

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

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Декан фізичного факультету

Руслан ВОСК

“ ” 2025 р.

Робоча програма навчальної дисципліни

Спецкурс «Дифузія дефектами кристала»

(назва навчальної дисципліни)

рівень вищої освіти _____ другий (магістр) _____
галузь знань _____ Е – Природничі науки, математика та статистика _____
(шифр і назва)
спеціальність _____ Е5 – фізика та астрономія _____
(шифр і назва)
освітня програма _____ освітньо-наукова – фізика _____
(шифр і назва)
спеціалізація _____
(шифр і назва)
вид дисципліни _____ за вибором _____
(обов'язкова / за вибором)
факультет _____ фізичний _____

2025/2026 навчальний рік

Програму рекомендовано до затвердження Вченою радою фізичного факультету

29 серпня 2025 року, протокол № 10

РОЗРОБНИК ПРОГРАМИ: Богданов В.В., канд. фіз.- мат. наук, доцент кафедри фізики кристалів

Програму схвалено на засіданні кафедри фізики кристалів

Протокол №9 від 22 серпня 2025 року

В.о. завідувача кафедри:

В.С.Т.
(підпис)

Владислав СЕМІНЬКО
(прізвище та ініціали)

Програму погоджено методичною комісією фізичного факультету

Протокол №5 від 28 серпня 2025 року

Голова методичної комісії

М.Г.
(підпис)

Микола МАКАРОВСЬКИЙ
(прізвище та ініціали)

ВСТУП

Програма навчальної дисципліни “**Дифузія дефектами кристала**” складена відповідно до освітньо-наукової програми підготовки магістра
(назва рівня вищої освіти, освітньо-кваліфікаційного рівня)

спеціальності E5 – фізика та астрономія

1. Опис навчальної дисципліни

1.1. Метою викладання навчальної дисципліни є:

ознайомити студентів із теорією дифузії в кристалах у зв’язку із наявністю дефектів кристалічної будови.

1.2. Основними завданнями вивчення дисципліни є:

в рамках фізики реальних кристалів вивчити процеси, що відбуваються в дифузійній зоні кристалічних систем та супроводжуючі їх ефекти кінетичного походження.

1.3. Кількість кредитів – 6

1.4. Загальна кількість годин – 108

Характеристика навчальної дисципліни	
за вибором	
Денна форма навчання	Заочна (дистанційна) форма навчання
Рік підготовки	
2-й	-й
Семестр	
1-й	-й
Лекції	
36 год.	год.
Практичні, семінарські заняття	
год.	год.
Лабораторні заняття	
72 год.	год.
Самостійна робота	
год.	год.
Індивідуальні завдання	
2 контрольні роботи, 1 курсова робота	

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

Компетентності, що мають бути сформовані:

Інтегральна: Здатність розв’язувати складні задачі і проблеми дослідницького та/або інноваційного характеру у фізиці та астрономії (ІК1).

Загальні

- Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності (ЗК1)
- Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях (ЗК2).
- Здатність використовувати інформаційні та комунікаційні технології (ЗК4).
- Вміння виявляти, ставити та вирішувати проблеми (ЗК5).
- Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями (ЗК6).
- Здатність працювати в міжнародному контексті (ЗК8).
- Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел (ЗК9).

- Здатність дотримуватися принципів академічної доброчесності (ЗК11).

