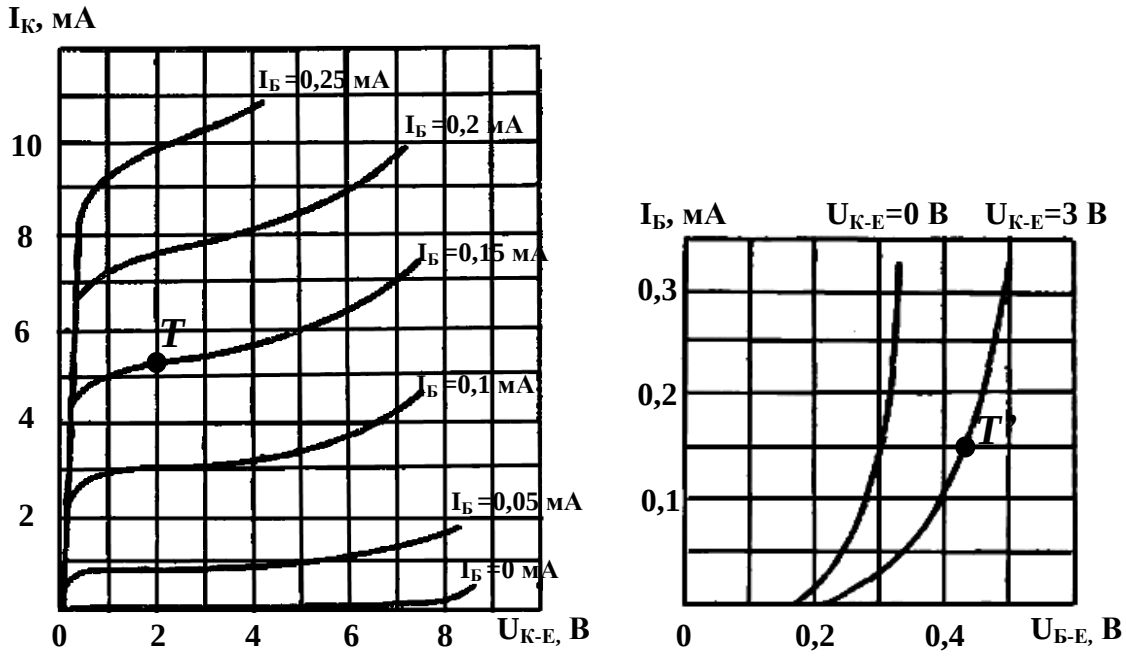


Рис. 12.6. Статичні характеристики транзистора для приклада 12.1:
а – вихідні; б – вхідні

Параметр h_{11} визначаємо по вхідній статичній характеристиці транзистора, що відповідає напрузі $U_{\text{К-Е}} = 3$ В (рис. 12.7, а).

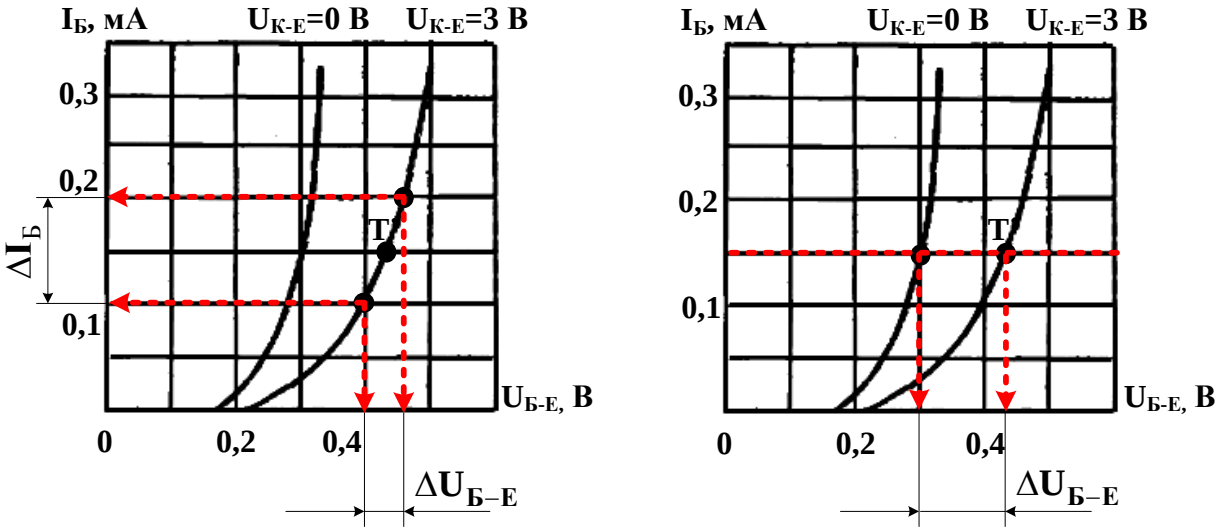
$$h_{11} = \left.\frac{\Delta U_{\text{Б-Е}}}{\Delta I_{\text{Б}}}\right|_{U_{\text{К-Е}}=U_{\text{К-Е0}}} = \frac{0,46-0,4}{(0,2-0,1)\cdot 10^{-3}} = 600 \text{ Ом}.$$

Параметр h_{12} визначаємо по вхідним характеристикам транзистора (рис. 12.7, б).

$$h_{12} = \left.\frac{\Delta U_{\text{Б-Е}}}{\Delta U_{\text{К-Е}}}\right|_{I_{\text{Б}}=I_{\text{Б0}}} = \frac{0,43-0,3}{3-0} = 0,043.$$

Параметр h_{21} визначаємо по вихідним характеристикам транзистора (рис. 12.8, а).

$$h_{21} = \left.\frac{\Delta I_К}{\Delta I_Б}\right|_{U_{К\text{-}Е}=U_{К\text{-}Е0}} = \frac{(7{,}5-3)\cdot 10^{-3}}{(0{,}2-0{,}1)\cdot 10^{-3}} = 45.$$



а б

Рис. 12.7. Визначення h – параметрів по вхідним статичним характеристикам транзистора:

а – h_{11}; б – h_{12}

Параметр h_{22} визначаємо по вихідній характеристиці транзистора, що відповідає $I_Б = 0{,}15$ мА (рис. 12.8, б).

$$h_{22} = \left.\frac{\Delta I_К}{\Delta U_{К\text{-}Е}}\right|_{I_Б=I_{Б0}} = \frac{(5{,}5-5)\cdot 10^{-3}}{3-1} = 250 \text{ мкСм}.$$

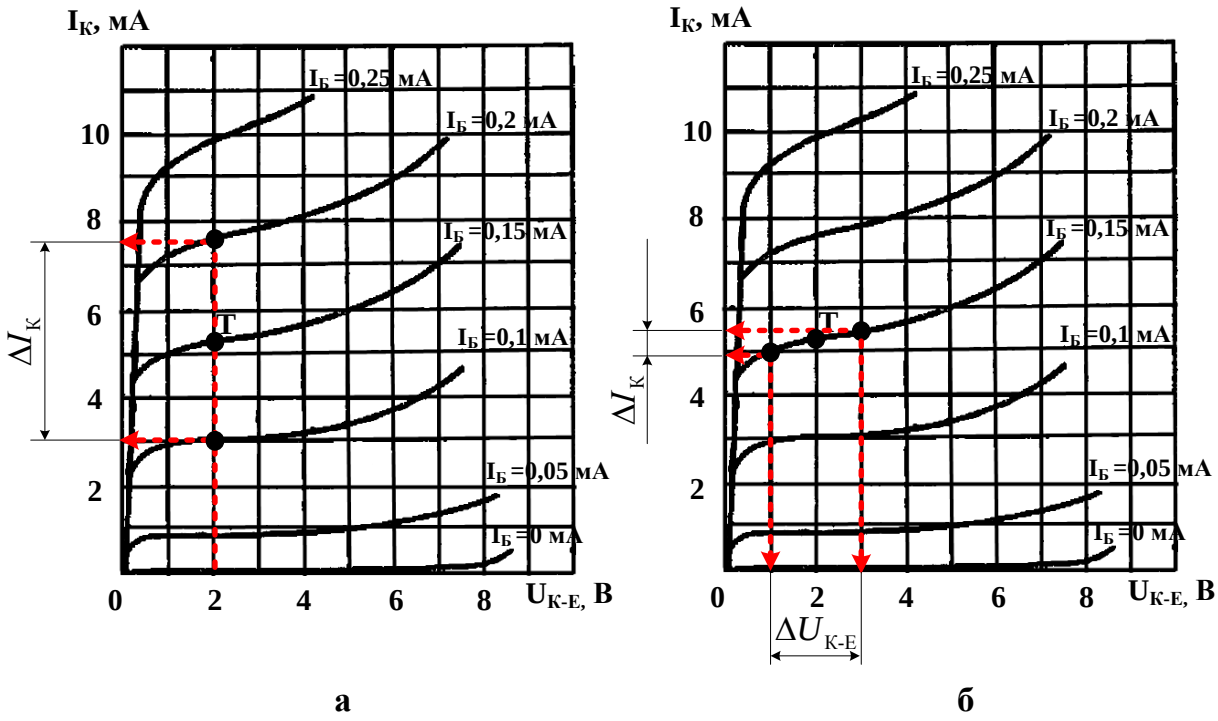


Рис. 12.8. Визначення h – параметрів по вихідним статичним характеристикам транзистора:

а – h_{21}; б – h_{22}

ЛЕКЦІЯ 13. ТЕМПЕРАТУРНІ ТА ЧАСТОТНІ ВЛАСТИВОСТІ ТРАНЗИСТОРА. ВЛАСНІ ШУМИ ТРАНЗИСТОРА

Діапазон робочих температур транзисторів такий, як і у напівпровідникових діодів, оскільки він обумовлений властивостями *p-n*-переходів. На роботу транзисторів істотно впливає нагрівання (наприклад, від навколишнього середовища, розташованих поруч нагрітих деталей, струмів, що протікають через транзистор) і менш істотно – охолодження.

При підвищенні температури змінюються опори емітера, колектора і бази, струми (особливо зворотній струм *p-n*-перехода), вихідні характеристики, h-параметри і, відповідно, підсилювальні властивості транзистора.

Температурні властивості схеми зі СБ. Нагрівання транзистора, включеного в схемі зі СБ, призводить до збільшення зворотного струму *p-n*-перехода. $I_{К\text{-}Б0}$ зростає вдвічі при збільшенні температури на 10^0С, що в свою чергу викликає зсув вихідних характеристик і зміну їхнього нахилу (на рис. 13.1 суцільними лініями вказані характеристики при температурі 20^0С, а штриховими – при 70^0С).

