

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”  
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ  
Кафедра фізичної та біомедичної електроніки

“З А Т В Е Р Д Ж У Ю “  
Декан факультету електроніки

\_\_\_\_\_ Жуйков В.Я.  
“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2011 р.

\_\_\_\_\_ Жуйков В.Я.  
“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2012 р.

**РОБОЧА ПРОГРАМА**

з курсу "**ФІЗИКА ЕЛЕКТРОННИХ ПРОЦЕСІВ**"

для підготовки бакалаврів електроніки за фахом

“Фізична та біомедична електроніка”

Програму рекомендовано кафедрою  
фізичної та біомедичної електроніки  
протокол № \_\_\_\_\_ від « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2011 р.

Зав. кафедрою ФБМЕ

\_\_\_\_\_ Тимофеев В.І.

## АНОТАЦІЯ

В учбових планах спеціальності “Фізична і біомедична електроніка” курс “Фізика електронних процесів” слідує в розділі спеціальної підготовки після курсів “Спецрозділи фізики”, “Вакуумна і плазмова електроніка”, “Твердотільна електроніка”. Рівень попередньої фізичної підготовки відповідає вимогам двох останніх курсів і деяких подальших дисциплін, але не може задовольнити рівень потреб професійної підготовки за спеціалізацією “Фізична електроніка” і забезпечити вивчення подальших професійно орієнтованих дисциплін. Тому основна мета курсу “Фізика електронних процесів” – дати поглиблені знання в області фізичних процесів, які мають місце в різноманітних електронних приладах і які можуть знайти застосування в різних областях електронної техніки. Помітний акцент робиться на аналізі швидкодії тих або інших процесів. Зважаючи на дуже широкий спектр приладів і відповідних фізичних явищ, цій меті при обмеженому обсязі часу можна досягти лише за рахунок ретельної систематизації матеріалу і його підбору з орієнтацією на сучасні тенденції розвитку електронної техніки.

Курс “Фізика електронних процесів” – відносно новий в учбових планах вузів. Тому природною є відсутність відпрацьованої учбової і методичної літератури. Список, що наводиться нижче, слід розглядати лише як перелік допоміжної літератури, яка може бути використана для вивчення окремих питань або розділів курсу. Треба відзначити також, що матеріал деяких (особливо перших чотирьох) розділів значною мірою перетинається із змістом таких традиційних курсів як „Фізика твердого тіла” або “Фізика напівпровідників”. Тому матеріал цих розділів читається залежно від повноти і глибини змісту раніше прочитаних курсів, а вказана кількість годин на ті або інші розділи є орієнтовною. Наведені розрахункові домашні завдання призначені фактично для закріплення вивченого у вказаних курсах матеріалу.

## НОРМАТИВНІ ДАНІ

Семестри	всього	лекції	лабораторні роботи	семінари	самостійна робота		Семестрова атестація
					всього	У т.ч. індив. завдання	
VI	7/252	72	36	18	126	36	екзамен

## ЗМІСТ КУРСУ

### I. ЕЛЕКТРОННІ СТАНИ В КРИСТАЛАХ – 10 г.л., 4 г.сам.

#### 1. Усупільнені стани

1.1. Утворення енергетичних зон

1.2. Загальні властивості хвильової функції, хвилі Блоха

1.3. Закон дисперсії, його властивості, форми подання

1.4. Ефективна маса електрона

1.5. Розподіл електронних станів у кристалах

1.6. Модель утворення напівпровідників зонної структури у ковалентних (Ge, Si) і

ковалентно-іонних ( $A_3B_5$ ) кристалах

1.7. Особливості закону дисперсії для найважливіших напівпровідникових матеріалів

(Ge, Si, GaAs)

