

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

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Декан фізичного факультету

Руслан ВОВК



“ ” 2025 р.

Робоча програма навчальної дисципліни

Спецкурс «**Основи теорії росту кристалів**»
(назва навчальної дисципліни)

рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський)
галузь знань _____ 10 – Природничі науки, математика та статистика
(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

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 “**Основи теорії росту кристалів**” складена відповідно до освітньо-професійної програми підготовки _____ перший (бакалавр) _____ спеціальності (напряму) _____ Е5 – фізика та астрономія _____

1. Опис навчальної дисципліни

1.1. Метою викладання навчальної дисципліни є

подати сучасний стан термодинамічної теорії кристалізації та методів аналізу процесів кристалізації, ознайомити студентів із молекулярно-кінетичним підходом до опису процесу кристалізації, подати сучасні уявлення про атомну структуру кристалічних твердих тіл, про характер і мікроскопічну природу сил, котрі обумовлюють стабільність кристалічних структур, про зв'язок структурних та енергетичних параметрів кристалів з параметрами міжатомних сил, про зв'язок динамічних рівнянь руху кристалічної ґратки з потенціалами міжатомної взаємодії, про загальні положення теорії малих коливань кристалічної ґратки, основні положення динамічної теорії пружності та її співставлення з мікроскопічною динамікою кристалів.

1.2. Основними завданнями вивчення дисципліни є

освоїти теорію зародження і росту кристалів на основі термодинамічного підходу до проблеми, освоїти молекулярно-кінетичну теорію росту кристалів та освоїти сучасні уявлення про атомну структуру кристалічних твердих тіл, про характер і мікроскопічну природу сил, котрі обумовлюють стабільність кристалічних структур, про зв'язок структурних та енергетичних параметрів кристалів з параметрами міжатомних сил, про зв'язок динамічних рівнянь руху кристалічної ґратки з потенціалами міжатомної взаємодії, про загальні положення теорії малих коливань кристалічної ґратки, основні положення динамічної теорії пружності та її співставлення з мікроскопічною динамікою кристалів

1.3. Кількість кредитів – 5

1.4. Загальна кількість годин – 64

1.5. Характеристика навчальної дисципліни	
За вибором	
Денна форма навчання	Заочна (дистанційна) форма навчання
Рік підготовки	
3-й	-й
Семестр	
5-й	-й
Лекції	
64 год.	год.
Практичні, семінарські заняття	
год.	год.
Лабораторні заняття	
год.	год.
Самостійна робота	
год.	год.
Індивідуальні завдання	
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 спеціалізовані задачі та практичні проблеми з фізики та/або астрономії у професійній діяльності або у процесі подальшого навчання, що передбачає застосування певних теорій і методів фізики та/або астрономії і характеризується складністю та невизначеністю умов. (ІК)
- Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях. (ЗК 2)
- Навички використання інформаційних і комунікаційних технологій. (ЗК 3)
- Здатність приймати обґрунтовані рішення. (ЗК 5)
- Здатність оцінювати та забезпечувати якість виконуваних робіт. (ЗК 8)
- Визначеність і наполегливість щодо поставлених завдань і взятих обов'язків. (ЗК 9)
- Здатність спілкуватися державною мовою як усно, так і письмово. (ЗК 12)
- Здатність спілкуватися іноземною мовою. (ЗК 13)
- Знання і розуміння теоретичного та експериментального базису сучасної фізики та астрономії. (ФК 1)
- Здатність використовувати базові знання з фізики та астрономії для розуміння будови та поведінки природних і штучних об'єктів, законів існування та еволюції Всесвіту. (ФК 7)
- Здатність працювати з джерелами навчальної та наукової інформації. (ФК 9)
- Здатність самостійно навчатися і опановувати нові знання з фізики, астрономії та суміжних галузей. (ФК 10)
- Усвідомлення професійних етичних аспектів фізичних та астрономічних досліджень. (ФК 12)
- Орієнтація на найвищі наукові стандарти – обізнаність щодо фундаментальних відкриттів та теорій, які суттєво вплинули на розвиток фізики, астрономії та інших природничих наук. (ФК 13)
- Здатність здобувати додаткові компетентності через вибіркові складові освітньої програми, самоосвіту, неформальну та інформальну освіту (ФК 14)

