

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

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Декан
фізичного факультету

Руслан БОВК
“ _____ ” _____ 2023 р.

Робоча програма навчальної дисципліни

Спецкурс «Основи теорії росту кристалів»

(назва навчальної дисципліни)

рівень вищої освіти _____ перший (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 _____

2023/2024 навчальний рік

Програму рекомендовано до затвердження Вченою радою фізичного факультету

30 серпня 2023 року, протокол № 6

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

Програму схвалено на засіданні кафедри фізики кристалів

Протокол № 6 від 28 серпня 2023 року

Завідувач кафедри Гриньов Б. В.

(підпис)

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

назва освітньої програми

Гарант освітньої (професійної/наукової) програми
(керівник проектної групи)

Лазоренко О.В.

(підпис)

Програму погоджено методичною комісією фізичного факультету

Протокол № 7 від 29 серпня 2023 року

Голова методичної комісії

Макаровський М.О.

(підпис)

ВСТУП

Програма навчальної дисципліни “**Основи теорії росту кристалів**” складена відповідно до освітньо-професійної програми підготовки

_____ перший (бакалавр) _____

(назва рівня вищої освіти)

спеціальності (напряму) _____ 104 – фізика та астрономія _____

спеціалізації _____

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 и 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.

Компетентності, що забезпечуються дисципліною:

- 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)

1.3. Кількість кредитів – 5

1.4. Загальна кількість годин – 150

1.5. Характеристика навчальної дисципліни	
За вибором	
Денна форма навчання	Заочна (дистанційна) форма навчання
Рік підготовки	
3-й	-й
Семестр	
5-й	-й
Лекції	
44 год.	год.
Практичні, семінарські заняття	
год.	год.
Лабораторні заняття	
год.	год.
Самостійна робота	
106 год.	год.
Індивідуальні завдання	

Форма контролю – екзамен

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

знати: основні теоретичні моделі, що описують процеси зародження і подальшого росту кристалічної фази, механізми росту кристалів, залежність швидкості процесу кристалізації від стану і складу середовища кристалізації, умов тепловідведення тощо; основані на теоретичних уявленнях про кристалогенезис методи штучного вирощування кристалів, особливості кристалічної структури в порівнянні з іншими структурними станами твердих тіл, математичні методи опису кристалічної структури та динамічної поведінки кристалічних ґраток, мати чітке уявлення про зв'язок структурних, енергетичних та динамічних характеристик кристалів з характеристиками потенціалів міжатомної взаємодії в них;

вміти: використовувати знання теоретичних моделей, що описують процеси зародження і росту кристалічної фази, механізмів росту кристалів, залежності швидкості процесу кристалізації від стану і складу середовища кристалізації, умов тепловідведення тощо, використовувати одержані знання у роботі з науковою літературою, в якій розглядаються питання, пов'язані з впливом динамічних властивостей кристалічної ґратки на теплові, електрофізичні, механічні властивості кристалів, практично використовувати одержані знання при розробці нових матеріалів, технологій, приладів, при опрацюванні і збереженні науково-технічної інформації.

Програмні результати навчання, що забезпечуються дисципліною:

- Знати, розуміти та вміти застосовувати на базовому рівні основні положення загальної та теоретичної фізики, зокрема, класичної, релятивістської та квантової механіки, молекуляр-

ної 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 відшукувати 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)

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 и 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 ν_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.

Орієнтована (епітаксимальна) кристалізація. Оптимальні умови для її реалізації.

Розділ 7. Міжатомна взаємодія в кристалах.

Сили притягання та відштовхування між атомами, їх фізична природа. Основні властивості потенціалів міжатомної взаємодії в кристалах. Емпіричні потенціали, потенціал Ленарда-Джонса і фізичний зміст його параметрів.

Розділ 8. Зв'язок геометричних і енергетичних параметрів кристалу з параметрами парного потенціалу міжатомної взаємодії.

Розрахунок потенціальної енергії гранецентрованого кубічного кристалу з використанням потенціалу Ленарда-Джонса. Розрахунок рівноважних значень параметру ґратки, енергії сублімації, модуля всебічного стиснення.

Розділ 9. Силова матриця кристалу.

