

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ТА ЗАВДАННЯ**

до виконання розрахунково-графічної та курсової робіт  
з дисципліни "Твердотільна електроніка"  
для студентів спеціальностей  
"Електронні системи", "Електронні прилади та пристрої",  
"Фізична та біомедична електроніка"  
усіх форм навчання

Суми  
Сумський державний університет  
2023

Методичні вказівки та завдання до виконання розрахунково-графічної та курсової робіт з дисципліни «Твердотільна електроніка» / укладачі Кобяков О.М., Опанасюк А.С. Суми: Сумський державний університет, 2023. - 64 с.

Кафедра електроніки і комп'ютерної техніки

## Зміст

	С.
1 Загальні методичні вказівки	4
2 Список літератури	6
3 Робоча програма та методичні вказівки до розділів дисципліни	8
3.1 Елементи фізики напівпровідників та процеси у переходах метал – діелектрик - напівпровідник, електронно-діркових гомо- і гетеропереходах	8
3.2 Напівпровідникові діоди	14
3.3 Біполярні транзистори	16
3.4 Польові транзистори	23
3.5 Тиристори	27
3.6 Лавинно-прольотні діоди та діоди Ганна	30
3.7 Оптоелектронні напівпровідникові прилади	33
3.8 Основи мікроелектроніки	38
4. Розрахунково-графічні роботи та методичні вказівки до їх виконання	40
4.1 Розрахунково-графічна робота	41
4.2 Курсова робота	52
5 Довідниковий мінімум	60

## 1. ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

Навчальна дисципліна «Твердотільна електроніка» належить до циклу професійної та практичної підготовки освітньо-професійної програми навчання студентів за спеціальностями 171 "Електроніка", 153 "Мікро- та наносистемна техніка" усіх форм навчання. Метою вивчення дисципліни є формування у студентів суми знань з принципів роботи напівпровідникових приладів та особливостей їх застосування в електронних схемах. У результаті вивчення дисципліни студенти повинні:

- отримати знання про основні твердотільні елементи електронної апаратури;
- розширити свій науково-технічний кругозір в області електронної техніки;
- придбати знання, необхідні інженеру, що займається експлуатацією пристроїв і систем електроніки.

Після засвоєння матеріалу навчальної дисципліни студент повинен:

### **ЗНАТИ:**

- фізичні принципи роботи приладів твердотільної електроніки, що являються основою їх функціонування;
- параметри і характеристики різних напівпровідникових приладів і елементів інтегральних мікросхем, необхідні для забезпечення їх штатних режимів роботи;
- особливості експлуатації та можливі застосування основних приладів електроніки;
- типові аналогові та цифрові схемотехнічні рішення.

### **ВОЛОДІТИ:**

- інформацією про області застосування і перспективи розвитку приладів і пристроїв твердотільної електроніки і мікроелектроніки;
- методами дослідження вольт-амперних характеристик (ВАХ) та інших параметрів і характеристик приладів твердотільної електроніки;

## **ВМІТИ:**

- забезпечувати штатні режими роботи електронних приладів;
- експериментально знімати основні характеристики і визначати параметри напівпровідникових приладів;
- представляти основні активні прилади твердотільної електроніки у вигляді еквівалентних схем та електричних моделей;
- аналізувати роботу електронних схем;
- застосовувати прилади твердотільної електроніки для реалізації схемних рішень;
- створювати на основі типових рішень та універсальних схем нові схемотехнічні продукти.

Дисципліна «Твердотільна електроніка» вивчається студентами усіх форм навчання на 2-3 курсах (4-5 семестри). Робоча програма передбачає викладання 60-годинного лекційного курсу, проведення практичних занять, а також виконання студентами лабораторних робіт у рамках лабораторного практикуму. Крім того, студентам у 4 семестрі пропонується виконати розрахунково-графічну роботу (РГР), а у 5 семестрі курсову роботу (КР), які містять теоретичні питання за темами курсу, а також розрахункову частину.

На лекціях викладаються основні питання тем робочої програми, спираючись на які студент за допомогою методичних вказівок, рекомендованої літератури та лекційного курсу самостійно вивчає всі інші питання курсу.

У процесі вивчення розділів дисципліни рекомендується скласти стислий конспект, звертаючи основну увагу на фізичні процеси у приладах в статистичному та динамічному режимі їх роботи. Виведення не основних формул можна опустити, але обов'язково потрібно знати початкові умови отримання та фізичну сутність цих формул. Після вивчення кожної теми студент повинен вміти відповісти на усі запитання самоконтролю викладені у конспекті лекцій. Якщо у процесі вивчення деяких тем, при відповідях на запитання

самоконтролю чи при виконанні РГР та КР виникають ускладнення, рекомендується в усній чи письмовій формі звернутись за поясненнями та консультацією до провідного викладача, що викладає відповідний курс.

Вивчення розділів робочої програми курсу слід здійснювати за допомогою рекомендованої літератури, посилання на яку наведені в методичній вказівці та конспекті вказівок до кожного розділу з вказівкою сторінок. Проте можна використовувати й інші літературні джерела, якщо глибина і обсяг матеріалу у них відповідає вимогам навчальної програми.

## **2. СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

### **2.1. Основна навчальна література**

1. Курс лекцій з дисципліни «Твердотільна електроніка» / А.І. Новгородцев, О.А. Борисенко, О.М. Кобяков та ін. - Суми: Вид-во СумДУ, 2008. – 205 с.

2. Твердотільна електроніка: підручник / О. В. Борисов, Ю. І. Якименко; за заг. ред. Ю. І. Якименка. – Київ: НТУУ «КПІ», 2018. – 484 с.

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

4. Болюх В. Ф., Данько В. Г. Основи електроніки мікропроцесорної техніки: Навч. посібник. – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – 257 с.

5. Дружинін А.О. Твердотільна електроніка. Фізичні основи і властивості напівпровідникових приладів: навч. посіб. / А.О. Дружинін. - Львів: Львівська політехніка, 2009. - 332 с.

6. Васильєва Л.Д. Напівпровідникові прилади / Л.Д. Васильєва, Б.І., Медведенко, Ю.І. Якименко. - Київ: ЗІВЦ Видавництво «Політехніка», 2003. - 388 с.

7. Методичні вказівки до лабораторних робіт із дисципліни «Твердотільна електроніка» / укладачі: А. С. Опанасюк, А. І.

Новгородцев, О. А. Любивий, О. В. Д'яченко. – Суми : Сумський державний університет, 2022. – 84 с.

## **2.2. Додаткова рекомендована література**

1. Фізичні основи електронної техніки / З.Ю. Готра, І.Є. Лопатинський, Б.А. Лукіянець та ін. – Львів: Бескид Біт, 2004. – 880 с.

2. Медведенко Б.І. Напівпровідникові прилади: підручник / Л.Д. Васильєва, Б.І. Медведенко, Ю.І. Якименко. – Київ: Кондор, 2008. - 388 с.

3. Papadopoulos C. Solid-State Electronic Devices: An Introduction / C. Papadopoulos. - Springer Science, 2014. – 287 p.

4. Streetman B. Solid State Electronic Devices 7th Edition / B. Streetman, S. Banerjee / - University of Texas at Austin, 2016. – 212 p.

5. Осадчук В.С. Напівпровідникові діоди / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук. – Вінниця: ВДТУ, 2002. – 162 с.

## **3. РОБОЧА ПРОГРАМА ТА МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО РОЗДІЛІВ ДИСЦИПЛІНИ**

### **Змістовий модуль 1**

#### **Вступ**

Предмет і завдання дисципліни. Напрями та етапи розвитку електроніки. Основні матеріали напівпровідникової техніки. Класифікація пристроїв електроніки за класами, видом енергії, що діє на вході і виході, способом формування і передачі сигналу. Напівпровідники. Класифікація напівпровідникових матеріалів. Елементарні напівпровідники IV підгрупи періодичної системи. Сполуки  $A_3B_5$  та  $A_2B_6$ . Інші напівпровідникові матеріали. Їх властивості.

#### **Тема 1. Елементи фізики напівпровідників.**

Монокристали, їх кристалічна гратка. Дефекти у кристалах. Зонна структура напівпровідників. Власна і домішкова

провідність. Ефективна маса носіїв заряду. Статистика електронів і дірок у напівпровідниках. Залежність положення рівня Фермі від температури. Вплив температури на рухливість носіїв заряду. Нерівноважні носії заряду. Рекомбінація носіїв заряду та тривалість їх життя. Дрейфові і дифузійні струми у напівпровідниках. Фундаментальні рівняння твердотільної електроніки: рівняння неперервності та Пуассона. Термоелектронна емісія в напівпровідниках. Робота виходу. Ефект поля.

## **Тема 2. Контакт метал-напівпровідник**

Класифікація електричних контактів: контакт метал-напівпровідник,  $p-n$  - переходи, гетеропереходи,  $p-p^+$ ,  $n-n^+$  контакти. Способи їх виготовлення.

Енергетична діаграма контакту метал-напівпровідник. Омичні та випрямні контакти. Вимоги до контактуючих матеріалів. Перехід Шоткі. Утворення контактної різниці потенціалів. Вольт-амперна характеристика переходу.

## **Тема 3. Електронно-дірковий перехід і процеси в ньому.**

Рівноважний  $p-n$  перехід і фізичні процеси в ньому. Різкі та плавні переходи. Діаграма енергетичних зон переходу. Процеси в  $p-n$  - переході при відсутності зовнішньої напруги. Утворення запірного шару і дифузійного електричного поля в ньому. Висота потенціального бар'єра та контактна різниця потенціалів. Ємність  $p-n$  - переходу. Процеси в  $p-n$  - переході під дією зовнішньої напруги. Інжекція і екстракція носіїв. Вольт-амперна характеристика переходу. Її особливості для реальних випрямних контактів. Види пробоїв  $p-n$ -переходів. Еквівалентна схема переходу.

Ізотипні та анізотипні гетеропереходи. Зонні діаграми гетеропереходів. Основні моделі струмопроходження через гетеропереходи. Електричні властивості гетеропереходів. Теоретичні та реальні ВАХ гетеропереходів.

## **Тема 4. Напівпровідникові діоди.**

Класифікація та системи позначень діодів: радянська, PRO-ELECTRON, JEDEK. Відмінність ВАХ германієвого і



кремнієвого діодів. Випрямні діоди. Напівпровідникові стабілітрони і стабістори. Універсальні діоди. Імпульсні діоди та перехідні процеси в них. Варикапи. Тунельні та обернені діоди. Високочастотні діоди. Випрямлячі на діодах.

### **Методичні вказівки**

Даний розділ є вступним та служить своєрідним фундаментом для вивчення усіх інших розділів. Без його засвоєння неможливо зрозуміти принципи функціонування основних приладів твердотільної електроніки. При вивченні цього розділу необхідно згадати основні положення курсу загальної фізики та фізики твердого тіла.

Особливе значення мають: інтерпретація зонного характеру енергетичних спектрів кристалічних твердих тіл, яку засновано на одночастинковому рівнянні Шредінгера; поняття валентної, забороненої зони та зони провідності; принцип Паулі; поняття ковалентних зв'язків та ковалентних пар; генерація та рекомбінація носіїв заряду; поняття рівня Фермі та енергії активації; механізм утворення потенційного бар'єру для носіїв при контакті напівпровідників різних типів провідності та інше.

Повторивши ці поняття, необхідно вивчити механізми власної, електронно-діркової провідності напівпровідників. При цьому звернути увагу, що при реалізації домішкової провідності число вільних носіїв одного знаку набагато більше, ніж вільних носіїв іншого знаку, оскільки утворення вільних носіїв за рахунок іонізації домішкових атомів не супроводжуються звільненням носіїв протилежного знаку. Саме тому питома електропровідність донорного та акцепторного напівпровідників вища, ніж питома електропровідність напівпровідника бездомішкового (чистого).

Вивчивши механізми дифузійного та дрейфового току у напівпровіднику та відмінність їх природи, перейти до вивчення фізичних властивостей *p-n* переходу.

Особливу увагу слід звернути на утворення внутрішнього, дифузійного електричного поля у приконтактних шарах двох напівпровідників з різними типами провідності та зв'язаного з ними потенційного бар'єру, який слугує обмежуючим фактором для дифузійного руху основних носіїв заряду через перехід. Необхідно вміти пояснити зниження потенційного бар'єру при прямому зміщенні переходу (через векторне додавання зовнішнього  $E_{\text{пр}}$  і внутрішнього  $E_{\text{диф}}$  полів) і його збільшення при зворотному зміщенні. Звернути увагу на зміст таких термінів як: інжекція, екстракція, рівноважна і нерівноважна концентрація носіїв заряду, градієнт концентрації, контактна різниця потенціалів, запірний шар, область просторового заряду (ОПЗ) та інше. Для розуміння та засвоєння роботи усіх без виключення напівпровідникових приладів слід вміти аналітично (у формульному вигляді) і фізично показати, що збіднений носіями приконтактний шар (власне  $p$ - $n$  перехід) при збільшенні зворотної напруги, прикладеної до омичних контактів, розширюється, а при збільшенні прямої напруги - звужується. Це фізичне явище, що обумовлює залежність бар'єрної ємності  $p$ - $n$  переходу від зовнішньої напруги. Примітним є той факт, що ширина переходу в області  $p$  або  $n$  області обернено пропорційна концентрації акцепторних та донорних домішок.

$$\frac{d_p}{d_n} = \frac{N_d}{N_a}$$

Тобто чим сильніше легованим є напівпровідниковий матеріал тем вузькою буде область збіднення у ньому.

При розгляді ємності переходу треба знати причину її виникнення та вміти пояснити, чому при прямому зміщенні визначальною є дифузійна ємність, а при зворотньому - бар'єрна ємність  $p$ - $n$  - переходу.

При порівняльному розгляді теоретичної і реальної ВАХ  $p$ - $n$  переходу необхідно вміти першу обґрунтувати аналітично, тобто за допомогою формули, а на другій вказати ділянки, властиві реальному  $p$ - $n$  - переходу (діоду). При цьому особливо

важливо обґрунтувати такі три факти: наявність на реальній ВАХ ділянки пробою (при цьому потрібно знати природу та класифікацію пробоїв  $p$ - $n$  переходу); зростання зворотного струму при зворотних напругах до настання пробою ( $|U_{обр}| < |U_{проб}|$ ); зменшення крутизни прямої гілки реальної ВАХ у порівнянні з теоретичною. При розгляді механізмів пробою  $p$ - $n$  – переходу слід розібратися з фізичними процесами що відбуваються при цьому.