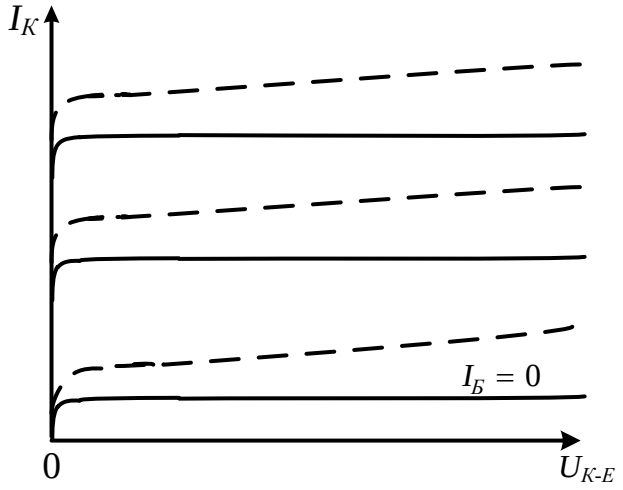


Рис. 13.1. Температурна залежність вихідних характеристик транзистора, включеного по схемі зі СБ

Як видно з рисунку, характеристики незначно піднімаються. Очевидно,

що положення робочої ділянки транзистора і його робочої точки при цьому зміниться незначно. Відповідно, підсилення буде приблизно таким, як і до нагрівання – схема зі СБ є температуростабільною.

Температурні властивості схеми зі СЕ. Для транзистора, включеного по схемі зі СЕ, зворотним струмом *p-n*-переходу є струм $I_{К\text{-}Е0}$. При нагріванні транзистора цей струм збільшується в декілька разів сильніше, ніж струм $I_{К\text{-}Б0}$, тому вихідні характеристики значно змінюються (рис. 13.2).

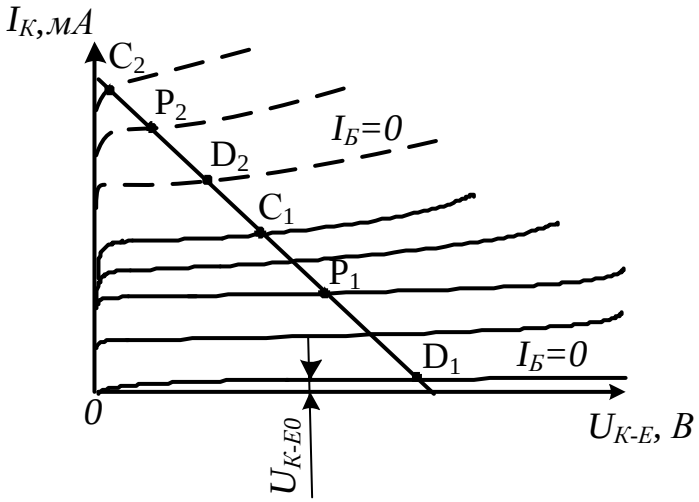


Рис. 13.2. Температурна залежність вихідних характеристик транзистора, включеного по схемі зі СЕ

Робоча ділянка стає меншою, робоча точка зміщується. Відповідно, підсилення зменшується і робота підсилювального каскаду відбуватиметься зі значними нелінійними спотвореннями.

Т.ч., схема зі СЕ має низьку температурну стабільність і досить сильно змінює свої властивості при підвищенні температури, що є її істотним недоліком.

Частотні властивості. З підвищенням частоти підсилювальні властивості транзистора погіршуються.

На частотні властивості транзисторів значно впливають ємності *p-n*-

переходів, а також інерційність процесів проходження носіїв заряду через базу від емітерного переходу до колекторного і накопичення зарядів у базі. Наприклад, зі збільшенням частоти ємнісний опір зменшується і шунтуюча дія ємностей зростає.

Для розширення частотного діапазону транзисторів необхідно збільшувати швидкість переміщення неосновних носіїв зарядів через базу, зменшувати товщину бази і ємність колектора. При виконанні цих умов транзистори можуть успішно працювати на частотах порядку десятків і сотень мегагерц.

Слід також зазначити, що транзистори типу *n-p-n* при інших рівних умовах є більш високочастотними, ніж транзистори типу *p-n-p*. Те ж саме можна сказати і про схему включення транзистора зі СБ в порівнянні зі схемою зі СЕ.

Власні шуми транзисторів

Струми та напруги в будь-яких електричних колах завжди здійснюють невеликі хаотичні коливання, що називають ***електричними флуктуаціями***. Вони обумовлені тепловим рухом електронів. З підвищенням температури флуктуації посилюються. Флуктуаціям піддаються струми всіх електродів транзистора. Після підсилення ці флуктуації проявляються у вигляді шуму.

Будь-який постійний струм не є строго постійним, а крім постійної складової I_0 містить змінну шумову складову $I_ш$ (рис. 13.3).

Це пояснюється тим, що внаслідок теплового руху число електронів, що проходять через поперечний переріз провідника за малі рівні проміжки часу, не постійне, а змінюється.

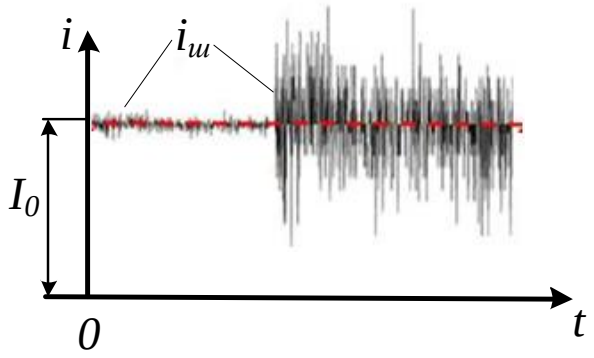


Рис. 13. 3. Флуктуації струму

Теоретично та експериментально доведено, що шумовий струм являє собою суму змінних синусоїдальних складових із різними частотами – від нуля до надвисоких.

Власні шуми транзисторів обмежують чутливість радіоприймачів та інших пристроїв, що використовуються для приймання, підсилення та вимірювання параметрів слабких сигналів. Якщо корисні сигнали слабші за власні шуми, то реєстрація цих сигналів досить ускладнюється або, навіть, унеможливлюється.

У будь-якому електричному колі, що містить опори (в тому числі і в транзисторі, оскільки всі його області мають деякі опори) за рахунок електричних флуктуацій створюється деяка шумова ЕРС. Діюче значення шумової ЕРС *Еш*, що виникає в резисторі або в будь-якому колі з опором R, визначається формулою Найквіста:

$$E_ш = \sqrt{4kTR2\Delta f_{0,7}},$$

де k – стала Больцмана ($k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К), T – абсолютна температура, $2\Delta f_{0,7}$ – ширина смуги пропускання підсилювача.

Повний шум, що виникає в транзисторі, має кілька складових:

1. Теплові шуми;
2. Дробові шуми;
3. Шуми струморозподілу;

4. Рекомбінаційні шуми;
5. Флікер-шуми.

Для оцінки шумових властивостей транзисторів використовують ***коефіцієнт шуму F***:

$$F = 10\lg \frac{P_{с.вх} / P_{ш.вх}}{P_{с.вих} / P_{ш.вих}},$$

де $P_{с.вх}$ і $P_{с.вих}$ – потужності корисного сигналу на вході і виході відповідно, $P_{ш.вх}$ і $P_{ш.вих}$ – потужності шуму на вході і виході відповідно.

$$[F] = дБ.$$

Сучасні транзистори мають коєфіцієнт шуму приблизно 10-20 дБ.

Шуми транзистора залежать від:

1. Значення коефіцієнта передачі струму емітера;
2. Значення опору бази і зворотного струму *p-n*-переходу;
3. Матеріалу напівпровідника;
4. Напруги колекторного переходу і струму емітера;
5. Внутрішнього опору джерела коливань, які необхідно підсилити.
6. Температури;
7. Частоти (рис. 13.4).

В діапазоні середніх частот коефіцієнт шуму *F* має мінімальне і приблизно постійне значення.

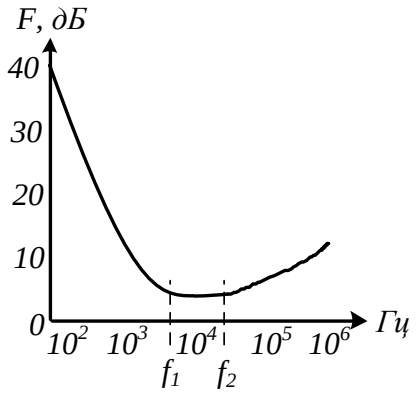


Рис. 13.4. Частотна залежність коефіцієнту шуму

Нижня частота f_1 цього діапазону становить одиниці кілогерц. На частотах нижче f_1 збільшуються флікер-шуми і за рахунок цього коефіцієнт шуму зростає. Збільшення коеціфієнта шуму на частотах вище f_2 відбувається внаслідок зниження коефіцієнта передачі струму емітера. Частота f_2 може становити сотні кілогерц і більше.

ЛЕКЦІЯ 14. ПОЛЬОВІ ТРАНЗИСТОРИ

Польовий транзистор – це напівпровідниковий прилад, принцип дії якого полягає в керуванні вихідним струмом за рахунок зміни питомої провідності і площі напівпровідникового шару (каналу) під дією електричного поля.

Робота такого транзистора заснована на переміщенні тільки основних носіїв заряду – дірок або електронів, тому прилади такого типу називають ***уніполярними*** (носії заряду мають один знак).

Польовий транзистор використовується в схемах підсилювачів, генераторів і перемикачів, де виконує функції підсилення потужності і перетворення електричних коливань.

Область, товщина і поперечний переріз якої управляється зовнішньою напругою і по якій проходить струм основних носіїв, називають ***каналом***.

Електроди польового транзистора називаються затвор, стік і витік.

Витік – електрод, з якого в канал потрапляють основні носії, ***стік*** – електрод, до якого рухаються основні носії з каналу, ***затвор*** – керуючий електрод.

Польові транзистори розділяють на:

1) транзистори з керуючим *p*-*n*-переходом;
2) транзистори з ізольованим затвором.

Для нормальної роботи польових транзисторів до стоку підключається джерело напруги позитивним полюсом для транзисторів з каналом *n*-типу і негативним – для транзисторів з каналом *p*-типу (незалежно від структури транзистора).

Польові транзистори мають істотні ***переваги в порівнянні з біполярними***:

1. Мають високий вхідний опір (10^6-10^7 Ом – у транзисторів з керуючим *p*-*n*-переходом і 10^{10}-10^{15} Ом у транзисторів з ізольованим затвором);
2. Більш стійкі до впливу іонізуючого випромінювання;
3. Добре працюють при низьких температурах (до -197°С);
4. Характеризуються низьким рівнем шумів (відсутній рекомбінаційний шум,

оскільки при роботі використовуються носії заряду лише одного типу).

Польові транзистори з керуючим *p-n*-переходом

Польовий транзистор з керуючим *p-n*-переходом – це напівпровідниковий прилад, в якому струм створюється тільки основними носіями заряду. Величина цього струму керується напругою, що подається на керуючий електрод.

