

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

Фізичний факультет
(назва факультету)

Кафедра загальної фізики

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Заступник декана
з навчальної роботи
Момот О.В.
« ____ » _____ 2019 року

РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ¹

Фізика напівпровідникових наноструктур

(повна назва навчальної дисципліни)

для студентів

галузь знань 10 Природничі науки
(шифр і назва)

спеціальність 104 Фізика та астрономія
(шифр і назва спеціальності)

освітній рівень магістр
(молодший бакалавр, бакалавр, магістр)

освітня програма Фізика наноструктур в металах та кераміках
(назва освітньої програми)

спеціалізація Фізика наноструктур в металах та кераміках
(за наявності)
(назва спеціалізації)

вид дисципліни обов'язкова

Форма навчання	<u>очна</u>
Навчальний рік	<u>2019/2020</u>
Семестр	<u>3</u>
Мова викладання, навчання та оцінювання	<u>українська</u>
Форма заключного контролю	<u>залік</u>

Викладачі: професор Коротченков Олег Олександрович

(Науково-педагогічні працівники, які забезпечують викладання даної дисципліни у відповідному навчальному році)

Пролонговано: на 20__/20__ н.р. _____ (_____) «__» __ 20__ р.
(підпис, ПІБ, дата)

на 20__/20__ н.р. _____ (_____) «__» __ 20__ р.
(підпис, ПІБ, дата)

на 20__/20__ н.р. _____ (_____) «__» __ 20__ р.
(підпис, ПІБ, дата)

КИЇВ – 2019

¹ Робоча програма навчальної дисципліни є нормативним документом вищого навчального закладу і містить виклад конкретного змісту навчальної дисципліни, послідовність, організаційні форми її вивчення та їх обсяг, визначає форми та засоби поточного і підсумкового контролю.

Розробник²: Коротченков Олег Олександрович, доктор фіз.-мат. наук, професор,
професор кафедри загальної фізики
(вказати авторів: ПІБ, науковий ступінь, вчене звання, посада, кафедра)

ЗАТВЕРДЖЕНО

Зав. кафедри _____

(підпис)

(Боровий М.О.)
(прізвище та ініціали)

Протокол № 10 від 7 травня 2019 р.

Схвалено науково-методичною комісією фізичного факультету

протокол №21 від 10 травня 2019 року

Голова науково-методичної комісії _____
(підпис)

(Оліх О.Я.)
(прізвище та ініціали)

« _____ » _____ 2019 року

² Розробляється лектором. Робоча програма навчальної дисципліни розглядається на засіданні кафедри (циклової комісії – для коледжів), науково-методичної комісії факультету/інституту (радї навчального закладу - коледжу), підписується завідувачем кафедри (головою циклової комісії), головою науково-методичної комісії факультету/інституту (головою ради) і затверджується заступником декана/директора інституту з навчальної роботи (заступником директора коледжу).

ВСТУП

1. Мета дисципліни – отримання глибоких та систематизованих знань з фізики низькорозмірних напівпровідникових систем, що включає засвоєння основних явищ та фізичних закономірностей у даному класі наноструктур, оволодіння методами і принципами як теоретичного розв'язку фізичних проблем, так і планування та виконання фізичного експерименту в галузі фізики напівпровідникових наноструктур.

2. Попередні вимоги до опанування або вибору навчальної дисципліни:

1. Знати

основні питання фізики низькорозмірних напівпровідників, зокрема: загальні положення фізики напівпровідникових наносистем; основні сучасні уявлення напівпровідникових нанотехнологій, застосування низькорозмірних напівпровідникових систем у практичних пристроях;

2. Вміти

застосовувати на практиці методи квантової механіки та фізики твердого тіла для опису властивостей низькорозмірних напівпровідників; логічно і послідовно формулювати основні закономірності визначення енергетичних станів у низькорозмірних напівпровідниках; самостійно працювати з науковою літературою в галузі фізики напівпровідникових наносистем;

3. Володіти

основними навичками розв'язку типових задач квантової механіки та фізики твердого тіла, методами розрахунку енергетичного спектру носіїв заряду у нано-розмірному середовищі та розрахунків з використанням кінетичного рівняння Больцмана в наближенні часу релаксації;

3. Анотація навчальної дисципліни / референс:

В рамках курсу «**Фізика напівпровідникових наноструктур**» розглядаються як класичні, так і сучасні досягнення в області опису фізичних закономірностей та практичного використання напівпровідникових нанорозмірних систем.

