

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ**  
**Інститут фізики НАН України**



**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Директором Інституту фізики НАН  
України, член-кор. НАНУ, д.ф.-м.н.

**М.В. Бондар**

(підпис)

« 27 » жовтня 2023 р.

**РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ**

**ВК.08**

**Явища переносу в напівпровідникових гетероструктурах**

для аспірантів

спеціальності: 104 Фізика і астрономія

третього (освітньо-наукового) рівня  
вищої освіти – доктор філософії

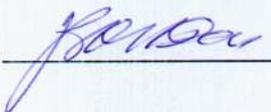
**Київ - 2023**

**Розробник:**

доктор. фіз.-мат. наук, с.н.с, провідний науковий співробітник відділу електроніки твердого тіла Інституту фізики НАНУ .  /В.В Вайнберг/

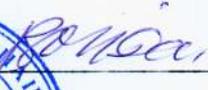
**Робочу програму узгоджено науково-методичною радою**

Протокол № 10-1 від 24 жовтня 2023 р.

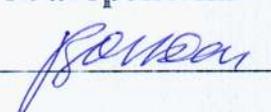
Головою науково-методичної ради  /М.В. Бондар/

**Робочу програму затверджено Вченою радою Інституту фізики НАНУ**

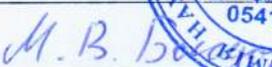
Протокол № 10 від 26 жовтня 2023 р.

Голова Вченої ради  /М.В. Бондар/

**Робочу програму погоджено з гарантом освітньо-наукової програми зі спеціальності 104 «Фізика та астрономія» 27 жовтня 2023р.**

Гарант освітньої програми  /М.В. Бондар/

**Пролонговано Вченою радою Інституту фізики НАН України:**

| навчальні роки пролонгації | Голова Вченої ради ІФ НАН України  | підпис  | № протоколу | дата протоколу |
|----------------------------|--|---|-------------|----------------|
| 20 <u>24</u> /20 <u>25</u> | <u></u> | <u></u> | 5           | 27.06.2024     |
| 20 <u>25</u> /20 <u>26</u> | <u></u> | <u></u> | 8           | 11.09.2025     |
| 20 ____ /20 ____           |  |   |             |                |
| 20 ____ /20 ____           |  |   |             |                |

## 1. Загальні відомості

| Найменування показників                  | Характеристика дисципліни за денною формою навчання |
|--|---|
| Вид дисципліни                           | вибіркова   |
| Мова викладання, навчання та оцінювання  | українська  |
| Загальний обсяг кредитів / годин         | 4/120   |
| Курс                                     | 2   |
| Семестр                                  | 2   |
| Кількість змістових модулів з розподілом | 1   |
| Обсяг кредитів                           | 4   |
| Обсяг годин,<br>В тому числі:            | 120   |
| Лекції                                   | 30  |
| Практичні заняття                        | 15  |
| Самостійна робота                        | 75  |
| Форма підсумкового контролю              | екзамен   |

## 2. Мета, завдання та очікувані результати навчальної дисципліни

Робоча програма навчальної дисципліни ВК.08 «Явища переносу в напівпровідникових гетероструктурах» є нормативним документом, який розроблений на основі освітньо-наукової програми, далі ОП, (затверджена Вченою радою Інституту фізики НАН України, протоколом № 10 від 26 жовтня 2023 року) здобувача третього рівня відповідно до навчального плану спеціальності 104 «Фізика та астрономія»

**Передумова вивчення.** Навчальний курс ВК.08 «Явища переносу в напівпровідникових гетероструктурах» є складовою циклу професійної підготовки фахівців третього освітньо-кваліфікаційного рівня “доктор філософії”. Програма курсу орієнтована на аспірантів, які самостійно або під керівництвом наукового керівника планують та здійснюють наукові дослідження відповідно до планів навчання у аспірантурі. Курс розроблений з орієнтацією як на аспірантів, які спеціалізуються у області фізики твердого тіла, так і на слухачів, які спеціалізуються у інших напрямках фізики та астрономії.

**Мета навчальної дисципліни.** ВК.08 «Явища переносу в напівпровідникових гетероструктурах»: отримання базових знань в теорії фізики напівпровідникових гетероструктур, зокрема кінетичних явищ, ознайомлення з експериментальними методами дослідження та обробки результатів, ознайомлення з основними технологіями виготовлення та впливу технологічних особливостей на реальні властивості досліджуваних структур, вивчення методів виконання досліджень електрофізичних властивостей напівпровідникових низькорозмірних об'єктів

**Зміст навчальної дисципліни.** Теоретичні та практичні знання, набуті при вивченні дисципліни ВК.08 «Явища переносу в напівпровідникових гетероструктурах» дають поглиблене ознайомлення з розділами фізики твердого тіла, що складають базис для аналізу кінетичних ефектів у напівпровідникових гетероструктурах з квантовими ямами – включаючи особливості, характерні для близьких матеріалів пониженої розмірності, таких як 2D матеріали, структури на основі композиційних матеріалів. Набуття аспірантами навичок у творчому розв'язуванні відповідних фізичних задач (в тому числі, з використанням ПК); сприяння розвитку логічного й аналітичного мислення майбутніх фізиків-науковців..