При вивченні електричних переходів інших видів особливу увагу потрібно звернути на випрямні та не випрямні (омічні) контакти «метал-напівпровідник» та фізичні процеси у них. Треба вміти довести, що у випадку випрямного контакту «метал-напівпровідник» у ньому відсутня явище інжекції, накопичення та розсмоктування неосновних носіїв заряду. Ця обставина дозволяє конструювати на базі таких переходів швидкодійні діоди Шоттки. Потрібно звернути увагу також на особливості омічних контактів, оскільки вони є обов'язковим елементів усіх напівпровідникових приладів.

Нарешті необхідно розібратися з особливостями зарядоперенесення та випрямлення струму на гетеропереходах, з'ясувати переваги та недоліки приладів створених на базі таких структур. При створенні гетеропереходів близьких за властивостям до ідеальних слід засвоїти, що потрібно підбирати контактуючі матеріали з близькими періодами кристалічної ґратки та коефіцієнтами термічного розширення.

Література: [1], с. 3-43; [2], с. 57-99, 156-171, 195-210

### Питання до самоконтролю

1. Пояснити механізм власної провідності напівпровідників.
2. Пояснити механізм електронної провідності напівпровідників. Як отримати матеріал  $n$ -типу провідності?
3. Пояснити механізм діркової провідності напівпровідників. Як отримати матеріал  $p$ -типу провідності?

4. Чому електропровідність домішкових напівпровідників зазвичай вища, ніж чистих напівпровідників? Як це пов'язано з глибиною залягання рівня домішок у забороненій зоні матеріалу.

5. Чому зі збільшенням температури рухливість носіїв у напівпровіднику зменшується? Які види розсіювання носіїв заряду у напівпровідниках існують?

6. Охарактеризувати існуючі способи виготовлення  $p-n$  переходів.

7. Записати і пояснити формули, що описують густину повного дрейфового та повного дифузійного струму в напівпровіднику.

8. Пояснити, яким чином в  $p-n$  переході при відсутності зовнішньої напруги виникає дифузійне електричне поле та як воно впливає на концентрацію основних та неосновних носіїв заряду.

9. Записати вираз для контактної різниці потенціалів на  $p-n$  переході та пояснити, за рахунок чого в переході при  $U = 0$  виникає потенціальний бар'єр.

10. Записати вираз, що описує зв'язок рівноважної концентрації неосновних носіїв заряду в  $p$  - та  $n$  - областях напівпровідника з рівноважною концентрацією основних носіїв та контактною різницею потенціалів.

11. Охарактеризувати явище екстракції носіїв на контакті двох напівпровідників (на  $p-n$  переході).

12. Чому при прямому підключенні  $p-n$  переходу до зовнішньої напруги відбувається збільшення концентрації неосновних носіїв заряду біля переходу у порівнянні з їх рівноважною концентрацією.

13. Чому струм через  $p-n$  перехід при нарузі зміщення  $U = 0$  не протікає, хоча спостерігається дифузійне та дрейфове переміщення носіїв заряду?

14. Чому при зворотному включенні  $p-n$  переходу зменшується концентрація неосновних носіїв заряду біля переходу у порівнянні з їх рівноважною концентрацією?

15. Чому при збільшенні зворотної напруги потенційний бар'єр на  $p$ - $n$  переході збільшується?

16. Вивести формулу для опису теоретичної ВАХ  $p$ - $n$  переходу. На яких явищах базуються вентильні властивості  $p$ - $n$  переходу?

17. Пояснити, як та чому товщина збідненої області на  $p$ - $n$  переході залежить від прикладеної зовнішньої напруги.

18. Зобразити аналітично та пояснити фізично, яким чином концентрація домішок впливає на товщину збідненої області  $p$ - $n$  переходу.

19. Дати визначення різкого та плавного, симетричного та несиметричного  $p$ - $n$  переходів.

20. Пояснити залежність бар'єрної ємності  $p$ - $n$  переходу від прикладеної зворотної напруги.

21. Дати визначення та пояснити природу дифузійної ємності  $p$ - $n$  переходу.

22. Зобразити повну еквівалентну схему  $p$ - $n$  переходу.

23. Чому пряма гілка реальної ВАХ проходить трохи нижче, ніж пряма гілка теоретичної ВАХ? Чому зворотний струм реального  $p$ - $n$  переходу завжди дещо більший за струм насичення?

25. Охарактеризувати основні види пробоїв  $p$ - $n$  переходу.

26. Чому на ділянці теплового пробою ВАХ спостерігається область негативного диференційного опору?

27. Охарактеризувати фізичні процеси в області контакту «метал-напівпровідник». Як застосовують випрямні та омічні контакти?

28. Які переваги та недоліки використання гетеропереходів при створенні приладів електроніки?

29. Описати основні моделі струмопроходження через гетеропереходи.

30. Навести зонні діаграми різних типів гетеропереходів та вирази, що описують ВАХ переходу для різних моделей зарядоперенесення.

## Розділ 2. Напівпровідникові діоди

Класифікація та система позначень діодів. ВАХ ідеального діода. Струм насичення і його залежність від температури. Відмінність ВАХ германієвого і кремнієвого діодів. Випрямні діоди. Імпульсні діоди та перехідні процеси в них. Напівпровідникові стабілітрони і стабістори. Варикапи. Тунельні та обернені діоди. Високочастотні діоди. Універсальні діоди.

### Методичні вказівки

При вивченні зарядоперенесення у діодах необхідно поперше з'ясувати відмінності реальних ВАХ германієвих і кремнієвих  $p-n$  переходах від теоретичних залежностей. Важливо знати, чому зворотній струм германієвих діодів вищий, ніж у кремнієвих, чому на зворотній гілці ВАХ кремнієвих діодів відсутня явно виражена ділянка насичення, в силу яких причин у германієвих діодів більш ймовірний тепловий пробій, а у кремнієвих – лавинний. При вивченні стабілітронів, тунельних та обернених діодів спостерігається одна цікава закономірність: в залежності від ступеня легування тунельний ефект властивий всім цим трьом різновидам діодів. При цьому у низьковольтних стабілітронах ( $U < 5$  В) він настає при зворотних напругах, утворюючи робочу ділянку стабілізації напруги на ВАХ. В обернених діодах, ступінь легування матеріалу яких вища, тунельний ефект розвивається при  $U = 0$ . У тунельних діодах з високим ступенем легування матеріалу ( $N_A = N_d = 10^{20} - 10^{21} \frac{1}{\text{см}^3}$ ), що відповідає надтонким  $p-n$  переходам ( $d \approx 10^{-8}$  м), тунельний ефект зберігається при невеликій прямій напрузі.

Важливим питанням є вивчення перехідних процесів у діодах, які проявляються при їх роботі в імпульсному режимі.

У зв'язку з інерціальністю процесів накопичення неосновних нерівноважних зарядів в базі за рахунок їх інжекції та розсмоктування, перехід діода в вихідний стан відбувається не миттєво. Тому для збільшення швидкодії ключових елементів електронних схем на діодах застосовуються спеціальні легуючі домішки, що створюють центри рекомбінації носіїв у напівпровідниках для зменшення часу їх життя; конструюються діоди з нерівномірною концентрацією домішок у базі; використовуються практично безінерційні діоди Шотткі.

Література: [1], с. 44-68; [2], с. 221-246

### Питання до самоконтролю

1. Розглянути відмінності у маркуванні діодів за європейською, американською, японською та російською системою позначень.

2. Пояснити відмінність ВАХ германієвих та кремнієвих випрямляючих діодів.

3. Вказати основні особливості випрямних діодів та перерахувати основні параметри, що використовуються для їх характеристики.

4. Зобразити ВАХ стабілітрона та стабістора. Вказати їх основні параметри. Перерахувати області застосування стабілітронів (стабісторів) в електричних схемах.

5. Зобразити схему стабілізатора напруги на стабілітроні та пояснити принцип її роботи.

6. З якою метою в універсальних діодах застосовуються точкові та мікросплавні *p-n* переходи. Вказати на особливості ВАХ таких діодів.

7. Охарактеризувати перехідні процеси у імпульсних діодах. Які існують методи підвищення швидкодії імпульсних діодів?

8. Описати фізичні процеси що відбуваються у тунельних діодах. Пояснити вигляд ВАХ діода за допомогою енергетичних діаграм.

9. Яка властивість  $p-n$  переходу використовується у варикапах? Пояснити будову та застосування варикапів та варакторів.

10. Особливості конструкції та застосування діодів Шоттки. Їх переваги та недоліки.

### **Розділ 3. Біполярні транзистори**

Загальні відомості про біполярні транзистори (БТ), їх режими роботи та типи. Визначення, класифікація і система позначень БТ. Будова і технологія виготовлення сплавного транзистора. Принцип дії БТ в активному режимі. Схеми включення БТ. Основні співвідношення між струмами, напругами і статичними коефіцієнтами вхідного струму для схеми включення транзистора зі спільною базою, спільним колектором і емітером.

Статичні характеристики БТ при підключенні зі спільною базою, спільним емітером та спільним колектором. Вплив температури на статичні характеристики транзисторів.

Диференціальні параметри БТ. Температурний дрейф статичних характеристик БТ. Диференціальні параметри й еквівалентні схеми БТ. Визначення параметрів БТ за його статичними характеристиками.

Принцип дії підсилювального каскаду на БТ. Способи забезпечення режиму спокою транзисторного каскаду. Динамічні характеристики БТ та їх використання. Частотні властивості БТ. Робота БТ у ключовому режимі. Одноперехідний транзистор. Високочастотні малопотужні транзистори. Потужні транзистори. Оцінка температурної нестабільності транзисторного каскаду.

### **Методичні вказівки**

Ця тема за обсягом та за значенням є основною темою курсу. БТ визначається як напівпровідниковий прилад з двома



взаємодіючими переходами, з трьома та більше відводами, підсилювальні властивості якого обумовлені явищами інжекції та екстракції неосновних носіїв. Основний режим роботи БТ – активний – має місце при прямому зміщенні емітерного переходу та зворотному – колекторного. Емітерний перехід інжектуює неосновні носії в базу, а колекторний їх екстрагує. Взаємодія переходів досягається, якщо ширину бази  $\omega$  зробити значно меншою за дифузійну довжину пробігу неосновних носіїв  $\lambda$ .

Розглядаючи роботу БТ в активному режимі, необхідно згадати фізичні процеси в окремому  $p$ - $n$  переході при дії на нього прямої та зворотної напруги. Потрібно усвідомити, що дифузія неосновних носіїв через базу забезпечується тим, що внаслідок інжекції виникає градієнт їх концентрації від емітерного переходу (ЕП) до колекторного переходу (КП). Необхідно показати, що розподіл концентрацій дірок у базі має лінійно-регресивний характер уздовж ширини бази. Важливо вміти показати напрямки всіх струмів транзистора як діркових, так і електронних. Звернути увагу на різницю площ переходів і на те, як ця обставина впливає на коефіцієнт перенесення носіїв у базі. Для засвоєння поняття «модуляція ширини бази» необхідно згадати матеріал попередньої теми, як ступінь легування напівпровідників впливає на товщину  $p$ - $n$  переходу, тоді стане зрозумілим, чому при слабо легованій базі та сильно легованому колекторі колекторний перехід при зворотному зміщенні розширюється переважно в бік бази, що служить причиною зменшення її активної ширини  $\omega$ . Далі потрібно усвідомити, чому саме в активному режимі роботи БТ можна зміною струму емітерного переходу (вхідного струму) керувати зміною вихідного колекторного струму, оскільки це відображається на коефіцієнті  $h_{21Б}$  (тобто необхідно розкрити фізичну сутність цього коефіцієнту).

Розглядаючи залежність коефіцієнту  $h_{21Б}$  від конструкції транзистора, треба вміти показати, що всі три співмножника, що складають цей коефіцієнт (коефіцієнт інжекції  $\gamma$ , коефіцієнт

перенесення  $\xi$ , коефіцієнт лавинного множення  $M$ ), в свою чергу, залежать від конструктивних особливостей пристрою. Потрібно показати, яким чином конструктивно чи технологічно можна підвищити коефіцієнт  $h_{21Б}$ . Корисно вміти пояснити, чому величина  $h_{21Б}$  не може перевищувати одиниці, якщо транзистор не працює в режимі пробую колекторного переходу.

При вивченні залежності коефіцієнта  $h_{21Б}$  від режимів роботи БТ потрібно за графіком функцій  $h_{21Б} = f(I_E)$  вміти пояснити природу висхідної ділянки кривої, ділянки насичення та падаючої ділянки. При розгляді залежності  $h_{21Б} = f(U_{КБ})$  треба вміти пояснити пологу ділянку характеристики (до настання пробую), коли при збільшенні напруги  $U_{КБ}$  незначно збільшується  $h_{21Б}$  за рахунок зменшення активної ширини бази приладу, що, відповідно, викликає зростання коефіцієнту перенесення носіїв заряду  $\xi$ .

Співвідношення, що описують зв'язок між струмами та напругою транзистора в усіх трьох схемах включення, перехід від  $h_{21Б}$  до  $h_{21Е}$  та  $h_{21К}$  потрібно вивчити напам'ять. Використовуючи ці співвідношення, показати що вхідний опір транзистора, ввімкненого за схемою зі спільним емітером, в залежності від величини  $h_{21Б}$  в десятки разів вищий, ніж вхідний опір БТ в схемі зі спільною базою; вихідний опір транзистора в схемі зі спільним колектором значно перевищує вхідний опір, ця обставина обумовлює застосування названої схеми включення при побудові емітерних повторювачів.

Вивчаючи статичні вхідні та вихідні характеристики БТ, необхідно не лише запам'ятати їх вигляд, але і вміти пояснити кожен ділянку на них та відмінність однойменних характеристик різних схем включення між собою. Особливу увагу потрібно звернути на те, що пологі ділянки вихідних характеристик БТ у схемі зі спільною базою та в схемі із загальним емітером мають різний нахил; що на сім'ї вихідних характеристик БТ у схемі зі спільною базою область режиму відсічки проходить нижче кривої  $I_K = f(U_{КБ})$  при  $I_E = 0$ , а на вихідних характеристиках транзистора в схемі із спільним

емітером – нижче кривої при  $I_B = - I_{KB0}$ ; що в схемі з спільною базою режим насичення спостерігається при напрузі  $U_{KB}$ , зворотній до  $U_{KB}$  в активному режимі, на відміну від схеми підключення БТ зі спільним емітером; всі ці явища потрібно пояснити через розгляд фізичних процесів, що відбуваються у пристрої. Нееквідистантність вихідних характеристик БТ пояснюється залежністю коефіцієнту  $h_{21B}$  від вхідного струму  $I_E$  ( $h_{21E}$  від  $I_B$ ). Додаткові відомості, що розширюють знання про роботу транзистора, містяться у його статичних характеристиках прямої передачі та зворотного зв'язку, хоча вони менше застосовуються на практиці.