Фахові

- Здатність використовувати закони та принципи фізики та/або астрономії у поєднанні із потрібними математичними інструментами для опису природних явищ (ФК1).
- Здатність формулювати, аналізувати та синтезувати рішення наукових проблем в області фізики та/або астрономії (ФК2).
- Здатність презентувати результати проведених досліджень, а також сучасні концепції у фізиці та/або астрономії фахівцям і нефахівцям (ФК3).
- Здатність комунікувати із колегами усно і письмово державною та англійською мовами щодо наукових досягнень та результатів досліджень в області фізики та/або астрономії (ФК4).
- Здатність сприймати новоздобуті знання в області фізики та астрономії та інтегрувати їх із уже наявними, а також самостійно опановувати знання і навички, необхідні для розв'язання складних задач і проблем у нових для себе деталізованих предметних областях фізики та/або астрономії й дотичних до них міждисциплінарних областях (ФК5).
- Здатність встановлювати зв'язок між експериментальними і теоретичними результатами, здійснювати феноменологічний та теоретичний опис досліджуваних явищ, об'єктів і процесів, пов'язувати результати досліджень із сучасними фізичними та астрономічними теоріями і уявленнями (ФК8).
- Здатність формулювати нові гіпотези та наукові задачі в області фізики та астрономії, вибирати відповідні методи для їх розв'язання, беручи до уваги наявні ресурси (ФК9).
- Здатність проводити аналіз наукових результатів, отриманих в області фізики та астрономії (ФК13).
- Здатність ефективно використовувати людські та матеріальні ресурси для вирішення фундаментальних та прикладних наукових завдань (ФК14).

1.7. Перелік результатів навчання, що формує дана дисципліна

Програмні результати навчання

Програмні результати навчання, що забезпечуються дисципліною:

- ✓ Використовувати концептуальні та спеціалізовані знання і розуміння актуальних проблем і досягнень обраних напрямів сучасної теоретичної і експериментальної фізики та/або астрономії для розв'язання складних задач і практичних проблем. (ПРН 1).
- ✓ Проводити експериментальні та/або теоретичні дослідження з фізики та астрономії, аналізувати отримані результати в контексті існуючих теорій, робити аргументовані висновки (включаючи оцінювання ступеня невизначеності) та пропозиції щодо подальших досліджень (ПРН 2).
- ✓ Обирати і використовувати відповідні методи обробки та аналізу даних фізичних та/або астрономічних досліджень і оцінювання їх достовірності (ПРН 4)
- ✓ Здійснювати феноменологічний та теоретичний опис досліджуваних фізичних та/або астрономічних явищ, об'єктів і процесів (ПРН 5)
- ✓ Обирати ефективні математичні методи та інформаційні технології та застосовувати їх для здійснення досліджень та/або інновацій в області фізики та/або астрономії. (ПРН 6)
- ✓ Оцінювати новизну та достовірність наукових результатів з обраного напрямку фізики та/або астрономії, оприлюднених у формі публікації чи усної доповіді. (ПРН 7)

- ✓ Аналізувати та узагальнювати наукові результати з обраного напрямку фізики та/або астрономії, відслідковувати найновіші досягнення в цьому напрямі, взаємокорисно спілкуючись із колегами. (ПРН 9)
- ✓ Відшуковувати інформацію і дані, необхідні для розв'язання складних задач фізики та/або астрономії, використовуючи різні джерела, зокрема, наукові видання, наукові бази даних тощо, оцінювати та критично аналізувати отримані інформацію та дані. (ПРН 10)
- ✓ Застосовувати теорії, принципи і методи фізики та/або астрономії для розв'язання складних міждисциплінарних наукових і прикладних задач. (ПРН 11)

1.8. Вивченню спецкурсу передують курс загальної фізики, курс класичної термодинаміки та статистичної фізики.

2. Тематичний план навчальної дисципліни

Розділ 1. Дифузія уздовж меж зерен у кристалах.

1.1. Розвиток уявлень про структуру меж зерен.

1.2. Дифузійні властивості меж.

Розділ 2. Теорія дифузії уздовж одиначної стаціонарної межі.

1.1. Метод Фішера розділення дифузійних потоків.

2.2. Дифузія уздовж міжфазової межі.

Розділ 3. Визначення параметрів дифузії межами зерен.

3.1. Експериментальні методи визначення параметрів зерномежової дифузії.

3.2. Умови застосовності розв'язку Фішера.

