

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
Кафедра фізики твердого тіла

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Проректор з науково-
педагогічної роботи ХНУ імені
В.Н. Каразіна

Олександр ГОЛОВКО

2022 р.



Робоча програма навчальної дисципліни

Дефекти в кристалах

(назва навчальної дисципліни)

рівень вищої освіти перший рівень (бакалавр)

галузь знань 10 – природничі науки
(шифр і назва)

спеціальність 104 – фізика та астрономія
(шифр і назва)

освітня програма фізика
(шифр і назва)

спеціалізація _____
(шифр і назва)

вид дисципліни за вибором
(обов'язкова / за вибором)

факультет фізичний

Програму рекомендовано до затвердження Вченою радою фізичного факультету
30 серпня 2022 року, протокол № 6

РОЗРОБНИКИ ПРОГРАМИ: Тонкопряд А.Г. - канд. фіз.-мат. наук., доцент,
доцент кафедри фізики твердого тіла.

Програму схвалено на засіданні кафедри фізики твердого тіла

Протокол № 6 від 29 серпня 2022 року

Завідувач кафедри  Золтан ЗИМАН

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Програму погоджено з гарантом освітньої (професійної/наукової) програми
(керівником проектної групи)

фізика

назва освітньої програми

Гарант освітньої (професійної/наукової) програми

(керівник проектної групи)



(підпис)

Олег ЛАЗОРЕНКО

(прізвище та ініціали)

Програму погоджено методичною комісією фізичного факультету
Протокол № 11 від 29 серпня 2022 року

Голова методичної комісії



(підпис)

Микола МАКАРОВСЬКИЙ

(прізвище та ініціали)

ВСТУП

Програма навчальної дисципліни “Дефекти в кристалах” складена відповідно до освітньо-професійної програми підготовки

перший рівень (бакалаврський)
(назва рівня вищої освіти)

спеціальності (напрямку) 104 – фізика та астрономія

спеціалізації

Опис навчальної дисципліни

1.1. Мета викладання навчальної дисципліни

Метою викладання навчальної дисципліни є надання студентам знань про різні типи дефектів кристалічної будови та їх класифікацію; атомну структуру, геометричні та енергетичні характеристики дефектів кристалічної будови реальних кристалів.

1.2. Основні завдання вивчення дисципліни є засвоєння студентами знань щодо різних недосконалостей кристалічної будови реальних кристалів, а саме: наявності точкових, лінійних, двовимірних та об’ємних дефектів, які в значній мірі обумовлюють більшість фізичних властивостей твердих тіл.

1.3. Кількість кредитів 9

1.4. Загальна кількість годин 270

1.5. Характеристика навчальної дисципліни
за вибором
Денна форма навчання
Рік підготовки
4 - й
Семестр
7-й
Лекції
64год.
Лабораторні заняття
96 год
Самостійна робота
110 год.
Контрольні роботи
2

1.6. Заплановані результати навчання

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми студенти повинні досягти таких результатів навчання:

знати класифікацію дефектів реальної структури кристалів за геометричними ознаками та з точки зору термодинамічної рівноваги, їх атомну структуру, енергетичні характеристики, умови їх виникнення, спотворення кристалічної ґратки при наявності дефектів кристалічної будови, способи виявлення та дослідження різних дефектів в кристалах.

вміти застосовувати здобуті знання для одержання, аналізу та пояснення експериментальних даних, отриманих за різних умов випробувань металів і сплавів, з урахуванням їх реальної дефектної структури.

2. Тематичний план навчальної дисципліни

Классификация дефектов кристаллической структуры

Розділ 1. Точкові дефекти.

Тема 1. Точкові дефекти

Зміст: Види точкових дефектів: вакансії, міжвузольні атоми, домішкові атоми.

Комплекси точкових дефектів. Спотворення кристалічної ґратки навколо точкових дефектів.

Тема 2. Термодинаміка точкових дефектів.

Зміст: Енергія утворення точкових дефектів. Рівноважна концентрація точкових дефектів.