Вивчаючи  $h$ -параметри транзистора, треба навчитися визначати їх графо-аналітичним шляхом за сім'єю статичних вхідних характеристик приладу, а також знати їх фізичний зміст.

Знання фізичних параметрів БТ створює можливість при аналізі його роботи не прив'язуватися до конкретної схеми включення пристрою, що дає можливість перейти до зручних схем заміщення, та дозволяє розрахувати транзисторний каскад у частотній та часовій областях за допомогою відомих з теорії електричних кіл методів. Важливо навчитися здійснювати перехід від фізичних параметрів до  $h$ -параметрів і навпаки та засвоїти залежність фізичних параметрів від температури та режимів роботи транзистора.

Розглядаючи динамічний режим роботи БТ, важливо врахувати, що для цього режиму є характерною зміна у часі хоча б однієї з величин (струм, напруга) транзистора. На практиці застосовується режим, коли на вхідний електрод пристрою подається змінна напруга. Порівнюючи роботу транзисторного каскаду на БТ увімкненому за схемою із спільним емітером та схемою із спільною базою, потрібно зрозуміти, чому перша схема неінвертуюча а друга – інвертуюча. Питання визначення характеристик навантаження БТ та їх застосування для розрахунку параметрів підсилювального транзисторного каскаду покладені в основу РГР №1. Для її виконання необхідно вивчити принципові схеми транзисторних каскадів не лише з

автономним джерелом базового зміщення, але й з автозміщенням у базовому (вхідному) колі, в яких установка початкового значення робочої точки на характеристиці навантаження приладу здійснюється за рахунок місцевого джерела живлення  $E_k$ .

Далі потрібно вивчити частотні властивості БТ. Окрім розуміння тих факторів, що обмежують застосування транзисторів на високих частотах, необхідно знати способи підвищення граничної частоти пристрою, та як ці способи реалізовані в високочастотних транзисторах (дрейфових, планарних, дифузійно-сплавних).

Важливим є знання часових характеристик БТ, оскільки дуже широко транзистори застосовуються в ключовому режимі в різноманітних швидкодіючих імпульсних схемах. Також потрібно вивчити роботу транзисторного ключа, розглянути процеси зміни концентрації неосновних носіїв у базі при миттєвих перемиканнях, та пов'язане з ним «затягування» передніх та задніх фронтів вихідних імпульсів. Важливо знати технологічні та схемо-технічні засоби підвищення швидкодії транзисторних ключів.

Література: [1], с. 69-160; [2], с. 257-269

### **Питання до самоконтролю**

1. Розглянути відмінності у маркуванні БТ за європейською, американською, японською та російською системою позначень.

2. Охарактеризувати основні режими роботи БТ.

3. Описати фізичні процеси в емітері, базі та колекторі БТ, що працює в активному режимі.

4. Записати вирази для струмів та статичного коефіцієнта передачі  $h_{21B}$  БТ підключеного за схемою зі спільною базою.

5. Записати вирази для струмів та статичного коефіцієнта передачі  $h_{21E}$  БТ в схемі із спільним емітером.

6. Записати вираз для струмів та статичного коефіцієнта передачі  $h_{21К}$  БТ в схемі із спільним колектором.

7. Чому струм бази транзистора в активному режимі в багато разів менший ніж струм емітера?

8. Чому в режимі відсічки зворотні струми емітерного  $I_{ЕБ0}$  та колекторного  $I_{КБ0}$  переходів відрізняються за величиною один від одного?

9. Чому лише в активному режимі БТ стає керованим приладом?

10. У скільки разів та в який бік зміниться вхідний опір транзистора при переході від схеми із спільною базою до схеми із спільним емітером, якщо  $h_{21Б} = 0,95$ ?

11. Пояснити явище та суть модуляції ширини бази БТ?

12. Чому при збільшенні колекторної напруги  $U_{КБ}$  в активному режимі зменшується ширина бази транзистора?

13. Прокоментувати залежності  $h_{21Б} = f(I_E)$ ;  $h_{21Б} = f(U_{КБ})$ .

14. З якою метою в БТ  $p$ - $n$ -переходи виготовляють з різною площею?

15. Чому в сплавних БТ область бази виготовляється слабо легованою, а області колектора та емітера – сильно легованими?

16. З якою метою в БТ намагаються конструктивно зменшити ширину бази?

17. Чому в БТ, увімкнених за схемою із спільним емітером, вхідний опір вище, ніж у транзисторах підключених за схемою із спільною базою?

18. Чому схема включення БТ з спільним колектором є основою для побудови каскадів емітерних повторювачів?

19. Надати порівняльну характеристику схем підключення транзистора зі спільною базою та спільним емітером.

20. Зобразити статичні вхідні характеристики БТ у схемі із спільною базою та пояснити їх вигляд.

21. Зобразити статичні вихідні характеристики БТ у схемі із спільною базою та пояснити їх вигляд.
22. Зобразити статичні вхідні характеристики БТ у схемі із спільним емітером та пояснити їх вигляд.
23. Зобразити статичні вихідні характеристики БТ у схемі із спільним емітером та пояснити їх вигляд.
24. Зобразити та пояснити вигляд статичних характеристик прямої передачі та зворотного зв'язку БТ в схемі із спільною базою.
25. Провести порівняльний аналіз характеристик зворотного зв'язку транзистора в схемі зі спільною базою та схемі із спільним емітером.
26. Пояснити фізичний зміст та розмірність диференціальних  $h$ -параметрів БТ.
27. Нарисувати фізичну T-подібну схему заміщення БТ зі спільною базою та пояснити зміст фізичних параметрів.
28. Нарисувати схему та пояснити принцип дії транзисторного каскаду на основі БТ підключеного за схемою зі спільним емітером та двома джерелами живлення.
29. Пояснити порядок побудови вхідних та вихідних характеристик навантаження каскаду на БТ.
30. Чому зі збільшенням температури колекторний струм БТ в схемі із спільним емітером зростає сильніше, ніж в схемі із спільною базою?
31. Чому зі збільшенням частоти зменшується амплітуда колекторного струму БТ та збільшується його запізнення за фазою від емітерного струму?
32. Нарисувати частотні характеристики БТ у схемі із спільним емітером та вказати на них граничну частоту.
33. Як пов'язані гранична частота БТ в схемі із спільною базою та схемі із спільним емітером?
34. Які фактори викликають погіршення частотних характеристик БТ на високих частотах?
35. Назвати та розкрити особливості роботи БТ у ключовому режимі.

36. Розглянути будову та пояснити принцип дії дрейфових транзисторів.

37. Розкрити конструкційні та технологічні особливості потужних транзисторів.

38. Описати порядок виготовлення планарних транзисторів.

39. Розглянути будову, принцип дії та застосування одноперехідних транзисторів.

40. Розглянути вплив ємностей переходів і розподіленого опору бази на частотні властивості БТ.

#### **Розділ 4. Польові транзистори**

Польові транзистори (ПТ) з керуючим  $p-n$  - переходом. Структурна схема, принцип дії та характеристики ПТ з керуючим  $p-n$  – переходом. ПТ з ізольованим затвором. Метал-діелектрик-напівпровідник (МДН) або метал-оксид-напівпровідник (МОН) - транзистори. Ефект поля. МДН - транзистори з індукованим каналом. МДН - транзистори з вбудованим каналом. Структурна схема, принцип дії та характеристики МДН - транзисторів. Вплив температури на характеристики ПТ. Динамічний режим роботи транзистору. Схеми забезпечення режиму спокою ПТ. Частотні властивості транзисторів. Потужні ПТ. Польові прилади з зарядовим зв'язком. Мікромінітюаризація МДН - приладів.

#### **Методичні вказівки**

Приступаючи до вивчення даної теми, треба осмислити назву «польові транзистори» або «уніполярні транзистори». Польовими вони називаються тому, що основою їх принципу дії є керування дрейфом носіїв заряду через канал за допомогою двох взаємно перпендикулярних електричних полів - поздовжнього та поперечного. Уніполярними, на відміну від біполярних, називаються вони тому, що в процесі протікання

струму у цих приладах беруть участь носії одного знаку – лише дірки або лише електрони – в залежності від типу провідності каналу.

Вивчаючи будову ПТ з керуючим  $p$ - $n$  переходом, необхідно звернути увагу на те, що в робочому режимі  $p$ - $n$  перехід між затвором та витокком (керуючий перехід) вмикається у зворотному напрямі. По-перше, це забезпечує можливість ефективного керування шириною, і, як наслідок, провідністю каналу за допомогою змінної вхідної напруги  $U_{ЗВ}$ , що є необхідним для створення підсилювального ефекту. По-друге, ця обставина обумовлює найважливішу перевагу ПТ перед біполярними – високий вхідний опір. Це дозволяє керувати приладом не за допомогою струмів, як у БТ, а за допомогою напруги.

При вивченні принципу дії ПТ з керуючим  $p$ - $n$  переходом треба зрозуміти, чому перекриття каналу при збільшенні напруги  $U_{ЗВ}$  за модулем починається в області стоку; чому при одночасному збільшенні стокової  $U_{СВ}$  та затворної  $U_{ЗВ}$  напруги для великих  $U_{ЗВ}$  перекриття каналу здійснюється за допомогою меншої напруги  $U_{СВ}$ ; чому при напрузі відсічки  $U_{ЗВ\text{ відс}}$  через канал протікає деякий струм  $I_C$ , що відрізняється від нуля; чому напруга відсічки  $U_{ЗВ\text{ відс}}$  є конструктивним параметром ПТ з керуючим  $p$ - $n$  переходом, постійним для даного пристрою; чому ця напруга пропорційна концентрації домішок у каналі.

Розглядаючи статичні характеристики ПТ з керуючим  $p$ - $n$  переходом, не достатньо запам'ятати їх форму. Як і при розгляді характеристик БТ, необхідно вміти надати чітку фізичну трактовку кожній ділянці кривої. Особливо слід звернути увагу на область вихідних характеристик приладу при  $0 < U_{СВ} < U_{СВ\text{пер}}$ , яка називається крутою, або омічною областю. В цій області диференційний опір ПТ з керуючим  $p$ - $n$  переходом змінюється зі зміною напруги на затворі, це дозволяє використовувати транзистор як електронно-керуючий резистор.

При вивченні МДН (МОН) – транзисторів, чи ПТ з ізолюваним затвором, необхідно врахувати, що в них



використовується раніше вивчене явище, під назвою «ефект поля». Треба прийняти до уваги, що якщо у ПТ з керуючим  $p-n$  переходом вхідний опір досягає декілька сотень кілоомів, то у МДН - транзисторах він складає одиниці та десятки мегомів за рахунок діелектричного шару між металічним затвором та напівпровідниковою підкладкою.

При розгляді явищ на поверхні напівпровідника потрібно знати, що в основу роботи МОН (МДН) транзисторів покладений ефект поля, який заключається в керуванні електропровідністю поверхневого шару напівпровідникового кристалу за допомогою напруги, що прикладається до металу і напівпровідника, розділених шаром діелектрика. Треба з'ясувати та прояснити фізичний зміст таких термінів, як «збагачення», «збіднення», «інверсія», «інверсний поверхневий шар» тощо. Використовуючи знання цього матеріалу, в подальшому потрібно розглянути будову та роботу МДН - транзисторів з індукованим каналом (збагаченого типу) та з вбудованим каналом (збідненого типу). Далі слід вивчити вихідні та прохідні статичні характеристики МДН - транзисторів, звернути увагу на те, при якій напрузі  $U_{зв}$  вони знімаються, та відмінність їх від характеристик ПТ з керуючим  $p-n$  переходом.

Розглядаючи залежність характеристик ПТ від температури, необхідно вміти показати на стоко-затвірних характеристиках термостабільну точку, а також пояснити, чому у даних приладах, на відміну від БТ, відсутнє явище самоперегріву.

Розглядаючи граничні режими роботи ПТ, особливу увагу слід звернути на можливість пробою діелектричного шару в МДН - транзисторах статичним зарядом на затворі, вивчити схеми технічні способи захисту затвору в схемах та запобіжні заходи при їх монтажі.

Частотні властивості ПТ необхідно пов'язувати з їх еквівалентними схемами. При розгляді динамічного режиму роботи ПТ з керуючим  $p-n$  переходом вивчити принципові схеми основних каскадів на їх основі.

Література: [1], с.161-198; [2], с.270-277; [8], с. 5-67

### Питання до самоконтролю

1. Будова та принцип дії ПТ з керуючим  $p$ - $n$  переходом.
2. Чому вхідна напруга транзистора з керуючим  $p$ - $n$  переходом  $U_{зв}$  повинна вмикати  $p$ - $n$  перехід між каналом та затвором в зворотному напрямі?
3. При якому співвідношенні концентрацій домішок у затворі та каналі ПТ з керуючим переходом, що має  $p$ -канал, можливе ефективне керування струмом стоку: а)  $N_{ак} \gg N_{дз}$ ; б)  $N_{ак} \approx N_{дз}$ ; в)  $N_{ак} \ll N_{дз}$ ; г)  $N_{дк} \ll N_{аз}$ ?
4. Описати принцип дії ПТ з керуючим  $p$ - $n$  переходом за допомогою кількісних співвідношень.
5. Нарисувати та пояснити вигляд статичних характеристик ПТ з керуючим  $p$ - $n$  переходом.
6. Дати визначення та вказати межі зміни диференціальних параметрів ПТ з керуючим  $p$ - $n$  переходом.
7. Чому ПТ мають більш високий вхідний опір, ніж біполярні?
8. Пояснити будову та принцип дії МДН (МОН) - транзисторів з індукованим каналом, їх статичні характеристики.
9. Пояснити будову та принцип дії МДН (МОН) - транзисторів із вбудованим каналом, їх статичні характеристики.
10. Пояснити залежність характеристик ПТ від температури.
11. Провести порівняльний аналіз будови, роботи та застосування МДН - транзисторів та ПТ з керуючим  $p$ - $n$  переходом.
12. Навести та пояснити роботу схеми підсилювального каскаду на ПТ з керуючим  $p$ - $n$  переходом.