**Предметом навчальної дисципліни** ВК.08 «Явища переносу в напівпровідникових гетероструктурах» є гіпотези, теоретичні моделі та експериментальні результати у галузі фізики твердого тіла, ефекти у напівпровідникових гетероструктурах з квантовими ямами тощо.

**Основними завданнями навчальної дисципліни** ВК.08 «Явища переносу в напівпровідникових гетероструктурах» є формування базису знань в межах матеріалу, що вивчається. Дисципліна готує аспірантів до сприймання матеріалу інших спецкурсів, передбачених програмою спеціалізації.

**Фахові програмні результати навчання (вимоги до знань та вмінь)**

В результаті вивчення навчальної дисципліни аспірант повинен

**Знати:**

особливості енергетичного спектру носіїв заряду в напівпровідникових гетероструктурах, механізми їх розсіяння, методи розрахунку та визначення рухливості, фотоелектричні явища, особливості розігріву носіїв струму в сильних електричних полях, ефектів міждолинного та просторового перерозподілу гарячих носіїв.

**Уміти:**

використовувати експериментальні методи дослідження кінетичних властивостей напівпровідникових матеріалів та гетероструктур на їх основі, проводити розрахунок рухливості носіїв струму, гальваномагнітних та фотоелектричних характеристик.

**Завданням навчальної дисципліни (відповідно до переліку ОП) ВК.08 «Явища переносу в напівпровідникових гетероструктурах»** набути компетентності:

Загальні: ЗК1, ЗК2, ЗК3.

Спеціальні: СК1, СК2, СК5, СК6

Програмні результати навчання: РН1, РН4, РН5, РН6, РН7, РН8, РН9.

### 3. Тематичний план

(структура залікового кредиту)

з навчальної дисципліни ВК.08 «Явища переносу в напівпровідникових гетероструктурах»

(2 курс – 2 семестр)

| №             | Зміст   | Лекції,<br>год. | Семінарські,<br>год. | Самостійна<br>робота, год. | Разом,<br>год. |
|---------------|---|-----------------|----------------------|----------------------------|----------------|
| 1.            | Лекція 1.<br>Вступ. Системи зі зниженою розмірністю. Типи гетероструктур з квантовими ямами                 | 3               | 0                    | 7                          | 10             |
| 2.            | Лекція 2<br>Напівпровідникові гетероструктури з квантовими ямами. Енергетичний спектр та профіль потенціалу | 3               | 0                    | 7                          | 10             |
| 3.            | Лекція 3.<br>Енергетичний спектр електронів у гетероструктурах з тунельно-зв'язаними квантовими ямами       | 3               | 4                    | 8                          | 15             |
| 4.            | Лекція 4.<br>Механізми розсіяння електронів та дірок при латеральному транспорті у КЯ                       | 3               | 4                    | 7                          | 14             |
| 5.            | Лекція 5.<br>Латеральна провідність у селективно легованих гетероструктурах з дельта шарами домішки         | 3               | 0                    | 7                          | 10             |
| 6.            | Лекція 6.<br>Гарячі носії при латеральному транспорті у КЯ  | 3               | 0                    | 8                          | 11             |
| 7.            | Лекція 7. Фотопровідність селективно легованих гетероструктур з КЯ у слабких та грюючих електричних полях.  | 3               | 4                    | 8                          | 15             |
| 8.            | Лекція 8.<br>Квантові ефекти при латеральному транспорті у гетероструктурах з селективно легованими КЯ      | 3               | 0                    | 8                          | 11             |
| 9.            | Лекція 9.<br>Стрибова провідність в двовимірних системах (квантових ямах).                                  | 3               | 0                    | 8                          | 11             |
| 10.           | Лекція 10.<br>Магнітоопір двовимірних систем  | 3               | 3                    | 7                          | 13             |
| <b>Всього</b> |   | <b>30</b>       | <b>15</b>            | <b>75</b>                  | <b>120</b>     |

#### Методичне забезпечення навчальної дисципліни забезпечують:

опорні конспекти лекцій, бібліотечні посібники зі списку рекомендованої літератури, електронні посібники, мультимедійні презентації, діючі нормативно-правові законодавчі акти України, довідково-інформаційні інтернет-джерела тощо.

