

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

Фізичний факультет
(назва факультету)

Кафедра загальної фізики



РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ¹

ДЕФЕКТИ В НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ТА ДІЕЛЕКТРИЧНИХ КРИСТАЛАХ

(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 бакалавр
(молодший бакалавр, бакалавр, магістр)
освітня програма Фізичне матеріалознавство / Неметалічне матеріалознавство
(назва освітньої програми)
спеціалізація
(за наявності) (назва спеціалізації)
вид дисципліни вибіркова БС 5.2.2

Форма навчання очна
Навчальний рік 2025/2026
Семестр 7
Мова викладання, навчання та оцінювання українська
Форма заключного контролю залік

Викладачі: доцент Оліх Олег Ярославович,

(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.

Розробники²:

Оліх Олег Ярославович, доктор фіз.-мат. наук, доцент,
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 систематичних знань, які стосуються можливих відхилень від періодичності кристалічних структур, а також наслідками до яких приводить їх поява.

2. Попередні вимоги до опанування або вибору навчальної дисципліни:

1. Знати закони термодинаміки, загальні умови термодинамічної рівноваги, правила опису кристалографічних напрямків та площин, механізми перенесення заряду, рівняння дифузії, методи опису зіткнення частинок, основи квантової механіки.
2. Вміти застосовувати попередні знання з курсів математичного аналізу, диференційних та інтегральних рівнянь, математичної фізики, теоретичної механіки для розв'язку рівнянь у частинних похідних, знаходження похідних складних функцій, запису гамільтоніана системи, знаходження екстремумів функцій.
3. Володіти елементарними навичками графічно зображувати кристалографічні напрямки та площини, знаходити похідні, оцінювати складові повної енергії системи.

3. Анотація навчальної дисципліни / референс:

В рамках курсу «Дефекти в напівпровідникових та діелектричних кристалах» розглядаються основні типи та характеристики точкових та лінійних дефектів, методи опису енергетичних рівнів у забороненій зоні кристалу, пов'язаних з порушеннями періодичності; процеси дифузії точкових дефектів, зокрема вплив на них зарядового стану; особливості дефектоутворення при радіаційному опроміненні з використанням різного типу падаючих частинок; елементи термодинаміки дефектів, зокрема оцінка рівноважної концентрації дефектів як у сполуках, так і кристалах, що складаються з атомів одного сорту. Увага приділяється особливостям метастабільних та бістабільних дефектів, центрів з від'ємною кореляційною енергією. Навчальна задача курсу також полягає у засвоєнні принципів роботи таких способів визначення параметрів дефектів як метод перехідної спектроскопії локальних рівнів, позитронно-анігіляційна спектроскопія, метод термостимульованих струмів, магніто-резонансні методи. Крім того передбачено, набуття навичок опису перебудови дислокаційної структури за допомогою тетраедра Томсона. Методи викладання: лекції, консультації. Методи оцінювання: опитування в процесі лекції, модульні контрольні роботи, іспит. Підсумкова оцінка виставляється на основі проміжних оцінок (80%) та заліку (20%).

4. Завдання (навчальні цілі) – засвоєння студентами методів опису та дослідження точкових дефектів в напівпровідниках та діелектриках, а також їх впливу на властивості кристалів та виробів з них. Дисципліна спрямована на досягнення таких компетентностей як, здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу (ЗК1), навички використання інформаційних і комунікаційних технологій (ЗК3), здатність приймати обґрунтовані рішення (ЗК5), знання і розуміння теоретичного та експериментального базису сучасної фізики та астрономії (ФК1), здатність працювати з джерелами навчальної та наукової інформації (ФК9), здатність самостійно навчатися і опановувати нові знання з фізики, астрономії та суміжних галузей (ФК10), здатність здобувати додаткові компетентності через вибіркові складові освітньої програми, самоосвіту, неформальну та інформальну освіту (ФК14), здатність аналізувати світові тенденції розвитку фізики для вибору власної освітньої траєкторії (ФК15).

