

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
Інститут монокристалів

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор,
Ін-кор. НАН України



Ігор ПРИТУЛА

26.09.2023р.

ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ
НАУКОВІ ОСНОВИ ВИРОЩУВАННЯ МОНОКРИСТАЛІВ
132 Матеріалознавство

Затверджено Вченою радою Інституту монокристалів
Національної академії наук України
(протокол №9 від 26.09.2023 р.)

РОЗРОБНИК ПРОГРАМИ:

Вовк О.М., кандидат хімічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник Інституту монокристалів Національної академії наук України

Харків-2023

ВСТУП

Робоча програма навчальної дисципліни “Наукові основи технологій вирощування монокристалів” складена відповідно до освітньої-наукової програми підготовки доктора філософії за спеціальності 132 Матеріалознавство.

Пререквізити навчальної дисципліни: 1) володіння концептуальними та методологічними знаннями в галузі фізико-хімічних наук, зокрема, основними поняттями матеріалознавства, 2) володіння базовими знаннями про властивості монокристалічних матеріалів, що використовуються у науці та техніці; 3) вміння оцінювати стан вивченості об’єкта досліджень і актуальності наукової проблеми з використанням сучасних інформаційних джерел національного та міжнародного рівня, 4) мати навички проведення досліджень з матеріалознавства на сучасному експериментальному та технологічному обладнанні.

Постреквізити: в результаті вивчення дисципліни будуть отримані наступні знання і навички: 1) основи теорії вирощування монокристалів, 2) фізико-хімічні та технологічні основи технологій вирощування монокристалів (сапфіру, гранату, боратів, халькогенідів, нелінійно-оптичних сегнетоелектриків тощо), 3) особливості структурної будови монокристалічних матеріалів, 4) вплив умов кристалізації на фізичні та хімічні властивості кристалів, 5) застосування сучасних методів дослідження властивостей, 6) практичні навички роботи з вирощування певних типів монокристалів.

Отриманні знання і навички будуть використовуватись при виконанні дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії, а також при самостійній розробці стратегії вирощування кристалів заданого складу і якості.

1. Опис навчальної дисципліни

1.1. Мета викладання навчальної дисципліни

Знайомство аспірантів, що спеціалізуються галузі матеріалознавства, з фундаментальними явищами, що лежать в основі росту кристалів, та науковими основами технології вирощування монокристалів.

1.2. Основні завдання вивчення дисципліни

Знайомство з основами теорії росту монокристалів, структурними особливостями та властивостями кристалів, фізико-хімічними та технологічними основами методів вирощування монокристалів, після ростовими методами управління властивостями кристалів, впливу умов кристалізації на фізичні та хімічні властивості кристалів, основними галузями застосування кристалів. А також одержання практичних навичок роботи з вирощування певних типів монокристалів.

1.3. Кількість кредитів –12

1.4. Загальна кількість годин – 360

1.5. Характеристика навчальної дисципліни:

Вибіркова

Денна форма навчання

Рік підготовки - 2-й

Семестр - 3-4

Лекції - 80 год.

Практичні заняття - 40 год

Самостійна робота - 240 год

1.6. Заплановані результати навчання

Згідно з вимогами освітньої-наукової програми аспіранти повинні досягти таких результатів навчання:

РН1. Проявляти наукові погляди та підходи при проведенні експертного аналізу наукових даних, оцінювати вплив технологічних факторів на властивості матеріалів.

РН2. Володіти концептуальними та методологічними знаннями в галузі матеріалознавства та бути здатним застосовувати їх до професійної діяльності на межі предметних галузей.

РН3. Інтегрувати існуючі методики та методи досліджень та адаптувати їх для розв'язання наукових завдань при проведенні дисертаційних досліджень.

РН5. Визначити закономірності та особливості поведінки матеріальних об'єктів.