## 4. Зміст навчальної дисципліни

ВК.08 «Явища переносу в напівпровідникових гетероструктурах»

**Тема 1. Вступ. Системи зі зниженою розмірністю. Типи гетероструктур з квантовими ямами**  
Кінетичні явища. Характерні масштаби зниження розмірності. Квазі-знижена розмірність. 2D-матеріали. Розмірне квантування. Гетероструктури. Композиційні типи гетероструктур з квантовими ямами. Домішкові ями та надгратки. Дельта легування. Дельта ями. «Вертикальний» та «латеральний» рух носіїв струму у гетероструктурах з КЯ. Поздовжня рухливість у КЯ. Досягнення та успіхи практичного застосування. Лазери, транзистори  
Література: 1-6.

### Завдання для самостійної роботи (7 год.)

1. Вивчення матеріалу лекції.
2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення:
  - Практичні досягнення у застосуванні 2D матеріалів (графен, халькогеніди перехідних металів, чорний фосфор)
  - Приклади реалізації різних типів квантових ям.
  - Вимірювання концентрації у двовимірних системах, Холл-ефект і осциляції Шубнікова-де Гааза.
  - Одно та нуль-вимірні об'єкти (квантові дроти та точки)
  - Інжекційні лазери, каскадні лазери. Транзистори з високою рухливістю електронів.

### 2. Тема 2. Напівпровідникові гетероструктури з квантовими ямами. Енергетичний спектр та профіль потенціалу

Залежність параметрів квантових ям від властивостей матеріалів гетеропар. Закон дисперсії. Профіль потенціалу. Вбудоване поле. Енергетичний спектр електронів. Непараболічність зон. Ефективна маса. Енергетичний спектр дірок у квантових ямах. Вплив напружень, зняття виродження, ефективна маса. Основні рівняння, аналітичні та чисельні методи розрахунку. Самоузгоджений розв'язок рівнянь Шредінгера і Пуассона. Форм-фактор  
Література: 1-6.

### Завдання для самостійної роботи (7 год.)

1. Вивчення матеріалу лекції.
2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення:
  - Різниця у визначенні розриву зон для зони провідності і валентної зони.
  - Залежність від неузгодження сталих гратки.
  - Непараболічність закону дисперсії в зоні провідності і валентній зоні. Широкозонні і вузькозонні матеріали.
  - Відмінності поняття ефективної маси у двовимірних підзонах розмірного квантування.
  - Вплив напружень.

### 3. Тема 3. Енергетичний спектр електронів у гетероструктурах з тунельно- зв'язаними квантовими ямами

Багатоперіодні ГС (надгратки з широкими проміжними бар'єрами). Одиночна дельта-легована КЯ. Неглибокі тунельно- зв'язані КЯ з різною шириною (без просторового заряду). Тунельно- зв'язані КЯ з різною шириною з дельта-легуванням в центр вузької КЯ, 3x-ямна структура з різною шириною та глибиною КЯ. Сегрегація індію в структурах GaAs/InGaAs/GaAs в процесі вирощування і вплив на профіль потенціалу. Тунельно зв'язані структурна та домішкова ями. Вплив концентрації домішки у дельта-шарі в бар'єрі на енергетичний спектр електронів. Короткоперіодні надгратки. Короткоперіодні надгратки, тунельно- зв'язані зі структурними КЯ. Вплив просторового заряду. Розділення зарядів електронів і дірок в асиметричних гетероструктурах. Закон дисперсії дірок у КЯ валентної зони в ГС Si/GeSi/Si. Енергетичний спектр електронів у гратках квантово-каскадних лазерів  
Література: 1-6.

### Завдання для самостійної роботи (8 год.)

1. Вивчення матеріалу лекції.

2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення:

Математичний апарат розрахунків параметрів квантових ям. Рівняння Шредінгера і Пуассона для квантових ям одиночних і зв'язаних (симетричних та асиметричних). Методи розв'язку. Метод кінцевих різниць і практичні реалізації.

#### **Семінар (4 год)**

Реферати «вид квантових ям та їх енергетичний спектр у транзисторах з високою рухливістю електронів, інжекційних лазерах близького інфрачервоного діапазону, квантових каскадних лазерах.»

#### **4. Тема 4. Механізми розсіяння електронів та дірок при латеральному транспорті у КЯ**

Функція розподілу носіїв. Кінетичне рівняння Больцмана. Наближення часу релаксації. Переріз розсіяння. Механізми розсіяння електронів та дірок при латеральному транспорті у КЯ. Розсіяння на акустичних фононах. Оптичні фонони. Полярні оптичні фонони. Розсіяння на іонізованій домішці у гетероструктурах з КЯ. Розсіяння на шорсткостях інтерфейсів. Сплавне розсіяння. Міжпідзонні переходи. Міждолинне розсіяння

Література: 1,3,14,15

#### **Завдання для самостійної роботи (7 год.)**

1. Вивчення матеріалу лекції.