Метою вивчення дисципліни є засвоєння загальних положень фізики напівпровідникових наносистем, зокрема, явища екранування носіїв заряду, приповерхневого квантування, основи ємнісної спектроскопії, процесів саморегулювання при одержанні низькорозмірних напівпровідникових структур.

Навчальна задача курсу полягає в оволодінні основними методами одержання та дослідження напівпровідникових наносистем, включаючи квантові ями, драти, точки, надгратки.

Результати навчання полягають в умінні застосовувати знання із основ функціонування та застосування низькорозмірних напівпровідникових систем. Методи викладання: лекції, консультації, лабораторні роботи.

Методи оцінювання: опитування в процесі лекції, контрольні роботи після основних розділів спецкурсу, оцінювання лабораторних робіт, залік. Підсумкова оцінка виставляється на основі проміжних оцінок (60%) та заліку (40%).

4. Завдання (навчальні цілі) – ознайомлення студентів з фізичними основами функціонування низькорозмірних напівпровідникових систем та основами напівпровідникових нанотехнологій.

Згідно вимог проекту Стандарту вищої освіти України (другий (магістерський) рівень вищої освіти, галузь знань 10 «Фізика», спеціальність 104 «Фізика та астрономія», ОНП «Фізика наноструктур в металах та кераміках») дисципліна забезпечує набуття здобувачами освіти наступних **компетентностей**:

Інтегральних:

Здатність розв'язувати складні спеціалізовані задачі та комплексні проблеми у процесі навчання із застосуванням сучасних теорій та процесів дослідження наноструктур із використанням комплексу методів.

Загальних:

- Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу (ЗК1).
- Здатність до проведення самостійних досліджень на сучасному рівні (ЗК3).
- Здатність до пошуку, оброблення на аналізі інформації з різних джерел (ЗК4).
- Здатність працювати в міжнародному науковому просторі (ЗК5).
- Здатність використовувати професійно-профільовані знання в галузі фізики (ЗК6).

Фахових:

- Володіння принципами структурної й функціональної побудови наноструктур (ФК1).
- Володіння методами створення наноструктур (ФК2).
- Здатність застосовувати знання теорій опису фізичних властивостей наноструктур (ФК4).
- Здатність застосовувати знання основ напівпровідникової наноелектроніки (ФК5).
- Здатність застосовувати знання оптичних та фотоелектричних явищ в наноструктурах. (ФК6).
- Здатність застосовувати знання в галузі методів вимірювання фізичних властивостей наноструктур (ФК12).

5. Результати навчання за дисципліною: (описуються з детальною достовірністю для розробки заходів оцінювання)

Результат навчання (1. знати; 2. вміти; 3. комунікація*; 4. автономність та відповідальність*)		Методи викладання і навчання	Методи оцінювання	Відсоток у підсумковій оцінці з дисципліни
Код	Результат навчання			
1.1	Знання основ фізики нерівноважних відкритих систем (ПРН 1.6).	лекції	Модульна контрольна робота	20
1.2	Знання електронних процесів в наноструктурах (ПРН 1.7).	лекції	Модульна контрольна робота	30
2.1	Вміння встановлювати зв'язки між характеристиками конденсованих середовищ, їх будовою та фізичними процесами в них (ПРН 2.3).	лекції	Модульна контрольна робота	10

6. Співвідношення результатів навчання дисципліни із програмними результатами навчання (необов'язково для вибіркових дисциплін)

Результати навчання дисципліни	1.1	1.2	2.1
Програмні результати навчання			
ПРН 1.6. Знати основи фізики нерівноважних відкритих систем.	+		+
ПРН 1.7. Знати електронні процеси в наноструктурах.		+	

7. Структура курсу

* заповнюється за необхідністю, наприклад для практик, лабораторних курсів тощо.

Курс складається з 2-х змістових модулів: «Фізичні основи функціонування низькорозмірних напівпровідникових систем», який включає в себе 7 лекцій та «Вступ до напівпровідникових нанотехнологій», який складається з 8 лекцій.

8. Схема формування оцінки:

8.1 Форми оцінювання студентів: (зазначається перелік видів робіт та форм їх контролю / оцінювання із зазначенням Min. – рубіжної та Max. кількості балів чи відсотків)

- семестрове оцінювання:

1. Модульна контрольна робота 1 (18 балів-30 балів).
2. Модульна контрольна робота 2 (18 балів-30 балів).