РН7. Визначатись з факторами та критеріями, які необхідно враховувати при оцінці наслідків розвитку виробництва на стан довкілля.

РН8. Спланувати та реалізувати на практиці оригінальне самостійне наукове дослідження, яке має суттєву новизну, теоретичну і практичну цінність та сприяє розв'язанню соціальних, наукових та інших проблем.

РН9. Проводити на регіональному рівні оцінку та облік технічних ризиків, що можуть погіршувати стан довкілля.

РН11. Використовувати сучасні інформаційні джерела національного та міжнародного рівня для оцінки стану вивченості об'єкту досліджень і актуальності наукової проблеми.

РН12. Демонструвати навички роботи з сучасним обладнанням при проведенні експериментальних досліджень.

РН16. Описувати результати наукових досліджень у фахових публікаціях у вітчизняних та закордонних спеціалізованих виданнях, в тому числі, у внесених до наукометричних баз Scopus, Web of Science або їм аналогічних.

РН18. Дотримуватись етичних норм, враховувати авторське право та норми академічної доброчесності при проведенні наукових досліджень, презентації їх результатів та у науково-педагогічній діяльності.

РН19. Знайти оригінальне рішення, направлене на розв'язання конкретної науково-технічної проблеми.

2. Тематичний план навчальної дисципліни

Розділ 1. Вступ до курсу

Тема 1. Вступ до курсу «Наукові основи технологій вирощування монокристалів». Визначення поняття монокристалу. Історичний нарис розвитку методів вирощування

монокристалів. Еволюція теорій росту кристалів. Загальні принципи одержання монокристалів. Загальний огляд методів одержання монокристалів.

Розділ 2. Будова кристалів. Основи кристалографії

Тема 2. Кристали та кристалічні структури. Природа кристалічного стану. Побудова кристалів із щільно упакованих гексагональних шарів атомів. Елементарні комірки структур гранецентрована кубічна (ГЦК) та гексагональна щільноупакована (ГЦУ). Помилки укладання та двійники. Зображення кристалів у вигляді координатних багатогранників.

Тема 3. Кристалічні ґратки та симетрія. Двовимірні ґратки. Підходи до вивчення кристалічних структур. Ґратки Браве та кристалічні системи. Симетрія кристала: точкові групи, просторові групи, симетрійні властивості та квазіперіодичні кристали. Симетрія та габітус кристалів. Центри та інверсійні осі симетрії

Тема 4. Опис площин та напрямків решітки в кристалах: індекси Міллера та символи осей зон. Зони, осі зон і закон зон, правило додавання. Зворотна решітка. Стереографічна проекція. Побудова стереографічної проекції кристалів. Застосування стереографічної проекції. Відображення симетрії точкової групи, співвідношення орієнтації.

Тема 5. Дифракція рентгенівських променів. Інтенсивності дифрагованих рентгенівських променів: рівняння структурного фактора та його застосування. Рівняння Шеррера: взаємні точки та вузли решітки. Рентгенівські методи: метод Лауе, осциляційний, ротаційний та прецесійний методи. Дифракція рентгенівських променів (і нейтронів) на впорядкованих кристалах. Рентгенівська дифракція полікристалічних матеріалів. Точні вимірювання параметрів решітки. Ідентифікація невідомих фаз.

Тема 6. Дифракція електронів. Конструкція сфери Евальда для дифракції електронів. Аналіз електронограм. Застосування дифракції електронів.

Розділ 3. Будова розплавів

Тема 7. Розплави. В'язкість розплавів. Порівняння кристалічних і розплавових структур. Радіальна функція розподілу і локальні атомні густини. Будова розплавів. Координація атомів у розплавах. Зв'язки в рідинах. Вплив температури на радіальну функцію розподілу. Теорії плавлення і рідкого стану.