Умовне графічне позначення і варіанти зовнішнього вигляду польового транзистора з керуючим *p-n*-переходом представлені на рис. 14.1.

p-канал *n*-канал

а б в

Рис. 14.1. Польовий транзистор з керуючим *p-n*-переходом:
а – умовне графічне позначення транзистора з каналом *p*-типу; б – умовне графічне позначення транзистора з каналом *n*-типу; в – варіанти конструкції корпусу

Будову та принцип дії даного типу транзистора можна пояснити на прикладі польового транзистора з каналом *n*-типу (рис. 14.2).

Тонка пластина з напівпровідника *n*-типу з низькою концентрацією домішки (канал) за допомогою електродів включена в вихідне коло підсилювального каскаду. Вихідне коло містить навантаження $R_н$ і живиться від джерела $U_{C\text{-}B}$.

На бічну поверхню каналу наносять шар з напівпровідника з протилежним типом провідності (затвор). Електрод, що відходить від цієї

області формує вхідне коло підсилювального каскаду і є керуючим. До вхідного кола також вмикають джерело сигналу, який потрібно підсилити. Джерело живлення вхідного кола $U_{З\text{-}В}$ створює на *p*-*n*-переході даного транзистора зворотну напругу. Для випадку транзистору з каналом *p*-типу створюється позитивне зміщення.

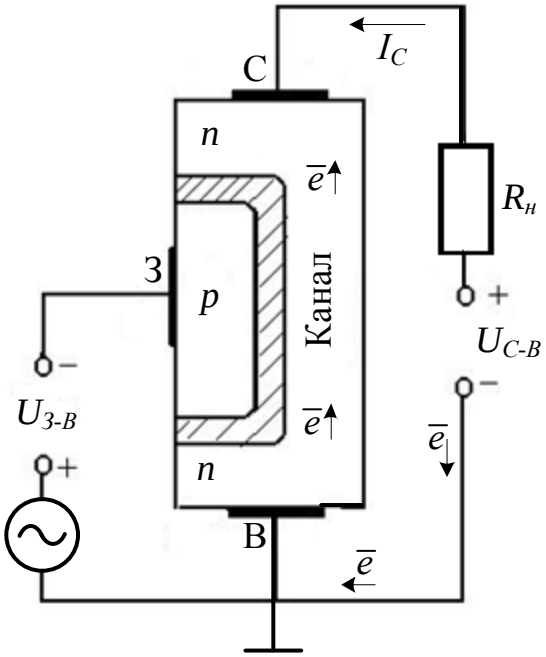


Рис. 14.2. Будова і схема включення польового транзистора з керуючим *p*-*n*-переходом

У польовому транзисторі з керуючим *p*-*n*-переходом затвор утворює *p*-*n*-перехід з областю каналу. При подачі на перехід затвор-канал зворотної напруги відбувається зміна ширини *p*-*n*-переходу, що викликає зміну поперечного перерізу каналу і, відповідно, його питомої провідності, яка в свою чергу, обумовлює зміну струму каналу.

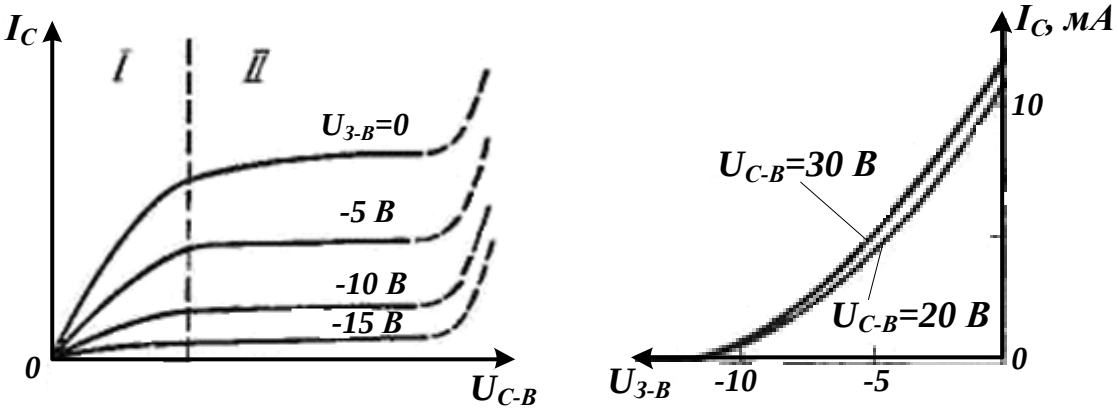
При відсутності напруги на затворі ширина *p*-*n*-переходу мінімальна, ширина каналу максимальна, струм стоку максимальний. При збільшенні напруги на затворі ширина *p*-*n*-переходу збільшується, площа поперечного перерізу каналу і струм стоку – зменшуються. При досить високих напругах на затворі ширина *p*-*n*-переходу може збільшитися настільки, що струм стоку дорівнюватиме нулю.

Напруга на затворі, при якій струм стоку стає рівним нулю, називається ***напругою відсікання.***

Основні характеристики і параметри польового транзистора з керуючим p-n-переходом

Основними характеристиками польового транзистора є вихідні (стокові) характеристики і характеристики прямої передачі (стоко-затворні характеристики).

Стоковою характеристикою називають залежність $I_C = f(U_{C-B})\big|_{U_{З-B}=const}$.



а б

Рис. 14.3. Характеристики польового транзистора:
а – стокова; б – стоко-затворна

Зі збільшенням U_{C-B} струм I_C спочатку зростає досить швидко (ділянка I), а потім це зростання уповільнюється і майже зовсім припиняється, тобто наступає явище, що нагадує насичення (ділянка II). При прикладанні більшої за абсолютним значенням негативної напруги на затвор струм I_C зменшується і характеристика проходить нижче.

Підвищення напруги стоку врешті-решт призводить до електричного пробою *p-n*-переходу, і струм стоку починає стрімко зростати, що показано на

рис. 14.3, а штриховими лініями.

Робота транзистора зазвичай відбувається на пологих ділянках характеристик. Напруги, за яких починається ця область, називають ***напругами насичення***.

Характеристики польового транзистора не є еквідистантними, що пояснюється тим, що ширина *p-n*-переходу нелінійно залежить від напруги. Тому за однакового приросту $U_{З-В}$ відстань між характеристиками не буде однаковою. Із зростанням напруг $U_{З-В}$ пробій *p-n*-переходу відбувається за менших напруг $U_{С-В}$.

Характеристикою прямої передачі (стоко-затворною характеристикою) називають залежність $I_C = f(U_{З-В})\big|_{U_{С-В}=const}$.

Максимальний струм стоку I_C за заданої напруги $U_{С-В}$ відповідає $U_{З-В} = 0$. У разі збільшення $U_{З-В}$ за абсолютною величиною I_C зменшується (рис. 14.3, б).

Польовий транзистор характеризується наступними ***параметрами:***

1. ***Крутизна***

$$S = \Delta I_C / \Delta U_{З-В}\big|_{U_{С-В}=const}.$$

Даний параметр характеризує підсилювальні властивості польового транзистора і визначає вплив зміни напруги на затворі на зміну струму стоку.

2. ***Внутрішній (вихідний) опір***

$$R_i = \Delta U_{С-В} / \Delta I_C\big|_{U_{З-В}=const}.$$

Даний параметр являє собою опір транзистора між стоком і витоком (опір каналу) для змінного струму.

3. ***Коефіцієнт підсилення транзистора***

$$K = \Delta U_{C-B} / \Delta U_{З-B}\big|_{I_C=const};$$

$$K = SR_i.$$

Даний параметр визначається відношенням приростів напруг стоку і затвору в режимі холостого ходу на стоці.

4. Вхідний опір

$$R_{вх} = \Delta U_{З-B} / \Delta I_З\big|_{U_{C-B}=const}.$$

Вплив температури на характеристики польових транзисторів

В наслідок того, що в польових транзисторах використовуються тільки основні носії, вони можуть працювати у більш широкому температурному діапазоні, порівняно з біполярними транзисторами. Однак, так само, як і в інших напівпровідникових приладах, на параметри і характеристики польових транзисторів впливає температура: від неї залежать струм затвору, струм стоку і крутизна характеристики.

Струм затвору $I_З$ є струмом зворотно зміщеного переходу, тому характер його температурної залежності такий самий, як і зворотного струму діода.

Функції $I_C(T)$ і $S(T)$ обумовлені залежністю рухливості носіїв заряду від температури. З підвищенням температури I_C і S будуть зменшуватися.

Схеми включення польових транзисторів

Подібно біполярним транзисторам, польові транзистори використовують у трьох основних схемах включення: зі спільним витоком (СВ), спільним стоком (СС) і спільним затвором (СЗ).

Підсилювальний каскад по схемі зі СВ аналогічний схемі зі СЕ. Він дає велике підсилення струму і потужності і інвертує фазу вхідної напруги.

Схема зі СС подібна до емітерного повторювача і називається

витоковим повторювачем. Коефіцієнт підсилення такого каскаду по напрузі близький до одиниці. Підсилювач по схемі зі СС має порівняно невеликий вихідний опір і великий вхідний опір.

Схема зі СЗ аналогічна схемі зі СБ. Схема не підсилює струми, тому коефіцієнт підсилення по потужності в багато разів менше, ніж у схемі зі СВ. Ця схема має малий вхідний опір, тому що вхідним струмом є струм стоку.

Польові транзистори з ізольованим затвором

Польовий транзистор з ізольованим затвором – це польовий транзистор, в якому металевий затвор електрично ізольований шаром діелектрика від каналу, утвореного в приповерхньому шарі напівпровідника.

Формування структури метал-діелектрик-напівпровідник пояснює те, що друга назва польових транзисторів з ізольованим затвором – МДН-транзистори.

Принцип дії МДН-транзистора заснований на явищі керування просторовим зарядом напівпровідника через шар діелектрика.

Розрізняють МДН-транзистори з вбудованим і з індукованим каналом (рис. 14.4). Залежно від типу електропровідності каналу МДН-транзистори можуть бути *p*- або *n*-типу. Найбільше поширення одержали МДН-транзистори з індукованим каналом *p*-типу і з вбудованим каналом *n*-типу. Тип електропровідності витоку і стоку завжди збігається з типом електропровідності каналу.

а б

Рис. 14.4. Умовне графічне позначення польового транзистора з ізольованим затвором:

а – із вбудованим каналом; б – з індукованим каналом

У ***МДН-транзисторах із вбудованим каналом*** в підкладці з кристалу кремнію *p*-типу (рис. 14.5) створюються дві сильно легіровані області з електропровідністю *n*-типу – стік і витік. Між витоком і стоком технологічно створюється канал з електропровідністю *n*-типу. В якості діелектрика використовують діоксид кремнію. Над діелектриком розміщений затвор у вигляді тонкої металевої плівки.