- підсумкове оцінювання у формі заліку

Підсумкове оцінювання у формі екзамену³: (обов'язкове проведення екзаменаційного оцінювання в письмовій формі)

	ЗМ1/Частина 1 (за наявності)	ЗМ2/Частина 2 (за наявності)	залік	Підсумкова оцінка
Мінімум	<u>18</u>	<u>18</u>	<u>24</u>	<u>60</u>
Максимум	<u>30</u>	<u>30</u>	<u>40</u>	<u>100</u>

у випадку комплексного екзамену слід вказати питому вагу складових

Студент не допускається до заліку, якщо під час семестру набрав менше 36 балів.⁴

(слід чітко прописати умови, які висуваються викладачами даної дисципліни).

Оцінка за залік не може бути меншою **24 балів** для отримання загальної позитивної оцінки за курс.

8.2 Організація оцінювання: (обов'язково зазначається порядок організації передбачених робочою навчальною програмою форм оцінювання із зазначенням, у тому числі, результатів навчання, опанування яких перевіряється конкретним оцінюванням).

Шкала відповідності

Відмінно / Excellent	90-100
Добре / Good	75-89
Задовільно / Satisfactory	60-74
Незадовільно з можливістю повторного складання / Fail	35-59
Незадовільно з обов'язковим повторним вивченням дисципліни / Fail	0-34
Зараховано / Passed	60-100
Не зараховано / Fail	0-59

³ Семестрову кількість балів формують бали, отримані студентом у процесі теоретичного засвоєння матеріалу з усіх розділів дисципліни, семінарських занять, виконання практичних, лабораторних, індивідуальних, підсумкових контрольних робіт, творчих робіт впродовж семестру, передбачених робочою навчальною програмою (**100 балів** - для залікових дисциплін, у випадку, якщо дисципліна завершується екзаменом, то розподіл здійснюється за таким алгоритмом: **60 балів (60%) – семестровий контроль і 40 балів (40%) – екзамен**).

⁴ У випадку, коли дисципліна завершується екзаменом не менше – **20 балів**, а рекомендований мінімум **не менше 36 балів**, оскільки якщо студент на екзамені набрав менше **24 балів** (а це 60% від 40 балів, відведених на екзамен), то вони **не додаються** до семестрової оцінки незалежно від кількості балів, отриманих під час семестру, а в екзаменаційній відомості у графі «результуюча оцінка» переноситься лише кількість балів, отриманих під час семестру.

СТРУКТУРА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ
ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН ЛЕКЦІЙ І ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТЬ

№ п/п	Назва теми	Кількість годин		
		лекції	лабораторні	Самостійна робота
Частина 1. Фізичні основи функціонування низькорозмірних напівпровідникових систем.				
1	<p>Тема 1. Вступ. Статистика носіїв заряду у власному та домішковому напівпровіднику. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції.</p> <p>Густина станів та функція розподілу електронів по квантових станах. Концентрація електронів у зоні провідності та дірок у валентній зоні для власного напівпровідника. Ефективна густина станів електронів та дірок в зонах. Невироджений електронний (дірковий) газ. Обчислення положення рівня Фермі у власному напівпровіднику та його зміна при зміні температури та параметрів напівпровідника. Рівень Фермі для напівпровідника з домішками одного типу.</p>	4		6
2	<p>Тема 2. Кінетика рекомбінації носіїв заряду. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції.</p> <p>Рівняння кінетики рекомбінації. Темпи генерації і рекомбінації. Часи життя нерівноважних носіїв. Дрейфовий і дифузний струми. Біполярна провідність. Дифузія, дрейф і рекомбінація у випадку просторово-неоднорідних нерівноважних розподілів носіїв заряду. Довжина дифузії і довжина дрейфу нерівноважних носіїв заряду.</p>	4		6
3	<p>Тема 3. Енергетичні діаграми $p-n$-переходу. Дифузійна та бар'єрна ємності. Ємнісна спектроскопія низькорозмірних напівпровідникових систем. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції.</p> <p>$p-n$-перехід та його енергетична діаграма. Ємність $p-n$-переходу. Приповерхнєве квантування. Інжекція неосновних носіїв заряду в $p-n$-переході. Фотоелектричні властивості $p-n$-переходів. Ємнісна спектроскопія квантових точок. Вольт-фарадні характеристики. Вимірювання стаціонарної та нестаціонарної ємності у темряві і при освітленні. Нестационарна ємнісна спектроскопія глибоких рівнів для дослідження наноструктур.</p>	4		6
4	<p>Тема 4. Розмірне квантування та квантово-розмірні структури. Методи отримання плівкових квантово-розмірних структур. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Підготовка до модульної контрольної роботи 1.</p> <p>Розмірне квантування та умови спостереження квантово-розмірного ефекту. Класифікація гетероструктур. Вимоги до технології отримання квантово-розмірних структур на основі гетеропереходів. Хімічні аналоги. Близькість сталих ґратки. Різкість гетеромежі. Основні методи отримання плівок. Хімічне осадження з газової фази. Парофазна епітаксія з металоорганічних сполук. Молекулярно-пучкова епітаксія. Електрохімічне осадження. Фізичні основи методів, заснованих на використанні скануючих зондів. Атомна інженерія. Зондові методи створення низькорозмірних структур.</p>	2		10
	Контрольна робота 1			2

Частина 2. Вступ до напівпровідникових нанотехнологій.