Розділ 4. Основи термодинаміки

Тема 8. Основи термодинаміки. Рівняння Гіббса -Дюгема. Ентальпія: теплообмін і робота при перетвореннях тверде тіло в рідину. Співіснування твердих тіл і розплавів. Критична точка твердого розплаву. Термічне переохолодження та метастабільність. Зміни вільної енергії під час замерзання та плавлення.

Тема 9. Термодинамічна рівновага. Геометричне зображення фазової рівноваги. Р-Т фазова діаграма. Фазові процеси. Поліморфізм і метастабільні стани. Подвійні системи. Типи Р-Т-Х фазових діаграм подвійних систем. Метастабільні стани у фазовому просторі Р-Т-Х. Експериментальні методи дослідження фазової рівноваги Р-Т-Х.

Розділ 5. Теоретичні аспекти росту кристалів

Тема 10. Термічні концепції при кристалізації. Близька до рівноваги кристалізація. Енергетичний баланс в системі, що затвердіває. Енергетичні баланси на межі розділу

кристал-розплав. Енергетичний баланс інтерфейсу – задача Стефана. Закон теплопровідності Фур'є. Закон охолодження Ньютона: коефіцієнти теплопередачі.

Тема 11. Затвердіння чистих речовин. Квазістатична теорія. Аналіз рухомих меж.

Тема 12. Баланс маси розчинених речовин: макросегрегація. Локальна та глобальна міжфазна рівновага. Відторгнення розчиненої речовини на межі розділу тверде тіло–рідина. Теорія макросегрегації Гуллівера–Шейля. Макросегрегація з твердотільною дифузією. Модель Броді–Флемінгса для розподілу розчинених речовин. Криві сегрегації бінарних сплавів.

Тема 13. Затвердіння на плоскому фронті. Приграничні шари розчиненої речовини. Перехідна макросегрегація. Контроль складу. Конвекція в затвердіваючих розплавах. Ефективні коефіцієнти розподілу.

Тема 14. Інтерфейси кристал-розплав. Капілярність. Планарні та вигнуті інтерфейси. Ефект Гіббса-Томсона. Конституційне переохолодження. Міжфазна нестійкість в монокристалах і в полікристалах. Стабільні інтерфейси. Нестабільні інтерфейси. Масовий ріст кристалів: обмеження форм для стабільності.

Тема 15. Лінійна морфологічна стійкість. Плоско-фронтальне затвердіння в стаціонарному стані. Критерії стабільності. Загальний аналіз стабільності. Нелінійні моделі стійкості. Обмеження лінійної стабільності. Абсолютна стійкість у нелінійному режимі.

Тема 16. Нуклеаційний каталіз. Флуктуація-Дисипація. Гетерогенна рівновага. Гомогенне зародження. Гетерогенне зародження.

Тема 17. Ріст дендритів. Теорія дендритного росту. Дендритні приграничні шари. Дендритна капілярність. Гіпотеза граничної стабільності.

Тема 18. Структура інтерфейсу та кінетика росту. Фасетні інтерфейси і безгранні інтерфейси. Кінетичні теорії дворівневої моделі інтерфейсу.

Тема 19. Багатофазне затвердіння. Евтектика. Теорія евтектики Ханта–Джексона. Евтектичні мікроструктури. Розрахунок евтектичних мікроструктур. Направлене затвердіння поліфазних сплавів.

Тема 20. Швидке затвердіння. Нерівноважні фазові діаграми. Гіперохолодження. Термодинамічні межі. Захоплення розчинених речовин.

Розділ 6. Характеризація кристалів

Тема 21. Дефекти кристалів. Нульвимірні дефекти. Одновимірні дефекти. Двовимірні дефекти (площинні дефекти): межі зерен, стекування, протифазні границі, двійники, границі доменів. Поверхня кристалів. Тривимірні дефекти: включення, вторинні фази, пори.

Тема 22. Якість кристалів. Критерії якості кристалів. Якість кристалів і їх застосування.