#### 2. Локалізовані стани

2.1. Донорні домішки

2.2. Акцепторні домішки

2.3. Багатозарядні домішки, глибокі стани

2.4. Вплив концентрації домішки на зонну структуру, аморфні напівпровідники

#### 3. Електронні стани на поверхні

3.1. Макроскопічна енергетична модель поверхні, роботи виходу

3.2. Таммівські стани

3.3. Адсорбовані стани

### II. ЕЛЕКТРОННІ СТАНИ І ПРОВІДНІСТЬ ТВЕРДИХ ТІЛ – 4 г.л., 2 г. сам.

1. Зв'язок зонної структури і провідності, напівкласичні рівняння руху

2. Види провідності і носії заряду

3. Перенос носіїв заряду, роль зіткнень

3.1. Дрейф носіїв, одночасткова модель

### 3.2. Дифузія носіїв, її особливості для заряджених частинок

## III. РІВНОВАЖНИЙ СТАН НОСІЇВ – 6 г.л., 8 г. практи., 7 г.сам.

1. Основні положення статистики електронів, функції розподілу
2. Розрахунок концентрацій рівноважних носіїв
  - 2.1. Електрони у зоні провідності
  - 2.2. Дірки у валентній зоні
  - 2.3. Особливості для невироджених напівпровідників
  - 2.4. Заповнення локалізованих станів
3. Провідність металів
4. Власна провідність напівпровідників
5. Домішкова провідність
  - 5.1. Донорні напівпровідники
  - 5.2. Акцепторні напівпровідники
6. Зміна рівноважних концентрацій в електричному полі
7. Термоелектронна емісія

## IV. ДИНАМІКА ЕЛЕКТРОННИХ СТАНІВ. ЗАСОБИ ОПИСУ – 6 г.л., 2 пр.

1. Кінетичне рівняння
  - 1.1. Нерівноважна функція розподілу
  - 1.2. Вигляд кінетичного рівняння
  - 1.3. Інтеграл зіткнень
2. Наближення часу релаксації
  - 2.1. Час релаксації
  - 2.2. Статична провідність
  - 2.3. Нестационарна динаміка дрейфу
  - 2.4. Високочастотна провідність
3. Рівняння збереження
  - 4.1. Усереднення кінетичного рівняння
  - 4.2. Рівняння релаксацій балансу частинок, імпульсу, енергії
  - 4.3. Особливості рівнянь для багатодолинних напівпровідників

## V. РОЗСІЮВАННЯ НОСІЇВ – 6 г.л., 2 г. сам.

1. Домішкове розсіювання
  - 1.1. Моделі розсіювання на іонізованих домішках
  - 1.2. Розсіювання на нейтральних домішках
2. Фононне розсіювання
  - 2.1. Спектр фононів
  - 2.2. Загальні закономірності розсіювання
  - 2.3. Акустичне розсіювання
  - 2.4. Оптичне (полярне і неполярне) розсіювання
  - 2.5. Міждолинне розсіювання
3. Середні часи релаксації концентрації, імпульсу і енергії

## VI. РЕКОМБІНАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ – 6 г.л., 2 г. сам.

1. Динаміка процесів рекомбінації, часи життя
2. Види електронно-діркової рекомбінації у напівпровідниках
3. Динаміка заряду глибоких станів
4. Електронно-іонна рекомбінація у газовій плазмі

## VII. ПРОЦЕСИ У СИЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛЯХ – 8 г. л., 3 г. сам.

1. Розігрівання електронного газу
2. Насичення дрейфової швидкості в Ge, Si
3. Міждолинні переходи в GaAs, від'ємна диференціальна провідність
4. "Сплеск" дрейфової швидкості
5. Ефект Ганна
6. Електростатична іонізація, ефект Зінера
7. Термоелектронна іонізація
8. Автоелектронна емісія, вістряні катоди
9. Лавинні процеси:
  - 9.1. найпростіша модель
  - 9.2. лавинний пробій в напівпровідниках (поріг іонізації, залежність коефіцієнта іонізації від поля, умова пробою)

- 9.3. стаціонарна теорія наростання лавини
- 9.4. динамічна модель лавинних процесів, "індуктивність" лавини
- 9.5. лавинно-пролітні діюди.

## VIII. ПОВЕРХНЕВІ ТА КОНТАКТНІ ЯВИЩА

Ефект поля.. Види контактів, збіднені, збагачені шари. Електронно-дірковий перехід. Рівноважний стан. Електронно-дірковий перехід, Нерівноважний стан. Гетероконтакти.

## IX ФОТОЕЛЕКТРОННІ ПРОЦЕСИ – 8 г.л., 2 г.сам., 2 г.пр.

1. Поглинання світла:
  - 1.1. макроскопічна модель
  - 1.2. види поглинання (фотоелектрично активні)
  - 1.3. особливості виконання законів збереження
  - 1.4. поведінка збуджених носіїв, термалізація
2. Внутрішній і зовнішній фотоелефекти, їх порівняльні властивості:
  - 2.1. інерційність
  - 2.2. лінійність світлової характеристики
  - 2.3. чутливість
  - 2.4. спектральні властивості
3. Фоточутливі матеріали