3.3. Орієнтаційна залежність коефіцієнта зерномежової дифузії.

3.4. Про механізм дифузії межами.

Розділ 4. Дифузія в полікристалах.

4.1. Різні режими кінетики дифузії у полікристалах.

4.2. Дифузія рухомими межами.

4.3. Міграція меж, спричинена межевою дифузією.

Розділ 5. Дифузія уздовж дислокацій.

5.1. Математичний опис дифузії дислокаціями.

5.2. Різні кінетичні режими дифузії в монокристалах.

Розділ 6. Дифузія уздовж вільної поверхні кристала.

6.1. Структура поверхні.

6.2. Поверхнева дифузія.

6.3. Визначення параметрів дифузії поверхнею.

6.4. Експериментальне визначення дифузійних параметрів методом перенесення маси.

3. Структура навчальної дисципліни

Назви розділів і тем	Кількість годин					
	Денна форма					
	Усього	у тому числі				
		л	п	л.	ін.	с.р.
1	2	3	4	5	6	7
Розділ 1. Дифузія уздовж меж зерен у кристалах.						
1. Розвиток уявлень про структуру меж зерен.	7	2		5		

2. Дифузійні властивості меж.	7	2	5		
Разом за розділом 1	14	4	10		
Розділ 2. Теорія дифузії уздовж одиначної стаціонарної межі.					
3. Метод Фішера розділення дифузійних потоків.	6	2	4		
4. Дифузія уздовж міжфазової межі.	6	2	4		
Разом за розділом 2	12	4	8		
Розділ 3. Визначення параметрів дифузії межами зерен.					
5. Експериментальні методи визначення параметрів зерномежової дифузії.	7	2	5		
6. Умови застосовності розв'язку Фішера.	7	2	5		
7. Орієнтаційна залежність коефіцієнта зерномежової дифузії.	7	3	4		
8. Про механізм дифузії межами.	7	3	4		
Разом за розділом 3	28	10	18		
Розділ 4. Дифузія в полікристалах.					
9. Різні режими кінетики дифузії у полікристалах.	6	2	4		
10. Дифузія рухомими межами.	6	2	4		
11. Міграція меж, спричинена межевою дифузією.	6	2	4		
Разом за розділом 4	18	6	12		
Розділ 5. Дифузія уздовж дислокацій.					
12. Математичний опис дифузії дислокаціями.	6	2	4		
13. Різні кінетичні режими дифузії в монокристалах.	6	2	4		
Разом за розділом 5	12	4	8		
Розділ 6. Дифузія уздовж вільної поверхні кристала.					
14. Структура поверхні.	6	2	4		
15. Поверхнева дифузія.	6	2	4		
16. Визначення параметрів дифузії поверхнею.	6	2	4		
17. Експериментальне визначення дифузійних параметрів методом перенесення маси.	6	2	4		
Разом за розділом 6	24	8	16		
Усього годин	108	36	72		

4. Теми семінарських (практичних, лабораторних) занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Розвиток уявлень про структуру меж зерен.	5
2	Дифузійні властивості меж.	5
3	Метод Фішера розділення дифузійних потоків.	4
4	Дифузія уздовж міжфазової межі.	4
5	Експериментальні методи визначення параметрів зерномежової дифузії.	5
6	Умови застосовності розв'язку Фішера.	5
7	Орієнтаційна залежність коефіцієнта зерномежової дифузії.	4
8	Про механізм дифузії межами.	4
9	Різні режими кінетики дифузії у полікристалах.	4

10	Дифузія рухомими межами.	4
11	Міграція меж, спричинена межевою дифузією.	4
12	Математичний опис дифузії дислокаціями.	4
13	Різні кінетичні режими дифузії в монокристалах.	4
14	Структура поверхні.	4
15	Поверхнева дифузія.	4
16	Визначення параметрів дифузії поверхнею.	4
17	Експериментальне визначення дифузійних параметрів методом перенесення маси.	4
	Разом	72

5. Завдання для самостійної роботи

№	З використанням літературних джерел із списку рекомендованої літератури проробка питань, поставлених викладачем на лекції з теми:	Кількість годин

6. Тема курсової роботи

Дифузійно-індукована міграція меж зерен.