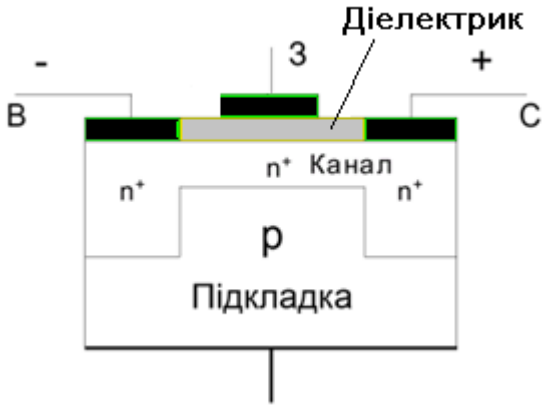


Рис. 14.5. Структура МДН-транзистора з вбудованим каналом

За наявності напруги між витоком і стоком у колі стоку буде протікати струм навіть у разі нульової напруги на затворі. Якщо на затвор подати від'ємну напругу відносно витоку і підкладки, то дірки з підкладки будуть втягуватись в канал, а електрони виштовхуватися. Канал буде позбавлений частини електронів, в наслідок чого струм стоку зменшиться. Якщо напруга на затворі досягне значення напруги відсікання, то електрони вийдуть з каналу в підкладку, струм стоку стане рівним нулю.

Т.ч., поперечний переріз і провідність каналу МДН-транзистора з вбудованим каналом будуть змінюватися при змінах напруги на затворі як позитивної, так і негативної полярності. Тобто транзистор з вбудованим каналом може працювати і в ***режимі збіднення*** (на затвор подається від'ємна відносно витоку напруга, опір каналу збільшується і струм стоку зменшується), і в ***режимі збагачення*** (на затвор подається додатна напруга, провідність

каналу збільшується і струм стоку збільшується).

У ***МДН-транзисторах з індукованим каналом*** канал між витоком і стоком виникає (індукується) тільки при підведенні до затвору керуючої напруги. У цих транзисторах при нульовій різниці потенціалів між витоком і затвором електропровідність між стоком і витоком практично відсутня. Коли напруга затвору перевищить деяке порогове значення, то в приповерхневому шарі концентрація електронів настільки збільшиться, що перевищить концентрацію дірок і відбудеться інверсія типу електропровідності. Тобто утвориться тонкий канал *n*-типу і транзистор почне проводити струм. Чим більше додатна напруга затвору, тим більше провідність каналу і, відповідно, струм стоку.

Даний тип транзисторів може працювати тільки в режимі збагачення.

Робота транзисторів з індукованим каналом здійснюється шляхом подачі на затвор потенціалу тільки однієї полярності. Із всіх видів польових транзисторів тільки транзистор з індукованим каналом при нульовій напрузі на затворі не проводить струму.

Параметри і характеристики МДН-транзистора визначаються аналогічно польовому транзистору з керуючим *p*-*n*-переходом.

Типові вихідні характеристики і характеристики прямої передачі для МДН-транзистора наведені на рис. 14.6.

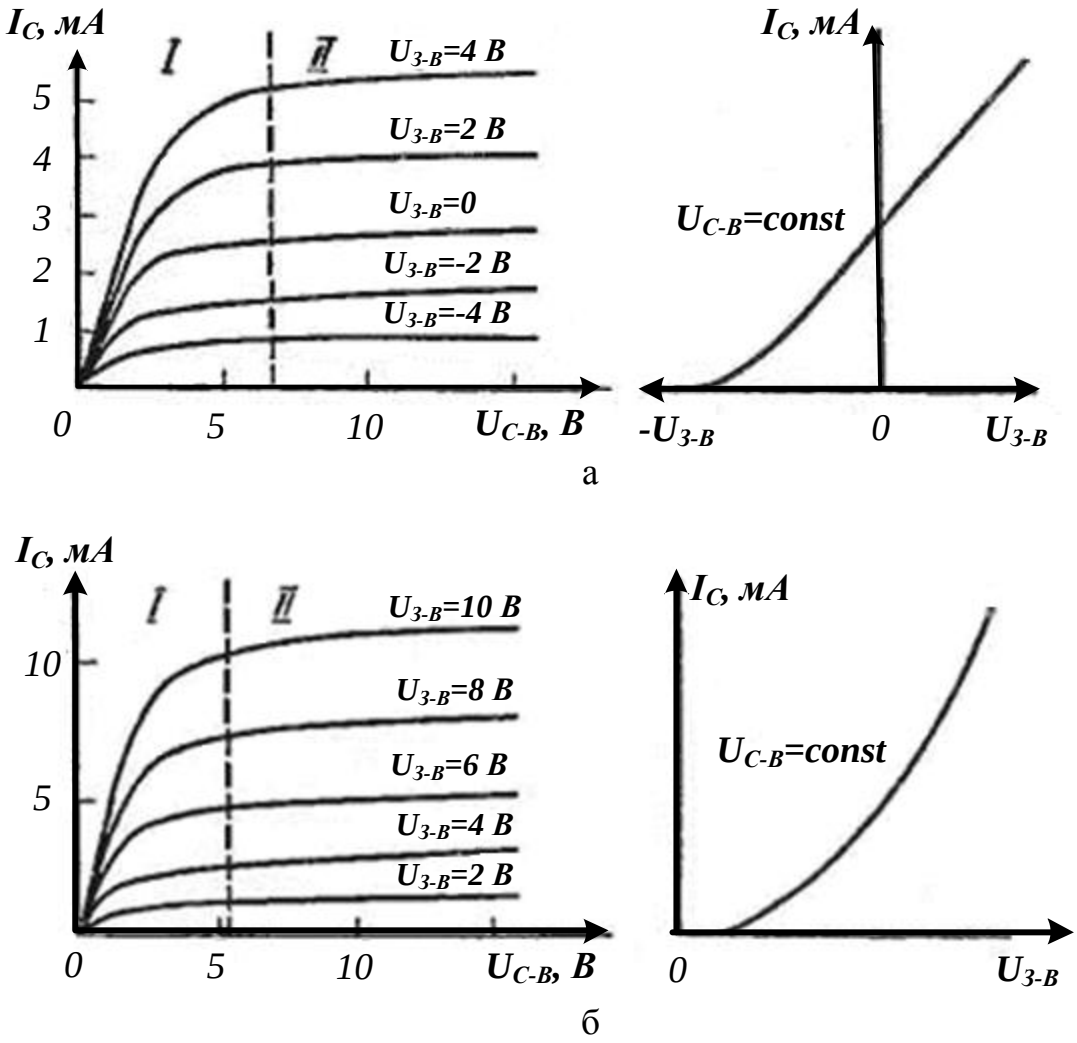


Рис. 14.6. Характеристики польового транзистора:

а – для транзистора з вбудованим каналом; б – для транзистора з індукованим каналом

ЛЕКЦІЯ 15. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ТА ПРИЛАДИ П’ЄЗОЕЛЕКТРОНІКИ

Робота приладів п’єзоелектроніки заснована на ***п'єзоелектричному ефекті*** **(*п’єзоефекті)***, що був відкритий французькими вченими П'єром Кюрі та Жаком Кюрі.

Прямий п'єзоефект полягає в тому, що під дією тиску на деякі кристалічні тіла, що називаються ***п’єзоелектриками***, на протилежних гранях цих тіл виникають рівні за величиною, але протилежні за знаком електричні заряди. Якщо змінити напрямок деформації, тобто не стискати, а розтягувати п’єзоелектрик, то заряди на гранях змінять знак на протилежний.

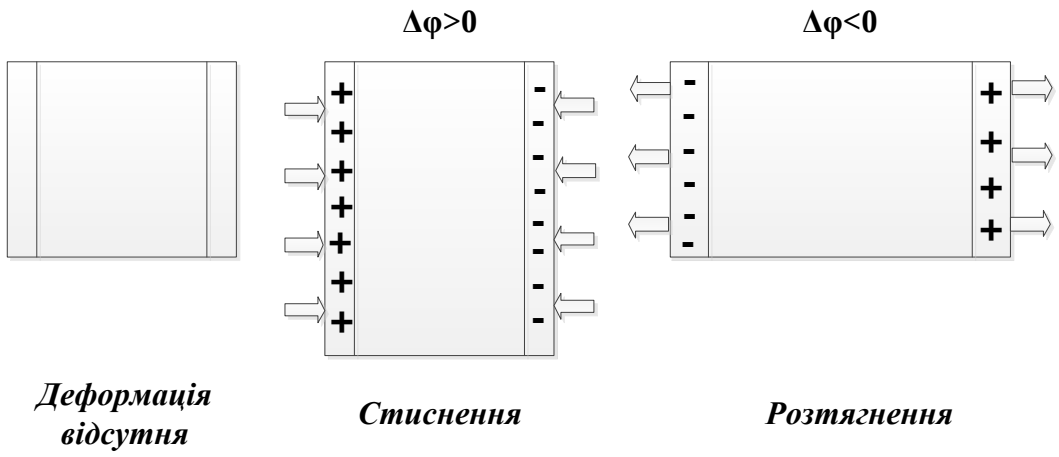


Рис. 15.1. Прямий п'єзоелектричний ефект

Зворотний п’єзоефект полягає в тому, що під дією електричного поля п’єзоелектрик стискається або розширюється залежно від напрямку вектора напруженості поля. У кристалічних п’єзоелектриків інтенсивність прямого та зворотного ***п’єзоефекта*** залежить від того, як спрямована по відношенню до осей кристала механічна сила або напруженість електричного поля.

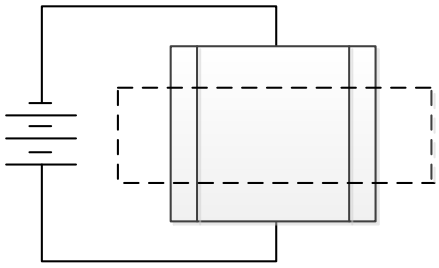


Рис. 15.2. Зворотний п’єзоелектричний ефект

До ***п’єзоелектриків*** відносяться деякі природні або штучні кристали (кварц або сегнетова сіль), а також спеціальні п’єзокерамічні матеріали (титанат барію, цирконат титанат свинцю) та синтетичні полімери (полівінілденфторид).

Кристалічні матеріали, мають високу стабільність параметрів, малі значення коефіцієнта електромеханічного зв’язку k_t і для них характерна низька чутливість за межами резонансу. Тому вони не придатні для роботи в широкій смузі частот, чи для використання в якості приймачів сигналів. В силу вказаних причин кристали, наприклад, кварцу, використовуються для вимірювання акустичних характеристик матеріалів на різних фіксованих частотах та для стабілізації частоти генераторів.

П'єзокерамічні матеріали типу ЦТС мають порівняно високий коефіцієнт електромеханічного зв’язку k_t та високу чутливість поза резонансом, що дозволяє використовувати п'єзокераміку в широкосмуговому режимі. З урахуванням високої діелектричної проникності з цих матеріалів можуть бути виготовлені перетворювачі малих розмірів. Тому п'єзокерамічні матеріали широко застосовуються для генерації та прийому акустичних хвиль у гідроакустиці, дефектоскопііі, радіотехніці, медицині.