Тема 23. Обрані методи характеризації кристалів. Травлення кристалів. Рентгенівська топографія. Скануюча електронна мікроскопія. Трансмісійна електронна мікроскопія.

Розділ 7. Наукові основи технологій вирощування кристалів

Тема 24. Огляд і класифікація основних методів вирощування кристалів. Контейнерні та безконтейнерні методи. Статичні та динамічні методи.

Тема 25. Методи очистки сировини. Методи сепарації порошків. Масова кристалізація і перекристалізація. Фізико-хімічні методи оцінки якості сировини.

Тема 26. Метод Вернейля. Структурні дефекти, характерні для метода

Тема 27. Метод Чохральського. Інверсія фронту кристалізації. Кристалізація в магнітному полі. Вирощування під флюсом.

Тема 28. Методи Обреїмова-Шубнікова, Стокбаргера, Бріджмена.

Тема 29. Метод Пфанна (зонне вирощування). ГСК. Метод Штебера, НЕМ-метод. Метод вирощування із гарнісажу.

Тема 30. Ріст кристалів у плаваючій зоні.

Тема 31. Метод Кіропулоса. Інверсія фронту кристалізації. Підживлення розплаву.

Тема 32. Метод Степанова. Капілярні та некапілярні методи вирощування профільованих кристалів. Структура профільованих кристалів. MPD-метод .

Тема 33. Вирощування кристалів з високотемпературних розчинів (вирощування з флюсу).

Тема 34. Вирощування кристалів з низькотемпературних розчинів (водних розчинів).

Тема 35. Гідротермічний і амонійнотермічний метод вирощування кристалів.

Тема 36. Вирощування масивних кристалів із газової фази.

Тема 37. Методи епітаксiального росту. Рідкофазна епітаксія (LPE). Парофазова епітаксія (VPE).

Тема 38. Порівняльна оцінка можливостей методів вирощування кристалів. Критерії вибору методу для вирощування заданого кристалу. Тенденції розвитку методів вирощування кристалів.

Розділ 8. Покращення властивостей кристалів

Тема 39. Методи відпалу кристалів. Вплив середовища відпалу на властивості кристалів. Відпал для зняття напруги. Вплив відпалу на щільність структурних дефектів в кристалах. Поводження домішків при відпалі.

Розділ 9. Моделювання процесів росту кристалів

Тема 40. Конвекція та контроль потоків у розплаві при рості кристалів. Тепло і масо перенос в системах Бріджмена-Стокбаргера та Степанова.

3. Структура навчальної дисципліни

Розділи і теми	Кількість годин			
	усього	у тому числі		
		лекції	практика	самостійна робота
1	2	3	4	5
Розділ 1				

Тема 1.		2		4
<i>Разом за розділом 1</i>	<i>6</i>	<i>2</i>		<i>4</i>
Розділ 2				
Тема 2.		2		4
Тема 3		4		6
Тема 4.		2		6
Тема 5.		2		6
Тема 6.		2		4
<i>Разом за розділом 2</i>	<i>38</i>	<i>12</i>		<i>26</i>
Розділ 3				
Тема 7.		2		6
<i>Разом за розділом 3</i>	<i>8</i>	<i>2</i>		<i>6</i>
Розділ 4				
Тема 8.		2		4
Тема 9		2		6
<i>Разом за розділом 4</i>	<i>14</i>	<i>4</i>		<i>10</i>
Розділ 5				
Тема 10.		2		4
Тема 11.		2		4
Тема 12.		2		6
1	2	3	4	5
Тема 13.		2		5
Тема 14.		2		5
Тема 15.		2		5
Тема 16.		2		5
Тема 17.		2		4
Тема 18.		2		6
Тема 19.		2		6
Тема 20.		2		4
<i>Разом за розділом 5</i>	<i>74</i>	<i>20</i>		<i>54</i>
<i>Залік</i>	<i>10</i>			<i>10</i>
Розділ 6				
Тема 21		2		6
Тема 22.		2		3
Тема 23.		2		6
<i>Разом за розділом 6</i>	<i>21</i>	<i>6</i>		<i>15</i>
Розділ 7				
Тема 24.		2		4
Тема 25.		2		6
Тема 26.		2		2
Тема 27.		2	10	6
Тема 28.		2	10	6
Тема 29.		3	10	4