## X. МЕТОДИ УПРАВЛІННЯ ПРОВІДНІСТЮ – 4 г.л., 4 г.сам., 6 г. пр.

1. Управління просторовим зарядом
2. Бар'єрне управління
  - 2.1. нелінійні властивості контактів
  - 2.2. види контактів: метал-метал, метал-напівпровідник (омічні і випрямляючі), електронно-дірковий перехід, гетеропереходи
3. Польове управління
  - 3.1. ефект поля
  - 3.2. польові транзистори
  - 3.3. короткоканальні ефекти при субмікронних затворах
  - 3.4. гетероструктурні канали
4. Оптичне управління (див. розд. VIII )
5. Квантове управління
6. Прилади з негативною диференціальною провідністю

## ЛЕКЦІЇ

### Розділ I. ЕЛЕКТРОННІ СТАНИ В КРИСТАЛАХ

- Лекція 1. Енергетичний спектр усупільнених електронів.  
Лекція 2. Закон дисперсії електронів в енергетичних зонах.  
Лекція 3. Особливості закону дисперсії найважливіших напівпровідників.  
Лекція 4. Локалізовані стани.  
Лекція 5. Поверхневі стани.

*Контрольна робота з розділу*

### Розділ II. ЕЛЕКТРОННІ СТАНИ І ПРОВІДНІСТЬ ТВЕРДИХ ТІЛ

- Лекція 6. Види провідності, роль зіткнень.  
Лекція 7. Дрейф носіїв, дифузія носіїв заряду.

*Контрольна робота з розділу*

### Розділ III. РІВНОВАЖНИЙ СТАН НОСІЇВ

- Рівноважні функції розподілу (*практ.зан.*)  
Розрахунок концентрації носіїв в зонах (*практ.зан.*)  
Статистика електронів в металах (*практ.зан.*)

- Лекція 8. Провідність металів і власних напівпровідників.  
Лекція 9. Провідність домішкових напівпровідників.  
Лекція 10. Зміна рівноважних концентрацій в електричному полі.

Термоелектронна емісія (*самоств., лаборат. раб.*)

*Контрольна робота з розділу, виконання домашньої розрахункової роботи*

### Розділ IV. ДИНАМІКА ЕЛЕКТРОННИХ СТАНІВ. ЗАСОБИ ОПИСУ

- Лекція 11. Кінетичне рівняння.  
Лекція 12. Наближення часу релаксації.  
Лекція 13. Рівняння збереження.

## Розділ V. РОЗСИЮВАННЯ НОСІЇВ

- Лекція 14. Домішкове, акустичне розсіювання.
- Лекція 15. Оптичне, міждолинне розсіювання.
- Лекція 16. Середні часи релаксації імпульсу і енергії.

*Контрольна робота з розділу*

## Розділ VI. РЕКОМБІНАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ

- Лекція 17. Динаміка процесів рекомбінації.
- Лекція 18. Види електронно-діркової рекомбінації.

## Розділ VII. ПРОЦЕСИ В СИЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛЯХ

- Лекція 19. Ефекти розігрівання електронного газу
- Лекція 20. Насичення дрейфової швидкості, «сплеск».
- Лекція 21. Ефект Ганна.
- Лекція 22. Лавинні процеси, пробій
- Лекція 23. Електростатична іонізація, ефект Зінера
- Лекція 24. Автоелектронна емісія.

## Розділ VIII. ПОВЕРХНЕВІ ТА КОНТАКТНІ ЯВИЩА

- Лекція 25. Ефект поля.
- Лекція 26. Види контактів, збіднені, збагачені шари.
- Лекція 27. Електронно-дірковий перехід, Рівноважний стан.
- Лекція 28. Електронно-дірковий перехід, Нерівноважний стан.
- Лекція 29. Гетероконтакти.

*Контрольна робота з розділу*

## Розділ IX. ФОТОЕЛЕКТРОННІ ПРОЦЕСИ

- Лекція 30. Внутрішній фотоефект.
- Лекція 31. Зовнішній фотоефект.
- Лекція 32. Фотогальванічні ефекти
- Лекція 33. Фоточутливі матеріали.

## Розділ X. МЕТОДИ УПРАВЛІННЯ ПРОВІДНІСТЮ

- Лекція 34. Бар'єрне управління.
- Лекція 35. Польове управління.
- Лекція 36. Оптичне управління.

## ТЕМИ ПРАКТИЧНИХ І СЕМІНАРСЬКИХ ЗАНЯТЬ

1. Енергетичні функції розподілу електронів.
2. Статистика електронів у металах.
3. Розрахунок концентрацій носіїв у зонах напівпровідника.
4. Контактні поля, контактна різниця потенціалів.
5. Дрейфово-дифузійна рівновага в контактах.
6. Вольтамперна характеристика електронно-діркового переходу
7. Динамічні властивості електронно-діркового переходу.
8. Фотодіоди, світлодіоди.
9. Моделі польових транзисторів.

## ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

Метою лабораторних робіт є експериментальне дослідження фізичних явищ і процесів та ідентифікація параметрів відповідних моделей за результатами експерименту.

1. Дослідження термоелектронної емісії. Визначення основних параметрів. –2 год.
2. Дослідження термоелектронної емісії. Метод затримуючого потенціалу –2 год.
3. Вимірювання ширини забороненої зони по краю фундаментального поглинання світла –4 год.
4. Дослідження зовнішнього фотоефекту –4 год.
5. Дослідження вторинної електронної емісії. Перевірка основних закономірностей –2 год.
6. Дослідження вторинної електронної емісії. Визначення параметрів моделі –2 год.
7. Дослідження електронно-діркового переходу. Визначення параметрів моделі вольтамперної характеристики –2 год.
8. Дослідження електронно-діркового переходу. Визначення контактної різниці потенціалів –2 год.
9. Дослідження законів відбивання та заломлення хвиль на межі поділу середовищ –4 год.
10. Дослідження закону дисперсії електромагнітних хвиль у прямокутному хвилеводі –4 год.
11. Вимірювання опору на надвисоких частотах –4 год.
12. Панорамне вимірювання коефіцієнта стоячої хвилі та коефіцієнта передачі –4 год.

## САМОСТІЙНА РОБОТА

Для самостійного вивчення пропонуються питання, пов'язані, перш за все, з поглибленням знань по темах, що вивчаються в курсах “Фізика твердого тіла”, “Статистична фізика”, а саме:

Статистичні функції розподілу бозонів і ферміонів.  
Властивості електронного газу в металах.  
Мілки і глибокі електронні локалізовані стани.  
Статистика електронно-діркових колективів у напівпровідниках.  
Властивості вироджених і невироджених напівпровідників.

В розрахунок самостійної роботи входить виконання розрахункових домашніх робіт.

## КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Яким чином взаємодія валентних електронів впливає на їх енергетичний спектр при об'єднанні атомів в кристал?

2. У чому полягає головна особливість хвильової функції усупільненого електрона в ідеальній періодичній кристалічній решітці? Які практичні висновки з неї виходять?

3. У чому відмінність хвильового вектора електрона в кристалі і вільного електрона? Що таке зона Бріллюена? Скільки і яких станів вона включає?

4. Опишіть властивості закону дисперсії електронів у кристалі і його особливості біля краю енергетичних зон. Які типові форми його подання?

5. У чому суть методу ефективної маси? Для яких станів його зручно застосовувати?

6. Опишіть функції розподілу енергетичних станів біля краю зон у кристалах. Що таке ефективна маса густини станів?

7. Опишіть модель утворення напівпровідникової зонної структури у ковалентних кристалах (Si, Ge) і ковалентно-іонних ( $A_3B_5$ ).

8. Які основні особливості розташування долин і їх позначення в законі дисперсії для найважливіших напівпровідникових матеріалів (Si, Ge, GaAs)?

9. Які атоми є типовими донорами? Сформулюйте головну особливість донорних станів, звернувши увагу на енергетичний спектр (енергію іонізації) електронів і область їх просторової локалізації. Чому для опису донорних станів зручно використовувати модель воднеподібного атома? Які типові значення енергії іонізації донорних атомів у найважливіших напівпровідниках?

10. Проведіть подібний аналіз для акцепторних атомів, використовуючи симетрію (антисиметрію) моделі порівняно з донорами.

11. Які домішки називаються багатозарядними і чому електронні стани в них називають глибокими?

12. Як впливає концентрація домішки на енергетичний спектр електронів? Що таке і чому утворюється домішкова зона? За якого порядку концентрації домішки спостерігається виродження напівпровідника?

13. Яка фізична природа потенціального бар'єру біля поверхні твердого тіла? Якими параметрами прийнято характеризувати його висоту в металах і напівпровідниках?

14. У чому причина відмінності електронних станів в об'ємі кристала і біля його поверхні? Які особливості спектру поверхневих (таммівських) станів?

15. У чому фізична причина виникнення сил адсорбції? Які типові прояви електронних станів адсорбованих атомів на поверхневих параметри зонної структури твердих тіл?

