

**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 напівпровідників та низькорозмірних напівпровідникових структур
(повна назва навчальної дисципліни)

для студентів

галузь знань	<u>10 Природничі науки</u> (шифр і назва)
спеціальність	<u>104 Фізика та астрономія</u> (шифр і назва спеціальності)
освітній рівень	<u>бакалавр</u> (молодший бакалавр, бакалавр, магістр)
освітня програма	<u>Фізика</u> (назва освітньої програми)
спеціалізація (за наявності)	<u>Фізика наноструктур в металах та кераміках</u> (назва спеціалізації)
вид дисципліни	<u>обов'язкова</u>

Форма навчання	<u>очна</u>
Навчальний рік	<u>2019/2020</u>
Семестр	<u>8</u>
Мова викладання, навчання та оцінювання	<u>українська</u>
Форма заключного контролю	<u>іспит</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: Коротченко Олег Александрович, 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 (раді 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 напівпровідників, що включає засвоєння основних явищ та фізичних закономірностей у даному класі твердих тіл, оволодіння методами і принципами як теоретичного розв'язку фізичних проблем, так і планування та виконання фізичного експерименту в галузі фізики напівпровідників.

2. Попередні вимоги до опанування або вибору навчальної дисципліни:

1. Знати

основні питання фізики низькорозмірних напівпровідників, зокрема: математичне формулювання та фізичний зміст основних понять фізики напівпровідників, її сучасний стан, застосування напівпровідників у приладах і пристроях;

2. Вміти

застосовувати на практиці методи квантової механіки та фізики твердого тіла для опису властивостей низькорозмірних напівпровідників; логічно і послідовно формулювати основні закономірності статистики електронів та дірок в напівпровідниках, протікання кінетичних явищ, властивостей поверхні; самостійно працювати з науковою літературою в галузі фізики напівпровідників;

3. Володіти

основними навичками розв'язку типових задач квантової механіки та фізики твердого тіла, методами розрахунку параметрів рівноважної та не рівноважної статистики носіїв заряду у напівпровідниках та розрахунків з використанням кінетичного рівняння Больцмана в наближенні часу релаксації.

3. Анотація навчальної дисципліни / референс:

В рамках курсу «Фізика напівпровідників» розглядаються як класичні, так і сучасні досягнення в області опису фізичних закономірностей та практичного використання напівпровідників.

Метою вивчення дисципліни є надання базових знань із фізики напівпровідників, що включає засвоєння основних явищ та фізичних закономірностей у даному класі твердих тіл, оволодіння методами і принципами як теоретичного розв'язку проблем цих матеріалів, так і планування та виконання фізичного експерименту в галузі фізики напівпровідників.

Навчальна задача курсу полягає в оволодінні методами і принципами опису основних властивостей напівпровідників – рівноважної статистики електронів та дірок в напівпровідниках, кінетичних явищ, нерівноважних електронів та дірок, поверхні напівпровідників.

Результати навчання полягають в умінні логічно і послідовно формулювати основні закономірності протікання фізичних процесів у напівпровідниках; розв'язувати основні типи задач; планувати та виконувати вимірювання фізичних параметрів напівпровідників; оцінювати точність проведеного експерименту; самостійно працювати з науковою літературою в галузі фізики напівпровідників. Методи викладання: лекції, консультації, лабораторні роботи.

Методи оцінювання: опитування в процесі лекції, контрольні роботи після основних розділів спецкурсу, оцінювання розв'язку семінарських завдань, перевірка рефератів та інших форм самостійної роботи студентів, іспит. Підсумкова оцінка виставляється на основі проміжних оцінок (60%) та іспиту (40%).

4. Завдання (навчальні цілі) – ознайомлення студентів з фізичними властивостями основних типів напівпровідників, засвоєння ними основних положень теорії напівпровідників, зокрема, статистики носіїв заряду та основних механізмів переносу заряду в них.