Полівінілденфторид (ПВДФ) має більш низький коефіцієнт електромеханічного зв’язку (k_t=0,19) та значно меншу в порівнянні з п'єзокерамікою електричну проникність. Але його питомий акустичний імпеданс близький до імпедансу води та м’яких біологічних тканин, а механічна добротність мала. Це забезпечує можливість ефективної роботи в широкій смузі частот. Крім того, технологічно ПВДФ можна надати вигляду

тонкої гнучкої плівки, що має велике практичне значення в ряді застосувань. ПВДФ застосовується в медичній діагностиці, гідроакустиці, акустичній мікроскопії.

На практиці використовують п'єзоелектрики різної форми: прямокутні або круглі пластини, циліндри, кільця. Із кристалів такі п’єзоелементи вирізають певним чином, дотримуючись орієнтації відносно осей кристала. П’єзоелемент розміщують між металевими обкладками або наносять металеві плівки на протилежні грані п’єзоелемента. У такий спосіб виходить конденсатор з діелектриком з п’єзоелектрика. Якщо до такого п’єзоелемента підвести змінну напругу, то він за рахунок зворотного п’єзоефекту буде стискатися та розширюватися, тобто виконувати механічні коливання. У цьому випадку енергія електричних коливань перетворюється в енергію механічних коливань із частотою, рівній частоті прикладеної змінної напруги. Оскільки п’єзоелемент має певну частоту власних механічних коливань, то може спостерігатися явище резонансу. Найбільша амплітуда коливань пластинки п’єзоелемента спостерігається при співпадінні частоти зовнішньої ЕРС із власною частотою коливань пластини. Слід зазначити, що є кілька резонансних частот, які відповідають різним типам коливань пластини.

Під впливом зовнішньої змінної механічної сили на п’єзоелементі виникає змінна напруга тієї ж частоти. У цьому випадку механічна енергія перетворюється в електричну і п’єзоелемент стає генератором змінної ЕРС. Можна сказати, що п’єзоелемент є коливальною системою, в якій можуть відбуватися електромеханічні коливання. Кожен п’єзоелемент еквівалентний коливальному контуру (рис. 15.3).

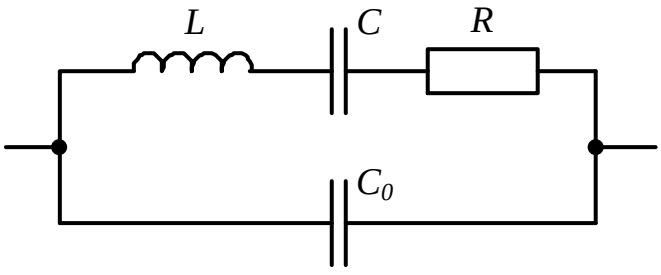


Рис. 15.3. Еквівалентна схема коливального контуру

У звичайному коливальному контурі, складеному з котушки індуктивності і конденсатора, періодично здійснюється перехід енергії електричного поля, зосередженої в конденсаторі, в енергію магнітного поля котушки та навпаки. В п’єзоелементі механічна енергія періодично переходить в електричну. В еквівалентній схемі п’єзоелемента індуктивність *L* відображає інерційні властивості п'єзоелектричної пластинки, ємність *C* характеризує пружні властивості пластинки, а активний опір *R* – втрати енергії при коливаннях. Ємність C_0, яка називається статичною ємністю, являє собою звичайну ємність між обкладками п’єзоелемента і не пов'язана з його коливальними властивостями.

Прилади п'єзоелектроніки

Одним з перших п'єзоелектричних приладів був ***кварцевий резонатор***, що має дуже високу стабільність частоти коливань. Кварцевий резонатор успішно використовується для стабілізації частоти генераторів і радіопередавачів. Власна резонансна частота кварцевого резонатора залежить від його геометричних розмірів.

Добротність кварцевих резонаторів дуже висока й становить 10^4-10^6. Відповідно до еквівалентної схеми, наведеної на рис. 15. 3 кварцевий резонатор має дві основні резонансні частоти. Для послідовного резонансу (резонансу напруг) у колі *L*-*C*-*R* частота резонансу $f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$, а для контуру, у якому відбувається паралельний резонанс (резонанс струмів), частота резонансу буде вище $f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{\text{екв}}}}$, де еквівалентна ємність $C_{\text{екв}} = \frac{CC_0}{C + C_0}$.

П’єзорезонатори можуть бути виготовлені не тільки із кварцу, але й з п’єзокераміки, однак добротність при цьому знижується і становить 10^2 -10^4.

Приклад схеми транзисторного генератора із кварцевою стабілізацією наведений на рис. 15.4. Кварцевий резонатор задає на вході транзистора

(ділянка база – емітер) коливання зі своєю стабільною частотою, а підсилені коливання спостерігаються у коливальному контурі, включеному у вихідне, колекторне коло. Зворотний зв'язок, необхідний для самозбудження генератора, здійснюється через ємність колектор-база. Якщо ця ємність недостатня, то між колектором і базою включають додатковий конденсатор.

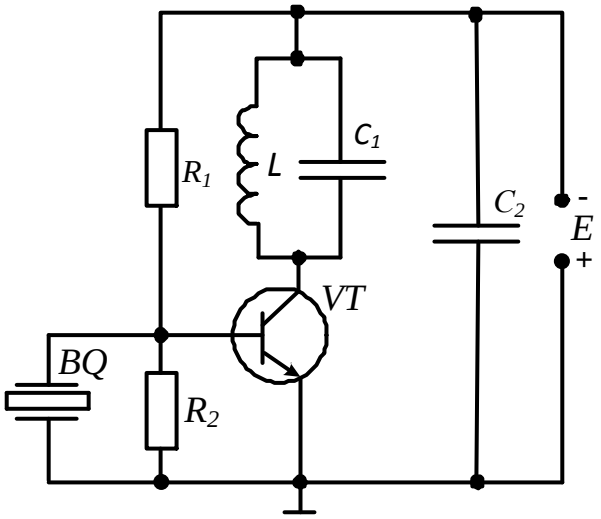


Рис. 15. 4. Схема найпростішого генератора із кварцевою стабілізацією частоти

Резистори R_1 та R_2 включені для того, щоб на емітерному переході була пряма напруга.

Окрім стабілізації частоти генераторів і радіопередавачів, кварцеві резонатори широко використовуються як еталони частоти, у приладах для вимірювання частоти, в електронних годинниках для забезпечення високої точності ходу. Із кварцевих резонаторів складаються смугові електричні фільтри.

Велику групу п'єзоелектричних приладів складають ***п'єзодатчики***, що реагують на зміну температури, тиску, переміщення, прискорення. У більшості випадків робота таких датчиків заснована на тому, що навіть невеликі зміни геометричних розмірів п'єзоелемента призводять до помітної зміни його резонансної частоти.

На використанні прямого п’єзоефекту працюють ***п'єзоелектричні мікрофони та звукознімачі***. В них використовується сегнетова сіль або п’єзокераміка. Ці ж матеріали використовуються в п'єзоелектричних ***гучномовцях***, що працюють на зворотньому п’єзоефекті.

Значний інтерес являють ***п'єзоелектричні трансформатори***, у яких п’єзоелемент має три або більше електродів, підключених до джерела змінної напруги і навантаження або до декількох джерел і декількох навантажень. Підбором площі електродів і їх розміщенням можна отримати різні значення коефіцієнта трансформації.

Так само, як і звичайні трансформатори з обмотками, п'єзоелектричні трансформатори можуть підсилювати сигнал по напрузі або по струму, перетворювати навантажувальний опір, здійснювати фазовий зсув на 180°. Розрізняють п'єзоелектричні трансформатори вузькосмугові, що працюють на частотах, близьких до однієї з резонансних частот п’єзоелементу, або широкосмугові.

У більшості випадків п'єзоелектричні трансформатори є трансформаторами напруги, але якщо вони розраховані на більші струми – у декілька ампер, то їх називають трансформаторами струму. Частина ***п'єзоелектричного трансформатора***, підключена до джерела змінної напруги, називається ***збуджувачем,*** а частина, підключена до навантаження, – ***генератором.*** У збуджувані за рахунок зворотного п’єзоефекту енергія електричних коливань переходить в енергію акустичних хвиль, які поширюються в напрямку генератора. У ньому за рахунок прямого п’єзоефекту енергія механічних коливань перетворюється в електричну. Оскільки амплітуда механічних коливань максимальна при резонансі, то саме на резонансних частотах коефіцієнт трансформації, що дорівнює відношенню вторинної напруги до первинної, буде максимальним.

У найпростішому випадку п'єзоелектричний трансформатор виконують із двох п’єзокерамічних брусків, склеєних один з одним (рис. 15.3). Один брусок служить збуджувачем, інший – генератором. Обидва бруски зроблені з п’єзокераміки різного складу. В залежності від розташування електродів на

збуджувачі та генераторі можливі трансформатори різних типів. Найбільше застосування одержали трансформатори ***поперечно-поздовжнього типу.*** Саме такий п'єзоелектричний трансформатор показаний на рис. 15.5. У нього в збуджувачі електричне поле спрямоване впоперек, а в генераторі уздовж. В залежності від співвідношення розмірів брусків коефіцієнт трансформації напруги в режимі холостого ходу може досягати декількох тисяч.

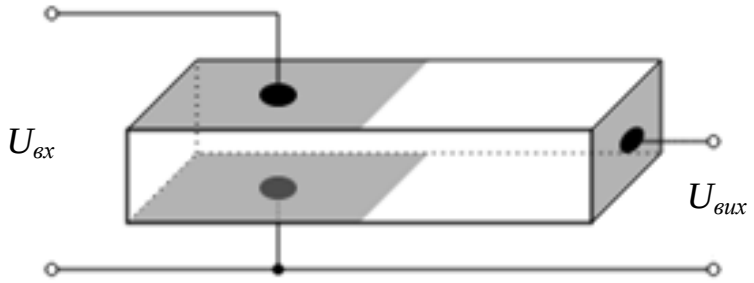


Рис. 15. 5. П'єзоелектричний трансформатор поперечно-поздовжнього типу

Крім «брускових» застосовуються дискові, циліндричні, кільцеві п'єзоелектричні трансформатори.

П'єзоелектричні трансформатори можуть використовуватися в малопотужних випрямлячах на високі напруги або в малопотужних низьковольтних випрямлячах для живлення транзисторних схем. У таких трансформаторів ККД становить 80-95 %.

Переваги п'єзоелектричних трансформаторів: відсутність обмоток, простота будови, низька вартість, мала маса, можливість мікроміниатюризації для застосування в мікросхемах, можливість роботи на різних частотах, велике різноманіття конструкцій і режимів роботи.

Недолік п'єзоелектричних трансформаторів – відсутність провідності для постійної складової струму.

ЛЕКЦІЯ 16. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ТА ПРИЛАДИ АКУСТОЕЛЕКТРОНІКИ

Акустоелектроніка – область електроніки, присвячена розробці теоретичних основ та створенню пристроїв, заснованих на акустоелектронній взаємодії, які використовуються для перетворення та обробки сигналів.