Тема 30.		2		4
Тема 31.		2		6
Тема 32.		3	10	6
Тема 33.		2		8
Тема 34.		2		6
Тема 35.		2		6
Тема 36.		2		4
Тема 37.		1		3
Тема 38.		1		4
<i>Разом за розділом 7</i>	<i>145</i>	<i>30</i>	<i>40</i>	<i>75</i>
Розділ 8				
Тема 39.		2		3
<i>Разом за розділом 8</i>	<i>5</i>	<i>2</i>		<i>3</i>
Розділ 9				
Тема 40.		2		7
<i>Разом за розділом 9</i>	<i>9</i>	<i>2</i>		<i>7</i>
<i>Екзамен</i>	<i>30</i>			<i>30</i>
Усього годин	360	80	40	240

4. Теми практичних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Вирощування кристалу методом горизонтальної спрямованої кристалізації (ГСК)	10
2	Вирощування кристалу методом Степанова	10
3	Вирощування кристалу методом Чохральського	10
4	Вирощування кристалу методом Бріджмена -Стокбаргера	10
	Разом	40

5. Завдання для самостійної роботи

№ з/п	Види, зміст самостійної роботи	Кількість годин
1	2	3
1	Тема 1. Загальні принципи одержання монокристалів. Огляд методів одержання монокристалів.	6
2	Тема 2. Кристали та кристалічні структури. Природа кристалічного стану. Елементарні комірки структур.	8
3	Тема 3. Кристалічні ґратки та симетрія. Ґратки Браве та кристалічні системи.	10
4	Тема 4. . Опис площин та напрямків решітки в кристалах. Стереографічна проекція.	10

5	Тема 5. Дифракція рентгенівських променів. Рентгенівські методи. Ідентифікація невідомих фаз.	10
6	Тема 6. Дифракція електронів та її застосування. Аналіз електроннограм.	10
7	Тема 7 Розплави. В'язкість розплавів. Порівняння кристалічних і розплавових структур. Радіальна функція розподілу і локальні атомні густини.	10
8	Тема 8. Рівняння Гіббса -Дюгема. Ентальпія: теплообмін і робота при перетвореннях тверде тіло в рідину. Співіснування твердих тіл і розплавів.	10
9	Тема 9. Термодинамічна рівновага. Р-Т-Х фазові діаграми.	8
10	Тема 10. Термічні концепції при кристалізації. Близька до рівноваги кристалізація.	8
11	Тема 11. Затвердіння чистих речовин. Квазістатична теорія.	10
12	Тема 12. Баланс маси розчинених речовин: макросегрегація. Теорії макросегрегації.	10
13	Тема 13. Затвердіння на плоскому фронті.	10
14	Тема 14. Інтерфейси кристал-розплав. Капілярність.	10
15	Тема 15. Морфологічна стійкість.	10
16	Тема 16. Нуклеаційний каталіз. Гомогенне зародження. Гетерогенне зародження.	10
1	2	3
17	Тема 17. Ріст дендритів. Теорія дендритного росту.	10
18	Тема 18. Структура інтерфейсу та кінетика росту.	4
19	Тема 19. Багатофазне затвердіння. Евтектика. Теорія евтектики Ханта–Джексона	4
20	Підготовка до заліку	
21	Тема 20. Швидке затвердіння. Нерівноважні фазові діаграми.	4
22	Тема 21. Дефекти кристалів.	8
23	Тема 22. Якість кристалів. Критерії якості кристалів.	8
24	Тема 23. Обрані методи характеристики кристалів.	8
25	Тема 24. Огляд і класифікація основних методів вирощування кристалів.	8
26	Тема 25. Методи очистки сировини.	
27	Тема 26. Метод Вернейля	
28	Тема 27. Метод Чохральського.	
29	Тема 28. Методи Обреїмова-Шубнікова, Стокбаргера, Бріджмена.	
30	Тема 29. Метод Пфанна (зонне вирощування). ГСК. Метод Штебера, НЕМ-метод. Метод вирощування із гарнісажу.	
31	Тема 30. Ріст кристалів у плаваючій зоні.	
32	Тема 31. Метод Кіропулоса.	
33	Тема 32. Метод Степанова. MPD-метод	