Тема 3. Комплекси точкових дефектів.

Зміст: Комплекси точкових дефектів, їх конфігурація і енергія зв'язку

Рухливість точкових дефектів і їх простих комплексів.

Тема 3. Виникнення точкових дефектів.

Зміст: Виникнення та відпал точкових дефектів. Джерела і стоки точкових дефектів. Способи введення нерівноважної концентрації точкових дефектів: гарт, пластична деформація, опромінення.

Поведінка вакансій при загартуванні і відпалі.

Тема 4. Експериментальні методи визначення характеристик точкових дефектів.

Зміст: Експериментальні методи постереження і дослідження точкових дефектів.

Методи визначення концентрації вакансій, енергії утворення і енергії активації міграції точкових дефектів.

Розділ 2. Лінійні дефекти: дислокації, дисклінації

Тема 5. Дислокації.

Зміст: Основні типи дислокацій та їх рух.

Крайова дислокація. Ковзання і переповзання крайових дислокацій.

Гвинтові дислокація. Ковзання гвинтової дислокації.

Змішані дислокації. Призматичні дислокації.

Тема 6. Вектор і контур Бюргерса.

Зміст: Вектор і контур Бюргерса. Основні особливості вектора Бюргерса дислокацій. Щільність дислокацій.

Тема 7. Експериментальні методи спостереження дислокацій.

Зміст: Методи декорування, електронної мікроскопії, рентгенівської дифракційної топографії.

Тема 8. Пружні властивості дислокацій.

Зміст: Енергія дислокацій.

Сили, що діють на дислокацію.

Пружня взаємодія між дислокаціями. Сили зображення (взаємодія дислокацій з поверхнею кристала).

Взаємодія дислокацій з домішковими атомами. Атмосфери Коттрелла.

Снука, Сузукі.

Взаємодія дислокацій з вакансіями і міжвузловими атомами.

Тема 9. Повні та часткові дислокації. Розтягнуті дислокації.

Зміст: Енергетичний критерій дислокаційних реакцій (критерій Франка).

Щільні упаковки та дефекти упаковки.

Часткові дислокації на межі дефекта упаковки. Дислокації Шоклі та дислокації Франка.

Стандартний тетраедр Томпсона і дислокаційні реакції в ГЦК гратці.

Вершинні дислокації і дислокації Ломер - Коттрелла

Утворення дислокацій. Розмноження дислокацій при пластичній деформації.

Тема 10. Дисклінації.

Зміст: Дислокації та дисклінації

Дисклінації в безперервному пружному середовищі.

Дисклінації в кристалічній гратці. Диспірації.

Розділ 3. Двовимірні дефекти: межі зерен і субзерен

Тема 11. Межі зерен.

Зміст: Геометрія меж зерен.. Межі нахилу, крутіння.

Кристалографія меж зерен за кутом разорієнтації.

Тема 12. Види меж зерен.

Зміст: Малокутові межі зерен, їх структура. Межі субзерен. Міжфазні межі.

Полігогізація. Висококутові межі зерен. Спеціальні та довільні межі зерен.

Двійникові межі. Енергія меж зерен

Тема 13. Моделі структури спеціальних висококутових меж зерен.

Зміст: Гратка співпадаючих вузлів (PCY), повна гратка накладення (ПРН), модель структурних елементів.

Тема 14. Дефекти структури меж зерен.

Зміст: Зернограничні дислокації та вакансії.

Тема 15. Тривимірні недосконалість кристалічної гратки.

Зміст: Пори, тріщини, виділення.