13. Чому у ПТ, на відміну від транзисторів біполярних, відсутній самоперегрів?

14. Навести еквівалентну схему ПТ та пояснити призначення її основних складових.

15. Пояснити за допомоги еквівалентних схем частотні властивості ПТ.

16. Розкрити способи забезпечення режиму спокою каскадів на ПТ з керуючим *p-n* переходом; навести відповідні принципові схеми.

17. Викласти основні вимоги до потужних ПТ та МДН транзисторів.

18. Розглянути конструктивні особливості і вихідні характеристики транзисторів зі статичною індукцією.

19. Пояснити будову та принцип дії польових приладів з зарядовим зв'язком.

20. Розкрити основні режими роботи МДН-структури в приладах з зарядовим зв'язком.

## **Розділ 5. Тиристри**

Будова та принцип дії тиристорів. ВАХ тиристора. Діністорний режим. Триністорний режим. Залежність напруги переключення триністора від струму керування. Симістри. Способи комутації тиристорів. Позначення тиристорів. Перехідні процеси в тиристорі. Особливості керування тиристорами. Побудова електричних кіл керування. Вибір режиму формувача імпульсів керування. Параметри імпульсів керування.

### **Методичні вказівки**

Вивчення тиристорів слід починати з розгляду чотиришарової *p-n-p-n*-структури при подачі зовнішньої напруги лише на крайні області. При цьому бажано фізичні процеси в цій структурі при зворотній, а після цього при прямій

анодній напрузі  $U_A$ , розглядати паралельно з роботою тиристорного включення двох транзисторів з різним типом провідності. Кожний фізичний процес у тиристорі, що розглядається, потрібно пов'язувати з відповідною ділянкою ВАХ. Момент включення тиристора потрібно вміти характеризувати як якісно, пояснюючи фізичні процеси в чотиришаровій структурі, так і кількісно, за допомогою коефіцієнтів  $h_{21Б1}$  та  $h_{21Б2}$  еквівалентних  $p-n-p$ - та  $n-p-n$ -транзисторів, що складають тиристорну структуру, та анодного струму  $I_A$ .

З іншого боку, оскільки тиристири є приладами з  $S$  - подібною ВАХ, що має ділянку з негативним диференціальним опором, то вони є базою побудови імпульсних пристроїв, що генерують електромагнітні хвилі. У зв'язку з цим дуже важливо розглянути природу та механізм дії внутрішнього позитивного зв'язку в приладі. Необхідно вміти показати, яким чином зростання інжекційних процесів на одному з прямо ввімкнених емітерних переходів тиристора при позитивній анодній напрузі приводить до зростання інжекції через другий перехід. Аналогічним чином треба вміти пояснити на двотранзисторній еквівалентній схемі тиристора, яким чином збільшення емітерного струму  $p-n-p$ -транзистора приводить до збільшення прямого зміщення емітерного переходу  $n-p-n$ -транзистора та, як наслідок, збільшення емітерного струму цього транзистора, як це явище впливає на подальше відкриття емітерного переходу  $p-n-p$ -транзистора. При розгляді вмикання тиристора треба чітко уявляти, що саме внутрішній позитивний зв'язок визначає лавиноподібний характер цього процесу.

Розглядаючи роботу тиристора в керованому тиристорному режимі, необхідно вміти показати, що збільшення струму керування, збільшення прямого зміщення одного з емітерних переходів тиристора приводить до того, що внаслідок прискореного накопичення надлишкових зарядів дірок у  $p$ -базі, а електронів – в  $n$ -базі, перемикання приладу настає при менших анодних напругах. Цю обставину необхідно проілюструвати за

допомогою сім'ї ВАХ триністора. Важливо враховувати, що при струмі керування  $I_{кер} = I_{спр}$  тиристор працює як звичайний діод.

Дуже важливо мати уявлення про блокувальну властивість тиристора та знати способи її підвищення.

Вивчати перехідні процеси при перемиканні тиристорів необхідно в наступній послідовності: ввімкнення струмом керування при малих анодних струмах, ввімкнення струмом керування при великих анодних струмах, ввімкнення тиристора по аноду (ефект  $\frac{dU_a}{dt}$ ), вимкнення тиристора. Наприкінці слід звернути увагу на імпульсний режим роботи тиристора оскільки він часто використовується в пристроях і системах енергетичної електроніки.

Розглядаючи різновиди тиристорів, особливу увагу необхідно звернути на симістори, що дозволяють регулювати діюче значення напруги в колах змінного струму.

Література: [1], с.199-218;

### Питання до самоконтролю

1. Розглянути будову, принцип дії та ВАХ тиристора в диністорному режимі.

2. Розглянути будову, принцип дії та сім'я ВАХ тиристора в триністорному режимі.

3. Пояснити механізм утворення та дію позитивного зворотного зв'язку в триністорній структурі.

4. Пояснити принцип дії тиристора за допомогою розгляду роботи тиристорного включення двох транзисторів різного типу провідності.

5. Що таке блокуюча здатність тиристора та як вона досягається?

6. Розглянути будову, принцип дії та сім'я ВАХ симістора.

7. Охарактеризувати способи включення тиристорів.

8. Охарактеризувати способи виключення тиристорів.

9. Чому в імпульсному режимі по аноду тиристор відкривається при менших анодних напругах  $U_a$ , ніж у неперервному режимі?

10. Охарактеризувати параметри та систему позначень тиристорів.

## **Розділ 6. Лавинно-прольотні діоди та діоди Ганна**

Лавинно-прольотні діоди (ЛПД). Типова конструкція. Механізм виникнення від'ємного диференціального опору. Використання ЛПД для генерації НВЧ - коливань. Основні параметри ЛПД.

Загальні відомості про ефект Ганна. Вимоги до зонної структури напівпровідника. Статична ВАХ діодів Ганна. Зарядова нестійкість у приладах з від'ємним диференціальним опором. Генерація НВЧ - коливань у діодах Ганна.

### **Методичні вказівки**

Вивчення роботи ЛПД слід починати з розгляду фізичних явищ, що відбуваються у приладах.

ЛПД це напівпровідниковий діод, що має негативний диференціальний опір в НВЧ - діапазоні внаслідок розвитку так званої лавинно-пролітної нестійкості. Остання обумовлена ударною іонізацією та дрейфом носіїв заряду в  $p-n$  - переході у режимі зворотного зміщення.

Виникнення негативного опору в ЛПД обумовлено двома фізичними процесами, що мають кінцеві часи протікання в області просторового заряду  $p-n$ -переходу в режимі лавинного множення. Перший процес пов'язаний з часом наростання лавинного струму, а другий процес - з проходженням носіїв через пролітну область. Їх суперпозиція призводить до появи фазового зсуву між струмом і напругою на відводах діода. Одним з основних критеріїв, необхідним для роботи ЛПД, є приблизна рівність між періодом коливань НВЧ поля і

характерним часом прольоту носіїв через область просторового заряду.

Особливості фізичних процесів що відбуваються у ЛПД слід розглянути на прикладі діоду Ріда, який історично був створений першим.

Після ознайомлення з принципом роботи ЛПД слід розібратися в конструктивних особливостях діодів різної конструкції та пристроїв, що використовуються для підсилення електромагнітних хвиль, які генеруються діодами (резонаторних контурів).

Наприкінці слід запам'ятати характерні параметри різних типів ЛПД (вихідну потужність, частоту і коефіцієнт корисної дії), що працюють у імпульсному або безперервного режимі НВЧ генерації.

Ознайомлення з принципами роботи діодів Ганна слід розпочати з вивчення та розуміння суті ефекту Ганна. Для цього потрібно з'ясувати особливості напівпровідникового матеріалу що обумовлюють можливість виникнення цього ефекту. Ефект Ганна спостерігається головним чином у двохдолинних напівпровідниках, зона провідності яких складається з однієї нижньої долини і кількох верхніх долин. Слід розібратися у процесах, що відбуваються у напівпровіднику при прикладанні зовнішнього електричного поля. Після цього можна приступити до вивчення принципів роботи самого діода Ганна.

Діод Ганна - напівпровідниковий діод, що складається з однорідного напівпровідника, який генерує високочастотні коливання при прикладанні постійного електричного поля. Фізичною основою, що дозволяє реалізувати такі властивості діоду, є ефект Ганна, який полягає в генерації високочастотних коливань електричного струму в однорідному напівпровіднику з N-подібною ВАХ. Ефект Ганна виявлений американським фізиком Дж. Ганном (J. Gunn) у 1963 р. в кристалах арсеніду галію (GaAs) з електронною провідністю. Ганн виявив, що при прикладанні електричного поля  $E$  ( $E_{пор} \geq 2-3$  кВ/см) до однорідних зразків з арсеніду галію  $n$ -типу в зразках виникають

спонтанні коливання струму. Пізніше він встановив, що при  $E > E_{\text{пор}}$  у зразку, зазвичай у катода, виникає невелика ділянка сильного поля - «домен», який дрейфує від катода до анода зі швидкістю  $v \sim 10^6$  м/с і зникає на аноді. Потім у катода формується новий домен, і процес періодично повторюється. Моменту виникнення домену відповідає падіння струму, що протікає через зразок. Моменту зникнення домену у анода - відновлення колишньої величини струму. Період коливань струму приблизно дорівнює прогонному часу, тобто часу, за який домен дрейфує від катода до анода.

Особливу увагу слід зосередити на вивченні роботи діода у режимі прольоту, оскільки генерація змінного струму в цьому випадку відбувається на частоті, яка визначається параметрами резонансного електричного кола тобто є керованою.

Нарешті наприкінці потрібно з'ясувати недоліки та переваги генераторів Ганна порівняно з іншими приладами, що генерують електромагнітні коливання.

Література: [2], с.246-247; [8], с.150-221

### **Питання до самоконтролю**

1. Розглянути типову конструкцію, принцип дії та ВАХ ЛПД.
2. Пояснити механізм виникнення від'ємного диференціального опору у ЛПД.
3. Розглянути способи використання ЛПД для генерації НВЧ-коливань.
4. Викласти основні параметри ЛПД різної конструкції.
5. Пояснити суть ефекту Ганна.
6. Сформулювати вимоги до зонної структури напівпровідника необхідні для реалізації ефекту Ганна.
7. Навести статичні ВАХ діодів Ганна та пояснити їх вигляд.
8. Пояснити причину зарядової нестійкості у приладах з від'ємним диференціальним опором.



9. Пояснити механізм генерація НВЧ - коливань у діодах Ганна.

10. Вказати недоліки та переваги генераторів на діодах Ганна порівняно з іншими приладами призначеними для генерації високочастотних коливань.

## **Розділ 7. Оптоелектронні напівпровідникові прилади**

Загальні відомості. Поглинання та випромінювання світла напівпровідниками. Спектральні характеристики. Напівпровідникові фотоприймачі. Фоторезистори. Фотодіоди і фотоелементи. Фотоприймачі з внутрішнім підсиленням. Світлодіоди і напівпровідникові лазери. Оптрони та їх застосування.

Загальні відомості. Характеристики сонячного випромінювання та ККД сонячних перетворювачів. Сонячні елементи з  $p-n$  – переходами. Сонячні елементи з гетеропереходами. Еквівалентна схема фотоелементів. Темнові та світлові ВАХ ідеальних і реальних сонячних елементів. Визначення основних характеристик фотоперетворювачів. Основні фізичні процеси у фотоперетворювачах. Монокристалічні та плівкові сонячні елементи. Одноперехідні та тандемні фотоперетворювачі.

### **Методичні вказівки**

Вивчення теми потрібно почати з повторення матеріалу присвяченого основним оптичним властивостям напівпровідників. Даний розділ є вступним та служить своєрідним фундаментом для вивчення інших розділів теми. Без його засвоєння неможливо зрозуміти принципи функціонування оптоелектронних приладів.

Студентам потрібно згадати, що таке електромагнітна хвиля, її основні характеристики, розглянути поділ цих хвиль на світлові та радіохвилі. Більш докладно слід зупинитися на явищі

поглинання світла напівпровідниками, зрозуміти суть закону Бугера, таких поняттів як коефіцієнт поглинання, відбиття та проходження світла. Потрібно знати визначення абсолютного та відносно показників заломлення речовини, зв'язок між коефіцієнтами поглинання, відбиття та проходження світла (співвідношення Ламберта). У подальшому потрібно з'ясувати різницю у будові енергетичних зон прямозонних та непрямозонних напівпровідників, зрозуміти чому коефіцієнт поглинання прямозонних матеріалів суттєво вищий ніж непрямозонних. Необхідно також розібратися як визначається ширина забороненої зони прямозонних та непрямозонних напівпровідників.

Важливим для розуміння процесів поглинання світла у напівпровідниках є поняття екситонного поглинання, у зв'язку з цим потрібно розібратися, що таке екситон, і які екситони існують.

Особливу увагу потрібно звернути на явище випромінювальної рекомбінації носіїв заряду у напівпровідниках, яке приводить до люмінесценції матеріалів. Слід з'ясувати різницю між вимушеною та стимульованою рекомбінацією.

Важливими різновидами люмінесценції є люмінесценція викликана інжекцією носіїв заряду через  $p-n$  – перехід та люмінесценція пов'язана з ударною іонізацією у  $p-n$  - переході, що включений у зворотному напрямі, оскільки ці ефекти покладені в основу роботи світлодіодів.

Необхідно також розібратися у явищах, що при освітленні обумовлюють фоторезистивний ефект у однорідних напівпровідниках та виникнення фото-ЕРС у  $p-n$ -переходах. Все це дозволить зрозуміти поділ приладів оптоелектроніки на такі що випромінюють світло, приймачі випромінювання, оптопари і оптоелектронні ІМС.

У подальшому потрібно вивчити конструкцію та принцип дії світлодіодів. Звернути увагу на те, як матеріал напівпровідника впливає на колір випромінювання світла

приладом. Розглянути принцип роботи світлодіодів з кольором випромінювання, що регулюється. Ознайомитися з структурою сегментних та матричних індикаторів на базі світлодіодів.

Далі потрібно зрозуміти принцип дії світловипромінюючих приладів, що генерують когерентне випромінювання, тобто твердотільних лазерів. Також важливо розібратися чим одномодові лазери відрізняються від багатомодових.

