

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

Фізичний факультет
(назва факультету)

Кафедра загальної фізики



РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ¹

Фізика напівпровідникових матеріалів **06.1.31**
(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> (молодий бакалавр, бакалавр, магістр)
освітня програма	<u>Фізичне матеріалознавство/Неметалічне матеріалознавство</u> (назва освітньої програми)
Спеціалізація (за наявності)	_____
вид дисципліни	<u>обов'язкова</u>

Форма навчання	<u>очна</u>
Навчальний рік	_____
Семестр	<u>8</u>
Кількість кредитів ECTS	<u>5</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 – 2022

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 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 № 7 від 19 травня 2022 р.

Схвалено науково-методичною комісією фізичного факультету

протокол № 11 від 10 червня 2022 року

Голова науково-методичної комісії

(підпис)

(Оліх О.Я.)

(прізвище та ініціали)

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 напівпровідникових матеріалів, 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 напівпровідникових матеріалів.

2. Попередні вимоги до опанування або вибору навчальної дисципліни:

1. Знати

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

2. Вміти

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

3. Володіти

основними навичками розв'язку типових задач квантової механіки та фізики твердого тіла, методами розрахунків з використанням кінетичного рівняння Больцмана в наближенні часу релаксації.

3. Анотація навчальної дисципліни / референс:

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

Метою вивчення дисципліни є надання базових знань із фізики напівпровідникових матеріалів, 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 напівпровідникових матеріалів.

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

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 напівпровідникових матеріалів; оцінювати точність проведеного експерименту; самостійно працювати з науковою літературою в галузі фізики напівпровідникових матеріалів. 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 напівпровідникових матеріалів, засвоєння ними основних положень теорії напівпровідників, зокрема, статистики носіїв заряду та основних механізмів переносу заряду в них.

Згідно вимог Стандарту вищої освіти України (перший (бакалаврський) рівень вищої освіти, галузь знань 10 «Природничі науки», спеціальність 104 «Фізика та астрономія» дисципліна забезпечує набуття здобувачами освіти наступних **компетентностей**:

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 комплексністю та невизначеністю умов.

Загальних:

ЗК1. Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу.

ЗК3. Навички використання інформаційних і комунікаційних технологій.

ЗК5. Здатність приймати обґрунтовані рішення.

ЗК7. Навички здійснення безпечної діяльності.

Фахових:

ФК1. Знання і розуміння теоретичного та експериментального базису сучасної фізики та астрономії.

ФК2. Здатність використовувати на практиці базові знання з математики як математичного апарату фізики і астрономії при вивченні та дослідженні фізичних та астрономічних явищ і процесів.

ФК3. Здатність оцінювати порядок величин у різних дослідженнях, так само як точності та значимості результатів.

ФК4. Здатність працювати із науковим обладнанням та вимірювальними приладами, обробляти та аналізувати результати досліджень.

ФК7. Здатність використовувати базові знання з фізики та астрономії для розуміння будови та поведінки природних і штучних об'єктів, законів існування та еволюції Всесвіту.

ФК9. Здатність працювати з джерелами навчальної та наукової інформації.

ФК10. Здатність самостійно навчатися і опановувати нові знання з фізики, астрономії та суміжних галузей.

ФК13. Орієнтація на найвищі наукові стандарти – обізнаність щодо фундаментальних відкриттів та теорій, які суттєво вплинули на розвиток фізики, астрономії та інших природничих наук.

ФК15. Здатність аналізувати світові тенденції розвитку фізики для вибору власної освітньої траєкторії.

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
---	------------------------------	-------------------	------------------------

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

Код	Результат навчання			оцінці з дисципліни
1	Знати математичне формулювання та фізичний зміст основних законів фізики напівпровідникових матеріалів; основні методи розв'язку практичних задач різних типів; принцип дії та призначення основних типів фізичних вимірювальних приладів, застосованих для вивчення напівпровідникових матеріалів; основні сучасні досягнення фізики напівпровідникових матеріалів та їх застосування у різних галузях науки, виробництва та повсякденного життя.	лекції, лабораторні роботи, практичні, самостійна робота	Модульна контрольна робота, перевірка самостійної роботи, опитування в процесі лекції, іспит.	60
2	Вміти досліджувати фізичні властивості напівпровідникових матеріалів та основні закономірності кінетичних явищ в них.	лекції, лабораторні роботи, практичні, самостійна робота	модульна контрольна робота, опитування в процесі виконання лабораторних робіт та на практичних заняттях, контроль виконання самостійної роботи	40