34	Тема 33. Вирощування кристалів з високотемпературних розчинів (вирощування з флюсу).	
35	Тема 34. Вирощування кристалів з низькотемпературних розчинів (водних розчинів).	
36	Тема 35. Гідротермічний і амонійнотермічний метод вирощування кристалів.	
37	Тема 36. Вирощування масивних кристалів із газової фази.	
38	Тема 37. Методи епітаксialного росту.	
39	Тема 38. Порівняльна оцінка можливостей методів вирощування кристалів. Тенденції розвитку методів вирощування кристалів.	
40	Тема 39. Методи відпалу кристалів.	
41	Тема 40. Конвекція та контроль потоків у розплаві при рості кристалів.	
42	Підготовка до заліку та екзамену	36
	Разом	240

6. Методи контролю

Засвоєння матеріалу по дисципліні забезпечується циклом лекцій, проведенням практичних занять, а також самостійною роботою. Форма звітності – залік та екзамен.

7. Схема нарахування балів

Поточний контроль, практичні заняття, самостійна робота								Екзамен	Сума
Розділи 1-2	Розділ 3	Розділ 4	Розділ 5	Розділ 6	Розділ 7	Розділи 8-9	Разом		
T1-T6	T7	T8-T9	T10-T20	T21-T23	T24-T38	T39-T40			
4	4	4	8	4	32	4	60	40	100

8. Шкала оцінювання

Сума балів за всі види навчальної діяльності	Оцінка	
	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: навчальний посібник / Харків: ХНУ ім. Каразіна, 2010. – 313 с.
2. Добровинская Е.Р. Энциклопедия сапфира / Х.:Институт монокристаллов,2004.–508 с.
3. Кристаллические материалы для оптики и электроники /Под ред.В.М.Пузикова, Х.: Ин-т монокристаллов,2012.– 544 с.
4. Пузиков В.М. Монокристаллы KDP\DKDP для мощных лазеров / Х.: Ин-т монокристаллов,2004.– 336 с.
5. Чугай О.Н. Модификация физических свойств кристаллов А2 В6 самоупорядочением дефектой структуры / Х.: ИСМА.,2008.– 276 с.
6. Benz, Klaus-Werner, i Wolfgang Neumann. 2014. «Introduction to Crystal Growth and Characterization».
7. Dhanaraj, Govindhan, Kullaiah Byrappa, Vishwanath Prasad, i Michael Dudley, ред. 2010. *Springer Handbook of Crystal Growth*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74761-1>.
8. Feigelson, Robert S. 2015. «Crystal Growth through the Ages». В *Handbook of Crystal Growth*, 1–83. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-56369-9.00001-0>.
9. Glicksman, Martin Eden. 2011. *Principles of Solidification*. New York, NY: Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7344-3>.
10. Greenberg, Jacob H. 2002. *Thermodynamic Basis of Crystal Growth*. Вип. 44. Springer Series in Materials Science. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04876-4>.
11. Hammond, Christopher. 2009. *The Basics of Crystallography and Diffraction*. 3rd ed. International Union of Crystallography Texts on Crystallography 12. Oxford: Oxford University Press.

