

	Силабус навчальної дисципліни “Наукові основи вирощування монокристалів”
Напрямок підготовки	Доктор філософії
Галузь знань	13 Механічна інженерія
Спеціальність	132 Матеріалознавство
Освітньо-наукова програма	«Монокристалічні, керамічні та наноструктурні матеріали»
Статус дисципліни	Вибіркова
Семестр	3-4
Кількість кредитів ЄКТС	12
Форма підсумкового контролю	Залік + екзамен
Викладач	Литвинов Леонід Аркадійович , доктор технічних наук, професор, провід. наук. співроб. Інституту монокристалів Національної академії наук України CV: https://isc.kharkov.ua/wp-content/uploads/2023/01/cv_lytvynov.pdf e-mail: lalytvynov@gmail.com Scopus: https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55614645000 тел. роб.: 341-01-47
Анотація навчальної дисципліни	Ознайомлення аспірантів з основами теорії росту кристалів, структурними дефектами та властивостями кристалів, фізико-хімічними та технологічними основами методів вирощування кристалів, методами відпалу та контролю кристалів, залежністю фізичних та хімічних властивостей кристалів від умов кристалізації, основними областями застосування кристалів.
Загальний обсяг	360 годин: лекції – 80 годин; практичні заняття – 40 годин; самостійна робота – 240 годин
Заплановані результати навчання	Згідно з вимогами освітньо-наукової програми аспіранти повинні досягти таких результатів навчання: - розуміти фізичні принципи кристалізації; - знати методи вирощування кристалів; - розуміти залежність структурних властивостей від методів вирощування та відпалу кристалів.
Тематичний план навчальної дисципліни	
Розділ 1. Фізико-хімічні основи кристалізації. Тема 1. Діаграми стану. Метастабільні системи. Утворення зародків кристалів. Гомогенне та негомогенне зародження. Тема 2. Періодичні ланцюги зв'язків, Flat, stepped, kinked грані решітки, віцинальні грані.	

Розділ 2. Механізми росту кристалів

Тема 3. Гідродинамічна теорія Гіббса. Модель Косселя-Странського. Дислокаційна теорія росту. «Зеренна», фрактальна теорія. Механізм приєднання кристалічних елементів к анізотропній решітці.

Тема 4. Кристалізаційний тиск. Правило Кюри - Вульфа. Правило Браве. Вплив умов росту на форму кристалу. Стійкий ріст, втрата стійкості. Зв'язок стійкості росту з меніском розплаву. Морфологічна стійкість росту.

Тема 5. Вплив домішок на процес росту. Термодинаміка захвату домішок. Гомогенний захват домішок. Вплив домішок на зміщення рівноваги між кристалом і середовищем росту. Вплив енергії адсорбції. Коефіцієнт входження домішки. Секторальна, структурна і зонарна неоднорідність входження домішки. Взаємний вплив домішок. Дифузійна релаксація. Вплив домішок на властивості кристалу.

Тема 6. Механізм затвердіння розплаву. Зв'язок кристалізації з швидкістю охолодження. Коміркова та вакансійна моделі розплаву. Оцінка стану розчин-розплав. Утворення комплексів в розчинах-розплавах. Ультразвуковий вплив на розплав.

Розділ 3. Основні структурні дефекти в кристалах.

Тема 7. Одномірні дефекти. Двомірні дефекти. Трьохмірні дефекти. Механізми утворення дислокацій. Теорія утворення газових включень в розплавах, розчинах та кристалах. Взаємодія структурних дефектів. Утворення структурних дефектів при обробці та опроміненні кристалів.

Тема 8. Центри забарвлення. Агрегатні центри. Конкуренція структурних та домішкових центрів в кристалі. Наслідування структурних дефектів при рості кристалів.

Розділ 4. Методи підготовки сировини для вирощування кристалів.

Тема 9. Фізико-хімічні методи оцінки якості сировини.

Тема 10. Методи очистки сировини. Методи сепарації порошків. Масова кристалізація и перекристалізація.

Розділ 5. Класифікація методів вирощування кристалів

Тема 11. Контейнерні та безконтейнерні методи.

Тема 12. Статичні та динамічні методи. Зміна агрегатного стану (l-g, g-s, s-s, l-s, g-s).

Розділ 6. Сучасні методи вирощування кристалів. Техніка вирощування.