2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення:

Математичний апарат методу Монте-Карло.

Статистика енергетичного розподілу електронів і фононів. Різниця між акустичними і оптичними фононами. Характерні енергії оптичних фононів у різних напівпровідникових матеріалах, утворюючих нетеропари.

Дифузійний і балістичний рух носіїв заряду, зв'язок з технологією виготовлення мікро (нано) розмірних приладів в інтегральних мікросхемах

Детальний розгляд математичного виведення виразів матричних елементів переходів при розсіянні

#### **Семінар (4 год)**

Реферати «температурна залежність рухливості електронів у гетероструктурах на основі напівпровідникових сполук  $A_3B_5$  та  $GeSi/Si$ »/

#### **5. Тема 5. Латеральна провідність у селективно легованих гетероструктурах з дельта шарами домішки.**

Провідність одиночних дельта-легованих КЯ. Роль зони домішкових станів. Провідність одиночних КЯ з дельта-шаром домішки у бар'єрі. Тунельно- зв'язана пара «структурна КЯ+домішкова дельта-яма. Перерозподіл густини зарядів в залежності від концентрації дельта-домішки. Залежність рухливості від концентрації дельта-домішки. Асиметрична пара тунельно- зв'язаних ям, одна з яких дельта-легована. Провідність асиметричної пари тунельно- зв'язаних ям, одна з яких дельта-легована. Статистика електронів у зв'язаних КЯ. Просторовий розподіл енергетичного спектру електронних станів. Домішкова зона – додатковий канал провідності. Короткоперіодна надгратка. Загальні вирази для розрахунку рухливості. Вплив просторового перерозподілу зарядів з ростом температури на величину рухливості електронів.

Література: 1,3,14,15

#### **Завдання для самостійної роботи (7 год.)**

1. Вивчення матеріалу лекції.

2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення:

Домішкові енергетичні стани електронів та дірок, поняття про домішкову зону. Локалізовані та делокалізовані домішкові стани. «Самоузгоджена» квантова яма окремого дельта-шару мілкої домішки. Критерій утворення і різниця між мілкими та глибокими домішками. Роль дельта-шару домішки у бар'єрі. Залежність від концентрації. Відмінності фрагменту короткоперіодної надгратки в утворенні енергетичного спектру.

**Практичне заняття. Лабораторна робота – вимірювання ефекту Холла у зразках гетероструктур з КЯ в режимі постійного струму та імпульсному режимі (2 год)**

Реферати «реферативний огляд публікацій у наукових журналах по провідності у квантових ямах, утворених дельта-шарами домішки».

#### **6. Тема 6. Гарячі носії при латеральному транспорті у КЯ**

Електронна температура. Експериментальне визначення електронної температури . Розсіяння на фононах. Накопичення «гарячих» фононів. Взаємодія з фононами у квантових ямах.

Експериментальні результати по дослідженню рухливості гарячих носіїв струму в гетероструктурах GaAs/InGaAs, AlGaAs/GaAs, Si/GeSi. Ефект Ганна. Просторовий перерозподіл гарячих електронів. Асиметрична пара тунельно- зв'язаних пар. Ідея отримання інверсної населеності носіїв. Просторовий перерозподіл гарячих електронів у випадку пар КЯ, одна з яких дельта-легована КЯ, домішкова потенціальна яма або фрагмент короткоперіодної надгратки. Вплив просторового заряду на реалізацію ефекту у селективно легованих гетероструктурах. Література:7,15

#### **Завдання для самостійної роботи (8 год.)**

1. Вивчення матеріалу лекції.
2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення:  
Поняття електронної температури, умови використання, використання для електронів та дірок з врахуванням властивостей конкретних гетероструктур. Акустоелектричні ефекти, умови прояву.

#### **7. Тема 7. Фотопровідність селективно легованих гетероструктур з КЯ у слабких та гріючих електричних полях).**

Кінетика фотопровідності , основні поняття та параметри. Рекомбінація Використання фотопровідності для досліджень розподілу поля у гетероструктурах. Оптично-зондовий метод дослідження розподілу поздовжнього електричного поля та біполярного дрейфу носіїв у КЯ в режимі затриманої фотопровідності. Дослідження характеристик біполярного дрейфу у гетероструктурах методом світлового зонда. Негативна залишкова фотопровідність в інфрачервоному діапазоні у гетероструктурах з дельта-легованими КЯ при домішковому збудженні. Домішкова ІЧ-фотопровідність в гетероструктурах p-SiGe/Si з селективно легованими квантовими ямами . Спектри домішкової фотопровідності. Залежність від положення домішки у КЯ. Затримана від'ємна ФП. Затримана фотопровідність у тунельно-зв'язаних парах КЯ. Флуктуації складу шарів КЯ, Спад фотопровідності по «розтягнутій» експоненті. Параметри спаду. Зміна параметрів фотопровідності в сильному електричному полі. Огляд моделей затриманої фотопровідності у гетероструктурах з КЯ. Довготривала релаксація фотопровідності в асиметричних зв'язаних КЯ при між зонному збудженні.