16. Поясніть, чому електрони у повністю заповненій зоні не можуть створювати електричний струм, і вкажіть характерний зв'язок зонної структури твердих тіл з їх провідністю. Запишіть напівкласичні рівняння, що описують рух вільних електронів у кристалічній решітці.

17. Які типові механізми електронної провідності у частково заповненій зоні провідності і частково вільній валентній зоні? Що таке рухливі носії заряду і які характерні параметри електронів і дірок?

18. На прикладі поведінки одного електрона в координатному і в  $k$ -просторі опишіть дрейфовий рух (одночасткова модель) в електричному полі, звернувши увагу на роль зіткнень. Що таке рухливість електронів і питома електропровідність речовини і від яких параметрів вони залежать?

19. Дайте визначення дифузії як макроскопічному процесу і вкажіть його внутрішню фізичну причину ("рушійну силу"). Які особливості дифузії заряджених частинок? Які величини зв'язує співвідношення Ейнштейна, і за яких умов воно застосовне?

20. Опишіть суть основного методу статистичного аналізу великих колективів частинок і роль функцій розподілу. Які функції розподілу типові для електронних колективів?

21. Опишіть метод і основний результат розрахунку концентрації електронів в зоні провідності. Який вид він має для невироджених напівпровідників?

22. Дайте відповідь на попереднє питання для дірок у валентній зоні, звернувши увагу на симетрію понять.

23. Що таке закон діючих мас для електронно-діркового колективу і за яких умов він застосовний?

24. Який метод розрахунку і його результати для концентрації іонізованих домішкових (донорних і акцепторних) станів?

25. Поясніть залежність провідності металів від температури, використовуючи властивість виродженості електронного газу і особливості його розсіювання. Рекомендується заздалегідь виконати розрахунки із завдання №1 програми курсу.

26. Поясніть хід температурної залежності питомої електропровідності, а також рівня Фермі, для власних напівпровідників, пов'язавши її з процесами генерації носіїв і механізмами розсіювання. Зверніть увагу на форми представлення цієї залежності у різних координатах і на її зв'язок з параметрами зонної структури.

27. Виконати попереднє завдання для домішкових напівпровідників (донорних і акцепторних). Доцільно заздалегідь виконати кількісні розрахунки відповідно до завдання № 2 (див. робочу програму).

28. Наведіть і поясніть зв'язок розподілу концентрації рівноважних носіїв і потенціального рельєфу, що створюється електричним полем (при цьому зручно скористатися моделлю викривлених зон).

29. Опишіть механізм термоелектронної емісії і приведіть її основний закон. Які параметри і яким чином можуть бути визначені із експериментальної залежності струму емісії від температури?

30. Які фактори впливають на роботу виходу термоелектронних катодів? Як впливає прискорююче електричне поле на струм термоемісії (ефект Шоттки)? Яку інформацію можна отримати, вимірюючи анодний струм при гальмуючому електричному полі (метод затримуючого потенціалу)?

31. Поясніть суть і ціль методу кінетичного рівняння. Які макроскопічні характеристики можуть бути визначені із знайденої функції розподілу? Чому цей метод вважається за напівкласичний?

32. Поясніть структуру і зміст кожного доданку в кінетичному рівнянні. Що таке інтеграл зіткнень і як він перетворюється при використанні наближення часу релаксації? У чому суть принципу детальної рівноваги і в яких випадках він застосовний?

33. Яким чином кінетичного рівняння можна отримати закон Ома? Зверніть увагу на допущення, при яких це можливо. Що таке омічна ефективна маса?

34. Опишіть характер перехідних дрейфових процесів, що виникають в однорідному провідному середовищі при включенні-виключенні електричного поля. Від чого залежить швидкість цих процесів релаксацій?

35. Яким чином змінюється провідність при підвищенні частоти? Від чого залежить порядок значень частот, на яких зменшення провідності стає помітним? Що означає комплексний характер питомої електропровідності? Який граничний фазовий зсув між струмом і напругою може бути отриманий?

36. Поясніть метод отримання кінетичного рівняння рівнянь релаксацій для концентрації, дрейфового імпульсу і енергії. У чому зміст і відмінність відповідних часів релаксації?

37. У чому полягають особливості рівнянь релаксацій для багатодолинних напівпровідників (GaAs)?

38. Що таке розсіювання, яка його роль у процесах переносу носіїв і якими параметрами можна характеризувати його інтенсивність?

39. У чому полягають основні особливості і механізми домішкового розсіювання? Як швидкість розсіювання (час релаксації, рухливість) залежать від температури і концентрації домішки?