Сили, що виникають при відхиленнях атомів кристалічної структури від їх рівноважних положень, силова матриця та її властивості. Розрахунок елементів силової матриці для ГЦК ґратки з використанням потенціалу Ленарда-Джонса.

Розділ 10. Рівняння малих коливань кристалічної ґратки.

Рівняння руху для простих і складних кристалічних решіток. Одновимірні моделі кристалів і їх рівняння руху: одновимірна періодична низка атомів, звичайна та узагальнена модель Френкеля-Конторової.

Розділ 11. Монохроматичні коливання кристалічної ґратки.

Розповсюдження в кристалі монохроматичної плоскої хвилі зміщень. Закон дисперсії вільних гармонічних коливань простих та складних кристалічних структур, акустичні та оптичні коливання. Обернений простір та обернена ґратка вузлів. Основні властивості закону дисперсії у оберненому просторі. Комірка Бриллюена.

Розділ 12. Граничні умови у динаміці кристалів.

Типи граничних умов для рівнянь малих коливань кристалу. Дискретність хвильових векторів частот вільних коливань, обумовлена граничними умовами. Спектральна густина кристалу. Модель Енштейна і модель Дебая для спектральної функції.

Розділ 13. Енергія малих коливань кристалічної ґратки.

Кінетична та потенціальна енергія атомів кристалічної структури. Загальний вираз для енергії кристалічної ґратки. Енергія вільних коливань кристалічної ґратки та її зв'язок з законом дисперсії коливальних віток. Квантування вільних коливань. Фонони.

Розділ 14. Вільні коливання одновимірних кристалів.

Хвильові стани, закон дисперсії та спектральна густина для періодичної атомної низки з однакових атомів. Коливання періодичної низки атомів двох сортів. Малі коливання кристалу Френкеля-Конторової. Спектральна густина для одновимірних кристалів.

Розділ 15. Основні поняття та положення континуальної механіки твердого тіла.

Механічні та термодинамічні характеристики елементів суцільного середовища. Тензор деформації. Тензор механічних напружень. Пружні деформації. Закон Гука, тензор модулів пружності. Модель ізотропного пружного середовища. Кінетична та потенціальна енергія пружного континууму.

Розділ 16. Вільні коливання пружного середовища.

Рівняння руху елементів пружного середовища. Вільні монохроматичні коливання пружного середовища, хвильові стани, закон дисперсії. Звукові хвилі в ізотропному наближенні: поперечний та поздовжній звук.

Розділ 17. Співвідношення між динамікою кристалічної ґратки і динамікою пружного континууму.

Довгохвильове наближення у рівнянні руху кристалічної ґратки, перехід від диференційно-різницевих рівнянь до рівнянь в частинних піхідних. Співвідношення між елементами силової матриці кристалу і модулями пружності суцільного середовища. Довгохвильова границя у випадку одновимірних кристалів.

Розділ 18. Динаміка в'язко-пружних матеріалів.

Найпростіші види непружної деформації реальних кристалів. Діаграми деформування непружних кристалів. Найпростіші реологічні моделі непружних матеріалів. Релаксаційні процеси у в'язко-пружних матеріалах. Вільні та вимушені коливання в'язко-пружного матеріалу. Комплексні модулі пружності. Внутрішнє тертя.

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”	9	3				6
Розділ 2. Рушійна сила процесу кристалізації	10	4				6
Розділ 3. Спонтанна кристалізація	11	3				8
Розділ 4. Теорія гомогенного зародження кристалів	10	4				6
Розділ 5. Швидкість утворення і росту центрів кристалізації	9	3				6
Розділ 6. Теорія гетерогенного зародження кристалів	4	2				2
Розділ 7. Міжатомна взаємодія в кристалах	8	2				6
Розділ 8. Зв'язок геометричних і енергетичних параметрів кристалу з параметрами парного потенціалу міжатомної взаємодії	9	3				6
Розділ 9. Силова матриця кристалу	8	2				6
Розділ 10. Рівняння малих коливань кристалічної ґратки	8	2				6
Розділ 11. Монохроматичні коливання кристалічної ґратки	10	2				8
Розділ 12. Граничні умови у динаміці кристалів	6	2				4
Розділ 13. Енергія малих коливань кристалічної ґратки	8	2				6
Розділ 14. Вільні коливання одновимірних кристалів	8	2				6
Розділ 15. Основні поняття та положення континуальної механіки твердого тіла	8	2				6
Розділ 16. Вільні коливання пружного середовища	8	2				6
Розділ 17. Співвідношення між динамікою кристалічної ґратки і динамікою пружного континууму	8	2				6