1.7. Перелік результатів навчання, що формує дана дисципліна

Програмні результати навчання

- 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 та/або астрономії. (ПРН 1)
- Знати і розуміти фізичні основи астрономічних явищ: аналізувати, тлумачити, пояснювати і класифікувати будову та еволюцію астрономічних об'єктів Всесвіту (планет, зір, планетних систем, галактик тощо), а також основні фізичні процеси, які відбуваються в них. (ПРН 2)
- Знати і розуміти експериментальні основи фізики: аналізувати, описувати, тлумачити та пояснювати основні експериментальні підтвердження існуючих фізичних теорій. (ПРН 3)
- Знати основні актуальні проблеми сучасної фізики та астрономії. (ПРН 5)
- Оцінювати вплив новітніх відкриттів на розвиток сучасної фізики та астрономії. (ПРН 6)
- Розуміти, аналізувати і пояснювати нові наукові результати, одержані у ході проведення фізичних та астрономічних досліджень відповідно до спеціалізації. (ПРН 7)
- 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. (ПРН 8)
- Вміти упорядковувати, тлумачити та узагальнювати одержані наукові та практичні результати, робити висновки. (ПРН 11)

- Розуміти зв'язок фізики та/або 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. (ПРН 13)
- 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. (ПРН 17)
- Розуміти значення фізичних досліджень для забезпечення сталого розвитку суспільства. (ПРН 22)
- Розуміти історію та закономірності розвитку фізики та астрономії. (ПРН 23)
- Розуміти місце фізики та астрономії у загальній системі знань про природу і суспільство та у розвитку суспільства, техніки і технологій. (ПРН 24)
- Мати навички самостійного прийняття рішень стосовно своїх освітньої траєкторії та професійного розвитку. (ПРН 25)

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

2. Тематичний план навчальної дисципліни

Розділ 1. Рівноважні стани системи „кристал-середовище кристалізації”

Умови проходження процесів, що ведуть термодинамічну систему до рівноважного стану.

Умови рівноваги гетерогенної системи. Хімічний потенціал. Діаграми стану.

Структура хімічного потенціалу для різних агрегатних станів речовини.

Розділ 2. Рушійна сила процесу кристалізації

Рушійна сила процесу кристалізації в системі «пара–кристал» або «розплав–кристал».

Рушійна сила процесу кристалізації в системі «розчин–кристал».

Рушійна сила кристалізації з твердофазного стану.

Умови зародження кристалів. Метастабільні стани систем.

Розділ 3. Спонтанна кристалізація

Параметри процесу спонтанної кристалізації. Їхня експериментальна залежність від рушійної сили кристалізації.

Експериментальне і теоретичне моделювання процесу масової кристалізації. Опис кінетики процесу за Колмогоровим.

Розділ 4. Теорія гомогенного зародження кристалів

Роль межфазової поверхні на стадії гомогенного зародження кристалів.

Гомогенне утворення зародків кристалізації. Розмір тривимірного критичного зародка. Його залежність від рушійної сили кристалізації.

Робота утворення тривимірного критичного зародка. Правило Гіббса.

Імовірність і швидкість утворення тривимірних критичних зародків.

Розділ 5. Швидкість утворення і росту центрів кристалізації

Умови перетворення тривимірного критичного зародка на центр кристалізації. Розмір двовимірного критичного зародка. Робота його утворення.

Імовірність зародження двовимірних комплексів і параметри процесу спонтанної кристалізації n і V_n .

Залежність швидкості зародження кристалів від пересичення середовища кристалізації.

Порівняння теоретичного опису процесу спонтанної кристалізації з експериментом.

Розділ 6. Теорія гетерогенного зародження кристалів

Вплив розчинних і нерозчинних домішок на процес зародження кристалів. Робота утворення критичного зародка на поверхні нерозчинної домішки в ізотропному наближенні.

Гетерогенне зародкоутворення на підкладці з урахуванням анізотропії поверхневої енергії.
 Форма зародка. Критичний розмір і робота його утворення.
 Орієнтовання (епітаксiальна) кристалізація. Оптимальні умови для її реалізації.