3. Структура навчальної дисципліни

Назви модулів і тем	Кількість годин		
	Денна форма		
	Усього	у тому числі	
лекції		С.р.	
1	2	3	4
Розділ 1. Точкові дефекти			
Тема 1	10	4	6
Тема 2	14	4	10
Тема 3	6	2	4
Тема 4	10	4	6
Разом за розділом 1	40	14	26
Розділ 2. Лінійні дефекти: дислокації, дисклінації			
Тема 5	10	4	6
Тема 6	12	4	8
Тема 7	14	6	8
Тема 8	12	6	6
Тема 9	16	6	10
Тема 10	10	4	6
Разом за розділом 1	74	30	44
Розділ 3. Двовимірні дефекти: межі зерен і субзерен			
Тема 11	12	4	8
Тема 12	12	4	8
Тема 13	12	4	8
Тема 14	12	4	8
Тема 15	12	4	8
Разом за розділом 3	60	20	40
Усього годин	174	64	110

4. Теми лабораторних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Дослідження фазових перетворень в сталях за допомогою дилатометричного метода.	12
2	Дослідження фазових перетворень в сталях за допомогою диференційного метода.	12
3.	Дослідження фазових перетворень в сплавах за допомогою методу термічного аналізу. Побудова діаграми стану системи свінець-олово.	24
4.	Старіння сплавів.	16
5	Визначення закономірностей та механічних властивостей металічних зразків за умов активного одновісьового розтягнення.	16
6	Встановлення структурних та орієнтаційних змін в процесі деформування зразків.	16
	Разом	96

5. Завдання для самостійної роботи

№ з/п	Види, зміст самостійної роботи	кількість годин
1	Термодинамічно рівноважні та нерівноважні точкові дефекти.	6
2	Механізми міграції точкових дефектів	6
3	Способи виникнення нерівноважної концентрації точкових дефектів.	6
4	Поведінка вакансій за умов загартування та відпалу.	6
5	Методи визначення енергії міграції вакансій.	6
6	Експериментальні методи спостереження вакансій в металах	6
7	Трансляційні та ротаційні дислокації Вольтери.	6
8	Дисклінації у безперервному пружньому середовищі.	6
9	Методи виявлення дислокацій в металах за допомогою електронної мікроскопії .	6
10	Метод спостереження ліній дислокацій в прозорих кристалах	6
11	Спеціальні та довільні типи меж зерен.	4
12	Сучасні моделі структури спеціальних меж зерен.	8
13	Сучасні методи дослідження структури меж зерен	6
14.	Дисклінації Вольтерра. Дисклінації та диспірації в кристалах.	14
	Разом	110

6. Індивідуальні завдання: надати відповіді на наступні питання

1	Що таке точкові дефекти? Яка енергія утворення точкового дефекту?	1
2	Який точковий дефект, вакансія або межузельний атом, створює більші спотворення кристалічної решітки?	1
3	В якій кристалічній структурі точковий дефект створює більші спотворення - в ГЦК або ОЦК структурі, і чому?	1
4	Що більше - ймовірність перескоку атома в сусідню вакансію або ймовірність перескоку вакансії в сусідній вузол? Чому?	1
5	Що таке рівноважна концентрація вакансій?	1
6	Опишіть механізм утворення вакансій по Шоттки, по Френкелю.	1
7	Які способи отримання високої концентрації точкових дефектів ви знаєте?	1
8	Що таке крайова і гвинтова дислокації?	1
9	Чим відрізняються руху крайової і гвинтової дислокацій?	1
10	Яке розташування дислокацій (стінка або скупчення) є найбільш енергетично вигідним?	1
11	Що таке дисклінація в кристалах?	1
12	Що таке атмосфери Коттрелла? Снука, Сузукі?	1
13	У чому принципова різниця між частковими дислокаціями Шоклі і Франка?	1
14	Структура та властивості спеціальних меж зерен	1
	Разом	14

7. Методи контролю :

поточний контроль; бліц-опитування ;
допуск до лабораторних робіт та
звітування про виконання лабораторних робіт;
перевірка контрольних робіт.