Згідно вимог освітньо-професійної програми «Фізика» за освітнім ступенем «бакалавр» спеціальності 104 «Фізика та астрономія» дисципліна забезпечує набуття здобувачами освіти наступних *компетенностей*:

Інтегральних:

Здатність розв'язувати складні спеціалізовані задачі та практичні проблеми з фізики у професійній діяльності або у процесі подальшого навчання, що передбачає застосування певних теорій і методів фізики і характеризується складністю та невизначеністю умов.

Загальних:

- Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу **(ЗК1)**.
- Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях **(ЗК2)**.
- Здатність бути критичним і самокритичним **(ЗК4)**.
- Здатність приймати обґрунтовані рішення **(ЗК5)**.
- Здатність оцінювати та забезпечувати якість виконуваних робіт **(ЗК8)**.
- Здатність спілкуватися державною мовою як усно, так і письмово **(ЗК12)**.

Фахових:

- Знання і розуміння теоретичного та експериментального базису сучасної фізики **(ФК1)**.
- Здатність використовувати на практиці базові знання з математики як математичного апарату фізики при вивченні та дослідженні фізичних явищ і процесів **(ФК2)**.
- Здатність оцінювати порядок величин у різних дослідженнях, так само як точності та значимості результатів **(ФК3)**.
- Здатність працювати з джерелами навчальної та наукової інформації **(ФК9)**.
- Здатність самостійно навчатися і опановувати нові знання з фізики та суміжних галузей **(ФК10)**.
- Орієнтація на найвищі наукові стандарти – обізнаність щодо фундаментальних відкриттів та теорій, які суттєво вплинули на розвиток фізики та інших природничих наук **(ФК13)**.

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	Знати, розуміти та вміти застосовувати на базовому рівні основні положення загальної та теоретичної фізики, зокрема, квантової механіки та електромагнетизму, для встановлення, аналізу, тлумачення, пояснення й класифікації суті та механізмів різноманітних фізичних явищ і процесів (ПРН 1).	лекції	Модульна контрольна робота	10

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

1.2	Знати і розуміти експериментальні основи фізики: аналізувати, описувати, тлумачити та пояснювати основні експериментальні підтвердження існуючих фізичних теорій (ПРН 3).	лекції	Модульна контрольна робота	10
1.3	Знати основні актуальні проблеми сучасної фізики (ПРН 5).	лекції	Модульна контрольна робота	5
2.1	Вміти застосовувати базові математичні знання, які використовуються у фізиці: з математичного аналізу, диференціальних рівнянь та методів математичної фізики (ПРН 4).	лекції	Модульна контрольна робота	10
2.2	Мати базові навички самостійного навчання: вміти відшукувати потрібну інформацію в друкованих та електронних джерелах, аналізувати, систематизувати, розуміти, тлумачити та використовувати її для вирішення наукових і прикладних завдань (ПРН 8).	лекції	Модульна контрольна робота	5
2.3	Вміти упорядковувати, тлумачити та узагальнювати одержані наукові та практичні результати, робити висновки (ПРН 11).	лекції	Модульна контрольна робота	10
2.4	Розуміти зв'язок фізики з іншими природничими та інженерними науками, з основними поняттями прикладної фізики та матеріалознавства (ПРН 13).	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	1.3	2.1	2.2	2.3	2.4
Програмні результати навчання							
ПРН 1. Знати, розуміти та вміти застосовувати на базовому рівні основні положення загальної та теоретичної фізики, зокрема, квантової механіки та електромагнетизму, для встановлення, аналізу, тлумачення, пояснення й класифікації суті та механізмів різноманітних фізичних явищ і процесів.	+	+	+	+			
ПРН 3. Знати і розуміти експериментальні основи фізики: аналізувати, описувати, тлумачити та пояснювати основні експериментальні підтвердження існуючих фізичних теорій.	+	+	+				
ПРН 5. Знати основні актуальні проблеми сучасної фізики.			+		+		+

7. Структура курсу

Курс складається з 2-х змістових модулів: «Рівноважна статистика електронів та дірок в напівпровідниках. Кінетичні явища», який включає в себе 11 лекцій та «Нерівноважні електрони й дірки. Властивості поверхні», який складається з 11 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 екзамену