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. Рівноважні стани системи „кристал-середовище кристалізації”	10	10				
Розділ 2. Рушійна сила процесу кристалізації	10	10				
Розділ 3. Спонтанна кристалізація	10	10				
Розділ 4. Теорія гомогенного зародження кристалів	10	10				
Розділ 5. Швидкість утворення і росту центрів кристалізації	10	10				
Розділ 6. Теорія гетерогенного зародження кристалів	10	10				
Усього годин	60	60				

4. Темі семінарських (практичних, лабораторних) занять

№ з	Назва теми	Кількість годин
1		
2		

5. Завдання для самостійної роботи

№ з	З використанням літературних джерел із списку рекомендованої літератури проробка питань, поставлених викладачем на лекції з теми:	Кількість
	Розділ 1. Рівноважні стани системи „кристал-середовище	10
	Розділ 2. Рушійна сила процесу кристалізації	10
	Розділ 3. Спонтанна кристалізація	10
	Розділ 4. Теорія гомогенного зародження кристалів	10
	Розділ 5. Швидкість утворення і росту центрів кристалізації	10
	Розділ 6. Теорія гетерогенного зародження кристалів	10
	Разом	60

6. Індивідуальні завдання

7. Методи контролю залік.

Питання до контролю:

1. Умови проходження процесів, що ведуть термодинамічну систему до рівноважного стану.
2. Умови рівноваги гетерогенної системи. Хімічний потенціал. Діаграми стану.
3. Структура хімічного потенціалу для різних агрегатних станів речовини.
4. Рушійна сила процесу кристалізації в системі «пара–кристал» або «розплав–кристал».
5. Рушійна сила процесу кристалізації в системі «розчин–кристал».

6. Рушійна сила кристалізації з твердофазного стану.
7. Умови зародження кристалів. Метастабільні стани систем.
8. Параметри процесу спонтанної кристалізації. Їхня експериментальна залежність від рушійної сили кристалізації.
9. Експериментальне і теоретичне моделювання процесу масової кристалізації. Опис кінетики процесу за Колмогоровим.
10. Роль межфазової поверхні на стадії гомогенного зародження кристалів.
11. Гомогенне утворення зародків кристалізації. Розмір тривимірного критичного зародка. Його залежність від рушійної сили кристалізації.
12. Робота утворення тривимірного критичного зародка. Правило Гіббса.
13. Імовірність і швидкість утворення тривимірних критичних зародків.
14. Умови перетворення тривимірного критичного зародка на центр кристалізації. Розмір двовимірного критичного зародка. Робота його утворення.
15. Імовірність зародження двовимірних комплексів і параметри процесу спонтанної кристалізації n і v_n .
16. Залежність швидкості зародження кристалів від пересичення середовища кристалізації. Порівняння теоретичного опису процесу спонтанної кристалізації з експериментом.
17. Вплив розчинних і нерозчинних домішок на процес зародження кристалів. Робота утворення критичного зародка на поверхні нерозчинної домішки в ізотропному наближенні.
18. Гетерогенне зародкоутворення на підкладці з урахуванням анізотропії поверхневої енергії. Форма зародка. Критичний розмір і робота його утворення.
19. Орієнтованна (епітаксialьна) кристалізація. Оптимальні умови для її реалізації.

Заліковий білет № 1

1. Умови рівноваги гетерогенної системи. Хімічний потенціал. Діаграми стану.
2. На скільки градусів можна переохолодити розплав золота до початку гомогенного зародження кристалів? Густина атомів у розплаві прийняти рівною 10^{29} м^{-3} ; питома межфазна енергія $a_{\text{кр}} = 0,13 \text{ Дж} \times \text{м}^{-2}$; теплота плавлення золота $H_{\text{пл}} = 3,2 \times 10^{-20} \text{ Дж}$; температура плавлення 1336 К .

Заліковий білет № 2

1. Параметри процесу спонтанної кристалізації. Їхня експериментальна залежність від рушійної сили кристалізації.
2. На поверхні пошарово зростаючого з пари кристала зародився двовимірний агрегат критичного розміру. Вільна енергія замкнутої сходинок атомної висоти, що утворилася, ізотропна. Отримайте вираз для радіуса кривизни такої сходинок.

Заліковий білет № 3

1. Рушійна сила процесу кристалізації в системі «пара–кристал» або «розплав–кристал».
2. Доведіть, що макроскопічна домішка не змінює умов фазової рівноваги між кристалом і середовищем кристалізації.

Заліковий білет № 4

1. Умови протікання релаксаційних процесів у гомогенних системах. Якими є умови рівноваги таких систем?
2. Чому дорівнює робота утворення кристала, якщо він зародився на поверхні такого ж кристала?

Заліковий білет № 5

1. Експериментальне і теоретичне моделювання процесу масової кристалізації.