8. Схема нарахування балів

Підсумковий семестровий контроль при проведенні семестрового
екзамену

Лабораторні роботи, контрольна робота			Екзаменаційна робота	Сума балів
Виконання та звітування про виконання лабораторних робіт	Контрольні роботи, які передбачено навчальним планом (дві)	Разом		
30	10	40	60	100

9. Шкала оцінювання

Сума балів за всі види навчальної діяльності протягом семестру	Оцінка	
	для чотирирівневої шкали оцінювання	для дворівневої шкали оцінювання
90 – 100	відмінно	зараховано
70-89	добре	
50-69	задовільно	
1-49	незадовільно	не зараховано

Рекомендована література

Основна література

1. Демченко Л. Д. Дефекти в кристалах: Підручник. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 250 с.
2. Кристалографія та дефекти кристалічної будови / Укл.Л.П.Степанова, В.Я.Грабовський, О.В. Лисиця–Запоріжжя: ЗНТУ, 2019. – 82 с.
3. Бадіян Є.Ю. Практична кристалографія: Навчальний посібник. – Х.: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2010. – 144 с.
4. Зиман З.З., Сіренко А.Ф.. Основи фізичного матеріалознавства: Навчальний посібник. – Х.: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2005. – 288 с.
5. Бойко Ю.И., Богданов В.В. Фізика конденсованого стану в задачах і вправах.– Харків: ХНУ імені В.Н.Каразіна, 2016, 169 с.
6. Бадіян Є.Ю., Тонкопряд А.Г., Шеховцов О.В. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з фізичного матеріалознавства: 1. Вивчення пластичної деформації та визначення механічних характеристик металів і сплавів. 2. Вирощування
7. Тонкопряд А.Г., Шеховцов О.В. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з фізичного матеріалознавства: вивчення фазових перетворень у сталях за допомогою методу диференційного термічного аналізу та дилатометричного методу. - Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2009. - 33 с.
8. Бадіян Є.Ю., Тонкопряд А.Г., Шурінов Р.В.. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з фізичного матеріалознавства: дослідження механізмів пластичної деформації полікристалів за допомогою оптоелектронних методик. - Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2019. - 34 с.

Допоміжна література

9. Фізика металів – 3.Дефекти в кристалах / Практикум з кредитного модулю / Укладач Демченко Л. Д. – Київ, НТУУ «КПІ»,2014. – 78 с.
10. Фізика конденсованого стану матеріалів: навч. посіб. / Т.П. Говорун, В.О. Пчелінцев, В.М. Радзівський, Л.В. Носонова. - Суми: СумДУ, 2015. - 236 с.

Інформаційні ресурси

23. **Електронний підручник.** Defects in Crystals. Prof. Dr. Helmut Föll.
University of Kiel; Faculty of Engineering
http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/def_en/index.html

Питання для контрольної роботи:

1. Види точкових дефектів і механізми їх утворення.
2. Рівноважна концентрація вакансій і способи отримання надлишкової концентрації вакансій в кристалах.
3. Точкові дефекти і експериментальні методи спостереження і дослідження точкових дефектів.
4. Види лінійних дефектів.
5. Вектор і контур Бюргерса, основні властивості вектора Бюргерса.
6. Енергія діслокацій.
7. Сили, що діють на діслокацію.
8. Способи руху крайової та гвинтовою діслокацій в кристалі.
9. Описати можливі види взаємодії діслокацій між собою.
10. Класифікація меж зерен в полікрystalах. Власні зерномежеві дефекти.
11. Типи меж зерен. Моделі структури спеціальних меж зерен.
12. Тривимірні дефекти в кристалах.
13. Види дефектів кристалічної будови в реальному полікристалічному матеріалі.
14. Методи спостереження дефектів кристалічної будови.

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Факультет *фізичний*

Спеціальність *104-фізика та астрономія*

Семестр *7*

Форма навчання *денна*

Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень): *бакалавр*

Навчальна дисципліна: *Дефекти в кристалах*

ЕКЗАМЕНАЦІЙНИЙ БІЛЕТ № 1

1. Види точкових дефектів. Енергія утворення точкових дефектів. Рівноважна концентрація точкових дефектів. (20 балів).
2. Межі зерен. Класифікація меж зерен за кутом разорієнтації. Межі нахилу, крутіння. Моделі структури спеціальних меж зерен. (20 балів).