Література:1,3,9,16,19.

#### **Завдання для самостійної роботи (8 год.)**

1. Вивчення матеріалу лекції.
2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення:  
Види випромінювальної і безвипромінювальної рекомбінації. Міжзонне збудження з утворенням електронно-діркової плазми та екситонів. Різниця внеску у фотопровідність та люмінесценцію. Просторове розділення фотозбуджених електронів та дірок у гетероструктурах з тунельно зв'язаними КЯ і вплив цього явища на фотопровідність та люмінесценцію. Механізми затриманої фотопровідності .

#### **Практичне заняття. Лабораторна робота – методи дослідження фотопровідності у гетероструктурах з КЯ (4 год.)**

#### **8. Тема 8 Квантові ефекти при латеральному транспорті у гетероструктурах з селективно легованими КЯ**

Основні поняття з теорії квантових поправок до провідності. Характерні довжини і часи Слабка локалізація електрон-електронна інтерференція . Антілокалізація. Електрон-електронна взаємодія. Інші поправки. Приклад експериментальних даних для гетероструктури з КЯ. Осциляції Шубнікова-де Гааза. Квантовий ефект Холла. Польові кремнієві транзистори та гетеротруктури AlGaAs/GaAs/AlGaAs. Дробний квантовий ефект Холла. Спінові ефекти Дрессельхфузі та Рашби. Вплив на закон дисперсії та провідність.

Література:17,20,21.

### **Завдання для самостійної роботи (8 год.)**

1. Вивчення матеріалу лекції.
2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення:  
Види квантових поправок до провідності в системах різної розмірності. Вплив магнітного поля на поправки від слабкої локалізації і електрон-електронної взаємодії. Параметр затухання осциляцій Шубнікова-де Гааза і його використання для визначення параметрів провідності. Зв'язок з природою квантового ефекту Холла. Різниця цілочислового і дробного ефектів.

### **9. Тема 9 Стрибкова провідність в двовимірних системах (квантових ямах).**

Мінімальна металічна провідність. Моделі переходу метал-діелектрик по Мотту та Андерсону. Загальні уявлення про стрибковий механізм провідності. Домішкова зона, зони Хаббарда. Закон Мотта. Закон Шкловського-Ефроса. Експериментальні дані. Стрибкова провідність в сильному електричному полі. Ексітонний перехід Мотта  
Література: 17,18.

### **Завдання для самостійної роботи (8 год.)**

1. Вивчення матеріалу лекції.
2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення:  
Механізм локалізації електронів у квантовій ямі при зменшенні їх концентрації. Модель Шкловського-Ефроса у стрибковій провідності і електрон-електронної інтерференція у теорії квантових поправок у провідності по зоні провідності квантової ями.

### **10. Тема 10. Магнітоопір двовимірних систем.**

Магнітоопір в слабкому і сильному полі. Лінійний магнітоопір. Поздовжній магнітоопір. Тонкі плівки. Магнітоопір квантових ям. Ефект Кондо. Спін-поляризаційні ефекти. Хвильова функція локалізованих електронів в магнітному полі. стрибковий магнітоопір (експеримент). Позитивний стрибковий магнітоопір в умовах провідності с постійною та змінною довжиною стрибка. (теорія). Композиційний вуглецевий матеріал. Стрибковий магнітоопір у квантовій ямі в зоні провідності AlGaAs/GaAs/AlGaAs. Стрибковий магнітоопір в дельта шарах. Стрибковий магнітоопір по верхній підзоні Хаббарда в КЯ валентної зони AlGaAs/p-GaAs/AlGaAs  
Література: 17,18

### **Завдання для самостійної роботи (7 год.)**

1. Вивчення матеріалу лекції.
2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення:  
Механізм від'ємного поздовжнього магнітоопору у КЯ по теорії слабкої локалізації.  
Механізм від'ємного поздовжнього магнітоопору у тунельно зв'язаних КЯ.  
Особливості поперечного магнітоопору в асиметричних гетероструктурах з тунельно зв'язаними КЯ.

**Практичне заняття. Лабораторна робота – методи дослідження магнітоопору та осциляцій Шубнікова-де Гааза у гетероструктурах з КЯ, методи обробки результатів (3 год.)**

## **5. Практичні заняття**

з навчальної дисципліни ВК.08 «Явища переносу в напівпровідникових гетероструктурах»

Практичне закріплення лекційного матеріалу та наукові доповіді аспіранта пов'язані з темами лекцій і є частиною змісту дисципліни.