40. Які види (моди) коливань кристалічної решітки характерні для ковалентних (Ge, Si) і ковалентно-іонних (GaAs) кристалів? Який порядок енергій мають відповідні фонони і від чого залежить їх кількість?

41. Які загальні закономірності фононного розсіювання? Від чого залежить ступінь пружності взаємодії електронів фононами?

42. Перерахуйте види фононного розсіювання, дайте їх коротку характеристику і порівняйте їх швидкості і часи релаксації, звернувши увагу на відмінність часів релаксації імпульсу і енергії.

43. Які види і результат міждолинного розсіювання? Чи можна його віднести до фононних видів розсіювання і в чому його специфіка? Що таке міждолинні фонони?

44. Порівняйте динаміку рекомбінаційних процесів при низькому і високому рівнях збудження нерівноважних носіїв. Якими параметрами характеризується швидкість цих процесів?

45. Опишіть основні види рекомбінації у напівпровідниках і коротко охарактеризуйте вплив основних факторів на відповідні часи життя.
46. Які основні механізми і особливості електронно-іонної рекомбінації у газорозрядній плазмі?
47. Які електричні поля прийнято називати сильними? Перерахуйте ефекти, що спостерігаються в сильних полях, розділивши їх на дві характерні групи (які?).
48. З якою особливістю зіткнень і чому зв'язаний ефект розігрівання електронного газу? Які види зіткнень найбільшою мірою сприяють розігріванню? Охарактеризуйте різні види розсіювання з з погляду пружності.
49. З яким видом розсіювання пов'язане насичення дрейфової швидкості у ковалентних кристалах (Ge, Si)? У полях якої напруженості воно спостерігається? Який порядок швидкості насичення?
50. У чому полягає суттєва відмінність механізмів насичення дрейфової швидкості в арсеніді галію від таких у ковалентних напівпровідниках? Приведіть типовий вигляд полешвидкісної (вольтамперної) характеристики для GaAs і поясніть зв'язок міждолинних переходів з наявністю ділянки негативної диференціальної рухливості (провідності).
51. Поясніть, чому в динамічному режимі швидкість дрейфу може бути отримана вищою, ніж в стаціонарному (ефект “сплеску”).
52. Що таке ефект Ганна і яка особливість закону дисперсії необхідна для його прояву? Поясніть, як утворюється домен сильного поля і від чого залежить частота його повторення.
53. У чому полягає макроскопічний прояв ефекту Зінера і яке його квантовомеханічне пояснення? За яких умов він спостерігається і які властивості електрона відповідальні за його прояв? Яка особливість електростатичного “пробою” зумовлює сферу його застосування?
54. Поясніть причини і макроскопічні прояви термоелектронної іонізації (ефекту Френкеля), звернувши увагу на роль електричного поля і термічного збудження.
55. Що таке автоелектронна емісія, які її необхідні умови, внутрішній механізм і основний закон? Які її особливості зумовлюють області використання вістряних катодів? (Корисно прослідкувати спільні риси і відмінність автоелектронної емісії і ефекту Зінера).
56. Що таке лавинні процеси? Приведіть найпростішу модель лавинного розмноження. У чому її недолік при розгляді носіїв лише одного знаку?
57. Опишіть стаціонарну модель (фізичну і математичну) утворення електронно-діркових лавин у напівпровідниках. Сформулюйте умову лавинного пробою, звернувши увагу на його відмінність від електростатичного “пробою”.
58. Опишіть структуру, принцип дії і призначення простих конструкцій лавинно-пролітних діодів (ЛПД).
59. Дайте визначення ефектові поля. Опишіть типовий вигляд залежності поверхневої провідності від поверхневого потенціалу для домішкових (донорних та акцепторних) напівпровідників і вкажіть характерні області на цій кривій.
60. Опишіть рівноважний стан електронно-діркового переходу, звернувши увагу на роль контактного поля. Які процеси відбуваються при електричному зміщенні електронно-діркового переходу?
61. Опишіть вольт-амперну характеристику електронно-діркового переходу як результат порушення рівноважного стану. Опишіть поведінку носіїв за межами збідненої області.
62. Дайте порівняльну характеристику внутрішнього і зовнішнього фотоефектів і відповідних фотоприймачів по швидкодії, чутливості, лінійності світлової характеристики і граничній частоті.
63. Опишіть фотоелектронні процеси, що відбуваються при освітленні електронно-діркового переходу. Для яких цілей можна використовувати різні режими роботи переходу?