5	<p>Тема 5. Методи зниження розмірності плівкових квантово-розмірних структур. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції.</p> <p>Нанолітографія. Електронно-променева літографія. Зондова нанолітографія. Нанодрук. Порівняння нанолітографічних методів. Спеціальні методи зниження розмірності. Вирощування наноструктур на мікроскопічно упорядкованих фасетированих поверхнях.</p>	2		6
6	<p>Тема 6. Властивості гетеропереходів. Основні типи низькорозмірних напівпровідникових структур. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції.</p> <p>Ізольований гетероперехід. Граничні умови на гетеропереході. Побудова зонної діаграми поблизу гетеропереходу. Розрахунок вигину зон поблизу гетеропереходу. Структури з двовимірним електронним газом. Структури з квантовим обмеженням, створюваним зовнішнім електричним полем. Структури метал/діелектрик/ напівпровідник. Структури з розщепленим затвором. Структури з квантовим обмеженням, створюваним внутрішнім електричним полем. Надгратки. Композиційні та леговані надгратки. Квантові ями. Модуляційно-леговані структури. Дельта-леговані структури. Структури з одновимірним електронним газом. Структури з нуль-мірним електронним газом. Спінові ефекти у низькорозмірних напівпровідникових системах.</p>	6		6
7	<p>Тема 7. Густина станів. Ефективна густина станів. Концентрація носіїв заряду у напівпровідникових наносистемах. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції.</p> <p>Густина станів в об'ємних напівпровідниках (випадок 3D системи). Густина станів в низькорозмірному випадку (2D, 1D, 0D наносистеми). Поняття ефективної густини станів. Обчислення ефективної густини станів у випадку 3D системи та в низькорозмірному випадку (2D, 1D, 0D наносистеми). Обчислення концентрації вільних носіїв заряду у випадку 3D системи та в низькорозмірному випадку (2D, 1D, 0D наносистеми).</p>	4		6
8	<p>Тема 8. Процеси саморегулювання при одержанні низькорозмірних напівпровідникових структур. Основні методи дослідження низькорозмірних напівпровідникових структур. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції.</p> <p>Самоорганізація в об'ємних матеріалах. Отримання колоїдних розчинів напівпровідників. Самоорганізація квантових точок і ниток при епітаксії. Режими зростання гетероепітаксійних структур Франка-ван дер Мерві, Фольмера-Вебера, Странського-Крастанова. Типи наноструктур, одержаних з використанням ефектів самоорганізації. Вирощування тривимірних масивів</p>	4		10

	когерентно-напружених острівців в гетероепітаксійних розупорядкованих системах. Вирощування поверхневих структур плоских пружних доменів. Вирощування наноструктур з періодичною модуляцією складу в епітаксійних плівках твердих розчинів напівпровідників. Поняття про молекулярні наноструктури. Органічні напівпровідникові молекули. Супермолекули. Біомолекули. Поняття про основні методи дослідження низькорозмірних напівпровідникових структур: дифракція повільних електронів, просвічуюча електронна мікроскопія, автоелектронна й автоіонна мікроскопія, зондова мікроскопія, дифракційний аналіз, EXAFS-спектроскопія, оптичний спектральний аналіз, використання кінетичних електричних та теплових явищ для дослідження низькорозмірних напівпровідникових структур.			
	Підсумкова модульна контрольна робота			2
	ВСЬОГО	30		60

Примітка: слід зазначити теми, винесені на самостійне вивчення

Загальний обсяг 90 год.⁵, в тому числі:

Лекцій – 30 год.

Семінари – 0 год.

Практичні заняття – 0 год.

Лабораторні заняття – 0 год.

Тренінги – 0 год.

Консультації - ___ год.

Самостійна робота - 60 год.