2. Розглядаючи процес зародження кристалів з пари в ізотропному наближенні отримайте у загальному вигляді вираз для мінімального пересичення пари $D\phi=(Dp/p_0)\phi$, за якого ще можна експериментально спостерігати утворення кристалів зі швидкістю $1\text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$.

Заліковий білет № 6

1. Гомогенне утворення зародків кристалізації. Розмір тривимірного критичного зародка. Його залежність від рушійної сили кристалізації.
2. Розплав, переохолоджений на 1%, знаходиться в метастабільному стані. Чи буде кристалізуватися розплав, якщо ввести в нього затравку розміром $1'1'1\text{ мм}^3$? Теплота плавлення речовини розплаву 0,2 еВ, питома поверхнева енергія 0,15 Дж/м², розмір молекул 5 Å.

Заліковий білет № 7

1. Вплив розчинних і нерозчинних домішок на процес зародження кристалів. Робота утворення критичного зародка на поверхні нерозчинної домішки в ізотропному наближенні.
2. Чому максимальна швидкість гомогенного зародження кристалів досягається при більших пересиченнях середовища кристалізації, ніж максимальна швидкість їхнього зростання? Чому ситуація може змінитися в разі гетерогенного зародження?

Заліковий білет № 8

1. Умови перетворення тривимірного критичного зародка на центр кристалізації. Розмір двовимірного критичного зародка. Робота його утворення.
2. Величина відносного переохолодження пари і розплаву однієї і тієї ж речовини однакова. Тиск пари і розплаву залишається рівноважним. Чи буде однаковою для пари і розплаву величина їхнього відхилення від рівноваги з кристалічною фазою?

Заліковий білет № 9

1. Рушійна сила процесу кристалізації в системі «розчин–кристал».
2. Отримайте вираз для швидкості утворення центрів кристалізації в розплаві в присутності в ньому поверхнево активної домішки. Чи залежатиме вона від переохолодження розплаву?

Заліковий білет № 10

1. Залежність параметрів процесу спонтанної кристалізації від пересичення середовища.
2. Розплав міді знаходиться при температурі плавлення $T=1083\text{ }^{\circ}\text{C}$. Обчисліть максимальний розмір кристалічного агрегату, який може утворитися в розплаві в результаті гетерофазної флуктуації. Густина атомів в розплаві прийняти рівною 10^{29} м^{-3} , питома вільна поверхнева енергії межі кристал-розплав ізотропна і $\gg 0,11\text{ Дж}\times\text{м}^{-2}$.

8. Схема нарахування балів

Поточний контроль, самостійна робота				Залік	Сума
Поточне тестування за темами	Поточне тестування за темами	Контрольна робота	Курсова робота		
T1-T3	T4-T6				
9	9	20	12	50	100

T1, T2 ... – теми розділів.

Поточне тестування з кожної теми складається з 1-х завдання. Відповідь оцінюється в 3 бали.

Контрольна робота містить 2 питання по 10 балів за кожне. Питання на заліку містить два пункти: 1 теоретичне питання і 1 задачу. Відповідь на 1-й пункт оцінюється в 25 балів, правильний розв'язок задачі – 25 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. Основи теорії росту кристалів. – Вид. ХНУ ім. В.Н.Каразіна. – 2010.
2. Bhat, H. L. Introduction to crystal growth: principles and practice. – CRC Press, 2014.
3. Nishinaga, T., ed. Handbook of crystal growth: fundamentals. – Elsevier, 2014.
4. Müller, G., Métois, J. J., & Rudolph, P. (Eds.). (2004). Crystal Growth-From fundamentals to technology. Elsevier, 2004.
5. Сідлецький О.Ц., Гриньов Б.В. Сцинтиляційні кристали на основі твердих розчинів заміщення – Харків: “ІСМА”, 2019.

Допоміжна література

1. Handbook of Crystal Growth. Edited by D.T.J Hurler. North-Holland, 1993–1995: – Vol. 1: Fundamentals (Parts A and B); – Vol. 2: Bulk Crystal Growth (Parts A and B); – Vol. 3: Thin Films and Epitaxy (Parts A and B).
2. Pamplin, Brian R. (ed.). Crystal growth: International series on the Science of the solid state. – Elsevier, 2013.
3. Journal of Crystal Growth, Elsevier, 1967-2025 (<https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-crystal-growth/issues?page=1>).