## ЛІТЕРАТУРА

1. Москалюк В.А., Синекон Ю.С., Кассинг Р. «Физика электронных процессов, часть I. Электронные состояния», учебн. пособие. – Киев, изд. УкрИНТЭИ, 2001. С 148.
2. Москалюк В.А., «Физика электронных процессов, часть II. Динамические процессы», учебн. пособие. – Киев, изд. «Аверс», 2004. С 186.
3. Москалюк В.О., «Физика электронных процесів. Динамічні процеси», навч. посібник. – Київ, «Політехніка», 2004. С 180.
4. Герасимов С.М., Белоус М.В., Москалюк В.А. “Физические основы электронной техники”, учебн. пособие для вузов. – Киев, изд. “Вища школа”, 1981. С 368.
5. Москалюк В.А., Шовкун И.Д. “Генерация и рекомбинация подвижных носителей заряда”, текст лекций. – Киев, изд. КПИ, 1985. С 60.



6. Методические указания к разделу “Зонная теория твердых тел” по курсу “Физические основы электронной техники”, сост. Москалюк В.А.– Киев, изд. КПИ, 1980. С 52.
7. Москалюк В. О., Саурова Т. А., Федяй А. В., Шовкун І. Д. Лабораторний практикум з фізичної електроніки. Навчально-методичн. посібник, К., «Політехніка», 2009. С 96.
8. Москалюк В. А., Саурова Т. А., Федяй А. В., Шовкун І. Д. Лабораторный практикум по физической электронике. Учеб.-методич. пособие, К., НТУУ«КПИ», 2009. С 90.

### РОЗРАХУНКОВІ ДОМАШНІ РОБОТИ

ЗАВДАННЯ № 1. Метою даного завдання є визначення властивостей функції Фермі-Дірака та особливостей виродженого електронного газу.

1. Використовуючи дані, наведені у таблиці, і значення числа Авогадро, розрахувати концентрацію атомів і вільних електронів, оцінити середню відстань між атомами, розрахувати (у еВ) енергію Фермі, оцінити і порівняти середні значення нульової і теплової енергії і відповідних швидкостей при кімнатній температурі і температурі, на ~25% нижчої за температуру плавлення.

2. Розрахувати і побудувати функцію Фермі-Дірака для цих же температур, а також повну функцію розподілу електронів. За результатами розрахунків зробити висновки.

№ варіанту	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
метал	Ag	Cu	Au	Al	Ni	V	W	Fe	Mo	Pt
густина, г/см <sup>3</sup>	10,5	8,9	19,3	2,7	8,8	5,5	19,1	7,9	8,1	21,5
атомна вага	108	63,5	197	27,0	58,7	50,9	184	55,8	95,9	195
валентність	1	1	1	3	2	2	2	3	1	1
температура плавлення, К	1253	1356	1337	931	1723	1988	3673	1803	2893	2046
питомий опір, 10 <sup>-8</sup> Ом.м	1,6	1,7	2,3	2,7	3,7	3,5	5,3	10	5,2	10,5

ЗАВДАННЯ № 2. Метою цього завдання є визначення впливу температури на провідність не вироджених напівпровідників через зміну концентрації (п. 1) та через зміну рухливості (п. 2, 3)

1. Для даного напівпровідника, а) вважаючи його за власний, б) для заданої концентрації домішки, розрахувати залежності концентрації електронів і дірок і енергії Фермі від температури. Концентраційні залежності для власного і домішкового напівпровідників побудувати на одному графіку, який представити в природних і спрямляючих координатах. Графік  $E_f(T)$  представити на тлі енергетичної діаграми напівпровідника. У висновках зафіксувати результати розрахунку при кімнатній температурі.

2. Аналізуючи види розсіювання, розрахувати часи релаксації імпульсу для кожного з них та побудувати температурну залежність рухливості для заданого напівпровідника.

3. За результатами п.п. 1 та 2 побудувати температурну залежність питомої електропровідності. Порівняти отримані результати з наведеними на сайті <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond>

№ варіанту	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
напівпровідник	n-GaAs		n-Si		p-Si		n-Ge		p-Ge	
концентр. домішки, м <sup>-3</sup>	10 <sup>22</sup>	10 <sup>23</sup>	10 <sup>20</sup>	10 <sup>23</sup>	10 <sup>20</sup>	10 <sup>23</sup>	10 <sup>20</sup>	10 <sup>23</sup>	10 <sup>20</sup>	10 <sup>23</sup>
енергія іонізації, еВ	0,005		0,05		0,05		0,01		0,01	
$m_d^*/m_c^*$	0,1/0 056		1,08/0,26		1,08/0,26		0,56/0,12		0,56/0,12	
$m_{pd}^*/m$	0,5		0,56		0,56		0,36		0,36	
рухливість електронів, м <sup>2</sup> /В.с	0,86		0,13		0,13		0,40		0,40	
рухливість дірок, м <sup>2</sup> /В.с	0,04		0,05		0,05		0,19		0,19	