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

Результати навчання дисципліни		1	2
Програмні результати навчання			
ПРН1. Знати, розуміти та вміти застосовувати основні положення загальної та теоретичної фізики, зокрема, класичної, релятивістської та квантової механіки, молекулярної фізики та термодинаміки, електромагнетизму, хвильової та квантової оптики, фізики атома та атомного ядра для встановлення, аналізу, тлумачення, пояснення й класифікації суті та механізмів різноманітних фізичних явищ і процесів для розв'язування складних спеціалізованих задач та практичних проблем з фізики.		+	+
ПРН3. Знати і розуміти експериментальні основи фізики: аналізувати, описувати, тлумачити та пояснювати основні експериментальні підтвердження існуючих фізичних теорій.		+	+
ПРН5. Знати основні актуальні проблеми сучасної фізики та астрономії.		+	
ПРН13. Розуміти зв'язок фізики та астрономії з іншими природничими та інженерними науками, бути обізнаним з окремими (відповідно до спеціалізації) основними поняттями прикладної фізики, матеріалознавства, інженерії, хімії, біології тощо, а також з окремими об'єктами (технологічними процесами) та природними явищами, що є предметом		+	+

дослідження інших наук і, водночас, можуть бути предметами фізичних або астрономічних досліджень.		
ПРН17. Знати і розуміти роль і місце фізики, астрономії та інших природничих наук у загальній системі знань про природу та суспільство, у розвитку техніки й технологій та у формуванні сучасного наукового світогляду.	+	
ПРН27. Мати базові навички експериментального дослідження функціональних матеріалів різноманітного призначення, вміння обирати оптимальні методи та засоби їхнього дослідження.	+	+

7. Структура курсу

Курс складається з 2-х змістових модулів: «Рівноважна статистика електронів та дірок в напівпровідниках. Кінетичні явища», який включає в себе 7 лекцій, 3 практичних та 3 лабораторних занять та «Нерівноважні електрони й дірки. Властивості поверхні», який складається з 7 лекцій, 4 практичних та 4 лабораторних занять.

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 (12 балів-20 балів). Захист лабораторних робіт(6 балів-10 балів).
2. Модульна контрольна робота 2 (12 балів-20 балів). Захист лабораторних робіт(6 балів-10 балів).

- підсумкове оцінювання у формі екзамену

Підсумкове оцінювання у формі екзамену¹: (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.²

(слід чітко прописати умови, які висувуються 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

¹ 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**).

² 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.

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

СТРУКТУРА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН ЛЕКЦІЙ, ПРАКТИЧНИХ І ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТЬ

№ п/п	Назва теми	Кількість годин			
		лекції	лабораторні	практичні	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.</p> <p>Загальні властивості напівпровідників та методи їх вирошування. Застосування напівпровідників у приладах з переносом заряду. Напівпровідникові логічні елементи. Електронна зонна структура напівпровідників. Особливості структури енергетичних зон типових напівпровідників (Ge, Si, GaAs).</p> <p>Густина станів у напівпровідниках. Концентрація носіїв заряду у власному напівпровіднику. Рівень Фермі у власному напівпровіднику. Концентрація носіїв заряду у напівпровіднику з домішками. Положення рівня Фермі у напівпровіднику з домішками.</p> <p>Практичне заняття 1. Визначення концентрації носіїв заряду та положення рівня Фермі у власному напівпровіднику.</p> <p>Лабораторне заняття 1.</p> <p>Перевірка рівня підготовленості студентів до користування лабораторним електро-вимірювальним та спектральним оптичним обладнанням. Проведення тестових вимірювань електропровідності та спектру фотопровідності.</p> <p>Аналіз отриманих експериментальних результатів.</p> <p>с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Розв’язування семінарських задач, винесених на самостійний розгляд.</p>	6	2	2	20

2	<p>Тема 2. Кінетичні явища у напівпровідниках. Кінетичне рівняння Больцмана: загальний вираз, стаціонарний стан, час релаксації. Електропровідність напівпровідників.</p> <p>Практичне заняття 2. Визначення концентрації носіїв заряду та положення рівня Фермі у напівпровіднику з домішками.</p> <p>Лабораторне заняття 2. Перевірка рівня підготовленості студентів до виконання лабораторної роботи. Виконання лабораторної роботи №1 «Вимірювання питомого електроопору та визначення знаку носіїв заряду в напівпровідниках». Перевірка отриманих експериментальних результатів.</p> <p>с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Розв'язування семінарських задач, винесених на самостійний розгляд.</p>	4	4	2	20
3	<p>Тема 3. Генерація та рекомбінація носіїв заряду в напівпровідниках. Час релаксації енергії збуджених носіїв заряду. Квазірівні Фермі. Монополярна генерація носіїв заряду та час релаксації просторового заряду. Біполярна генерація. Релаксація носіїв заряду у напівпровідниках. Рухливість носіїв заряду.</p> <p>Практичне заняття 3. Визначення електропровідності напівпровідникових матеріалів із врахуванням основних механізмів обмеження рухливості носіїв заряду.</p> <p>Лабораторне заняття 3. Перевірка рівня підготовленості студентів до виконання лабораторної роботи. Виконання лабораторної роботи №2 «Визначення параметрів напівпровідників методом фотопровідності». Перевірка отриманих експериментальних результатів.</p> <p>с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Розв'язування семінарських задач, винесених на самостійний розгляд. Підготовка до модульної контрольної роботи 1.</p>	4	4	2	10
	Контрольна робота 1			1	
Частина 2. Нерівноважні електрони й дірки. Властивості поверхні					
4	<p>Тема 4. Дифузія та дрейф носіїв заряду в напівпровідниках. Дифузія і дрейф носіїв заряду у напівпровідниках: загальний вираз, рівняння неперервності, випадок монополярної та біполярної провідності, співвідношення Ейнштейна, радіус екранування Дебая, довжина дифузії неосновних носіїв заряду.</p> <p>Практичне заняття 4. Рівняння кінетики рекомбінації, темпи генерації і рекомбінації, часи життя нерівноважних носіїв заряду.</p> <p>с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Підготовка до виконання лабораторної роботи. Розв'язування семінарських задач, винесених на самостійний розгляд.</p>	4		2	15