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 основні типи точкових та лінійних дефектів	лекції	модульна контрольна робота, усне опитування, залік	10
1.2	знати методи опису рівнів у забороненій зоні, пов'язаних з дефектами	лекції	модульна контрольна робота, усне опитування, залік	10
1.3	знати механізми дифузії точкових дефектів	лекції	модульна контрольна робота, усне опитування, залік	5
1.4	знати особливості впливу радіаційного опромінення та термообробки на дефектну підсистему	лекції	модульна контрольна робота, усне опитування, залік	10
1.5	знати основні дефектні комплекси у кремнії та їх властивості	лекції	модульна контрольна робота, усне опитування, залік	5
1.6	знати механізми руху та розмноження дислокацій	лекції	модульна контрольна робота, усне опитування, залік	5
2.1	вміти обчислювати рівноважну концентрацію дефектів у однокомпонентних та багатокомпонентних кристалах	лекції	модульна контрольна робота, усне опитування, залік	10
2.2	вміти будувати та використовувати конфігураційну діаграму дефектів	лекції	модульна контрольна робота, усне опитування, залік	5
2.3	вміти записувати дислокаційні реакції, використовувати тетраedr Томпсона	лекції	модульна контрольна робота, усне опитування, залік	10
2.4	вміти записувати та розв'язувати рівняння, що описують кінетику перетворень в дефектній підсистемі	лекції	модульна контрольна робота, усне опитування, залік	5
2.5	вміти оцінити концентрацію та просторовий розподіл радіаційних дефектів залежно від типу опромінення	лекції	модульна контрольна робота, усне опитування, залік	10
4.1	формулювати ціннісні судження щодо доцільності застосування певних експериментальних методів дослідження дефектів для отримання інформації щодо необхідних характеристик	лекції	модульна контрольна робота, усне опитування, залік	10
4.2	знаходити інформацію про відомі властивості дефектів	лекції	усне опитування	5

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

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

Результати навчання дисципліни	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	4.1	4.2
Програмні результати навчання													
ПРН1. Знати, розуміти та вміти застосовувати на базовому рівні 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.	+			+		+		+	+			+	
ПРН4. Вміти застосовувати базові математичні знання, які використовуються у фізиці та астрономії: з аналітичної геометрії, лінійної алгебри, математичного аналізу, диференціальних та інтегральних рівнянь, теорії ймовірностей та математичної статистики, теорії груп, методів математичної фізики, теорії функцій комплексної змінної, математичного моделювання.		+	+	+				+		+			
ПРН8. Мати базові навички самостійного навчання: вміти відшуковувати потрібну інформацію в друкованих та електронних джерелах, аналізувати, систематизувати, розуміти, тлумачити та						+						+	+

використовувати її для вирішення наукових і прикладних завдань.													
ПРН16. Мати навички роботи із сучасною обчислювальною технікою, вміти використовувати стандартні пакети прикладних програм і програмувати на рівні, достатньому для реалізації чисельних методів розв'язування фізичних задач, комп'ютерного моделювання фізичних та астрономічних явищ і процесів, виконання обчислювальних експериментів.							+		+		+		
ПРН28. Розуміти міждисциплінарні шляхи розвитку науки та мати навички міждисциплінарних матеріалознавчих досліджень.	+			+		+						+	

7. Схема формування оцінки:

7.1 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. Опитування під час першого змістового модуля – 10 балів/ 6 балів
2. Модульна контрольна робота 1 – 30 балів/ 18 балів
3. Опитування під час другого змістового модуля – 10 балів/ 6 балів
4. Модульна контрольна робота 2 – 30 балів/ 18 балів

Модуль 1: оцінка за відповіді при усному опитуванні та за модульну контрольну роботу з теми «Основні властивості точкових дефектів та статистичні і квантово-механічні методи їх опису» – 40 балів (рубіжна оцінка 24 балів).

Модуль 2: оцінка за відповіді при усному опитуванні та за модульну контрольну роботу з теми «Методи дослідження та опису процесів перетворення дефектної підсистеми кристалів» – 40 балів (рубіжна оцінка 24 балів).

Для студентів, які упродовж семестру не досягли мінімального рубіжного рівня оцінки (60% від максимально можливої кількості балів) проводиться заключна семестрова контрольна робота, максимальна оцінка за яку не може перевищувати 40% підсумкової оцінки (до 40 балів за 100-бальною шкалою).

- підсумкове оцінювання у формі заліку, максимальна оцінка 20 балів (рубіжна оцінка 12 балів). Підсумкова кількість балів з дисципліни (максимум 100 балів), яка визначається як сума балів за систематичну роботу впродовж семестру та за результатами проведення іспиту. *Результатами навчання, які оцінюються під час іспиту, є РН 1.1. - 4.2.*

При простому розрахунку отримаємо:

	ЗМ1	ЗМ2	залік	Підсумкова оцінка
Мінімум	<u>24</u>	<u>24</u>	<u>12</u>	<u>60</u>
Максимум	<u>40</u>	<u>40</u>	<u>20</u>	<u>100</u>

Студент не допускається до заліку, якщо під час семестру набрав менше 48 балів. Для допуску до екзамену студент обов'язково має написати передбачені програмою контрольні роботи або написати заключну семестрову контрольну роботу. Оцінка за залік не може бути меншою 12 балів для отримання загальної позитивної оцінки за курс.