ЗАВДАННЯ № 3. Метою цього завдання є порівняння провідності металів та напівпровідників та співставлення властивостей виродженого та невиродженого електронних колективів

Використовуючи результати попередніх завдань, для металу і напівпровідника розрахувати (оцінити) і порівняти при кімнатній температурі питому електропровідність, рухливість носіїв, час і середню довжину вільного пробігу, швидкість хаотичного руху швидкість дрейфу і напруженість електричного поля при густині струму 1 А/мм<sup>2</sup>. Як додаткові дані узяти табличні значення електропровідності металу і рухливості носіїв у напівпровіднику. Результати розрахунків для порівняння звести у спільну таблицю, по результатах зробити висновки.

Програму розробив професор кафедри фізичної та біомедичної електроніки факультету електроніки НТУУ “КПІ” Москалюк В.О.

**ПОЛОЖЕННЯ**  
про рейтингову систему оцінки успішності студентів  
з дисципліни „Фізика електронних процесів”, курс 3-й,  
кафедра фізичної та біомедичної електроніки факультету електроніки  
для спеціальності „фізична та біомедична електроніка”

Рейтинг студентів складається з балів, що отримуються:

за 5 модульних контрольних робіт, 4 домашні розрахункові завдання, 5 контролів самостійної поточної роботи, 2 відповіді на практичних заняттях, 10 лабораторних робіт, . Семестровим контролем є екзамен.

Система рейтингових балів

1. *Модульна контрольна робота(4):*
  - повне виконання роботи 10 балів
  - незначні похибки в роботі 8 балів
  - помилки в роботі, але швидко коригування результату в процесі відповіді 4 бали
  - незадовільний результат 0 балів
2. *Домашні розрахункові роботи(3):*
  - повне та своєчасне виконання (5+ 6+4) балів
  - своєчасне виконання, незначні похибки (3+4+2) балів
  - своєчасне виконання, суттєві похибки 1 бал
3. *Практичні (семінарські) заняття:*
  - глибоке розкриття питання, вільне володіння матеріалом 5 балів
  - активна участь у роботі 4 бали
  - участь у роботі 3 бали
  - відсутність на занятті –2 бали
4. *Лабораторні роботи:*
  - повне і творче виконання роботи 3 бали
  - своєчасне виконання, незначні похибки 2 бали
  - своєчасне виконання, суттєві похибки 1 бал

За рішенням кафедри за виконання творчих робіт з дисципліни студентам можуть нараховуватися заохочувальні бали, також можуть передбачатися і штрафні бали за несвоєчасне виконання завдань, пропуски занять тощо, у межах  $\pm 8$  балів.

Максимальний рейтинг  $R = 100$  балів(4 м.к.р. $\times$ 10б. + 15б. +3п.з. $\times$ 5б. + 10л.р. $\times$ 3б.). Для отримання студентом відповідної семестрової оцінки його рейтинг має бути:

Оцінка ETCS	традиційна оцінка	
	бали	
A – відмінно	95...100	відмінно
B – дуже добре	85...94	добре
C – добре	75...84	
D – задовільно	65...74	Задовільно
E – достатньо	60...64	
FX – незадовільно	50...60	Незадовільно
F – не допущено	менше 50	Не допущено

Студенти, які отримали необхідну кількість балів ( $>0,6 R$ ) мають можливість:

- не складати екзамен (залік), а отримати відповідну оцінку згідно з таблицею;
- складати екзамен з метою підвищення оцінки. У разі отримання на екзамені оцінки меншої, ніж рейтингова, остання за студентом не зберігається і виставляється екзаменаційна оцінка.

Студенти, які отримали кількість балів  $<0,6 R$ , тобто оцінку „незадовільно” або „незараховано”, повинні складати екзамен (залік).

Студенти, які отримали кількість балів  $<0,5 R$ , повинні до початку екзаменаційної сесії підвищити його, інакше вони не допускаються до екзамену з цієї дисципліни і матимуть академічну заборгованість.

Склав  
Ухвалено на засіданні кафедри  
Протокол №      від  
Завідувач кафедри ФБМЕ

проф. Москалюк В.О.

проф. Тимофеев В.І.