Області застосування акустоелектронних пристроїв – радіолокація, зв'язок, автоматичне керування, обчислювальна техніка. На основі акустоелектронної взаємодії можуть бути створені лінії затримки, фільтри, підсилювачі, генератори, модулятори тощо.

В акустоелектроніці для перетворення акустичних коливань в електричні та навпаки використовується прямий і зворотний п'єзоефект. Таким чином, акустоелектроніка тісно пов'язана з п’єзоелектронікою.

Під ***акустоелектронною взаємодією*** розуміють взаємодію ультразвукових хвиль частотою 10^7-10^{13} Гц з електронами провідності в металах або напівпровідниках.

Ультразвукові хвилі, поширюючись у твердому тілі, впливають на внутрішньоґраткові електричні поля. Останні існують внаслідок того, що електричні поля, створювані позитивними та негативними іонами в проміжках між атомами та молекулами кристалічних ґраток, не скомпенсовані, і мають напруженість порядку 10^8 В/см і більше.

Дія ультразвукових хвиль полягає в тому, що вони викликають коливання кристалічних ґраток, а це призводить до зміни напруженості внутрішньоґраткових полів, які, у свою чергу, змінюють свою дію на електрони провідності. Акустоелектронну взаємодію ще називають електрон-фононною *взаємодією.* Така назва обумовлена тим, що ультразвукові хвилі та пружні коливання кристалічних ґраток можна розглядати, як електромагнітні хвилі у вигляді потоку квантів енергії. Ці кванти називаються ***фононами***. Поширення звукових хвиль у кристалах являє собою потік фононів. Енергія звукових хвиль (енергія фононів) передається електронам провідності, тобто відбувається електронне поглинання.

Виникнення в металі або напівпровіднику струму або ЕРС під дією ультразвукових хвиль називають ***акустоелектричним ефектом***. Струм протікає в напрямку поширення звуку. На рис. 16.1 показаний механізм виникнення поздовжнього акустоелектричного ефекту.

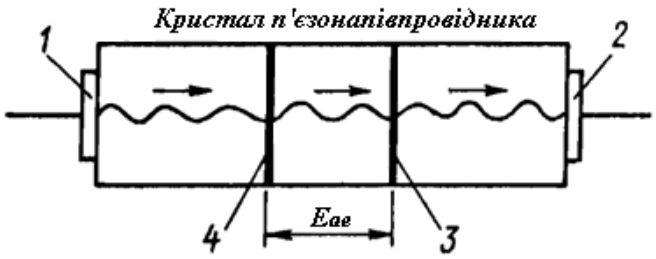


Рис. 16.1. Схема виникнення поздовжнього акустоелектричного ефекту

Через п’єзонапівпровідник проходить ультразвукова хвиля від електрода *1* до електрода 2, а між електродами *3* і *4* створюється ЕРС E_{ae}. В германії, кремнії та металах акустоелектричний ефект незначний, набагато сильніше він виражений у п’єзонапівпровідниках, до яких відносяться сульфід кадмію Cd, сульфід цинку Zn, антимонід індію InSb, арсенід галію GaAs тощо. При інтенсивності звуку 1 Вт/см^2 ЕРС може приймати значення декількох вольтів на один сантиметр відстані між електродами *3* і *4*.

Під дією на кристал зовнішнього електричного поля, яке створює дрейф електронів у напрямку поширення звукової хвилі, можливі два випадки перетворення:

1. Якщо швидкість дрейфу електронів менше швидкості хвилі, то її енергія поглинається електронами і хвиля загасає;

2. Якщо швидкість дрейфу електронів більше швидкості хвилі, то електрони віддають свою енергію хвилі і її амплітуда зростає, тобто відбувається підсилення хвилі. Коефіцієнт підсилення може приймати значення десятків децибелів.

Акустоелектричний ефект обумовлений дією або об'ємних ультразвукових хвиль в товщі хвилевода, або поверхневих акустичних хвиль. ***Поверхневі акустичні хвилі*** – це пружні хвилі, що поширюються по вільній

поверхні твердого тіла або вздовж границі твердого тіла з іншим середовищем, загасаючи при віддаленні від границі. Поверхневі акустичні хвилі можуть мати вертикальну або горизонтальну поляризацію.

Вертикальна поляризація – зміщення часток у хвилі відбувається перпендикулярно границі розподілу.

Горизонтальна поляризація – зміщення часток відбувається паралельно границі розподілу, але перпендикулярно напрямку поширення хвилі.

Найчастіше використовуються поверхневі акустичні хвилі з вертикальною поляризацією на границі твердого тіла з вакуумом або газом (хвилі Релея).

Найважливіші властивості поверхневих акустичних хвиль – порівняно невелика (1,6 – 4,0 км/с) швидкість поширення і можливість взаємодії із планарними структурами у вигляді плівок на поверхні хвилеводу. Цим забезпечується перетворення поверхневих акустичних хвиль в електричний сигнал і навпаки, а також зміна напрямку поширення хвиль, їхнє відбиття, підсилення, загасання й інші процеси.

Прилади акустоелектроніки

До акустоелектронних приладів відносяться лінії затримки, смугові фільтри, резонатори, датчики тощо. Більшість з них працюють на поверхневих акустичних хвилях.

Принцип будови типового акустоелектронного приладу показаний на рис. 16.2.

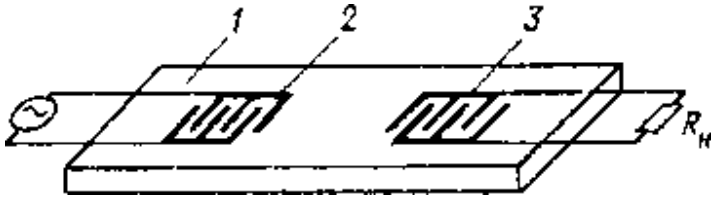


Рис. 16. 2. Принцип акустоелектронного приладу на поверхневих акустичних хвилях

В якості хвилевода *1* зазвичай використовують пластину, стрижень, або провід з п'єзоелектричного матеріалу з ретельно відполірованою поверхнею, на якій розташовані електромеханічні перетворювачі: вхідний – *2* і вихідний – 3. Ці перетворювачі виконують у вигляді гребінчастих електродів з тонкої металевої плівки товщиною 0,1-0,5 мкм. Їх називають ***зустрічно-штирьовими перетворювачами***. До вхідного перетворювача під'єднують джерело електричного сигналу, і у хвилеводі виникають поверхневі акустичні хвилі. У вихідному перетворювачі, до якого під'єднане навантаження, виникає електричний сигнал.

Основні параметри перетворювачів на поверхневих акустичних хвилях – внесене загасання, вхідний і вихідний опір, частотна вибірковість, смуга частот.

Геометричні розміри і форма вхідного перетворювача визначають ефективність перетворення електричного сигналу в акустичну хвилю. Для кожної частоти найбільш ефективне перетворення отримують при певних розмірах перетворювача. Число штирів перетворювача визначає відносну смугу частот пропускання. Сама широка смуга буде у перетворювача, що складається із двох штирів. Чим більше штирів, тим менше ширина смуги пропускання.

Робота перетворювачів на поверхневих акустичних хвилях погіршується через різні вторинні явища, до яких відносяться відбиття хвиль на межі звукопроведення і на границях електродів. Це відбиття – основна причина спотворень вихідного сигналу і погіршення параметрів приладу. Шкідливим також вважається пряме проходження електричного сигналу з входу на вихід і передача сигналу об'ємною акустичною хвилею.

Лінії затримки на поверхневих акустичних хвилях зазвичай вносять загасання 0,5-1,5 дБ. Верхня частота, на якій працюють такі лінії становить порядку 2 ГГц. Відносна смуга пропускання може бути досить різна – від часток відсотка до 100%. Тривалість затримки залежно від відстані між перетворювачами і від конструкції становить одиниці-сотні мікросекунд. Затримка може бути фіксованою або регульованою. На торці хвилевода наносять звукопоглинаючі покриття, щоб зменшити відбиття хвиль.

Динамічний діапазон ліній затримки 80-120 дБ. Для нормальної роботи лінії затримки важлива температурна стабільність її параметрів. Температурний коефіцієнт затримки (ТКЗ) близький до нуля отримують шляхом застосовування або спеціальних матеріалів для хвилевода (кремній з домішкою фосфору), або виконуючи хвилевід з двох частин, що мають ТКЗ різного знаку, що створює взаємну компенсацію. Діапазон робочих температур ліній затримки становить десятки градусів. Для збільшення часу затримки шлях хвилі виконують у вигляді спіралі чи ламаної лінії або з'єднують послідовно декілька ліній затримки. Регульовані лінії затримки мають декілька перетворювачів, розташованих на різних відстанях. Вмикаючи той чи інший перетворювач, можна змінювати час затримки.

Смугові фільтри на поверхневих акустичних хвилях являють собою лінії затримки із частотно-селективними властивостями. Такі фільтри можуть бути розраховані на різні робочі частоти і смуги частот. У вузькополосних фільтрах відносна смуга частот може бути в межах 0,01-1 %. Надвузькополосні та надширокополосні фільтри мають високу вибірковість. Внесене загасання не більше 3 дБ. Для підвищення вибірковості іноді застосовують каскадне включення декількох фільтрів. Розміри електродів у фільтрів, розрахованих на частоти 1-2 ГГц становлять одиниці мікрометрів і менше. Подібні мікрофільтри виготовляють методами фото-, рентгенівської або електронно-променевої літографії.

Різні типи фільтрів на поверхневих акустичних хвилях застосовують для обробки та формування складних фазо- і частотно-модульованих сигналів. Також можна створювати фільтри з регульованою смугою пропускання.

Принцип роботи ***датчиків*** на поверхневих акустичних хвилях, зокрема датчиків для вимірювання сили, тиску, температури ґрунтується на тому, що різні зовнішні впливи на хвилевід змінюють умови поширення в ньому поверхневих акустичних хвиль. Під дією механічних сил хвилевід розтягується або вигинається, що призводить до зміни часу затримки. Крім того, механічні впливи змінюють щільність і пружність хвилеводу, що призводить до зміни

швидкості поширення хвиль. Відомо, що остання також залежить і від температури.

ЛЕКЦІЯ 17. МІКРОЕЛЕКТРОНІКА

Мікроелектроніка – це науково-технічний напрям електроніки, що займається проблемами дослідження, конструювання та виготовлення високонадійних та економічно вигідних мікромініатюрних електронних схем і пристроїв за допомогою комплексу фізичних, хімічних, схемотехнічних та інших методів.

Задачі та принципи мікроелектроніки:

1. Створення максимально надійних електронних схем і пристроїв.
2. Зниження вартості електронних схем і пристроїв.

Поряд з вирішенням цих двох задач мікроелектроніки створення та використання інтегральних мікросхем (ІМС) призводить до різкого зменшення маси та об'єму електронної апаратури у порівнянні з масою та об'ємом апаратури на дискретних елементах, а також до зменшення споживаної потужності.