Розділ 18. Динаміка в'язко-пружних матеріалів	8	2			6
Усього годин	150	44			106

5. Завдання для самостійної роботи

№	З використанням літературних джерел із списку рекомендованої літератури проробка питань, поставлених викладачем на лекції з теми:	Кількість
1	Рівноважні стани системи „кристал-середовище кристалізації”	6
2	Рушійна сила процесу кристалізації	6
3	Спонтанна кристалізація	8
4	Теорія гомогенного зародження кристалів	6
5	Швидкість утворення і росту центрів кристалізації	6
6	Теорія гетерогенного зародження кристалів	2
7	Міжатомна взаємодія в кристалах	6
8	Зв'язок геометричних і енергетичних параметрів кристалу з парамет-	6
9	Силова матриця кристалу	6
10	Рівняння малих коливань кристалічної ґратки	6
11	Монохроматичні коливання кристалічної ґратки	8
12	Граничні умови у динаміці кристалів	4
13	Енергія малих коливань кристалічної ґратки	6
14	Вільні коливання одновимірних кристалів	6
15	Основні поняття та положення континуальної механіки твердого тіла	6
16	Вільні коливання пружного середовища	6
17	Співвідношення між динамікою кристалічної ґратки і динамікою пруж-	6
18	Динаміка в'язко-пружних матеріалів	6
	Разом	106

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 и 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. Орієнтована (епітаксialьна) кристалізація. Оптимальні умови для її реалізації.
20. Сили притягання та відштовхування між атомами, їх фізична природа. Основні властивості потенціалів міжатомної взаємодії в кристалах. Емпіричні потенціали, потенціал Ленарда-Джонса і фізичний зміст його параметрів.
21. Розрахунок потенціальної енергії гранецентрованого кубічного кристалу з використанням потенціалу Ленарда-Джонса. Розрахунок рівноважних значень параметру ґратки, енергії сублімації, модуля всебічного стиснення.
22. Сили, що виникають при відхиленнях атомів кристалічної структури від їх рівноважних положень, силова матриця та її властивості. Розрахунок елементів силової матриці для ГЦК ґратки з використанням потенціалу Ленарда-Джонса.
23. Рівняння руху для простих і складних кристалічних решіток. Одновимірні моделі кристалів і їх рівняння руху: одновимірна періодична низка атомів, звичайна та узагальнена модель Френкеля-Конторової.
24. Розповсюдження в кристалі монохроматичної плоскої хвилі зміщень. Закон дисперсії вільних гармонічних коливань простих та складних кристалічних структур, акустичні та оптичні коливання. Обернений простір та обернена ґратка вузлів. Основні властивості закону дисперсії у оберненому просторі. Комірка Бриллюена.
25. Типи граничних умов для рівнянь малих коливань кристалу. Дискретність хвильових векторів частот вільних коливань, обумовлена граничними умовами. Спектральна густина кристалу. Модель Енштейна і модель Дебая для спектральної функції.
26. Кінетична та потенціальна енергія атомів кристалічної структури. Загальний вираз для енергії кристалічної ґратки. Енергія вільних коливань кристалічної ґратки та її зв'язок з законом дисперсії коливальних віток. Квантування вільних коливань. Фонони.
27. Хвильові стани, закон дисперсії та спектральна густина для періодичної атомної низки з однакових атомів. Коливання періодичної низки атомів двох сортів. Малі коливання кристалу Френкеля-Конторової. Спектральна густина для одновимірних кристалів.
28. Механічні та термодинамічні характеристики елементів суцільного середовища. Тензор деформації. Тензор механічних напружень. Пружні деформації. Закон Гука, тензор модулів пружності. Модель ізотропного пружного середовища. Кінетична та потенціальна енергія пружного континууму.
29. Рівняння руху елементів пружного середовища. Вільні монохроматичні коливання пружного середовища, хвильові стани, закон дисперсії. Звукові хвилі в ізотропному наближенні: поперечний та поздовжній звук.
30. Довгохвильове наближення у рівнянні руху кристалічної ґратки, перехід від диференційно-різницевого рівняння до рівнянь в частинних піхідних. Співвідношення між елементами силової матриці кристалу і модулями пружності суцільного середовища. Довгохвильова границя у випадку одновимірних кристалів.
31. Найпростіші види непружної деформації реальних кристалів. Діаграми деформування непружних кристалів. Найпростіші реологічні моделі непружних матеріалів. Релаксаційні процеси у в'язко-пружних матеріалах. Вільні та вимушені коливання в'язко-пружного матеріалу. Комплексні модулі пружності. Внутрішнє тертя.