5	<p>Тема 5. Контактні явища в напівпровідниках.</p> <p>Розподіл концентрації електронів і потенціалу у шарі об'ємного заряду. Контакт метал-напівпровідник. Енергетична діаграма контакту метал-напівпровідник. Розподіл напруженості електричного поля, об'ємного заряду й потенціалу у збіднілому та збагаченому шарах. Бар'єр Шоттки. Бар'єрна ємність контакту метал-напівпровідник. <i>p-n</i> перехід.</p> <p>Практичне заняття 5. Дрейфовий і дифузний струми. Дифузія, дрейф і рекомбінація у випадку просторово-неоднорідних нерівноважних розподілів носіїв заряду.</p> <p>Лабораторне заняття 4. Перевірка рівня підготовленості студентів до виконання лабораторної роботи. Виконання лабораторної роботи №4 «Порівнювальні дослідження спектрів фотолюмінесценції в напівпровідниках з дефектами структури». Перевірка отриманих експериментальних результатів.</p> <p>с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Розв'язування семінарських задач, винесених на самостійний розгляд.</p>	6	4	2	15
	<p>Тема 6. Властивості поверхні напівпровідників. Поверхневі рівні і рівні Тамма. Поверхневий вигин зон і ширина області об'ємного заряду. Збагачений, збіднілий і інверсійний шари на поверхні напівпровідника. Розрахунок поверхневого потенціалу. Поверхнева провідність. Залежність поверхневої провідності від поверхневого потенціалу. Ефект поля. Застосування ефекту поля для визначення енергетичного спектру поверхневих рівнів.</p> <p>Практичне заняття 6. Темпи генерації й рекомбінації; час життя. Квазірівні Фермі як показники збурення напівпровідника. Рівняння кінетики рекомбінації в просторово однорідних та неоднорідних випадках.</p> <p>Лабораторне заняття 5. Звіт за виконаними лабораторними роботами.</p> <p>с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Розв'язування семінарських задач, винесених на самостійний розгляд. Підготовка до підсумкової модульної контрольної роботи.</p>				
	Підсумкова модульна контрольна робота			1	
	ВСЬОГО	28	14	14	93

Примітка: слід зазначити теми, винесені на самостійне вивчення

Загальний обсяг 150 год.³, в тому числі:

Лекцій – 28 год.

Семінари – 0 год.

Практичні заняття – 14 год.

Лабораторні заняття – 14 год.

Тренінги – 0 год.

Консультації – 1 год.

Самостійна робота – 93 год.

³ Загальна кількість годин, відведених на дану дисципліну згідно навчального плану.

Теми, винесені на самостійне вивчення

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 заселенностей станів. Неравноважний 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 ЛІТЕРАТУРА:

Основна: (Базова)

1. Третяк О.В., Лозовський В.З. Основи фізики напівпровідників. К.: ВПЦ "Київський університет", 2007. – Т. 1. Доступ за адресою: [Третяк, Лозовський. Основи фізики напівпровідників \(kspu.edu\)](http://kspu.edu.ua)
2. Третяк О.В., Лозовський В.З. Основи фізики напівпровідників. К.: ВПЦ "Київський університет", 2007. – Т. 2. Доступ за адресою: [Tretyak_Lozovsky_2.pdf \(radfiz.org.ua\)](http://radfiz.org.ua)
3. Ільченко В. І., Обухова Т. Ю. Фізика напівпровідників: Конспект лекцій (Частина I)[Електронний ресурс]: К : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. Доступ за адресою: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/37599/1/Fizyka_napivprovidnykiv-1.pdf
4. Фреїк Д.М., Чобанюк В.М., Готра З.Ю., Дзундза Б.С., Матеїк Г.Д., Ткачук А.І. Фізика процесів у напівпровідниках та елементах електроніки: Курс лекцій. Івано-Франківськ : Вид-во Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, 2010. – 263 с. Доступ за адресою: <https://kfhft.pnu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/48/2019/09/book-1.pdf>
5. Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С.И. Физика полупроводников. М.: Наука, 1990. [Бібліотека фізичного факультету.](#)

Додаткова:

1. Царенко О.М. Основи фізики напівпровідників і напівпровідникових приладів: навчальний посібник . – Кіровоград: РВВ КДПУ ім. В. Винниченка, 2011. Доступ за адресою: https://phm.cuspu.edu.ua/images/doc/navch_material/charenko/3.pdf
2. Зеєгер К. Физика полупроводников. М.: Мир, 1977. [Бібліотека фізичного факультету.](#)