Умовою отримання позитивної результуючої оцінки з дисципліни є досягнення не менш як 60% від максимально можливої кількості балів.

7.2 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).

Рівень досягнення запланованих результатів навчання визначається за результатами написання та захисту письмових контрольних робіт, відповідей при усному опитуванні.

Питома вага результатів навчання у підсумковій оцінці за умови її опанування на належному рівні:

- результати навчання 1.1 – 1.6 (знання) – до 45% ;
- результати навчання 2.1 – 2.5 (вміння) – до 40% ;
- результати навчання 4.1 – 4.2. (автономність і відповідальність) – до 15% .

У курсі передбачено 2 змістові модулі. Після завершення відповідних частин проводяться модульні контрольні роботи. Передбачено також усне опитування під час лекцій.

7.3 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

СТРУКТУРА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН ЛЕКЦІЙ

№ п/п	Назва теми	Кількість годин		
		лекції	лабораторні	Самостійна робота
Частина 1. Основні властивості точкових дефектів та статистичні і квантово-механічні методи їх опису				
1	Тема 1. Вступ. Іонні, ковалентні, ван-дер-ваальсівські та металеві кристали. Поняття дефекту. Класифікації дефектів. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Структура в'юрциту. Вплив дефектів на властивості кристалів.	2		4
2	Тема 2. Типи точкових дефектів. Вакансія, розщеплена вакансія. Міжвузловий атом. Міжвузлові положення в ґратці алмазу. Дефект заміщення. Агломерати точкових дефектів. Симетрія дефекту. Дисторсія та релаксація ґратки. Ефект Яна-Теллера. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Визначення можливих міжвузольних положень в кристалах напівпровідникових сполук. Краудіон. Дефект зв'язку.	4		6

3	Тема 3. Рівноважна концентрація точкових дефектів (дефект Шоткі, пара Френкеля). Рівновага між різними зарядовими станами дефекту. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Визначення рівноважної концентрації міжвузольних атомів.	2		4
4	Тема 4. Концентрація дефектів в стехіометричних сполуках. Рівноважна концентрація комплексних дефектів. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Метод квазіхімічних реакцій.	2		4
5	Тема 5. Наближення парної взаємодії, потенціали Ленард-Джонса, Морзе та Борна-Майєра, Букінгема. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Потенціали трьохчастинкової взаємодії.	2		4
6	Тема 6. Причини впливу дефектів на носії заряду в кристалах. Мілкі стани в напівпровідниках, застосування теорії ефективної маси. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Застосування теорії ефективної маси до легуючих домішок в кремнії.	2		4
7	Тема 7. Опис глибоких рівнів в напівпровідниках (методи молекулярних орбіталей, псевдопотенціалу, кристалічного поля). с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Метод функції Гріна.	2		4
8	Тема 8. Механізми дифузії дефектних атомів. Ймовірність перескоку атома та коефіцієнт дифузії дефектів. Самодифузія. Дифузія домішок заміщення та міжвузлових домішок. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Розрахунок коефіцієнтів дифузії для дефектів різних типів.	2		4
9	Тема 9. Вплив зарядового стану на міграцію дефектів: нормальна іонізаційно-прискорена дифузія, механізм Бургуєна, співвідношення Ейнштейна. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Причини відхилень від співвідношення Ейнштейна для точкових дефектів.	2		4
	<i>Модульна контрольна робота 1</i>			2
Частина 2. Методи дослідження та опису процесів перетворення дефектної підсистеми кристалів				
10	Тема 10. Причини появи та типи радіаційних дефектів. Переріз дефектоутворення при опроміненні іонами, нейтронами та електронами. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Причини дефектоутворення при опроміненні кристалу фотонами різних енергій.	2		4
11	Тема 11. Вторинні зміщення. Переріз іонізації атомів під час опромінення та вплив цього процесу на ефективність дефектоутворення. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Підпорогові радіаційні дефекти.	2		4
12	Тема 12. Шляхи впливу термообробки на дефектну підсистему кристалів. Методи опису кінетики відпалу. Ізотермічний відпал та його застосування. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Ізохронний відпал.	2		4

