

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

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

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

“ _____ ” _____ 2020 р.

Робоча програма навчальної дисципліни

Спецкурс «Закономірності формування кристалічних структур і основи динамічної теорії 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** _____

2020/2021 навчальний рік

Програму рекомендовано до затвердження Вченою радою фізичного факультету

21 червня 2020 року, протокол № 6

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

Програму схвалено на засіданні кафедри фізики кристалів

Протокол № 7 від 20 червня 2020 року

Завідувач кафедри Гриньов Б. В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Програму погоджено методичною комісією фізичного факультету

Протокол № 6 від 20 червня 2020 року

Голова методичної комісії

(підпис)

(прізвище та ініціали)

ВСТУП

Програма навчальної дисципліни “**Закономірності формування кристалічних структур і основи динамічної теорії кристалів**” складена відповідно до освітньо-професійної програми підготовки

_____ перший (бакалавр)_____

(назва рівня вищої освіти)

спеціальності (напрямку) _____ 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

1.3. Кількість кредитів – 4

1.4. Загальна кількість годин – 120

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	
56 год.	год.
Індивідуальні завдання	

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.

Форма контролю – екзамен

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 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.

Орієнтована (епітаксильна) 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		пл	ін.	с.р.		
1	2	3	4	5	6	7
Розділ 1. Рівноважні стани системи „кристал-середовище кристалізації”	6	3				3
Розділ 2. Рушійна сила процесу кристалізації	7	4				3
Розділ 3. Спонтанна кристалізація	7	3				4
Розділ 4. Теорія гомогенного зародження кристалів	7	4				3
Розділ 5. Швидкість утворення і росту центрів кристалізації	6	3				3
Розділ 6. Теорія гетерогенного зародження кристалів	6	4				2
Розділ 7. Міжатомна взаємодія в кристалах	7	4				3
Розділ 8. Зв'язок геометричних і енергетичних параметрів кристалу з параметрами парного потенціалу міжатомної взаємодії	6	3				3
Розділ 9. Силова матриця кристалу	7	4				3
Розділ 10. Рівняння малих коливань кристалічної ґратки	6	3				3
Розділ 11. Монохроматичні коливання кристалічної ґратки	7	3				4
Розділ 12. Граничні умови у динаміці кристалів	6	4				2
Розділ 13. Енергія малих коливань кристалічної ґратки	7	3				4
Розділ 14. Вільні коливання одновимірних кристалів	7	3				4
Розділ 15. Основні поняття та положення континуальної механіки твердого тіла	7	4				3
Розділ 16. Вільні коливання пружного середовища	7	4				3
Розділ 17. Співвідношення між динамікою кристалічної ґратки і динамікою пружного континууму	7	4				3
Розділ 18. Динаміка в'язко-пружних матеріалів	7	4				3
Усього годин	120	64				56

4. Темі семінарських (практичних, лабораторних) занять

з	Назва теми	Кількість годин
1		

2		
	Разом	

5. Завдання для самостійної роботи

з /	З використанням літературних джерел із списку рекомендованої літератури проробка питань, поставлених викладачем на лекції з теми:	Кількість
1	Рівноважні стани системи „кристал-середовище кристалізації”	3
2	Рушійна сила процесу кристалізації	3
3	Спонтанна кристалізація	4
4	Теорія гомогенного зародження кристалів	3
5	Швидкість утворення і росту центрів кристалізації	3
6	Теорія гетерогенного зародження кристалів	2
7	Міжатомна взаємодія в кристалах	3
8	Зв'язок геометричних і енергетичних параметрів кристалу з	3
9	Силова матриця кристалу	3
10	Рівняння малих коливань кристалічної ґратки	3
11	Монохроматичні коливання кристалічної ґратки	4
12	Граничні умови у динаміці кристалів	2
13	Енергія малих коливань кристалічної ґратки	4
14	Вільні коливання одновимірних кристалів	4
15	Основні поняття та положення континуальної механіки твердого тіла	3
16	Вільні коливання пружного середовища	3
17	жного континууму	3
18	Динаміка в'язко-пружних матеріалів	3
	Разом	56

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 (епітаксиальна) 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-різницевих рівнянь 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 $T = 1083 \text{ }^\circ\text{C}$. 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 енергія 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. Элементарные процессы роста кристаллов (под ред. А. А. Чернова).– М.: ИЛ, 1959.
2. Хонигман Б. Рост и форма кристаллов.– М.: ИЛ, 1961.
3. Вайнгард У. Введение в физику кристаллизации металлов.– М.: Мир, 1967.
4. Келли А., Гровс Г. Кристаллография и дефекты в кристаллах.– М.: Мир, 1974.
5. Палатник Л. С., Папилов И. И. Ориентированная кристаллизация.– М.: Металлургия, 1964.
6. Палатник Л. С., Папилов И. И. Эпитаксиальные пленки.– М.: Наука, 1971.

7. Козлова О. Г. Рост и морфология кристаллов.– М.: Изд. МГУ, 1973.
8. Лодиз Р., Паркер Р. Рост монокристаллов.– М.: Мир, 1974.
9. Современная кристаллография (в четырех томах). Т. 3, Образование кристаллов.– М.: Наука, 1980.
10. Богданов В. В. Основи теорії росту кристалів. – Вид. ХНУ ім. В.Н.Каразіна. – 2010.
11. Ч. Киттель. Введение в физику твердого тела., М., Наука-1978.
12. А.М. Косевич. Физическая механика реальных кристаллов. Киев, Наукова думка. - 1981.

Допоміжна література

1. Варма А. Рост кристаллов и дислокации.– М.: ИЛ, 1958.
2. Теория и практика выращивания кристаллов. Пер. с англ.– М.: Металлургия, 1968.
3. Чернов А. А., УФН, **23**, №2, 1961.
4. Лейтвейн Ф., Зоммер-Кулачевски Ш. Кристаллография.– М.: Высшая школа, 1968.
5. Стрикленд-Констебл Р. Ф. Кинетика и механизм кристаллизации.– Ленинград: Недра, 1971.
6. Любов Б. Я. Теория кристаллизации в больших объемах.– М.: Наука, 1975. Пфанн В. Дж. Зонная плавка.– М.: Мир, 1970.
7. Кристиан Дж. Теория превращений в металлах и сплавах. Часть 1 Термодинамика и общая кинетическая теория.– М.: Мир, 1978.
8. Сангвал К. Травление кристаллов: Теория, эксперимент, применение: Пер. с англ.– М.: Мир, 1990.– 492 с.
9. Handbook of Crystal Growth. Edited by D.T.J Hurlе. 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).
10. А.М.Косевич. Теория кристаллической решетки. Харьков, Вища школа – 1988.
11. В.С.Постников. Физика и химия твердого состояния. М., Металлургия-1978.