Питання для самостійної роботи

1 модуль

1. Кінетичні ефекти в двовимірних системах: час релаксації та рухливість, вертикальний перенос в системі квантових ям.
2. Структури метал-діелектрик-напівпровідник (МДН-структури) та їх застосування в польових транзисторах.
3. Релаксація концентрації нерівноважних носіїв заряду в напівпровіднику в просторово однорідному випадку.
4. Амбіполярний дрейф і амбіполярна дифузія. Амбіполярная рухливість. Коефіцієнт амбіполярної дифузії.
5. Кінетичні явища в сильних магнітних полях. Дробний квантовий ефект Холла.
6. Домішкові стани в напівпровідникових системах зниженої розмірності.
7. Кулонівські зв'язані стани та інтерфейсні дефекти в гетеро структурах.
8. Технологія вирощування Si/Ge гетероструктур.

2 модуль

1. Квантовий транспорт: ідеї локалізації, термоактивована провідність в режимі локалізації, теорія Таулесса.
2. Формула Ландауера. T- та S-матриці. Формалізм Ландауера-Буттікера.
3. Мезоскопічні структури та квантовий хаос.
4. Виміри магнітних полів методами квантової магнітометрії.
5. Біомедичні наноструктури: мікро/нанодвигуни та їх біомедичне застосування, новітні наноструктури як молекулярні нанодвигуни, наноструктури для транспорту ліків.

⁵ Загальна кількість годин, відведених на дану дисципліну згідно навчального плану.

6. Епітаксія монокристалічних плівок. Гомо- і гетероепітаксія. Основи теорії зародкоутворення і зростання епітаксійних плівок при їх вирощуванні з газоподібних фаз.
7. Термодинамічний і молекулярно-кінетичний підхід до опису гетероепітаксії.
8. Методи рідинної епітаксії. Епітаксія з газоподібної фази: метод хімічних реакцій, газотранспортна епітаксія. Конденсація з парової фази.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА⁶:

Основна: (Базова)

1. В. Л. Бонч-Бруевич, С.И. Калашников. Физика полупроводников. М.: Наука, 1990.
2. М. Кардона, Питер Ю. Основы физики полупроводников. М.: Физматлит, 2002.
3. Шпак А.П., Куницький Ю.А., Коротченко О.О., Смик С.Ю. Квантові низькорозмірні системи. Київ, 2003, 312 с.
4. Коротченко О.О. Вступ до фізики низькорозмірних напівпровідникових систем. Властивості гетеропереходів, Київ: Бавок, 2011, 48 с.
5. Воробьев Л.Е., Голуб Л.Е., Данилов С.Н., Ивченко Л.Е., Фирсов Д.А., Шалыгин В.А. Оптические явления в полупроводниковых квантово-размерных структурах. СПб. 2000, 156 с.
6. Гридчин В.А., Драгунов В.П., Неизвестный И.Г. Основы нанoeлектроники: Учебное пособие. М.: Физматкнига. 2006, 496 с.
7. Davies J.H. The physics of low-dimensional semiconductors. Cambridge Univ. Press, 1998, 438 p.
8. Шик А.Я., Бакуева Л.Г., Мусихин С.Ф., Рыков С.А. Физика низкоразмерных систем. СПб.: Наука. 2001, 160 с.
9. Борисенко В.Е., Воробьева А.И., Уткина Е.А. Нанoeлектроника: Учебное пособие, в 3-х частях. Минск: БГУИР. 2004, 205 с.
10. http://bookwu.net/book_nanoelektronika

Додаткова:

1. Datta S. Electronic transport in mesoscopic physics. Cambridge Univ. Press, 1995, 377 p.
2. Bastard G. Wave Mechanics Applied to Semiconductor Heterostructures. Les Editions de Physique, 1991, 358 p.
3. Bimberg D., Grundmann M., Ledentsov N.N. Quantum dot heterostructures. Wiley, 1999, 328 p.
4. Строшио М., Дутта М. Фононы в наноструктурах. М.: Физматлит. 2006, 320 с.
5. Александров Е.Б., Вершовский А.К. Современные радиооптические методы квантовой магнитометрии. Успехи физических наук. 2009, Т. 179, С. 605-637.
6. Gonsalves K.E., Halberstadt C.R., Laurencin C.T., Nair L.S. Biomedical nanostructures. Wiley, 2008, 516 p.
7. Дмитриев А.С. Введение в нанотеплофизику. М.: БИНОМ, 2015. – 792 с.
8. <http://vlp.com.ua/node/2785>
9. http://me.kpi.ua/downloads/Poplavko_Nanophysics_2012.pdf
10. http://karazinbook.univer.kharkov.ua/sites/default/files/fragments/azarenkov_-_kopiya.pdf

⁶ В тому числі Інтернет ресурси