13	Тема 13. Центри забарвлення в лужно-галоїдних та напівпровідникових сполуках: будова, основні властивості, особливості електронних переходів. Правило Мольво-Айві. Найпоширеніші комплекси в кремнії. Перші та нові термодонори. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Домішкові центри в напівпровідниках (на прикладі кремнію та арсеніду галію).	2		4
14	Тема 14. Метастабільні та бістабільні дефекти. Центри з від'ємною кореляційною енергією: особливості енергетичного спектру, причини появи, структура реальних дефектів. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Оцінка співвідношень концентрацій дефектів у різних конфігураціях в залежності від температури..	2		4
15	Тема 15. Типи та параметри дислокацій у напівпровідниках. Повна енергія дислокації. Сили, що діють на дислокацію. Дислокації в кристалах напівпровідникових сполук. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Поле напруг лінійних дефектів.	2		4
16	Тема 16. Часткові дислокації. Дефекти пакування. Взаємодія дислокацій з точковими дефектами. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Дислокації з переплутаним та ковзним наборами зв'язків.	2		4
17	Тема 17. Перегин та сходинка. Рух дислокацій. Дислокаційні реакції, тетраedr Томпсона. Механізми розмноження дислокацій. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Опис перебудови дислокаційної структури за допомогою тетраедра Томпсона.	2		4
18	Тема 18. Метод перехідної спектроскопії локальних рівнів. Позитронно-анігіляційна спектроскопія. Метод термостимульованих струмів. Магніто-резонансні методи. Інші методи дослідження дефектів. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Метод диференційних коефіцієнтів ВАХ.	4		6
	Підсумкова модульна контрольна робота			2
	ВСЬОГО	40		80

Примітка: слід зазначити теми, винесені на самостійне вивчення

Загальний обсяг 120 год.¹, в тому числі:

Лекцій – **40 год.**

Семінари – **0 год.**

Практичні заняття – **0 год.**

Лабораторні заняття – **0 год.**

Тренінги – **0 год.**

Консультації – **1 год.**

Самостійна робота – **80 год.**

¹ Загальна кількість годин, відведених на дану дисципліну згідно з навчальним планом.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА²:

Основна: (Базова)

1. Оліх О.Я. Дефекти у напівпровідникових та діелектричних кристалах. Вінниця, ФОП Корзун Д.Ю., 2016, 152 с. (<https://gen.phys.univ.kiev.ua/wp-content/uploads/2022/09/Olih-Defekti-A5.pdf>)
2. Болеста І. Фізика твердого тіла. Львів, видавничий центр ЛНУ ім. І. Франка, 2003, 480 с.
3. Оліх О.Я. Методи дослідження дефектів. Вінниця, ТОВ «Нілан-ЛТД», 2020, 60 с.
4. Орлов А.Н. Введение в теорию дефектов в кристаллах. М., Высшая школа, 1983, 144 с. (https://www.studmed.ru/orlov-a-n-vvedenie-v-teoriyu-defektov-v-kristallah_344c3a978e1.html)
5. Ланно М., Бургуэн Ж. Точечные дефекты в полупроводниках. Теория. М., Мир, 1984, 264 с.
6. Ланно М., Бургуэн Ж. Точечные дефекты в полупроводниках. Экспериментальные аспекты. М., Мир, 1985, 304 с.
7. Поплавко Ю. М. Фізика твердого тіла. Том 1. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017, 415 с (https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/22938/1/PoplavkoYu.M._Fizyka-tverdoho-tila_T.1.pdf)
8. Characterisation and Control of Defects in Semiconductors / Ed. By F. Tuomisto. — Institution of Engineering & Technology, 2019. — Vol. 45 of *Materials, Circuits and Devices*. — 596 p.

Додаткова:

1. Рейви К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии. М., Мир, 1984, 475 с.
2. Новіков М.М. Мікро- і макродеформація ковалентних кристалів. Курс лекцій для студентів фізичного факультету. К., Видавничий центр “Київський університет”, 2000, 87 с.
3. B.N. Mukashev, Kh.A. Abdullin, Yu.V. Gorelinskii “Metastable and bistable defects in silicon” // *Physics-Uspekhi* – 2000. – V. 170, is.2. – С. 139-150. (https://ufn.ru/ufn00/ufn00_2/ufn002b.pdf)
4. Келли А., Гровс Г. Кристаллография и дефекты в кристаллах. М., Мир, 1974, 496 с.
5. Стоунхем А.М. Теория дефектов в твердых телах. Электронная структура дефектов в диэлектриках и полупроводниках. М., Мир, 1978, т.1, 570 с.; т.2, 358 с.
6. Гундерманн М. Основы физики полупроводников. Нанопизика и технические приложения. М., Физматлит, 2012, 772 с.