Затверджено на засіданні кафедри фізики твердого тіла
протокол

Завідувач кафедри _____ (З.З.Зиман)

Екзаменатор _____ (А.Г.Тонкопряд)

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Факультет *фізичний*

Спеціальність *104-фізика та астрономія*

Семестр *7*

Форма навчання *денна*

Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень): *бакалавр*

Навчальна дисципліна: ***Дефекти в кристалах***

ЕКЗАМЕНАЦІЙНИЙ БІЛЕТ № 2

1. Рівноважна концентрація вакансій і способи отримання надлишкової концентрації вакансій в кристалах. (20 балів).

2 Види лінійних дефектів. Дислокації. Вектор і контур Бюргерса, основні властивості вектора Бюргерса. (20 балів).

Затверджено на засіданні кафедри фізики твердого тіла
протокол

Завідувач кафедри _____ (З.З.Зиман)

Екзаменатор _____ (А.Г.Тонкопряд)

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Факультет *фізичний*

Спеціальність *104-фізика та астрономія*

Семестр *7*

Форма навчання *денна*

Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень): *бакалавр*

Навчальна дисципліна: ***Дефекти в кристалах***

ЕКЗАМЕНАЦІЙНИЙ БІЛЕТ № 3

1 Виникнення та відпал точкових дефектів. Джерела і стоки точкових дефектів. Способи введення нерівноважної концентрації точкових дефектів. (20 балів).

2. Дислокації. Способи руху крайової та гвинтовою дислокацій в кристалі. (20 балів).

Затверджено на засіданні кафедри фізики твердого тіла
протокол

Завідувач кафедри _____ (З.З.Зиман)

Екзаменатор _____ (А.Г.Тонкопряд)

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Факультет *фізичний*

Спеціальність *104-фізика та астрономія*

Семестр *7*

Форма навчання *денна*

Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень): *бакалавр*

Навчальна дисципліна: *Дефекти в кристалах*

ЕКЗАМЕНАЦІЙНИЙ БІЛЕТ № 4

1. Види дефектів кристалічної будови в реальному полікристалічному матеріалі. (20 балів).

2. Класифікація меж зерен в полікрісталах. Структура малокутових та висококутових меж зерен. (20 балів).

Затверджено на засіданні кафедри фізики твердого тіла
протокол

Завідувач кафедри _____ (З.З.Зиман)

Екзаменатор _____ (А.Г.Тонкопряд)

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Факультет *фізичний*

Спеціальність *104-фізика та астрономія*

Семестр *7*

Форма навчання *денна*

Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень): *бакалавр*

Навчальна дисципліна: *Дефекти в кристалах*

ЕКЗАМЕНАЦІЙНИЙ БІЛЕТ № 5

1. Дислокації та дисклінації. Дисклінації в безперервному пружному середовищі. Дисклінації в кристалічній ґратці. Диспірації. (20 балів).

2. Тривимірні недосконалості кристалічної ґратки. (20 балів).

Затверджено на засіданні кафедри фізики твердого тіла
протокол

Завідувач кафедри _____ (З.З.Зиман)

Екзаменатор _____ (А.Г.Тонкопряд)

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Факультет *фізичний*

Спеціальність *104-фізика та астрономія*

Семестр *7*

Форма навчання *денна*

Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень): *бакалавр*

Навчальна дисципліна: *Дефекти в кристалах*

ЕКЗАМЕНАЦІЙНИЙ БІЛЕТ № 6

1. Дислокації. Енергія дислокацій. (20 балів).
2. Експериментальні методи постереження і дослідження точкових дефектів. Методи визначення концентрації вакансій, енергії утворення і енергії активації міграції точкових дефектів. (20 балів).