ІМС – це мікроелектронний виріб, виконуючий певну функцію перетворення, обробки сигналу та (або) нагромадження інформації, що має високу щільність монтажу електрично з'єднаних елементів, і який з погляду вимог до випробувань, приймання, поставки та експлуатації розглядається як єдине ціле.

ІМС містять елементи і компоненти.

Елементом ІМС називають її частину, що виконує функцію електронного елемента (діода, транзистора, конденсатора, резистора) і конструктивно є невіддільною від ІМС.

Компонентом ІМС називають її частину, що виконує функцію електронного елемента, але перед монтажем є самостійним виробом.

Кристал – готовий напівпровідниковий прилад або мікросхема без зовнішніх виводів і корпуса.

Щільність монтажу ІМС – це відношення числа елементів інтегральної мікросхеми до об'єму інтегральної мікросхеми без врахування об'єму виводів.

Ступінь інтеграції – параметр ІМС, що характеризує ступінь складності

ІМС або число елементів, які містяться в ній.

Переваги інтегральних мікросхем:

1. Малі розміри та маса;
2. Мала споживана потужність;
3. Висока надійність за рахунок зменшення числа паяних з'єднань;
4. Висока швидкодія;
5. Відносно низька вартість.

Класифікація ІМС:

1. За функціональним призначенням: цифрові, аналогові, аналогово-цифрові;
2. За характером функцій, що виконуються: підсилювачі, генератори, логічні елементи тощо;
3. За принципом дії основних елементів: біполярні, МДН, комплементарні;
4. За конструктивно-технологічними ознаками: напівпровідникові, плівкові, гібридні.
5. За ступенем інтеграції: проста ІМС; середня ІМС; велика ІМС; надвелика ІМС.

В залежності від технології виготовлення інтегральні мікросхеми бувають плівкові, гібридні та напівпровідникові.

Плівкові ІМС виконують у вигляді, різноманітних за товщиною, складом і конфігурацією плівок, нанесених на поверхню діелектричної підкладки. Розрізняють:

1. Тонкоплівкові ІМС – товщина плівок не більше двох мкм;
2. Товстоплівкові – товщина плівок значно більше.

При виготовленні ***плівкових резисторів*** (рис.17.11) на підкладку наносять резистивні плівки з металу, металевого сплаву або металокераміки. На кінцях резистивної плівки робляться виводи у вигляді металевих плівок, які з'єднують резистор з іншими елементами.

Опір плівкового резистора залежить від товщини та ширини плівки, її довжини та матеріалу. Для збільшення опору роблять плівкові резистори зигзагоподібної форми.

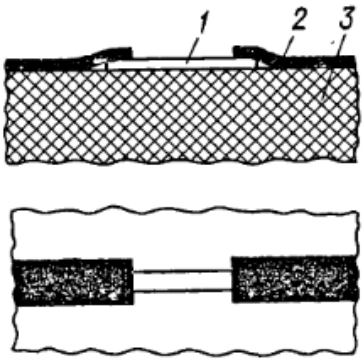


Рис. 17.1. Плівковий резистор:
1 – резистивна плівка; 2 – вивід; 3 – підкладка

Питомий опір плівкових резисторів виражають в омах на квадрат.

Плівкові конденсатори (рис. 17.2) найчастіше містять дві обкладки. Одна з них наноситься на підкладку та продовжується у вигляді сполучної лінії, потім на неї наноситься діелектрична плівка, а зверху розташовується друга обкладка, що також переходить у сполучну лінію.

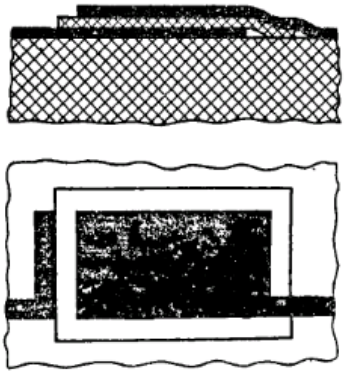


Рис. 17.2. Плівковий конденсатор

В якості діелектрика зазвичай використовують оксиди кремнію, алюмінію або титана. Питома ємність може бути від десятків до тисяч пікофарад на квадратний міліметр, і відповідно до цього при площі конденсатора в 25 мм^2 досягаються номінальні ємності від сотень до десятків тисяч пікофарад.

Плівкові котушки (рис. 17.3) виконуються у вигляді плоских спіралей, найчастіше прямокутної форми.

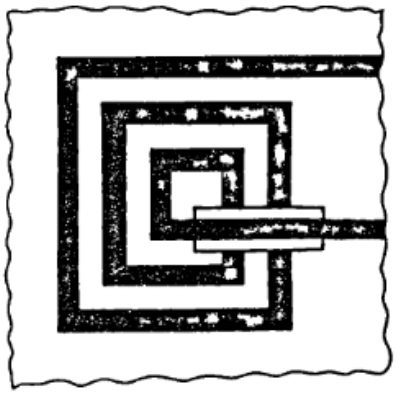


Рис. 17.3. Плівкова котушка індуктивності

Ширина провідних смужок і просвітів між ними зазвичай становить кілька десятків мкм. Питома індуктивність котушки, отриманої затакою технологією складає 10-20 нГн/мм^2. На площі 25 мм^2 можна одержати індуктивність до 0,5 мкГн. Збільшити індуктивність можна нанесенням на котушку феромагнітної плівки, що буде виконувати роль сердечника.

Гібридні інтегральні мікросхеми – це поєднання плівкових пасивних і навісних дискретних напівпровідникових елементів (рис. 17.4).

Спочатку на підкладці з діелектрика формують резистори, конденсатори, струмопровідні смужки, контактні площадки, а потім до цих площадок приєднують безкорпусні кремнієві транзистори та діоди.

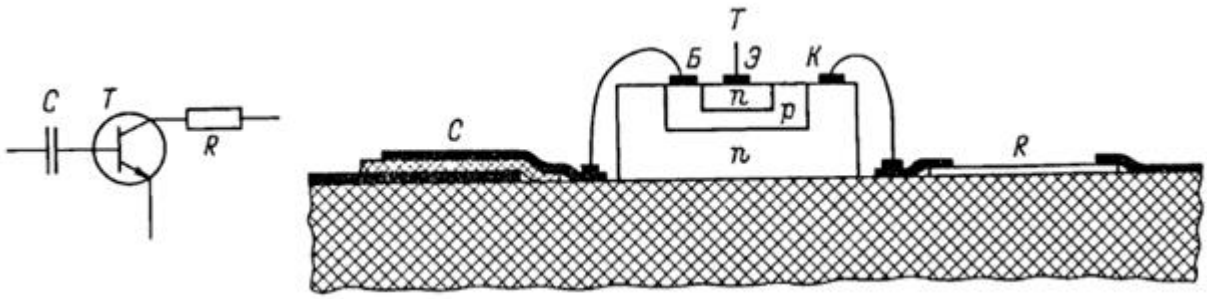


Рис. 17.4. Електрична схема і структура гібридної ІМС

Етапи виготовлення гібридної ІМС:

1. Роблять підкладку.
2. Наносять резистивні плівки, нижні обкладки конденсаторів, котушки і сполучні лінії.
3. Наносять діелектричні плівки.
4. Наносять металеві плівки.
5. Навішують (приклеюють) дискретні елементи, і їхні виводи приєднують до відповідних точок схеми.
6. Схему поміщають в корпус і приєднують до контактних виводів корпуса.
7. Проводять випробування мікросхеми.
8. Корпус герметизують і маркують.

Різновид гібридних ВІМС – мікрозборки (рис. 17.5).

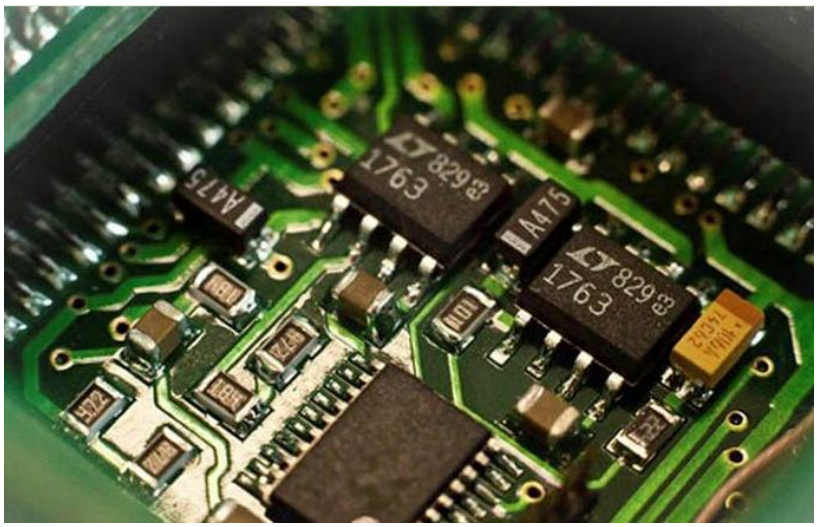


Рис. 17.5. Завнішній вигляд мікрозборки

Зазвичай в їхньому складі є різні елементи, компоненти та інтегральні схеми. Особливість мікрозборок полягає в тому, що вони виготовляються для конкретного типу апаратури. Іноді мікрозборками також називають набори декількох активних або пасивних елементів, що перебувають в одному корпусі і мають самостійні виводи.

Напівпровідникові інтегральні мікросхеми – це єдиний кристал

напівпровідника, локальні зони якого виконують функції активних (транзисторних) і пасивних елементів. Між цими зонами є електричні з'єднання та ізоляційні площадки.

Переваги напівпровідникових ІМС: мають досить високий рівень інтеграції (понад 104 елементів в 1 $см^3$) і забезпечують найвищу надійність електронних пристроїв, зводячи до мінімуму кількість зовнішніх з'єднань та монтажних операцій.

Недоліки напівпровідникових ІМС: гірша якість пасивних елементів (резистори та конденсатори) і неможливість створення в напівпровіднику котушок індуктивності.