При вивченні фотоприймачів необхідно ознайомитися з будовою та принципом дії фоторезисторів, фотодіодів, їх будовою, сім'єю ВАХ та застосуванням. Вивчаючи фотоприймачі з внутрішнім підсиленням, необхідно з'ясувати як зміна світлового потоку впливає на роботу фототранзисторів. Ці процеси аналогічні тим, які відбуваються у звичайних БТ при зміні струму бази (при підключенні за ССЕ) тобто зміна освітленості фототиристорів рівнозначна зміні струму керування звичайних тиристорів.

Важливо зрозуміти принципи роботи сонячних елементів оскільки останнім часом вони знаходять все більше застосування для перетворення енергії сонця в електричну. Слід знати основні процеси, що відбуваються у фотоперетворювачах. Необхідно вміти навести співвідношення, що описують темнові та світлові ВАХ сонячних елементів, та вміти визначати з них основні характеристики фотоперетворювачів, вміти зображати еквівалентну схему приладу та знати яким чином на характеристики фотоперетворювача впливають їх послідовний та шунтуючий опори. Також потрібно розуміти чому оптимальними з точки зору отримання максимальної ефективності перетворення сонячної енергії у електричну є матеріали, що мають ширину забороненої зони близьку до 1,5 еВ.

У подальшому слід розібратися з конструкцією та характеристиками резисторних, діодних, транзисторних та тиристорних оптронів. Розглянути питання застосування оптронів в електричних колах як елементів з високим ступенем розв'язки: імпульсних трансформаторів, перемикачів,

потенціометрів, змінних конденсаторів. Важливо також знати приклади схематичного застосування оптронів, як оптичних заміників основних елементів електронних схем.

Література: [1], с.219-256; [2], с.247-257, 269-270; [8], с.270-434

### **Питання до самоконтролю**

1. Сформулювати основні поняття оптики. Що з себе являють електромагнітні хвилі, які їх види ви знаєте?

2. Які механізми поглинання світла напівпровідниками існують? Сформулювати та записати закон Бугера, співвідношення Ламберта.

3. Що таке абсолютний і відносний показники заломлення, коефіцієнти відбиття та пропускання? Записати співвідношення, що визначає зв'язок коефіцієнту відбиття з показником заломлення.

4. Чим відрізняються прямозонні та непрямозонні матеріали, їх коефіцієнти поглинання?

5. Викласти методику визначення ширини забороненої зони прямозонних і непрямозонних напівпровідникових матеріалів.

6. Що таке екситон? Чому дорівнює енергія утворення екситону. Які види екситонів ви знаєте. Як змінює спектри поглинання напівпровідників екситонне поглинання.

7. Пояснити суть явища люмінесценції. Які її види ви знаєте? У чому різниця між спонтанною та вимушеною рекомбінацією носіїв заряду.

8. Пояснити механізми інжекційної та ударної люмінесценції, принципи дії світлодіодів. Навести їх основні характеристики та параметри.

9. Для чого призначені оптоелектронні напівпровідникові прилади. Навести їх класифікацію.

10. Пояснити сутність фоторезистивного ефекту в напівпровідниках та розглянути його застосування в фоторезисторах.

11. Пояснити принцип роботи світлодіодів з кольором свічення що перелаштовується. Навести схеми їх будови та підключення.

12. Пояснити принцип роботи напівпровідникових лазерів та навести схему їх будови. Вказати області використання одномодових та багатомодових лазерів.

13. Пояснити процес виникнення фото-ЕРС в освітленому *p-n*-переході. Від чого залежить величина фото-ЕРС?

14. Пояснити принцип дії та зобразити сім'ю ВАХ фотодіоду для різних значень світлового потоку.

15. Пояснити роботу фотоприймачів із внутрішнім підсиленням.

16. Яку ширину забороненої зони повинен мати напівпровідниковий матеріал для того щоб сонячний елемент мав максимальний ККД.

17. Пояснити чому фотоперетворювачі на основі гетеропереходів мають переваги перед сонячними елементами на основі *p-n*-переходів.

18. Викласти фізичні принципи роботи сонячних елементів. Вказати основні процеси, що відбуваються у фотоперетворювачах.

19. Зобразити еквівалентну схему сонячного елемента, його темнові та світлові ВАХ.

20. Пояснити вплив на ВАХ послідовного і шунтуючого опорів фотоперетворювача.

21. Пояснить як на світловій ВАХ сонячного елемента знайти точку максимальної потужності. Яким чином знайти основні параметри фотоперетворювача: струм короткого замикання, напругу холостого ходу, фактор заповнення ВАХ, ККД.

22. Пояснити переваги тандемних фотоперетворювачів перед одноперехідними.

23. Пояснити принцип роботи оптронів.

24. Охарактеризувати застосування оптронів в якості елементів електронних схем.

## **Розділ 8. Основи мікроелектроніки**

Основні поняття та визначення. Технологія виготовлення інтегральних МДП структур. Біполярні транзистори. МОН (МДП) транзистори. Діоди. Резистори. Конденсатори. Індуктивності.

### **Методичні вказівки**

При вивченні цього розділу, який завершує собою навчальну дисципліну «Твердотільна електроніка», потрібно ознайомитися з основними етапами розвитку мікроелектроніки, засвоїти такі поняття як мікроелектронний виріб, інтегральна схема (ІС), елемент ІС. Слід зрозуміти, що основною технологічною відмінністю сучасних електронних схем є їх виготовлення у єдиному технологічному процесі.

В подальшому слід ознайомитися з особливостями класифікації ІС та системою їх умовних позначень. Слід чітко зрозуміти різницю між двома основними технологіями виготовлення ІС – гібридною і напівпровідниковою, з'ясувати їх переваги та недоліки. Потрібно засвоїти, що при використанні гібридної технології розрізняють два різновиди плівкових ІС: товстоплівкові, у яких товщина нанесених плівок складає  $d > 10$  мкм та тонкоплівкові, у яких  $d \leq 1-2$  мкм. Студенти повинні знати як виглядають та створюються за цією технологією такі неактивні елементи мікросхем як резистори, конденсатори, індуктивності та ін.

В подальшому необхідно розібратися з особливостями планарно-дифузійної та планарно-епітаксійної технологіями створення ІС, їх недоліками та перевагами, методами ізоляції

окремих елементів мікросхеми, способами створення активних та пасивних елементів.

Особливу увагу студентам потрібно звернути на особливості біполярних і МОН-структур твердотільної мікросхемотехніки, на їх параметри, характеристики та застосування у мікросхемах різного ступеня інтеграції. Потрібно засвоїти, що, звичайно, у мікросхемах замість діодів застосовуються біполярні транзистори у діодному вмиканні і відомо п'ять варіантів такого вмикання. Важливим видається також ознайомлення студентів з топологією і схемотехнікою перспективних схем з інжекційним живленням.

І, нарешті, дуже корисно в результаті вивчення даного розділу усвідомити, що мікросхемна техніка за своїми прийомами і засадами суттєво відрізняється від дискретної транзисторної схемотехніки. Саме тому розділ 7 «Основи мікроелектроніки» є перехідним «містком» необхідним для якісного засвоєння студентами курсу мікросхемотехніки.

Література: [1], с.234-257; [2], с.284-294.

### **Питання до самоконтролю**

1. Як ІС поділяються за ступенем інтеграції?
2. Розглянути відмінності у маркуванні ІС за європейською, американською, японською та російською системою позначень.
3. Розглянути особливості планарно-епітаксійної та планарно-дифузійної технологій виготовлення ІС. Вказати недоліки планарно-дифузійної технології.
4. Провести порівняльну характеристику гібридних і напівпровідникових ІС з огляду на прецизійність приладів і ступінь їх інтеграції.
5. Описати процедуру виготовлення таких неактивних елементів ІС як резистори, конденсатори, індуктивності.
6. Описати процедуру виготовлення таких активних елементів ІС як тиристори, транзистори та діоди.

7. Чому серед твердих біполярних інтегральних транзисторів переважна більшість має *n-p-n* провідність?

8. Вказати топологічні особливості багатомітерних і багатоколекторних біполярних структур. Де вони застосовуються?

9. Розглянути особливості технології виготовлення інтегральних МДП структур.

10. Розглянути будова, принцип дії і застосування вентилів ІС з інжекційним живленням.

#### **4. РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНА ТА КУРСОВА РОБОТА ТА МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ЇХ ВИКОНАННЯ**

До виконання розрахунково-графічної та курсової робіт (РГР, КР) слід приступати лише після вивчення теоретичного матеріалу відповідних тем робочої програми.

Кожна робота складається з реферативної частини, що включає письмову відповідь студента на 3 питання відповідної теми та розрахункової частини (2 завдання у РГР1 та 2 завдання у КР2). Питання та завдання РГР (КР) поділені на варіанти. Студент повинен виконувати варіант якій відповідає його номеру у списку групи.

Після виконання РГР (КР) здають викладачу на перевірку. Оцінка за перевірені роботи разом з оцінками студента за лабораторний практикум є основою для допуску його до семестрового екзамену з дисципліни.

РГР (КР) виконується в окремому зошиті. На обкладинці зошиту повинні бути вказані: прізвище, ім'я, по батькові студента, номер групи, варіант контрольної роботи. Текст завдання на реферативну та розрахункові частини повинні бути наведені повністю.

Робота повинна бути оформлена повно, акуратно та розбірливо, з дотриманням ДСТУ та у відповідності до норм, що прийняті в науково-технічній літературі. Відповідь на



кожне питання реферативної частини повинна займати не менше однієї сторінки зошиту. Вона повинна бути написана власними словами і являти собою не переписаний з окремого запропонованого джерела уривок тексту, а результат обмірковування матеріалу отриманого з 2-3 джерел. При цьому додатково перевагою реферативної відповіді вважається застосування довідникових даних, можливий схемотехнічний приклад (у випадку, якщо він є доречним). Всі рівняння, формули, рисунки та графіки повинні бути пронумеровані арабськими цифрами в межах відповіді на одне питання.

У кінці роботи наводиться список використаних джерел, у відповідності до правил оформлення літератури. Посилання в тексті роботи повинні містити номер джерела за списком, наприклад [1].

### **Розрахунково-графічна робота (перший семестр курсу).**

Розрахунок статичних та динамічних параметрів біполярного транзистора.

## **Реферативна частина**

У таблиці 1 вказана тема та номери питань за варіантами. Їх необхідно брати з переліку питань для самоконтролю у відповідній темі методичних вказівок. Наприклад, питання 1.6 розшифровується таким чином: тема 1, питання 6 – Охарактеризувати існуючі способи виготовлення  $p-n$ -переходів.

Таблиця 1. Питання реферативної частини РГР1

<b>Варіанти</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
Теми питання та	1.1	1.2	1.3	1.4	1.6	1.7	1.8	1.9	1.10	1.12
	3.1	3.2	3.3	3.4	3.7	3.8	3.10	3.12	3.14	3.15
	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	4.10
<b>Варіанти</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>
Теми питання та	1.14	1.15	1.16	1.17	1.18	1.20	1.22	1.25	1.28	1.30
	3.17	3.18	3.19	3.20	3.21	3.26	3.27	3.28	3.29	3.30
	4.11	4.12	4.13	4.14	4.15	4.16	4.17	4.18	4.19	4.20

## Розрахункова частина

Початкові данні для розрахункової частини завдання 1 РГР для різних варіантів наведені у табл.2.

### Зміст завдання 1

1. Визначити величину контактної різниці потенціалів на різкому  $p$ - $n$ -переході при температурах  $T_1 = 0$  К та  $T_2 = 300$  К та нульовому зовнішньому зміщенні. Вважати, що при кімнатній температурі всі атоми легуючої домішки іонізовані. Таблиця 2.

2. Визначити товщину  $p$ - $n$ -переходу при температурі  $T = 300$  К та напрузі зміщення на переході  $U_1 = 0$  та  $U_2 = -50$  В. Визначити відношення товщини збіднених шарів в  $p$ - та  $n$ -областях. Перехід вважати різким.

3. Знайти максимальні значення напруженості  $E$  та потенціалу  $\phi$  електричного поля на  $p$ - $n$ - переході та зобразити їх розподіли вздовж переходу.

4. Для значень температури та напруги взятих з попереднього пункту визначити величину бар'єрної ємності  $p$ - $n$ -переходу.

5. Визначити величину теплового струму, що проходить через  $p$ - $n$  перехід при температурах  $T_1 = 300$  К та  $T_2 = 350$  К.

Таблиця 2. Початкові данні для розрахункової частини РГР1

№	Матеріал діоду	Концентрація легуючої домішки, $N$ , см <sup>3</sup>		Час життя носіїв, мкс		Дифузійна довжина вільного пробігу неосновних носіїв, мкм		Макс. допустима густина прямого струму, А/см <sup>2</sup>	Площа переходу, см <sup>2</sup>
		$N_d$	$N_a$	$\tau_n$	$\tau_p$	$L_n$	$L_p$		
1	Ge	$10^{16}$	$5 \cdot 10^{16}$	20	10	80	60	50	0,01
2	Ge	$10^{17}$	$2 \cdot 10^{16}$	40	20	90	70	40	0,02

3	Si	$10^{17}$	$10^{16}$	30	10	100	80	100	0,1
4	GaAs	$10^{17}$	$4 \cdot 10^{17}$	30	20	0,4	0,3	100	0,2
5	Ge	$5 \cdot 10^{16}$	$2 \cdot 10^{16}$	50	12	80	70	50	0,3
6	Si	$10^{18}$	$4 \cdot 10^{17}$	50	30	110	90	80	0,2
7	GaAs	$10^{16}$	$2 \cdot 10^{17}$	50	30	0,6	0,5	90	0,2
8	Si	$10^{16}$	$10^{16}$	40	15	110	80	100	0,08
9	Ge	$2 \cdot 10^{17}$	$4 \cdot 10^{16}$	60	30	80	60	50	0,05
10	Si	$4 \cdot 10^{17}$	$8 \cdot 10^{16}$	30	15	100	90	40	0,5
11	Si	$2 \cdot 10^{17}$	$10^{17}$	70	40	90	70	100	0,4
12	GaAs	$2 \cdot 10^{16}$	$4 \cdot 10^{16}$	50	20	0,7	0,5	100	0,1
13	Si	$6 \cdot 10^{17}$	$4 \cdot 10^{16}$	50	25	100	90	80	0,07
14	GaAs	$2 \cdot 10^{17}$	$8 \cdot 10^{16}$	20	15	0,8	0,6	40	0,6
15	Si	$3 \cdot 10^{17}$	$6 \cdot 10^{16}$	190	55	90	60	100	0,8
16	Ge	$3 \cdot 10^{17}$	$8 \cdot 10^{16}$	100	40	70	60	40	0,08
17	GaAs	$10^{17}$	$4 \cdot 10^{16}$	20	10	1	0,8	100	0,1
18	Ge	$4 \cdot 10^{16}$	$2 \cdot 10^{16}$	20	10	90	80	50	0,3
19	Si	$2 \cdot 10^{17}$	$6 \cdot 10^{16}$	110	60	100	90	50	0,7
20	Si	$4 \cdot 10^{16}$	$2 \cdot 10^{16}$	170	90	100	80	100	0,09

6. Розрахувати та побудувати ВАХ ідеалізованого діоду при температурах  $T_1 = 300 \text{ K}$  та  $T_2 = 350 \text{ K}$  зі зміною зворотної напруги від нуля до  $-50 \text{ В}$  та прямого струму від нуля до максимального значення  $I_{\text{пр max}} = j_{\text{пр max}} \cdot S$  ( $j_{\text{пр max}}$  – максимально допустима густина прямого струму;  $S$  – площа переходу).