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

	ЗМ1/Частина 1 (за наявності)	ЗМ2/Частина 2 (за наявності)	екзамен	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 екзамену, якщо під час семестру набрав менше 36 балів.⁴

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

Оцінка за іспит 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	семінари	Самостійна робота
Частина 1. Рівноважна статистика електронів та дірок в напівпровідниках. Кінетичні явища				
1	<p>Тема 1. Вступ. Статистика носіїв заряду у власному та домішковому напівпровіднику. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Предмет курсу. Класифікація твердих тіл за величиною питомого опору та заповненням енергетичних зон. Власна та домішкова провідність, її температурна залежність. Холлівська та дрейфова рухливість. Визначення знаку заряду носіїв. Основні властивості та приклади застосування напівпровідникових матеріалів. Вирощування й легування об'ємних напівпровідникових кристалів (метод Чохральського, метод зонної плавки). Основні відмінності напівпровідників, металів та діелектриків з точки зору зонної теорії. Тензор ефективних мас. Ізоенергетичні поверхні. Приклади зонних структур напівпровідників: зони провідності кремнію, германію, арсеніду галію. Прямоzonні й непрямоzonні напівпровідники. Застосування напівпровідників у приладах з переносом заряду. Статистика носіїв заряду. 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>	10		14
2	<p>Тема 2. Кінетичні явища у напівпровідниках. Електропровідність напівпровідників та рухливість носіїв заряду. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Кінетичне рівняння Больцмана: електропровідність напівпровідників, рухливість носіїв заряду та її залежність від температури при різних механізмах розсіяння. Рівняння неперервності. Дифузійний та дрейфовий струми. Співвідношення Ейнштейна. Зв'язок густини струму з градієнтом квазірівня Фермі. Релаксація об'ємного заряду, максвеллівський час релаксації.</p>	6		12
3	<p>Тема 3. Кінетика рекомбінації носіїв заряду. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Рівняння кінетики рекомбінації. Темпи генерації і рекомбінації. Часи життя нерівноважних носіїв. Дрейфовий і дифузійний струми. Біполярна провідність. Дифузія, дрейф і рекомбінація у випадку просторово-неоднорідних нерівноважних розподілів носіїв заряду. Довжина дифузії і довжина дрейфу нерівноважних носіїв заряду. Підготовка до модульної контрольної роботи 1.</p>	6		11
	Контрольна робота 1			1
Частина 2. Нерівноважні електрони й дірки. Властивості поверхні				
4	<p>Тема 4. Нерівноважні електрони й дірки. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Виникнення нерівноважних носіїв заряду в напівпровідниках. Оптична генерація. Темпи генерації й рекомбінації; час життя. Співвідношення між часами релаксації енергії й імпульсу та часом життя.</p>	4		10

	Квазірівновага та квазірівні Фермі. Фотопровідність. Домішкова і власна фотопровідність. Стаціонарне час життя, часи релаксації і стаціонарна величина фотопровідності в умовах низького рівня збудження.			
5	Тема 5. Статистика рекомбінації електронів і дірок. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Міжзонної рекомбінація і рекомбінація через локальні рівні. Механізми рекомбінації. Випромінювальна рекомбінація. Рекомбінаційне випромінювання. Випромінювальна рекомбінація в прямозонних і непрямоzonних напівпровідниках. Випромінювальна рекомбінація через домішки. Екситонна рекомбінація. Безвипромінювальна рекомбінація. Оже-рекомбінація. Коефіцієнт міжзонної рекомбінації. Зв'язок коефіцієнта міжзонної рекомбінації і коефіцієнта теплової генерації. Час життя при міжзонній рекомбінації.	6		10
6	Тема 6. Рекомбінації електронів і дірок за участю дефектів. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Рекомбінація через домішки і дефекти. Коефіцієнт захоплення на локальні рівні. Центри прилипання і центри рекомбінації. Демаркаційні рівні. Часи життя в разі рекомбінації через один глибокий домішковий рівень. Статистика Шоклі-Ріда.	6		10
7	Тема 7. Властивості поверхні напівпровідників. Контакт метал-напівпровідник. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Поверхневі рівні і поверхневі зони. Рівні Тамма. Поверхневий вигин зон і ширина області об'ємного заряду. Збагачений, збіднілий і інверсійний шари на поверхні напівпровідника. Поверхнева провідність. Залежність поверхневої провідності від поверхневого потенціалу. Ефект поля. Застосування ефекту поля для визначення енергетичного спектру поверхневих рівнів. Поверхнева рекомбінація. Швидкість поверхневої рекомбінації. Вплив поверхневої рекомбінації на фотопровідність. Контакт метал-напівпровідник. Енергетична діаграма контакту метал-напівпровідник. Розподіл напруженості електричного поля, об'ємного заряду й потенціалу у збідненому та збагаченому шарах. Бар'єр Шоттки. Бар'єрна емність контакту метал-напівпровідник. Підготовка до підсумкової модульної контрольної роботи.	6		7
	<i>Підсумкова модульна контрольна робота</i>			1
	ВСЬОГО	44		76