Оскільки всі елементи напівпровідникових ІМС виконуються в єдиному напівпровідниковому кристалі, то важливо забезпечити ізоляцію елементів від кристала та один від одного. Для цього використовують декілька способів ізоляції (рис. 17.6):

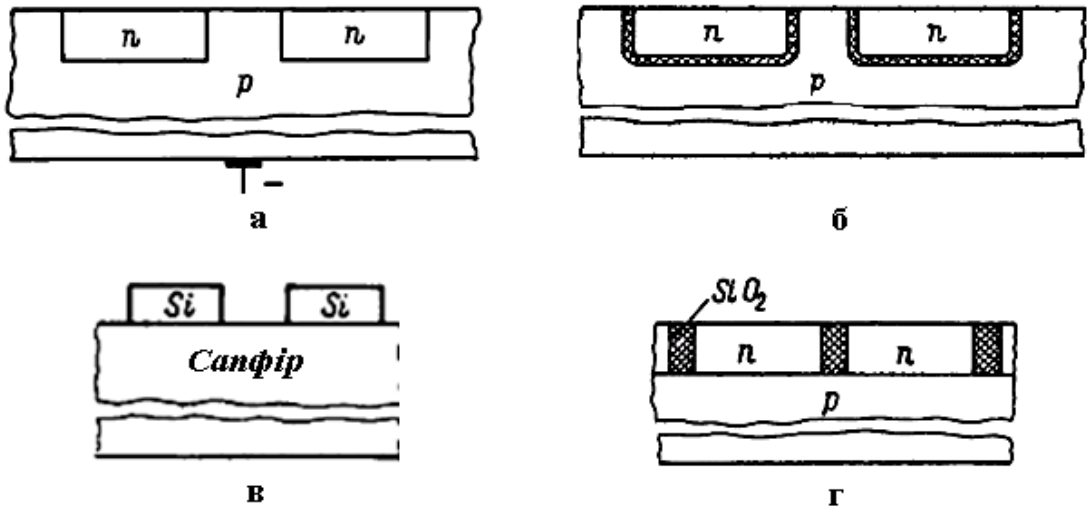


Рис. 17.6. Ізоляція елементів напівпровідникових ІМС:
а – ізоляція *p*-*n*-переходом; б – ізоляція діелектричним шаром; в – ізоляція типу кремній на сапфірі; г – комбінована ізоляція

1. **Ізоляція *p*-*n*-переходом.** В кристалі, наприклад із кремнію *p*-типу, методом дифузії робляться області *n*-типу, які називаються «кишенями». В «кишенях» потім формуються необхідні пасивні або активні елементи, а *p*-*n*-перехід між

«кишенею» і кристалом у працюючої ІМС постійно перебуває під зворотною напругою. Для цього на кристал постійно подається негативний потенціал у декілька вольт. Кремнієвий *p*-*n*-перехід при зворотній напрузі має дуже високий опір (декілька МОм), що і виконує роль ізоляції.

2. **Ізоляція діелектричним шаром**. В даному випадку також є «кишені» для наступного формування в них потрібних елементів, але між «кишенею» і кремнієвим кристалом є тонкий діелектричний шар діоксида кремнію SiO_2.

3. **Ізоляція типу кремній на сапфірі.** На сапфіровій підкладці, яка є гарним діелектриком, нарощується шар кремнію. Останній протравлюється до сапфіра таким чином, що утворюються кремнієві «острівці». У цих «острівцях» методом дифузії формуються необхідні елементи, які виявляються ізольованими один від одного знизу сапфіром, а по бокам – повітрям. Недоліком цього методу є те, що мікросхема має рельєфну поверхню, а це ускладнює виконання металевих з'єднань між елементами.

4. **Комбінована ізоляція, виконана по ізопланарній технології**. У цьому випадку бічні сторони «кишень» ізольовані діелектричним шаром діоксида кремнію, а нижня сторона ізольована від підкладки *p*-*n*-переходом, який знаходиться під зворотною напругою.

Виконання елементів напівпровідникових ІМС

Біполярні транзистори (рис. 17.7) виконують по планарній або планарно-епітаксиальній технології.

При планарній технології *p*-*n*-переходи утворюють дифузією домішок крізь отвір у захисному шарі, нанесеному на поверхню напівпровідника. При цьому виводи від всіх областей розташовуються в одній площині.

В якості напівпровідника зазвичай використовують кремній, який разом із захисною оксидною плівкою утворює колекторну область. В тому місці, де повинна бути базова область, оксидна плівка знімається травленням і методом дифузії створюється базовий шар. Потім всю поверхню знову окислюють і повторюють процес травлення та дифузії для створення емітерної області, що

розташовується в середині базової частини. Після цього через маску наносяться виводи у вигляді металевих шарів.

При планарно-епітаксиалъній технології між базою і колектором вводиться шар з більш високим опором. При виготовленні таких транзисторів колекторна пластинка напівпровідника, наприклад, з електронною електропровідністю має малий питомий опір. На неї нарощується плівка такого ж напівпровідника, але з високим опором, а потім планарним методом створюються області бази і емітера.

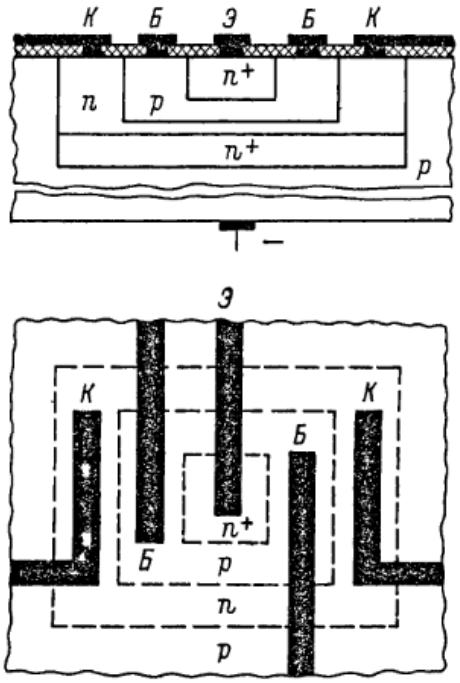


Рис. 17.7. Біполярний транзистор типу *n-p-n* в інтегральному виконанні

Структура транзистора заглиблюється в кристал не більше ніж на 15 мкм, а лінійні розміри транзистора на поверхні не перевищують декількох десятків мкм.

Польові транзистори з керуючим n-p-переходом можуть бути виготовлені одночасно з біполярними – на одному кристалі. На рис. 17.8, а показана структура планарного польового транзистора з *n*-каналом. В «кишені» n-типу створені області (n^+-типу) стоку і витоку, а також область (*p*-типу) затвора. Стік розташований у центрі, затвір навколо нього.

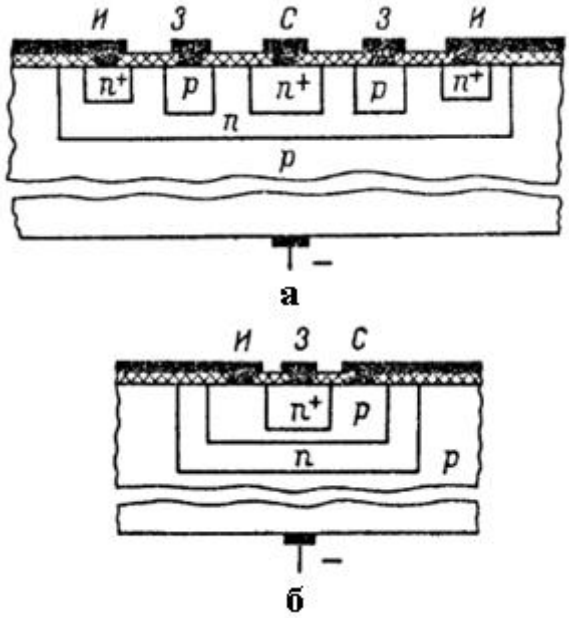


Рис. 17.7. Польовий транзистор напівпровідникової ІМС:
а – з каналом *n*-типу; б – з каналом *p*-типу

Для зменшення початкової товщини каналу іноді всередині роблять прихований шар p^+, але це пов'язане з ускладненням технологічних процесів. Інший варіант польового транзистора – з каналом *p*-типу – зображений на рис. 17.7, б. Його структура співпадає зі структурою звичайного *n*-*p*-*n* транзистора. В якості каналу використовується шар бази.

МДН-транзистори. Найпростішою є технологія виготовлення МДН-транзисторів з індукованим каналом. Для них у кристалі *p*-типу потрібно створити методом дифузії лише області n^+ витоку і стоку (рис. 17.8, а).

На переходах між цими областями і підкладкою підтримується зворотна напруга, і таким чином здійснюється ізоляція транзисторів від кристала і один від одного. Аналогічно виконується ізоляція каналу від кристала.

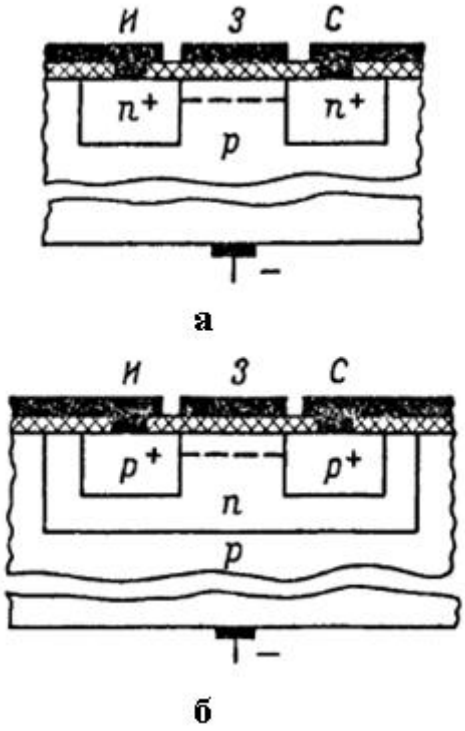


Рис. 17.8. МДН-транзистор напівпровідникової ІМС з індукованим каналом:
а – *n*-типу; б – *p*-типу

Дещо складніше виготовлення на підкладці *p*-типу МДН-транзистора з каналом *p*-типу, тому що необхідно спочатку зробити «кишеню» *n*-типу (рис. 17.8, б).

Існує окремий вид ІМС, в яких реалізовані пари МДН-транзисторів з каналами *n*- і *p*-типу. Такі пари називають комплементарними транзисторами (КМДН). Комплементарні транзистори використовуються в ключових (цифрових) схемах і характеризуються дуже малим споживанням струму і високою швидкодією. Зустрічаються також ІМС, у яких на одному загальному кристалі виготовлені біполярні і МДН-транзистори.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Щупляк Н. М. Основи електроніки і мікроелектроніки. – Дрогобич: Бескид БІТ, 2014. – 443 с.
2. Омельчук В. В., Гладич І. К. Електроніка та мікросхемотехніка . – Житомир: ЖВІРЕ, 2004. – 356 с.
3. Болюх В. Ф., Данько В. Г. Основи електроніки і мікропроцесорної техніки: Навч. посібник. – Харків: НТУ "ХПІ", 2011. – 257 с.
4. Новіков В. О., Рожко Ж. А., Богуш А. Р., Грінько С. С. Теоретичні та практичні основи електроніки. – Херсон: Херсонський національний технічний університет, 2017. – 146 с.
5. Борисов О.В., Якименко Ю.І. Твердотільна електроніка: Підручник. – К.: НТУУ "КПІ", 2015. – 484 с.
6. Бурбаева Н.В., Днепровская Т.С. Сборник задач по полупроводниковой электронике. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 168 с.
7. Расчет электронных схем. Примеры и задачи: Учеб. пособие для вузов по спец. электрон. техники / Г.И. Изъюрова, Г.В. Королев, В.А. Терехов и др. – М.: Высш. шк., 1987. – 335 с.
8. Гершунский Б.С. Основы электроники. – К.: Высшая школа, 1977. – 344 с.
9. Жеребцов И.П. Основы электроники. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.