### Методичні вказівки до завдання 1

Для розрахунку необхідних фізичних величин використати співвідношення наведені у конспекті лекцій та довідниковому мінімумі методички. Там же представлені потрібні константи напівпровідникових матеріалів. Перед розрахунками привести коротку умову завдання та перевести величини у систему СІ. Всі розрахунки проводити тільки у системі СІ.

## Зміст завдання 2

Для БТ вказаного у відповідному варіанті таблиці 3 спільно з параметрами транзисторного каскаду  $E_K$ , а також  $U_{KE0}$  та  $I_{K0}$  (напругою та струмом спокою в колекторному колі).

1. Розрахувати графоаналітичним способом  $h$  – параметри транзистора в схемі зі спільним емітером для заданого режиму ( $U_{KE0}$ ,  $I_{K0}$ ), використовуючи наведені в довіднику статичні вхідні та вихідні характеристики приладу.

2. За знайденими  $h$  – параметрами визначити фізичні параметри транзистора ( $r_E$ ,  $r_B$ ,  $r_K$ ,  $\alpha$ ) та зобразити  $T$ -подібну фізично еквівалентну схему приладу, що відповідає знайденим параметрам.

3. Для підсилювального каскаду зі спільним емітером та температурною стабілізацією робочої точки (рис.2) для заданого у відповідному варіанті таблиці 3 транзистору розрахувати елементи схеми  $R_K$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  та визначити графоаналітичним способом параметри підсилення каскаду  $K_U$ ,  $K_I$ ,  $K_p$ ,  $R_{вх}$ ,  $R_{вих}$ . За початковий взяти режим роботи транзистора заданий у відповідному варіанті таблиці.

Таблиця 3. Початковий режим роботи транзистора

Варіант	Транзистор	ЕРС джерела, В	Напруга колектор-емітер у точці спокою, $U_{KE0}$ , В	Струм колектора у точці спокою, $I_{K0}$ , мА
1	МП 25	30	5	14
2	МП 25А	30	5	24
3	МП 25Б	30	5	20
4	МП 26	40	5	20
5	МП 26А	40	5	24
6	МП 26Б	30	5	20
7	КТ 104А	25	5	15
8	КТ 104Б	25	5	10
9	КТ 104В	30	5	20

10	КТ 201А	12	5	18
11	КТ 201Б	12	5	22
12	КТ 201В	8	5	20
13	КТ 202А	15	5	3,0
14	КТ 202Б	15	5	3,0
15	КТ 215А	8	5	0,8

## Методичні вказівки до завдання 2

Беручись за виконання другого завдання розрахункової частини РГР, необхідно визначити за статичними характеристиками відсутні показники початкового режиму (струм бази спокою  $I_{Б0}$  та напругу база-емітер спокою  $U_{БЕ0}$ ).

1. Розрахунок  $h$  – параметрів транзистора за статичними характеристиками для заданого режиму ( $U_{БЕ0}$ ,  $I_{Б0}$ ,  $U_{КЕ0}$ ,  $I_{К0}$ ) виконується графоаналітичним способом у відповідності до гібридної системи рівнянь:

$$\begin{cases} \Delta U_{ВХ} = h_{11} \Delta I_{ВХ} + h_{12} \Delta U_{ВИХ} \\ \Delta U_{ВХ} = h_{21} \Delta I_{ВХ} + h_{22} \Delta U_{ВИХ} \end{cases} \quad (1)$$

яка для транзистора у ССЕ набуває наступного вигляду:

$$\begin{cases} \Delta U_{БЕ} = h_{11E} \Delta I_{Б} + h_{12E} \Delta U_{КЕ} \\ \Delta I_{К} = h_{21E} \Delta I_{Б} + h_{22E} \Delta U_{КЕ} \end{cases} \quad (2)$$

де  $h$  – параметри можна визначити з системи рівнянь:

$$h_{11E} = \frac{\Delta U_{БЕ}}{\Delta I_{Б}} \quad | \quad \Delta U_{КЕ} = 0$$

$$h_{12E} = \frac{\Delta U_{БЕ}}{\Delta U_{КЕ}} \quad | \quad \Delta I_{Б} = 0 \quad (3)$$

$$h_{21E} = \frac{\Delta I_{К}}{\Delta I_{Б}} \quad | \quad \Delta U_{КЕ} = 0$$

$$h_{22E} = \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{KE}} \Big|_{\Delta I_B = 0}$$

Зразок графоаналітичного визначення  $h$  – параметрів наведений на рис.1.

За вхідними характеристиками БТ знаходимо:

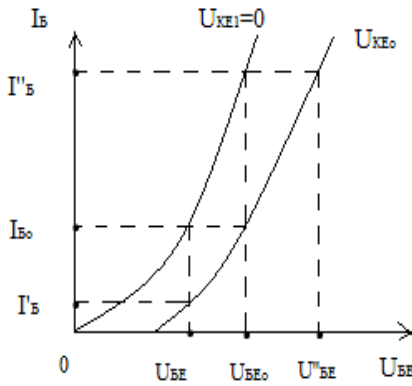
$$h_{11E} = \frac{U''_{BE} - U'_{BE}}{I''_B - I'_B} \Big|_{\Delta U_{KE} = \Delta U_{KE0}}$$

$$h_{12E} = \frac{U_{BE0} - U'_{BE}}{U_{KE0} - U_{KE1}} \Big|_{\Delta I_B = \Delta I_{B0}}$$

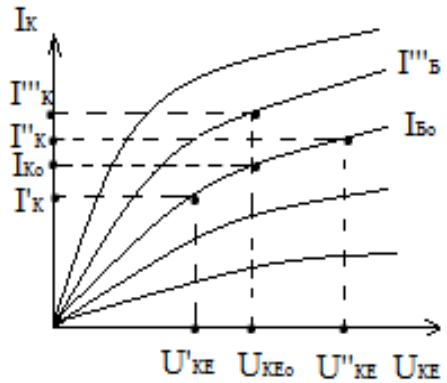
За вихідними характеристиками:

$$h_{21E} = \frac{I'''_K - I_{K0}}{I'''_B - I_{B0}} \Big|_{\Delta U_{KE} = \Delta U_{KE0}}$$

$$h_{22E} = \frac{I''_K - I'_K}{U''_{KE} - U'_{KE}} \Big|_{\Delta I_B = \Delta I_{B0}}$$



а)



б)

Рис.1. Визначення параметрів  $h_{11E}$ ,  $h_{12E}$ ,  $h_{21E}$  та  $h_{22E}$  за вхідними та вихідними характеристиками БТ у схемі зі спільним емітером

Вказані у формулах присто повинні бути мінімальними.

Знак « - » при визначенні  $h_{21E}$  пояснюється тим, що напрям струму  $I_K$  в транзисторі протилежний до напрямку вихідного струму в еквівалентному чотирьополіснику.

2. Розрахунок фізичних параметрів БТ на основі знайдених  $h$  – параметрів виконується за формулами:

$$\alpha = \frac{h_{21E}}{1 + h_{21E}}$$

$$r_E = \frac{h_{12E}}{h_{21E}}$$

$$r_K = \frac{1 + h_{21E}}{h_{22E}}$$

$$r_B = h_{11E} - \frac{h_{12E}(1 + h_{21E})}{h_{22E}}$$

Результатом розрахунків повинні бути значення фізичних параметрів та фізична еквівалентна  $T$ -подібна схема транзистора увімкненого за ССЕ.

3. Розрахунок підсилювального каскаду з БТ увімкненим за ССЕ та температурною стабілізацією робочої точки (рис.2) у режимі спокою слід починати з визначення напруги негативного зворотного зв'язку  $U_{R3}$ .

Зазвичай в реальних схемах приймають  $U_{R3} = (0,1 \dots 0,25) \cdot |E_K|$ , тому значення  $U_{R3}$  вибирають у вказаних межах. Потім на основі заданих у відповідності до варіанту завдань величин  $I_{K0}$  та  $U_{KE0}$ , а також визначених за характеристиками транзистору  $I_{B0}$  та  $U_{BE0}$  розраховують послідовно опори  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_K$ , що входять до схеми (див. рис.2):

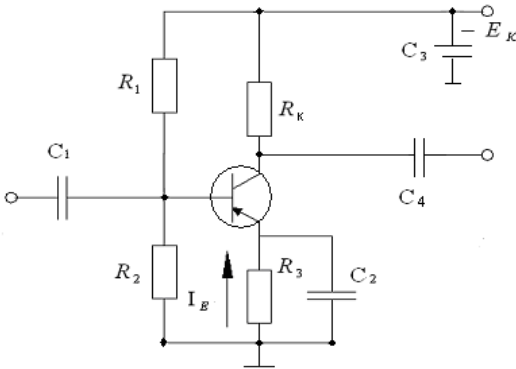


Рис. 2. Транзисторний каскад с фіксованим струмом бази

$$R_K = |E_K| - (U_{R3} + U_{KEO}),$$

$$|U_{R2}| = |U_{BE0}| + U_{R3},$$

$$I_{E0} = I_{B0} + I_{K0},$$

$$R_3 = \frac{U_{R3}}{I_{E0}},$$

$$I_D = (3 \dots 5)I_{B0},$$

$$R_2 = \frac{U_{R2}}{I_D},$$

$$R_1 = \frac{|E_K| - |U_{R2}|}{I_D + I_{B0}}.$$

На основі розрахованих величин опорів у подальшому потрібно обрати з таблиці 4 близькі їм номінальні значення  $R$ .

Таблиця 4. Ряд номінальних опорів постійних резисторів (одиниці, десятки, сотні Ом, кОм, мОм)

R, Ом, кОм, мОм				
1,0	1,6	2,7	4,3	6,8
1,1	1,8	3,0	4,7	7,5
1,2	2,0	3,3	5,1	8,2



1,3	2,2	3,6	5,6	9,1
1,5	2,4	3,9	6,2	

При розрахунку параметрів режиму підсилення каскаду (рис.2) необхідно мати на увазі, що до них належать:

коефіцієнт підсилення за струмом

$$K_I = \frac{I_{m k}}{I_{m б}} \quad (4)$$

та напругою

$$K_U = \frac{U_{m k}}{U_{m б}} \quad (5)$$

вихідна потужність

$$P_{\text{вих}} = \frac{1}{2} U_{m k} I_{m k} \quad (6)$$

коефіцієнт підсилення за потужністю

$$K_p = K_U K_I \quad (7)$$

вихідний опір

$$R_{\text{вих}} = \frac{U_{m k}}{I_{m k}} \quad (8)$$

вхідний опір

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_{m б}}{I_{m б}} \quad (9)$$

У формулах (4), (5), (6), (8) та (9) величини  $U_{mk}(U_{m\phi})$  та  $I_{mk}(I_{m\phi})$  – амплітуди напруги та струмів на вихідних (вхідних) електродах транзистора.

### Порядок розрахунку

1. На сім'ї статичних вихідних характеристик БТ будується вихідна пряма навантаження (рис.3 а).

Для вихідного кола каскаду

$$U_{KE} = E_K - I_K R_K - I_E R_3.$$

Оскільки  $I_K \approx I_E$ , то рівняння вихідної прямої навантаження за постійним струмом має вигляд:

$$U_{KE} \approx E_K - I_K (R_K + R_3).$$

Змінна складова колекторного струму через резистор  $R_3$  не проходить, тому пряма навантаження за змінним струмом описується рівнянням

$$U_{KE} = E'_K - I_K R_K.$$

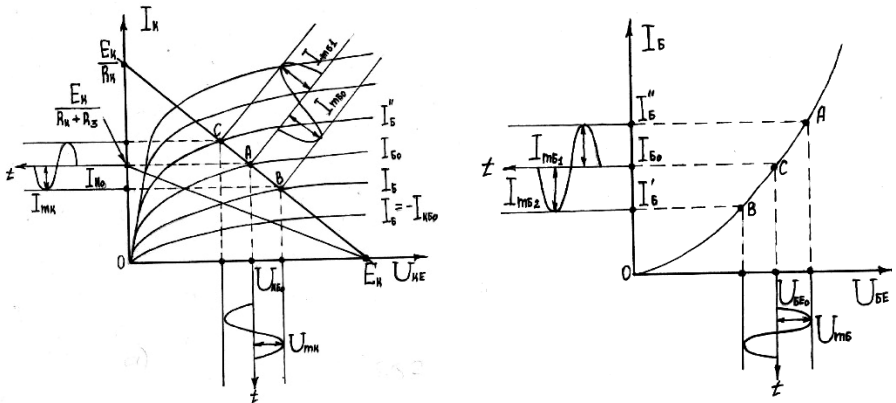


Рис. 3. До графоаналітичного визначення параметрів режиму підсилення транзисторного каскаду

де  $E'_K = E_K - I_{E0}R_3 = E_K - U_{R3}$ .

Таким чином, вихідна пряма навантаження за змінним струмом перетинає вісь  $U_{KE}$  у точці  $E'_K < E_K$ .

2. У багатьох практичних прикладах як вхідна навантажувальна характеристика використовується статична вхідна характеристика приладу, що знімається при нульовій напрузі  $U_{KE}$  (наприклад,  $U_{KE} = -5$  В).