## 6. Самостійна робота

з навчальної дисципліни ВК.08 «Явища переносу в напівпровідникових гетероструктурах»

| №                                     | Зміст самостійної роботи аспірантів                        | Обсяг, годин |
|---------------------------------------|--|--------------|
| 1.                                    | Вивчення матеріалу лекції                                  | 30           |
| 2.                                    | Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення | 45           |
| <b>Усього за навчальну дисципліну</b> |  | <b>75</b>    |

## 7. Методи викладання

з навчальної дисципліни ВК.08 «Явища переносу в напівпровідникових гетероструктурах»

У процесі викладання дисципліни використовуються такі методи:

- 1) методи організації та здійснення навчально-пізнавальної діяльності (бесіда, лекція; ілюстрація; лабораторні роботи, реферати; самостійна робота студентів);
- 2) методи стимулювання й мотивації навчально-пізнавальної діяльності (навчальні дискусії, модульно-рейтингова система знань);
- 3) методи контролю (самоконтролю, взаємоконтролю), корекції (самокорекції, взаємокорекції) за ефективністю навчально-пізнавальної діяльності.

## 8. Рейтингова система оцінювання

з навчальної дисципліни ВК.08 «Явища переносу в напівпровідникових гетероструктурах»

Основними формами організації контролю у процесі вивчення студентами даної дисципліни є індивідуальна, групова та фронтальна перевірка знань, вмінь та навичок студентів (усна та письмова). Рейтинг аспіранта складається з наступних отриманих балів:

1. Експрес-контроль – 20 балів. (усне опитування чи самостійні роботи під час навчального процесу)
2. Практичні заняття та самостійна робота – 40 балів.
3. Екзамен – 40 балів.

### Заохочувальні та штрафні бали

1. При відсутності на лекції/практичному занятті без поважних причин -2 бали
2. Подана в журнал стаття чи виступ на конференції за темою курсу +10 балів.

Сума як штрафних так і заохочуваних балів розраховується за формулою  $0,1R$ , де  $R$  – загальна кількість балів, і не має перевищувати в цілому 10 балів.

### Шкала рейтингів.

Загальна кількість балів, яку аспіранта може отримати під час вивчення курсу складається із суми вагових балів отриманих протягом вивчення дисципліни

$$R=20+40+40=100 \text{ (балів)}$$

### Шкала відповідності оцінок

| Рейтингова оцінка | Значення оцінки   | Рейтинг у відсотках, % |
|-------------------|---|------------------------|
| <b>A</b>          | <b>Відмінно</b> – відмінний рівень знань (умінь) в межах обов'язкового матеріалу з, можливими незнасними недоліками.  | 90-100                 |
| <b>B</b>          | <b>Дуже добре</b> – достатньо високий рівень знань (умінь) в межах обов'язкового матеріалу без суттєвих (грубих) помилок.   | 82-89                  |
| <b>C</b>          | <b>Добре</b> – добрий рівень знань (умінь) в межах обов'язкового матеріалу з незначною кількістю помилок.   | 75-81                  |
| <b>D</b>          | <b>Задовільно</b> – посередній рівень знань (умінь) в межах обов'язкового матеріалу із значною кількістю недоліків, достатній для подальшого навчання або ж професійної діяльності.         | 69-74                  |
| <b>E</b>          | <b>Достатньо</b> - мінімально можливий допустимий рівень знань (умінь) в межах обов'язкового матеріалу.   | 60-68                  |
| <b>FX</b>         | Незадовільно з можливістю повторного складання – незадовільний рівень знань (умінь) в межах обов'язкового матеріалу з можливістю повторного перескладання після самостійного доопрацювання. | 35-59                  |
| <b>F</b>          | Незадовільно з з обов'язковим повторним вивченням курсу – низький рівень знань (умінь) в межах обов'язкового матеріалу, що вимагає повторного вивчення матеріалів курсу.                    | 1-34                   |

### 9. Орієнтовний перелік екзаменаційних питань

з навчальної дисципліни ВК.08 «Явища переносу в напівпровідникових гетероструктурах»