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 $\alpha_{\text{кр}}=0,13 \text{ Дж}\cdot\text{м}^{-2}$; теплота плавлення золота $H_{\text{пл}}=3,2\cdot 10^{-20} \text{ Дж}$; температура плавлення 1336К .

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 $\Delta'=(\Delta p/p_0)'$, 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 $1\times 1\times 1 \text{ мм}^3$? Теплота плавлення речовини розплаву $0,2 \text{ еВ}$, питома поверхнева енергія $0,15 \text{ Дж/м}^2$, розмір молекул 5 \AA .

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 $T = 1083^\circ\text{C}$. 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 $\approx 0,11\text{ Дж}\cdot\text{м}^{-2}$.

8. Схема нарахування балів

Поточний контроль, самостійна робота			Залік	Сума
Поточне тестування за темами	Поточне тестування за темами	Разом		
T1-T10	T11-T18			
30	24	54	46	100

T1, T2 ... – теми розділів.

Поточне тестування з кожної теми складається з 3-х завдань. Відповідь на кожне завдання оцінюється в 1 бал.

Питання на заліку містить два пункти: 1 теоретичне питання і 1 задачу. Відповідь на 1-й пункт оцінюється в 20 балів, правильній розв'язок задачі – 24 бали.

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. W. C. Winegard, An introduction to the solidification of metals, John Wiley & Sons 1964
2. Богданов В. В. Основи теорії росту кристалів. – Вид. ХНУ ім. В.Н.Каразіна. – 2010.
3. A. Kelly, G. W. Groves, P. Kidd, Crystallography and Crystal Defects, , 2000
4. R. Laudise, R. Parker, Growth of Single Crystals, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, (1970)
5. А.М. Косевич. Фізична механіка реальних кристалів. Київ, Наукова думка. - 1981.

6. H. L. Bhat, Introduction to Crystal Growth: Principles and Practice, CRC Press, 2016
7. P. Hartman, Crystal Growth: An Introduction, North-Holland Publishing Company, 1973
8. Ch. Kittel, Introduction to Solid State Physics, Wiley, 1996.
9. A. M. Kosevich, The Crystal Lattice: Phonons, Solitons, Dislocations, Superlattices, John Wiley & Sons, 2006.
10. M. T. Dove, Introduction to Lattice Dynamics, Cambridge University Press, 1993

Допоміжна література

1. A. R. Verma, Crystal Growth and Dislocations, Butterworth's Scientific Publications, 1953
2. Strickland-Constable, R.F., Kinetics and Mechanism of Crystallisation, Academic Press, London, 1968
3. Chernov A. A., Advances in Physical Sciences, **23**, №2, 1961.
4. Chrystian J. Theory of transformations in metals and alloys. 1 Thermodynamics and general kinetic theory.– Oxford University Pre, 1978.
5. K. Sangwal, Etching of Crystals: Theory, Experiment and Application, Elsevier, 2012
6. Handbook of Crystal Growth. Edited by D.T.J Hurle. Nortn-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).
7. A. K. Ghatak, Ajoy K. Ghatak, L. S. Kothari, An Introduction to Lattice Dynamics, Addison-Wesley, 1972
8. H. Böttger, Principles of the Theory of Lattice Dynamics, Physik-Verlag, 1983.
9. J. R. Hardy, The Lattice Dynamics and Statics of Alkali Halide Crystals, Springer Science & Business Media, 2012
10. A. A. Maradudin, Lattice Dynamics, Benjamin, 1969