Примітка: слід зазначити теми, винесені на самостійне вивчення

Загальний обсяг 120 год.⁵, в тому числі:

Лекцій – **44** год.

Семінари – **0** год.

Практичні заняття – **0** год.

Лабораторні заняття – **0** год.

Тренінги – **0** год.

Консультації - **___** год.

Самостійна робота - **76** год.

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

Питання для самостійної роботи

1 модуль

1. Багатодолинні напівпровідники. Статистика носіїв заряду для них.
2. Густина струму в неоднорідних напівпровідникових системах.
3. Релаксація концентрації нерівноважних носіїв заряду в напівпровіднику в просторово однорідному випадку.
4. Амбіполярний дрейф і амбіполярна дифузія. Амбіполярная рухливість. Коефіцієнт амбіполярной дифузії.
5. Рівняння кінетики рекомбінації нерівноважних носіїв заряду в просторово однорідних та неоднорідних системах.

2 модуль

1. Фононна рекомбінація. Механізм захоплення Лекса.
2. Повна система рівнянь для знаходження нерівноважних заселеностей станів. Нерівноважний стаціонарний стан.
3. Рекомбінація через багатозарядні домішки.
4. Швидкі і повільні стани на поверхні напівпровідника.
5. Структури метал-діелектрик-напівпровідник (МДН-структури) та їх застосування в польових транзисторах.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА⁶:

Основна: (Базова)

1. В. Л. Бонч-Бруевич, С.И. Калашников. Физика полупроводников. М.: Наука, 1990.
2. К. В. Шалимова. Физика полупроводников. М.: Энергия, 1971.
3. А. И. Ансельм. Введение в физику полупроводников. М.: Наука, 1985.
4. К. Зеегер. Физика полупроводников. М.: Мир, 1977.
5. М. Кардона, Питер Ю. Основы физики полупроводников. М.: Физматлит, 2002.
6. Р. Смит. Полупроводники. М. Наука, 1985.
7. В. П. Грибковский. Теория поглощения и испускания света в полупроводниках. Минск: Наука и техника, 1975.
8. Л. П. Павлов. Методы определения основных параметров полупроводниковых материалов. М.: Высшая школа, 1975.
9. http://phm.kspu.kr.ua/images/doc/navch_material/charenko/3.pdf
10. http://journal-spqeo.org.ua/users/pdf/n1_98/123_198.pdf
11. https://radfiz.org.ua/files/NOT%20SORTED/zemskoff_IVT_s6_20140125_yse/%F4%D2%C5%D4%D1%CB.%20%EC%CF%DA%CF%D7%D3%D8%CB%C9%CA.%20%EF%D3%CE%CF%D7%C9%20%C6%A6%DA%C9%CB%C9%20%CE%C1%D0%A6%D7%D0%D2%CF%D7%A6%C4%CE%C9%CB%A6%D7.pdf

Додаткова:

1. І. В. Острівський, О.О. Коротченко. Фізична акустооптика. К.: Вид. Центр Київський університет, 2000.
2. Н.А.Поклонский, С.А.Вырко, С.Л. Поденок. Статистическая физика полупроводников: Курс лекций. Н: УРСС, 2005.

⁶ В тому числі Інтернет ресурси