7. Методи контролю:

контр. роб., екзамен.

Питання до контролю:

1. Сучасні уявлення про структуру меж зерен. Дифузія уздовж меж.
2. Дифузія уздовж поодинокі стаціонарної межі. аналіз Фішера.
3. Експериментальні методи визначення параметрів зерномежевої дифузії.
4. Орієнтаційна залежність коефіцієнта зерномежевої дифузії. Параметри зерномежевої дифузії при вакансійному механізмі. Умови застосовності аналізу Фішера.
5. Дифузія в полікрystalлах. Класифікація дифузійних режимів для стаціонарних і рухомих меж.
6. Дифузія рухомими межами. Дифузійно-індукована міграція меж зерен.
7. Структура вільної поверхні кристала. Дифузія уздовж поверхні. Визначення параметрів поверхневої дифузії методом перенесення маси.
8. Експериментальне визначення параметрів поверхневої і об'ємної дифузії методом перенесення маси вздовж вільної поверхні.

Екзаменаційний білет № 1

1. Сучасні уявлення про структуру меж зерен. Дифузія уздовж меж.
2. В якому режимі за класифікацією Харрісона відбувається дифузія домішки в бікрісталл, якщо кут при вершині ізоконцентраційного контуру поблизу межі зерен дорівнює 80° ?

Екзаменаційний білет № 2

1. Дифузія вздовж поодинокі стаціонарної межі. Аналіз Фішера.
2. Отримайте вираз для товщини шару інтерметаліду, що формується за взаємної дифузії двох металів, при якій відбувається зміна кінетичного закону зростання сполуки.

Екзаменаційний білет № 3

1. Експериментальні методи визначення параметрів зерномежевої дифузії.
2. Водень поміщений в резервуар з товщиною стінок $l = 1\text{ мм}$. Резервуар знаходиться у вакуумі. Тиск водню в резервуарі $p_1 = 105\text{ Па}$. Розрахувати потік водню крізь стінку резервуара, якщо відомо, що розчинність водню в металі пропорційна $\sqrt{p}$ і становить $10^{-5}\text{ ат\%}$ при $p = 10^3\text{ Па}$, коефіцієнт дифузії водню в металі, $D = 10^{-9}\text{ м}^2\text{с}^{-1}$, атомний об'єм металу $w \gg 10^{-29}\text{ м}^3$.

Екзаменаційний білет № 4

1. Орієнтаційна залежність коефіцієнта зерномежевої дифузії. Параметри зерномежевої дифузії при вакансійному механізмі. Умови застосовності аналізу Фішера.
2. У дифузійний контакт приведено речовини А і В. Після відпалу виявилось, що крива розподілу $C_B(x)$ симетрична щодо точки $C_B(x_0)$, де x_0 – координата площині вихідного контакту. Що можна сказати про концентраційну залежність коефіцієнта дифузії D_B ? Якою функцією описується $C_B(x)$?

Екзаменаційний білет № 5

1. Дифузія в полікристалах. Класифікація дифузійних режимів для стаціонарних і рухомих меж.
2. У дифузійній зоні системи А-В зростає шар сполуки, товщина якого l лінійно залежить від часу відпалу. Через 10 годин відпалу концентрації В на різних берегах шару виявилися рівними $C_1 = 0,65$; $C_2 = 0,66$, а його товщина $l = 20\text{ мкм}$. Оцінити кінетичний коефіцієнт зростання сполуки, якщо взаємна дифузія А-В відбувається уніполярно.