3. На вхідних та вихідних навантажувальних характеристиках БТ позначити положення початкової робочої точки за заданими значеннями:  $U_{BE0}$  та  $I_{B0}$  – на вхідних,  $U_{KE0}$  та  $I_{K0}$  – на вихідних.

4. На вхідній навантажувальній характеристиці відносно значення  $U_{BE0}$  розгорнути змінну напругу з амплітудою  $U_{m\delta}$ . За допомогою цієї характеристики отримати приріст струму  $I_{m\delta}$  викликаний приростом  $U_{m\delta}$ . Амплітуду струму  $I_{m\delta}$  визначити усередненням верхньої  $I''_B - I_{B0}$  та нижньої  $I_{B0} - I'_B$  амплітуд.

Перенесенням точок В та С на вхідну навантажувальну характеристику визначити робочу ділянку на ній, а також використовуючи метод усереднення виміряти відповідні цій ділянці амплітуди  $U_{Tк}$  та  $I_{Tк}$ .

Використовуючи визначені графоаналітичним методом амплітуди  $U_{Tк}$ ,  $I_{Tк}$ ,  $I_{TБ}$  при заданій амплітуді вхідної напруги  $U_{TБ}$ , розрахувати за формулами (4), (9) параметри режиму підсилення транзисторного каскаду зі спільним емітером та температурною стабілізацією.

## **Курсова робота 2 (другий семестр курсу).**

Розрахунок основних характеристик фотоперетворювачів сонячної енергії на основі гетеропереходів.

### **Реферативна частина**

У таблиці 5 вказана тема та номери питань за варіантами. Їх необхідно брати з переліку питань для самоконтролю у відповідній темі методичних вказівок. Наприклад, питання 6.1 (тема 6, питання 1) – Розглянути типову конструкцію, принцип дії та ВАХ ЛПД.

Таблиця 5. Питання реферативної частини КР

Варіанти	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Теми та питання	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5	6.6	6.7	6.8	6.9	6.10
	7.11	7.12	7.13	7.14	7.15	7.16	7.17	7.18	7.19	7.20
	8.10	8.9	8.8	8.7	8.6	8.5	8.4	8.3	8.2	8.1
Варіанти	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Теми та питання	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	7.6	7.7	7.8	7.9	7.10
	7.21	7.22	7.23	7.24	7.11	7.12	7.13	7.14	7.15	7.16
	8.1	8.2	8.3	8.4	8.5	8.6	8.7	8.8	8.9	8.10

### Розрахункова частина

Варіанти початкових даних для розрахункової частини КР наведені в табл.6.

Таблиця 6. Початкові данні для розрахункової частини РГР2

№ ВА РІ АН ТА	Температу ра, К	ГП (вікно <i>n</i> - типу/поглинаю чий шар <i>p</i> -типу)	Сталі ВАХ		Концентра ція донорів та акцепторів $см^{-3}$		Площа СЕ, $см^2$
			$j_0$ $A/см^2$	$A$	$N_d$	$N_a$	
1	200, 300, 400	CdS/CdTe	$1 \cdot 10^{-8}$	2,0	$10^{16}$	$10^{16}$	10
2	210, 310, 410	ZnS/CdTe	$2 \cdot 10^{-8}$	2,1	$2 \cdot 10^{16}$	$10^{17}$	20
3	220, 320, 420	SnS <sub>2</sub> /SnS	$3 \cdot 10^{-8}$	2,2	$3 \cdot 10^{16}$	$10^{17}$	30
4	230, 330, 430	In <sub>2</sub> S <sub>3</sub> /CdTe	$4 \cdot 10^{-8}$	2,3	$4 \cdot 10^{16}$	$10^{17}$	40
5	240, 340, 440	CdS/SnS	$5 \cdot 10^{-8}$	2,4	$5 \cdot 10^{16}$	$5 \cdot 10^{16}$	50
6	250, 350, 450	CdS/SnS	$6 \cdot 10^{-8}$	2,5	$6 \cdot 10^{16}$	$10^{18}$	60

7	260, 360, 460	ZnSe/CdTe	$7 \cdot 10^{-8}$	2,0	$7 \cdot 10^{16}$	$10^{16}$	70
8	270, 370, 470	In <sub>2</sub> S <sub>3</sub> /SnS	$8 \cdot 10^{-8}$	2,1	$8 \cdot 10^{16}$	$10^{16}$	80
9	280, 380, 480	ZnS/SnS	$9 \cdot 10^{-8}$	2,2	$9 \cdot 10^{16}$	$2 \cdot 10^{17}$	90
10	290, 390, 490	ZnSe/SnS	$10^{-7}$	2,3	$10^{17}$	$4 \cdot 10^{17}$	100
11	300, 400, 500	ZnO/SnS	$10^{-9}$	2,4	$2 \cdot 10^{18}$	$2 \cdot 10^{17}$	110
12	200, 310, 420	ZnO/CdTe	$2 \cdot 10^{-9}$	2,5	$2 \cdot 10^{17}$	$2 \cdot 10^{16}$	120
13	210, 320, 430	CdS/CdTe	$3 \cdot 10^{-9}$	2,0	$3 \cdot 10^{17}$	$6 \cdot 10^{17}$	130
14	220, 340, 450	ZnS/CdTe	$4 \cdot 10^{-9}$	2,1	$4 \cdot 10^{17}$	$2 \cdot 10^{17}$	140
15	230, 360, 470	SnS <sub>2</sub> /SnS	$5 \cdot 10^{-9}$	2,2	$5 \cdot 10^{17}$	$3 \cdot 10^{17}$	150
16	240, 380, 490	In <sub>2</sub> S <sub>3</sub> /CdTe	$6 \cdot 10^{-9}$	2,3	$6 \cdot 10^{17}$	$3 \cdot 10^{17}$	160
17	250, 400, 500	CdS/SnS	$7 \cdot 10^{-9}$	2,4	$7 \cdot 10^{17}$	$10^{17}$	170
18	260, 330, 410	CdS/SnS	$8 \cdot 10^{-9}$	2,5	$8 \cdot 10^{17}$	$4 \cdot 10^{16}$	180
19	270, 350, 430	Mg <sub>0,3</sub> Zn <sub>0,7</sub> O/CdTe	$9 \cdot 10^{-9}$	2,0	$9 \cdot 10^{17}$	$2 \cdot 10^{17}$	190
20	280, 370, 450	Mg <sub>0,3</sub> Zn <sub>0,7</sub> O/SnS	$10^{-8}$	2,1	$10^{18}$	$4 \cdot 10^{16}$	200

### Зміст завдання 1

1. Побудувати зонну діаграму гетеропереходу з межею поділу матеріалів близькою до ідеальної. Використати значення фізичних величин наведених у таблицях 6 та 7.

Таблиця 7. Деякі фізичні характеристики CdS та CdTe

Напів- провідник	Ширина забороне ної зони $E_g$ , eV	Спорідне ність з електрон ом $\chi$ , eV	Електрич на стала матеріалу $\epsilon$	Ефективна маса носіїв	
				$m_n/m_0$	$m_p/m_0$
<i>n</i> -ZnS (вікно)	3,68	3,90	8,3	0,40	0,82
<i>n</i> -CdS (вікно)	2,42	4,50	8,6	0,21	0,80
<i>n</i> -SnS <sub>2</sub> (вікно)	2,80	4,10	7,57	0,44	0,66

<i>n</i> -ZnO (вікно)	3,30	3,80	8,7	0,27	0,64
<i>n</i> -In <sub>2</sub> S <sub>3</sub> (вікно)	2,20	4,00	9,2	0,24	0,78
<i>n</i> -Mg <sub>0,3</sub> Zn <sub>0,7</sub> O (вікно)	4,00	3,10			
<i>n</i> -ZnSe (вікно)	2,67	4,09	8,9	0,21	0,60
<i>p</i> -CdTe (поглинач)	1,46	4,28	10,6	0,11	0,35
<i>p</i> -SnS (поглинач)	1,30	4,00	16	0,44	0,20

1. За відомими значеннями параметрів побудувати темнову ВАХ ( $I-U$ ) гетеропереходного сонячного елемента в інтервалі від 0 до 5 В при трьох різних температурах, з використанням виразу

$$j = j_s \left( \exp\left(\frac{qU}{AkT}\right) - 1 \right) - j_L, \quad (10)$$

де  $j_s$  – густина струму насичення  $j_s = j_0(\exp^{-qU_k/AkT})$ ;  $q$  – заряд електрона;  $U$  - прикладена напруга;  $U_k$  – контактна різниця потенціалів на гетеропереході;  $A$  – фактор ідеальності ВАХ;  $k$  – стала Больцмана;  $T$  – температура;  $j_L$  – густина фотоструму (в темноті  $j_L=0$ ).

Початкові данні взяти з таблиці 6 у відповідності до варіанту.

3. З темної ВАХ знайти коефіцієнт випрямлення діоду ( $K$ ) при цих температурах як відношення прямого струму до зворотного при напрузі  $U = 1$  В.

4. У точці перетину дотичної до прямої гілки ВАХ в області великих струмів з віссю напруги визначити контактну різницю потенціалів  $U_k$  на гетеропереході. Розрахувати висоту потенціального бар'єра на переході  $qU_k$

5. З нахилу цієї дотичної знайти послідовний опір сонячного елемента враховуючи, що  $\operatorname{tg}\alpha=1/R$ . При розрахунках кута використовувати систему СІ.

### Методичні вказівки до завдання 1

При побудові енергетичної діаграми гетеропереходу вважати, що межа розділу матеріалів є близькою до ідеальної, на ній відсутні приповерхневі стани.

Спочатку побудувати діаграми енергетичних зон матеріалів до їх контакту. Для цього від рівня вакууму, який вважається нульовим відкласти вниз у вибраному масштабі енергію електронної спорідненості, а потім енергію ширини забороненої зони матеріалу. За відомою концентрацією легуючої домішки у матеріалі розрахувати положення рівня Фермі, вважаючи, що всі домішки іонізовані ( $n = N_d$ ,  $p = N_a$ ). Для цього використати співвідношення

$$n = N_c \exp \frac{E_F}{kT},$$

$$p = N_v \exp^{-(E_g + E_F)/kT}.$$

де  $n$  - концентрація носіїв заряду у електронному напівпровіднику;  $p$  - концентрація носіїв заряду у дірковому напівпровіднику;  $E_F$  - положення рівня Фермі;  $N_c$ ,  $N_v$  - ефективна густина станів у зоні провідності, валентній зоні.

Відлік енергії рівня Фермі ведеться від низу зони провідності.

Ефективна густина станів у зоні провідності (валентній зоні) напівпровідника визначається виразами

$$N_c = \frac{2(2\pi m_n kT)^{3/2}}{h^3},$$

$$N_v = \frac{2(2\pi m_v kT)^{3/2}}{h^3},$$

де  $m_n$ ,  $m_p$  – ефективні маси електронів і дірок;  $h$  – стала Планка;

У подальшому для побудови діаграми енергетичних зон напівпровідників використати рис. 4.

Для побудови діаграми енергетичних зон напівпровідників після утворення різкого гетеропереходу спочатку слід знайти розриви зон на гетерограниці. Наприклад, розриви зон провідності  $\Delta E_c$  та валентної  $\Delta E_v$  матеріалів переходу  $n$ -CdS/ $p$ -CdTe можна визначити з використанням виразів:

$$\Delta E_c = |\chi_{ZnS} - \chi_{CdTe}|,$$

$$\Delta E_v = |E_{gZnS} - E_{gCdTe} - \Delta E_c|.$$

Відомо, що сумарний контактний потенціал на гетерограниці, обумовлений різницею робіт виходу матеріалів, дорівнює:

$$U_k = |U_{CdTe} + U_{ZnS}| = |\varphi_{CdTe} - \varphi_{ZnS}|.$$



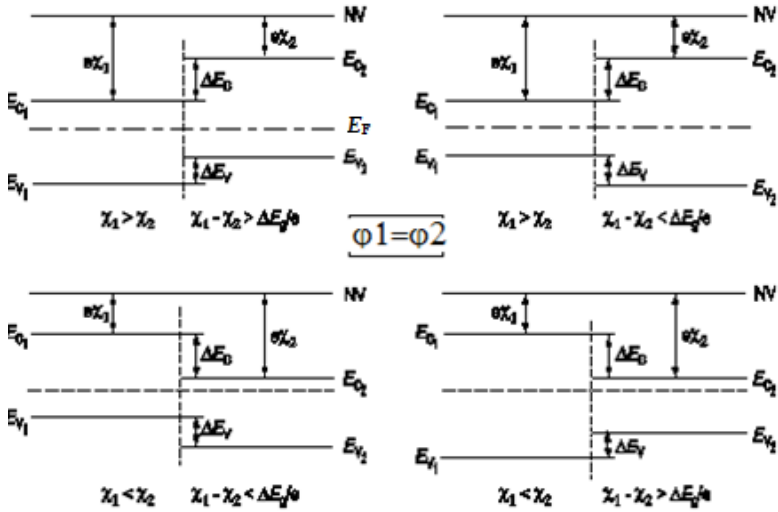


Рис. 4. Зонні діаграми гетеропереходів при різних комбінаціях спорідненості і ширини забороненої зони матеріалів у випадку рівності їх термодинамічних робіт виходу  $\varphi_1 = \varphi_2$

Відношення потенціалів  $U_{CdTe}$  та  $U_{ZnS}$  задається виразом:

$$\frac{U_{ZnS}}{U_{CdTe}} = \frac{N_{aCdTe} \varepsilon_{CdTe}}{N_{dZnS} \varepsilon_{ZnS}},$$

де  $N_{aCdTe}$ ,  $N_{dZnS}$  – концентрації донорів і акцепторів у відповідних матеріалах.

Після розрахунку вказаних фізичних величин приступити до побудови зонної діаграми гетеропереходу в рівноважному стані. При цьому врахувати, що при приведенні напівпровідників у контакт, положення рівня Фермі у матеріалах стає однаковим (рис.5).

Побудову проводити або з використанням міліметрового паперу або будь-якого графічного редактора.