1. Енергетичний спектр електронів у квантовій ямі. Густина станів. Відмінність від об'ємного випадку
2. Умови розмірного квантування. Характерні розмірності.
3. «Вертикальний» та «латеральний» рух носіїв Приклади приладів струму у гетероструктурах з КЯ.
4. Композиційні та домішкові типи квантових ям. Надгратки.
5. Гетероструктури з квантовими ямами I-го та II-го типу. Класифікація квантових ям у гетероструктурах GaAs/GaAs/AlGaAs та Si/GeSi/Si.
6. Дельта-легування. Утворення дельта-шарами домішки квантових ям.
7. Тунельно- зв'язані квантові ями. Утворення спільного спектру рівнів розмірного квантування. Фактори зміни ефективної маси.
8. Енергетичний спектр дірок у квантових ямах. Гамільтоніан Латтінжера. Напруження, Зняття виродження. Ефективна маса дірок у квантових ямах валентної зони.
9. Самоузгоджений розв'язок рівнянь Шредінгера і Пуассона у випадку гетероструктур з квантовими ямами.
10. Механізми розсіяння електронів та дірок при латеральному транспорті у КЯ
11. Функція розподілу носіїв. Кінетичне рівняння Больцмана. Наближення часу релаксації
12. Розсіяння на іонізованій домішці та шорсткостях інтерфейсів у гетероструктурах з КЯ.
13. Провідність одиночних КЯ з дельта-шаром домішки у бар'єрі. Тунельно- зв'язана пара «структурна КЯ+домішкова дельта-яма.
14. Перерозподіл густини зарядів у тунельно зв'язаних ямах. Статистика електронів у зв'язаних КЯ.
15. Домішкова зона в дельта-легованих квантових ямах та її вплив на загальну латеральну провідність.

16. Гарячі носії при латеральному транспорті у квантових ямах. Електронна температура
17. Експериментальне визначення електронної температури . Розсіяння на фононах. Накопичення «гарячих» фононів.
18. Просторовий перерозподіл гарячих електронів у випадку пар квантових ям, одна з яких дельта-легована квантова яма, домішкова потенціальна яма або фрагмент короткоперіодної надгратки.
19. Фотопровідність селективно легованих гетероструктур з квантовими ямами у слабких та гріючих електричних полях.
20. Механізми затриманої фотопровідності у гетероструктурах з квантовими ямами
21. Оптичні методи дослідження розподілу електричного поля при латеральному дрейфі в квантових ямах.
22. Теорія квантових поправок до провідності. Характерні довжини і часи.
23. Слабка локалізація електрон-електронна інтерференція . Антілокалізація. Електрон-електронна взаємодія.
24. Осциляції Шубнікова-де Гааза. Квантовий ефект Холла. Ефекти Дрессельхауза та Рашби
25. Стрибова провідність у двовимірних системах (квантових ямах) Домішкова зона, зони Хаббарда. Закон Мотта. Закон Шкловського-Ефроса
26. . Стрибова провідність в сильному електричному полі. Ексітонний перехід Мотта
27. Магнітоопір двовимірних систем в слабкому і сильному полі. Лінійний магнітоопір. Поздовжній магнітоопір. Ефект Кондо. Спін-поляризаційні ефекти.
28. Стрибовий магнітоопір в квантових ямах.

## 10.Рекомендована література

з навчальної дисципліни ВК.08 «Явища переносу в напівпровідникових гетероструктурах»

### Основна:

1. Андо Т., Фаулер А., Стерн Ф. Электронные свойства двумерных систем
2. М.Херман. Полупроводниковые сверхрешетки. М. Мир. 1989.
3. А.Я.Шик., Л.Г.Бакуева, С.Ф.Мусихин, С.А.Рыков. Физика низкоразмерных систем. С.Перебург, Наука, 2001.
4. О. В. Третьак, В. З. Лозовський.. В. Фізика низьковимірних систем : навч. посіб. К. : Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2013.
5. М.Шур. Физика полупроводниковых приборов. М.Мир. 1992
6. О.М. Царенко. Основы физики напівпровідників і напівпровідникових приладів
7. М.Е.Левинштейн, Ю.К.Пожела, М.С.Шур. Эффект Ганна. Сов.Радио, 1975.
8. Р.Смит. Полупроводники.
9. Ю П., Кардона М. Основы физики полупроводников
10. К. Зеегер. Физика полупроводников.
11. В. Л. Бонч-Бруевич, С. Г. Калашников. Физика полупроводников
12. А.И.Ансельм Введение в теорию полупроводников
13. Ч.Киттель. Введение в физику твердого тела
14. Воробьев І.Е. Механизмы рассеяния носителей заряда в полупроводниках:
15. Л. Е. Воробьев, С.Н.Данилов, Е.Л.Ивченко, М.Е.Левинштейн, Д.А.Фирсов, В.А.Шалыгин. Кинетические и оптические явления в сильных электрических полях в полупроводниках и наноструктурах.
16. Л. Е. Воробьев, Е.Л.Ивченко, Д.А.Фирсов, В.А.Шалыгин. Оптические свойства наноструктур. С. Петербург. 2001.
17. Гантмахер В. Ф. Электроны в неупорядоченных средах.
18. Шкловский Б. И., Эфрос А. Л. Электронные свойства легированных полупроводников.
19. П. К. Кашкаров В. Ю. Тимошенко. Оптика твердого тела и систем пониженной размерности. М.: Физический факультет МГУ, 2009
20. Т. А. Полянская, Ю. В. Шмарцев. Квантовые поправки к проводимости в полупроводниках с двумерным и трехмерным электронным газом. ФТП (1989) Т.23, №1.С. 3-32.