Екзаменаційний білет № 6

1. Дифузія рухомими межами. Дифузійно-індукована міграція меж зерен.
2. Після 10-годинного відпалу при 200°C бікрісталла Zn з мідною плівкою, що напилена на його торець, перпендикулярний площині межзеренної межі, виміряли розподіл концентрації Cu методом зняття шарів, паралельних площині джерела дифузії. З використанням рішення Фішера обчислили коефіцієнт зерномежевої $D_b \gg 10^{-11}\text{ м}^2\text{с}^{-1}$ і об'ємної $D \gg 10^{-16}\text{ м}^2\text{с}^{-1}$ дифузії. Чи правомірно було використовувати рішення Фішера в даному випадку?

Екзаменаційний білет № 7

1. Структура вільної поверхні кристала. Дифузія уздовж поверхні. Визначення параметрів поверхневої дифузії методом перенесення маси.
2. Було проведено дифузійний відпал зразків двох типів: 1-й складався з латуні (Cu + 30 ат.% Zn) і відпалювався у вакуумі, 2-й являв собою зразок бутербродного типу, складений з міді та латуні. У процесі відпалу при $T = 900^\circ\text{C}$ відбувалася сублімація цинку з 1-го зразка в вакуум і взаємна дифузія цинку і міді в 2-му зразку. Після 10-ти годинного відпалу були виміряні розподілення концентрації цинку в дифузійних зонах двох зразків. Яким способом слід обробити результати експерименту, щоб отримати значення коефіцієнтів дифузії, що характеризують кінетику дифузійних процесів в кожному зі зразків?

Екзаменаційний білет № 8

1. Експериментальне визначення параметрів поверхневої і об'ємної дифузії методом перенесення маси вздовж вільної поверхні.
2. З термодинаміки незворотних процесів випливає, що в ізотермічних умовах дифузійний потік визначається співвідношенням $j = -L\tilde{N}m$, де L – кінетичний коефіцієнт, $\tilde{N}m$ – градієнт хімічного потенціалу дифундуючих частинок. Виразити кінетичний коефіцієнт через коефіцієнт дифузії D і рухливість B .

8. Схема нарахування балів

Поточний контроль		Курсова робота	Екзамен	Сума
Контрольна робота за темами Т1-Т10	Контрольна робота за темами Т11-Т17			
20	20	20	40	100

Т1, Т2 ... – теми розділів

Контрольна робота з кожної теми складається з двох питань. Відповідь на кожне питання оцінюється в 1 бал. Курсова оцінюється в 20 балів.

Екзамен проводиться у письмовій формі. Екзаменаційний білет містить два пункти: 1 теоретичне питання і 1 задачу. Відповідь на кожен пункт оцінюється в 20 балів.

Шкала оцінювання

Сума балів за всі види навчальної діяльності протягом семестру	Оцінка за національною шкалою	
	для екзамену	для заліку
90 – 100	відмінно	зараховано
70-89	добре	
50-69	задовільно	
1-49	незадовільно	не зараховано

9. Рекомендована література

Основна література

1. Богданов В. В. Дифузія в кристалах. – ХНУ, 2006.
2. Mehrer, H. Diffusion in solids: fundamentals, methods, materials, diffusion-controlled processes. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007.
3. Ghomashchi, R. An Introduction to Fundamentals of Diffusion in Solid State Materials. – CRC Press, 2024.
4. Shewmon P. Diffusion in Solids. – Springer Cham, 2016.
5. Manning J. Diffusion Kinetics for Atoms in Crystals. – Van Nostrand, 1968.

Допоміжна література

1. Парицька Л. Н. Дифузія і дифузійні процеси в кристалах: Тексти лекцій.– Част. 1.– Харків: ХДУ, 1991.
2. Murch, G. E. Diffusion in crystalline solids. – Academic Press, 2012.
3. Alope P., and Divinski, S. (eds.) Handbook of Solid State Diffusion: Volume 1: Diffusion Fundamentals and Techniques. Vol. 1. – Elsevier, 2017.