Допоміжна література

12. E.Dobrovinskaya, L.Lytvynov, V.Pischik. Sapphire. Material, Manufacturing, Applications. Publisher “Springer”.2009,481 p.
13. Single Crystals of Electronic Materials, Edited by Roberto Fornary, WOODHEAD publisher ELSEVIER, Sept 2018, 583 p.
14. Физика сцинтилляторов. Материалы, методы, аппаратура – Харьков: “ИСМА”, 2015. 270с.
15. Н.З.Галунов, О.А.Тарасенко. Формирование треков ионизирующих излучений в органических конденсированных средах. Харьков. ИСМА. 2011.180с.

10. Питання до заліку/екзамену

1. Кристали та кристалічні структури. Природа кристалічного стану.
2. Кристалічні ґратки та симетрія. Симетрія та габітус кристалів.
3. Опис площин та напрямків решітки в кристалах.
4. Стереографічна проекція. Побудова стереографічної проекції кристалів
5. Дифракція рентгенівських променів. Інтенсивності дифрагованих рентгенівських променів. Рентгенівські методи.
6. Дифракція електронів та її застосування.

7. Розплави. В'язкість розплавів. Порівняння кристалічних і розплавових структур. Координація атомів у розплавах.
8. Рівняння Гіббса -Дюгема. Ентальпія: теплообмін і робота при перетвореннях тверде тіло в рідину.
9. Співіснування твердих тіл і розплавів. Критична точка твердого розплаву. Термічне переохолодження та метастабільність.
10. Термодинамічна рівновага. Геометричне зображення фазової рівноваги. Р-Т фазова діаграма.
11. Типи Р-Т-Х фазових діаграм подвійних систем. Метастабільні стани у фазовому просторі Р-Т-Х. Експериментальні методи дослідження фазової рівноваги Р-Т-х.
12. Термічні концепції при кристалізації.
13. Затвердіння чистих речовин.
14. Затвердіння розчинів. Відторгнення розчиненої речовини на межі розділу тверде тіло—рідина.
15. Затвердіння на плоскому фронті. Приграничні шари розчиненої речовини.
16. Інтерфейси кристал-розплав. Планарні та вигнуті інтерфейси.
17. Лінійна морфологічна стійкість. Критерії стабільності.
18. Нелінійні моделі стійкості. Абсолютна стійкість у нелінійному режимі.
19. Нуклеаційний каталіз. Гетерогенна рівновага. Гетерогенне зародження.
20. Флуктуація-Дисипація. Гомогенне зародження.
21. Ріст дендритів. Теорія дендритного росту.
22. Структура інтерфейсу та кінетика росту. Фасетні інтерфейси і безгранні інтерфейси.
23. Багатофазне затвердіння. Евтектика. Теорія евтектики Ханта–Джексона.
24. Швидке затвердіння. Нерівноважні фазові діаграми.
25. Дефекти кристалів.
26. Якість кристалів. Критерії якості кристалів.
27. Методи характеристики кристалів.
28. Класифікація основних методів вирощування кристалів
29. Методи очистки сировини. Фізико-хімічні методи оцінки якості сировини.
30. Метод Вернейля.
31. Метод Чохральського.
32. Методи Обреїмова-Шубнікова, Стокбаргера, Бріджмена.
33. Метод Пфанна (зонне вирощування).
34. Метод ГСК.
35. Метод Штебера, НЕМ-метод.
36. Метод вирощування із гарнісажу.
37. Ріст кристалів у плаваючій зоні.
38. Метод Кіропулоса.
39. Метод Степанова.
40. MPD-метод
41. Вирощування кристалів з високотемпературних розчинів
42. Гідротермічний і амонійнотермічний метод вирощування кристалів.
43. Вирощування масивних кристалів з газової фази.
44. Методи епітаксialного росту
45. Методи відпалу кристалів.
46. Конвекція та контроль потоків у розплаві при рості кристалів.