21. А.Я.Шик, Ю.В.Шмарцев. Квантовый эффект Холла. М.Мир.1986.

**Додаткова:**

1. Aleshkin, A.A. Andronov, A.V. Antonov et al. Toward far and mid IR intraband lasers based on hot carrier intervalley/real space transfer in multiple quantum well systems. Proceedings of SPIE (2001) Vol. 4318. P. 192-203.
2. Z. S. Gribnikov, K. Hess, G. A. Kozinovsky. Nonlocal and nonlinear transport in semiconductors: Real-space transfer effects J. Appl. Phys. (1995) Vol. 77, №4. – P. 1337-1373.
3. W. Ted Masselink. Ionized-Impurity Scattering of Quasi-Two-Dimensional Quantum-Confined Carriers. Phys.Rev.Lett.(1991) Vol.66,№11.P.1513-1516.
4. H. Sakaki, T. Noda, K. Hirakawa et al. Interface roughness scattering in GaAs/AlAs quantum wells Appl.Phys.Lett. (1987) Vol.51.P. 1934-1936.
5. Н. В. Агринская, Ю. Л. Иванов, В. М. Устинов, Д. А. Полоскин. Проявление верхней зоны Хаббарда в проводимости двумерных структур p-GaAs/AlGaAs. ФТП (2001) Т.35, №5. С. 571-574
6. Ridley B.K. Electron scattering by confined LO polar phonons in a quantum well Phys. Rev. B (1989) Vol. 39, №8. P. 5282-5286.
7. B. Laikhtman, R. A. Kiehl. Theoretical hole mobility in a narrow Si/SiGe quantum well. Phys. Rev. B (1993) Vol. 47, №16. P. 10515-10527
8. M. Li, J. J. Wu, X. X. Han et al. A model for scattering due to interface roughness in finite quantum wells. Semicond. Sci. Technol. (2005) Vol.20, №12 P.1207–1212.
9. R. Gupta, N. Balkan, B.K. Ridley. Hot-electron transport in GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As quantum-well structures. Phys.Rev.B (1992) Vol.46, №12. P. 7745-7754.
10. V.Ya. Aleshkin, A.A. Andronov, A.V. Antonov et al. Hot electron intervalley transfer in GaAs-AlAs MQWs: population inversion and possibility of intraband lasing Physica B (1999) Vol.272, №1-4. P.139-142.
11. A. Babinski, G. Li, C. Jagadish The persistent photoconductivity effect in modulation Si delta-doped pseudomorphic In<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As/GaAs quantum well structure. Appl. Phys. Lett. (1997) Vol.71, №12. P.1664-1666
12. D.R. Hang, Y.F. Chen, F.F. Fang, W.I. Wang. Positive and negative persistent photoconductivity in a two-side-doped In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/In<sub>0.52</sub>Al<sub>0.48</sub>As quantum well Phys.Rev.B (1999) Vol.60, №19. P.13318-13321.
13. B. Laikhtman, R. A. Kiehl, D. J. Frank Strained quantum well valence-band structure and optical parameters for AlGaAs-InGaAs-AlGaAs p-channel field-effect transistors. J.Appl.Phys. (1991) Vol.70, №3. P.1531-1538
14. M. S. Kagan, I. V. Altuchov, K. A. Korolev et al. Shallow acceptor states in SiGe quantum wells Phys. Status Solidi (b) (1998) Vol.210, №2. P.667-670.
15. Qiu-yi Ye, B. I .Shklovski, A. Zrenner et al. Hopping transport in  $\delta$ -doping layers in GaAs Phys.Rev.B (1990) Vol.41, №12. P.8477-8484.
16. S. I. Khondaker, I. S. Shlimak, J. T. Nicholls et al. Two-dimensional hopping conductivity in a  $\delta$ -doped GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As heterostructures. Phys.Rev.B (1999) Vol. 59, №7. P.4580-4583.
17. А. В. Антонов, В. Я. Алешкин, В. И. Гавриленко и др. Отрицательная фотопроводимость в среднем ИК-диапазоне селективно легированных гетероструктур SiGe/Si :В с двумерным дырочным газом. ФТТ (2005) Т. 47, №1. С.47-49.
18. L. C. Tsai, C. F. Huang, J. C. Fan et al. Persistent photoconductivity in SiGe/Si quantum well. J.Appl.Phys. (1998) Vol. 84, №2. P.877–880.
19. J. R. Sletter, G. J. Maclay. Carbon nanotubes and sensors: a review. Advanced Micro and Nanosystems. Ed. H.Baltes, O.Brand, G.K.Fedder et al. (2004) Vol.1.10 P. 357–382