Затверджено на засіданні кафедри фізики твердого тіла
протокол

Завідувач кафедри _____ (З.З.Зиман)

Екзаменатор _____ (А.Г.Тонкопряд)

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Факультет *фізичний*

Спеціальність *104-фізика та астрономія*

Семестр *7*

Форма навчання *денна*

Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень): *бакалавр*

Навчальна дисципліна: *Дефекти в кристалах*

ЕКЗАМЕНАЦІЙНИЙ БІЛЕТ № 7

1. Взаємодія дислокацій з домішковими атомами, з вакансіями і міжвузловими атомами. (20 балів).
2. Сили, що діють на дислокацію. Можливі види взаємодії дислокацій між собою. Сили зображення. (20 балів).

Затверджено на засіданні кафедри фізики твердого тіла
протокол

Завідувач кафедри _____ (З.З.Зиман)

Екзаменатор _____ (А.Г.Тонкопряд)

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Факультет *фізичний*

Спеціальність *104-фізика та астрономія*

Семестр *7*

Форма навчання *денна*

Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень): *бакалавр*

Навчальна дисципліна: *Дефекти в кристалах*

ЕКЗАМЕНАЦІЙНИЙ БІЛЕТ № 8

1. Повні та часткові дислокації. Розтягнуті дислокації.
Щільні упаковки та дефекти упаковки. Дислокації Шоклі та дислокації
Франка. (20 балів).

2 Основні типи дислокацій та їх рух. (20 балів).

Затверджено на засіданні кафедри фізики твердого тіла
протокол

Завідувач кафедри _____ (З.З.Зиман)

Екзаменатор _____ (А.Г.Тонкопряд)

6.Індивідуальні завдання: надати відповіді на наступні питання	
1	Що таке точкові дефекти?
2	Яка енергія утворення точкового дефекту?
3	Як енергія утворення вакансії пов'язана з температурою плавлення?
4	Що більше - енергія утворення вакансії або енергія межатомного зв'язку?
5	Який точковий дефект, вакансія або межузельний атом, створює більші спотворення кристалічної решітки?
6	В якій кристалічній структурі точковий дефект створює більші спотворення - в ГЦК або ОЦК структурі, і чому?
7	Що більше - ймовірність перескоку атома в сусідню вакансію або ймовірність перескоку вакансії в сусідній вузол?
8	Чому енергія утворення двох ізольованих вакансій більше енергії освіти дивакансії?
9	Що таке рівноважна концентрація вакансій?
10	Опишіть механізм утворення вакансій по Шоттки, по Френкелю.
11	Що є джерелом і стоком точкових дефектів?
12	Які способи отримання високої концентрації точкових дефектів ви знаєте?
13	Що таке крайова і гвинтова дислокації?
14	Чим відрізняються руху крайової і гвинтової дислокацій?
15	Як відносна деформація і швидкість деформації залежать від щільності дислокацій? Рівняння Орована.
16	Яке розташування дислокацій (стінка або скупчення) є найбільш енергетично вигідним?
17	Що таке дисклінація в кристалах?
18	Що таке атмосфери Коттрелла? Снука, Сузукі?
19	Механізми розмноження дислокацій?
20	У чому принципова різниця між частковими дислокаціями Шоклі і Франка?
21	Структура та властивості спеціальних меж зерен

Контрольні питання 1. Що таке крайова дислокація? 2. Чим відрізняється крайова дислокація від гвинтової? 3. Що називається ядром дислокації? 4. Чим відрізняються спотворення області ядра крайової дислокації від спотворень гвинтової дислокації? 5. Чому дислокації є незавершеним зрушенням? 6. Що таке вектор Бюргерса та що він характеризує? 7. Як спрямований вектор Бюргерса крайової та гвинтової дислокацій? 8. Як зменшується поле напруження, викликане дислокаціями? 9. Що таке площина ковзання та як вона проявляється на поверхні кристалів? 10. Яка модель джерела дислокацій? 11. Що є рушійною силою взаємодії дислокацій? 12. Що таке «переповзання» дислокацій? 13. До чого приводить взаємодія крайових дислокацій? 14. Що утворюється внаслідок перетину дислокацій? 15. До чого призводить взаємодія дислокацій та точкових

дефектив?