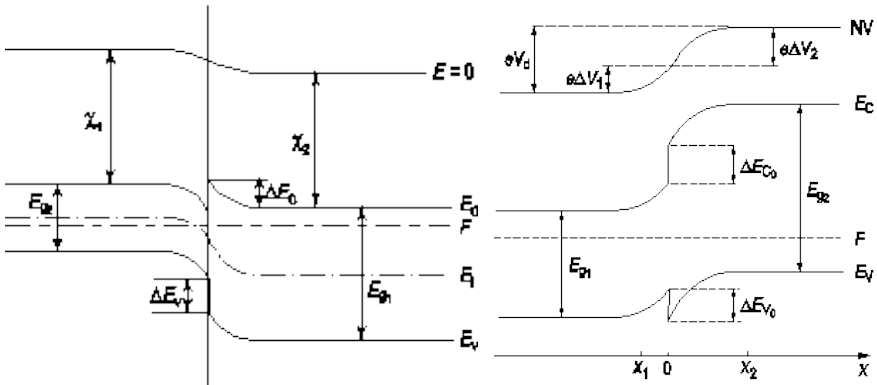


Рис. 5. Зонна діаграма гетеропереходів  $p\text{-Ge} - n\text{-GaAs}$  та  $n\text{-Ge} - p\text{-GaAs}$  в рівноважному стані

Для розрахунку темної ВАХ реального гетеропереходу використати співвідношення (10), та ті що давалися у лекційному курсі і наведені у довідниковій частині методичної вказівки. Для цього спочатку розрахувати  $n_i$ ,  $U_k$ ,  $j_s$ ,  $I_s$ .

Всі розрахунки проводити в системі СІ.

### Зміст завдання 2

Побудувати світлову ВАХ фотоелектричного перетворювача при температурі вказаній у таблиці 6 за номером 2. Знайти його напругу холостого ходу, струм короткого замикання, фактор заповнення ВАХ та ККД. Умова освітлення АМ1 для варіантів 1-10 та АМ0 для варіантів 11-20.

### Методичні вказівки до завдання 2

Беручись за виконання завдання 2 слід згадати, що світлова ВАХ сонячного елемента зсунута відносно темної за струмом на величину світлового струму  $I_{sc} = I_L$ .

Коефіцієнт корисної дії фотоперетворювача розраховується за формулою

$$\eta = \frac{P}{P_s} = \frac{FF \cdot I_{sc} \cdot U_{oc}}{P_s}, \quad (11)$$

де  $P_s$  – потужність сонячного випромінювання, що падає на сонячний елемент;  $FF$  – фактор заповнення ВАХ (коефіцієнт форми ВАХ), який дорівнює (рис. 6).

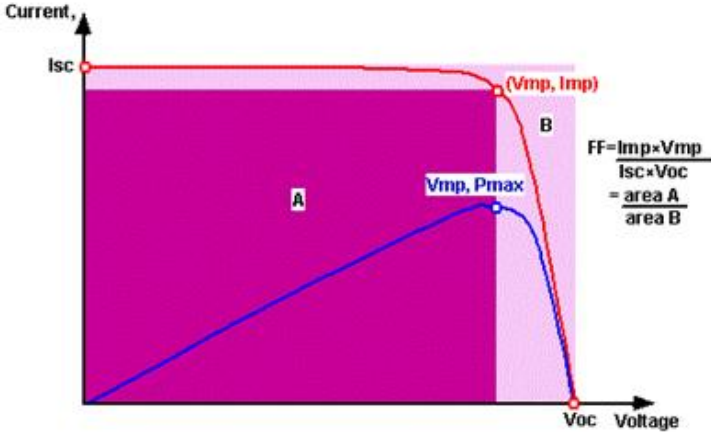


Рис.6. Визначення фактору заповнення  $FF$  ВАХ сонячного елемента

$$FF = \frac{I_{sc} U_{oc}}{I_m U_m}, \quad (12)$$

де  $I_m$  та  $U_m$  – сила струму та напруга, що відповідають найбільшій потужності приладу.

Звідси вихідна потужність фотоперетворювача дорівнює

$$P = IU = I_s U \left( \exp\left(\frac{qU}{AkT}\right) - 1 \right) - I_L U. \quad (13)$$

Положення точки максимальної потужності на ВАХ можна знайти прийнявши, що  $dP/dU = 0$  (умова екстремума функції) (рис. 6).

Звідси отримаємо значення струму та напруги у цій точці

$$I_m = I_s \beta U_m e^{\beta U_m} \sim I_L \left(1 - \frac{1}{\beta U_m}\right), \quad (14)$$

$$U_m = \frac{1}{\beta} \ln \frac{I_L/I_s + 1}{1 + \beta U_m} \sim U_{oc} - \frac{1}{\beta} \ln(1 + \beta U_m), \quad (15)$$

де  $\beta = \frac{q}{AkT}$ .

Формула (14) дозволяє визначити  $U_m$  методом послідовних наближень. В якості першого наближення в праву частину підставляється  $U_m = U_{oc}$ , при другому наближенні – визначене значення  $U_m$ . Двох ітераційних обчислень достатньо для отримання чотирьох вірних значущих цифр напруги.

Можна також розв'язати трансцендентне рівняння (15), використавши функцію `fsolve` пакета `Maple`.

Значення  $I_m$  визначається шляхом підстановки  $U_m$  в співвідношення (10) з урахуванням таблиці 6 (де вказано  $S$ ).

Таким чином, максимальна вихідна потужність фотоперетворювача визначається співвідношенням

$$P_m = I_m U_m \approx I_L \left( U_{oc} - \frac{1}{\beta} \ln(1 + \beta U_m) - \frac{1}{\beta} \right). \quad (16)$$

Густина фотоструму, що виробляється сонячним елементом визначається шириною забороненої зони поглинаючого матеріалу, його квантовим виходом та деякими іншими конструктивними особливостями приладу.

$$J_L(E_g) = q \int_{\nu}^{\infty} \alpha(\nu) f(\nu, T) Q(\nu) d\nu, \quad (17)$$

де  $J_L$  - густина фотоструму;  $\alpha$  - коефіцієнт поглинання світла матеріалом, який залежить від  $\nu$ ;  $Q$  – квантовий вихід (число електронно-діркових пар, що утворюються в матеріалі при падінні на нього одного фотона світла).

Нижня межа інтегрування може бути знайдена з виразу  $h\nu = E_g$ , де  $E_g$  – ширина забороненої зони поглинаючого матеріалу.

У першому наближенні можна вважати що сонце випромінює енергію як абсолютно чорне тіло з температурою  $T = 5900$  К. Добре відомо, що випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла задається співвідношенням

$$f(\nu, T) = \frac{h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}, \quad (18)$$

Підставивши цей вираз у співвідношення (17) остаточно знайдемо значення світлового струму фотоперетворювача

$$I_L(E_g) = J_L S = q \int_{\nu}^{\infty} \alpha(\nu) \frac{h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1} Q(\nu) d\nu. \quad (19)$$

Отриманий вираз дозволяє знайти фотострум сонячного елемента на основі будь-яких напівпровідникових матеріалів.

На щастя густина струму фотоперетворювачів на основі шарів CdTe давно розрахована і дорівнює  $j_L = 26$  мА/см<sup>2</sup> в умовах освітлення АМ1.

Повна потужність випромінювання сонця в умовах АМ1 (сонце в zenіті)  $P_s = 1000$  Вт/м<sup>2</sup> (на широтах, що відповідають місту Суми -  $P_s = 925$  Вт/м<sup>2</sup>), в умовах АМ1,5 (кут падіння сонячного випромінювання на поверхню землі 60°) – 691 Вт/м<sup>2</sup>.

## 5 ДОВІДНИКОВИЙ МІНІМУМ

### Основні формули, що використовуються у РГР

$$N_c = \frac{2(2\pi m_n kT)^{3/2}}{h^3}$$

$$N_v = \frac{2(2\pi m_p kT)^{3/2}}{h^3}$$

– ефективна густина станів у зоні провідності напівпровідника;

– ефективна густина станів у валентній зоні напівпровідника,

де  $m_n$ ,  $m_p$  – ефективні маси електронів і дірок;  $k$  – стала Больцмана;

$$n_i = N_c N_v \exp^{-\frac{E_g}{2kT}}$$

$$n = N_c \exp^{E_F/kT}$$

$$p = N_v \exp^{-(E_g + E_F)/kT}$$

$$np = n_i^2(T)$$

$$U_k = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_d N_a}{n_i^2}$$

$$\varphi_T = \frac{kT}{q}$$

$$d_n = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(U_k \pm U)}{q^2 N_d}}$$

$$d_p = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(U_k \pm U)}{q^2 N_a}}$$

$$E(x) = -\frac{qN_d}{\epsilon\epsilon_0}(d_n - x)$$

$$E(x) = -\frac{qN_a}{\epsilon\epsilon_0}(d_p + x)$$

$$E_{max} = \frac{qN_a d_p}{\epsilon\epsilon_0} = \frac{qN_d d_n}{\epsilon\epsilon_0}$$

$$\varphi_1(x) = -\frac{qN_d}{2\epsilon\epsilon_0}(x - d_n)^2.$$

- $T$  – температура;  $h$  – стала Планка;
- концентрація носіїв заряду у власному напівпровіднику, де  $E_g$  - ширина забороненої зони матеріалу;
  - концентрація носіїв заряду у електронному напівпровіднику; концентрація носіїв заряду у дірковому напівпровіднику, де  $E_F$  - положення рівня Фермі;
  - закон діючих мас
  - $U_k$  – контактна різниця потенціалів на  $p$ - $n$  – переході;  $N_d, N_a$  – концентрації донорних та акцепторних домішок у матеріалі;  $q$  - заряд електрона
  - температурний потенціал;
  - ширина збідненої області на переході з боку електронного матеріалу;  $U$  – прикладена зовнішня напруга
  - ширина збідненої області на переході з боку діркового матеріалу;
  - розподіл напруженості електричного поля вдовж переходу,  $n$ - область
  - розподіл напруженості електричного поля вдовж переходу,  $p$ - область
  - максимальне значення напруженості електричного поля на  $p$ - $n$  переході
  - розподіл потенціалу електричного поля вдовж переходу,  $n$ - область

$$\varphi_2(x) = -\frac{qN_a}{2\varepsilon\varepsilon_0}(x + d_p)^2$$

$$W_0 = qU_k$$

$$C_6 = S \left( \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0 q N_d N_a}{2(N_a + N_d)(\varphi_k + U)}} \right)$$

$$C_6 = S \left( \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0 q N_d}{2(\varphi_k + U)}} \right)$$

$$j = j_s (\exp^{qU/2kT} - 1)$$

$$j_s = q \left( \frac{D_p p_n}{L_p} + \frac{D_n n_p}{L_n} \right)$$

$$j = j_s (\exp^{qU/AkT} - 1)$$

$$j_s = j_0 (\exp^{-qU_k/AkT})$$

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

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

$$FF = \frac{I_{sc} U_{oc}}{I_m U_m}$$

$$\eta = \frac{P}{P_s} = \frac{FF I_{sc} U_{oc}}{P_s}$$

- розподіл потенціалу електричного поля вдовж переходу,  $p$ - область  
 - зв'язок між потенціальною енергією та контактною різницею потенціалів на переході

- бар'єрна ємність  $p$ - $n$  переходу

- бар'єрна ємність несиметричного переходу

- вольт-амперна характеристика ідеалізованого діоду на  $p$ - $n$ - переході

- густина теплового струму через ідеальний гомоперехід

- вольт-амперна характеристика реального гетеропереходу

- густина струму насичення гетеропереходу,

$A \neq 2$

- дифузійна довжина вільного пробігу електронів

- дифузійна довжина вільного пробігу дірок

- фактор заповнення ВАХ сонячного елемента

- ККД фотоперетворювача

### Основні константи, що використовуються у РГР

$k = 1,381 \cdot 10^{-23}$  Дж/К - стала Больцмана

$q = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл - заряд електрона

$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м - електрична стала

$h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с	- стала Планка
$m_0 = 9,109 \cdot 10^{-31}$ Кг	- маса електрону
$c = 2,999 \cdot 10^8$ м/с	- швидкість світла у вакуумі
$\varepsilon = 16,0$	- відносна діелектрична проникність германію ( $T = 300$ К)
$\varepsilon = 11,7$	- відносна діелектрична проникність кремнію ( $T = 300$ К)
$\varepsilon = 12,9$	- відносна діелектрична проникність GaAs ( $T = 300$ К)
$\Delta E_{gGe} = 0,72$ еВ	- ширина забороненої зони германію
$\Delta E_{gSi} = 1,12$ еВ	- ширина забороненої зони кремнію
$\Delta E_{gGaAs} = 1,44$ еВ	- ширина забороненої зони GaAs
$\mu_n = 3800$ см <sup>2</sup> /В·с	- рухливість електронів у германії при $T = 300$ К
$\mu_n = 3000$ см <sup>2</sup> /В·с	- рухливість електронів у кремнії при $T = 300$ К
$\mu_n = 8500$ см <sup>2</sup> /В·с	- рухливість електронів у GaAs при $T = 300$ К
$\mu_p = 1820$ см <sup>2</sup> /В·с	- рухливість дірок у германії при $T = 300$ К
$\mu_p = 500$ см <sup>2</sup> /В·с	- рухливість дірок у кремнії при $T = 300$ К
$\mu_p = 420$ см <sup>2</sup> /В·с	- рухливість дірок у GaAs при $T = 300$ К
$m_{n1} = 0,22 \cdot m_e$	- ефективна маса електрона в германії
$m_{n2} = 1,06 \cdot m_e$	- ефективна маса електрона в кремнії
$m_{n3} = 0,067 \cdot m_e$	- ефективна маса електрона в арсеніді галію
$m_{p1} = 0,39 \cdot m_e$	- ефективна маса дірки в германії
$m_{p2} = 0,56 \cdot m_e$	- ефективна маса дірки в кремнії
$m_{p3} = 0,45 \cdot m_e$	- ефективна маса дірки в арсеніді галію



Навчальне видання

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ТА ЗАВДАННЯ**

до виконання розрахунково-графічної та курсової робіт  
з дисципліни "Твердотільна електроніка"  
для студентів спеціальностей  
"Електронні системи". "Електронні прилади та пристрої".  
"Фізична та біомедична електроніка"  
усіх форм навчання

Відповідальний за випуск А.С. Опанасюк  
Редактор Н.А. Гавриленко  
Комп'ютерне верстання І.Є. Бражник

Підп. до друку 6.09.2014.. поз.  
Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 2.79. Обл.-вид. арк. 2.02.  
Тираж 50 пр. Зам. № Собівартість вид.

Видавець і виготовлювач  
Сумський державний університет.  
вул. Р.- Корсакова. 2. м. Суми. 40007  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №3062 від 17.12.2007.