Тема 13. Метод Вернейля. Дискретна і неперервна підпитка півки розплаву. Дифузійне горіння і методи рекуперації тепла. Структурні дефекти, характерні для метода.

Тема 14. Метод Пфанна (зонне вирощування). ГСК. Метод Штебера, НЕМ-метод. Метод вирощування із гарнісажу.

Тема 15. Метод Чохральського. Інверсія фронту кристалізації. Кристалізація в магнітному полі. Вирощування під флюсом.

Тема 16. Метод Кіропулоса. Інверсія фронту кристалізації. Підпитка розплаву. Комп'ютерний контроль параметрів процесу.

Тема 17. Метод Степанова. Капілярні та некапілярні методи вирощування профільованих кристалів. Вирощування із елемента профілю. Варіативне формоутворення. Групове вирощування профілей. Структура профільованих кристалів. Мікро-Пулінг-Давн метод.

Тема 18. Методи Обреїмова-Шубнікова, Стокбаргера и Бриджмена.

Тема 19. Методи вирощування із розчинів. Бінарні розчинники. Кристалізація при зниженні температури розчину. Кристалізація при тепловій конвекції розчину. Кристалізація при концентраційній конвекції розчину. Кристалізація при рециркуляції розчинника. Методи

дослідження процесів росту із розчинників. Контроль перенасичення розчинника. Кристалізація біологічних об'єктів.

Тема 20. Методи вирощування кристалів із газової фази.

Тема 21. Розчинення кристалів. Виявлення кристалографічної форм.

Тема 22. Порівняльна оцінка можливостей методів вирощування кристалів.

Техніко-економічні можливості методів на стан 2021 р. Тенденції розвитку методів.

Розділ 7. Методи відпалу кристалів. Вплив середовища відпалу на властивості кристалів.

Тема 23. Відпал для зняття напруги. Локальна напруга. Вплив відпалу на щільність структурних дефектів в кристалах. Поводження домішок при відпалі.

Тема 24. Шляхи зміни оптичних та лазерних властивостей кристалів при відпалі.

Структура навчальної дисципліни

Розділи і теми	Кількість годин			
	усього	у тому числі		
		лекції	практика	сам. роб.
1	2	3	4	5
Розділ 1				
Тема 1.		2		6
Тема 2.		4		8
Разом за розділом 1	20	6		14
Розділ 2				
Тема 3.		4		10
Тема 4.		4		10
Тема 5.		4		10
Тема 6.		4		10
Разом за розділом 2	56	16		40
Розділ 3				
Тема 7.		4		10
Тема 8.		4		10
Разом за розділом 3	28	8		20
Розділ 4				
Тема 9.		3	5	8
Тема 10.		3	5	8
Разом за розділом 4	32	6	10	16
Розділ 5				
Тема 11.		4		10
Тема 12.		4		10
Разом за розділом 5	28	8		20
Залік	6			6
Розділ 6				

Тема 13.		4		10
Тема 14.		4		10
Тема 15.		4		10
Тема 16.		4		10
Тема 17.		2	25	10
Тема 18.		2		4
Тема 19.		2		4
Тема 20.		2		4
Тема 21.		4		8
Тема 22.		4		8
Разом за розділом 6	135	32	25	78
Розділ 7				
Тема 23.		2	5	8
Тема 24.		2		8
Разом за розділом 7	25	4	5	16
Екзамен	30			30
Усього годин	360	80	40	240

Теми практичних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Підготовка сировини для вирощування кристалів із тигля	5
2	Розробка креслення формоутворювача для вирощування стрижня діаметром 19 мм	5
4	Вирощування сапфірового стрижня діаметром 19 мм методом Степанова	10
5	Вирощування сапфірової стрічки шириною 80 мм методом Степанова	10
6	Вирощування сапфірової труби ЗР 25мм, ВР 22 мм методом Степанова	5
7	Відпал сапфірової труби ЗР 25мм, ВР 22 мм в установці типу ОВП	5
	Разом	40

Методи контролю

Поточний контроль:

Перевірка розуміння аспірантами теоретичного та практичного програмного матеріалу в цілому, здатність творчо використовувати накопиченні знання та вміння.

Підсумковий контроль (залік + екзамен).

Схема нарахування балів									
Поточний контроль, практичні заняття, самостійна робота								Екзамен	Сума
Розділ 1	Розділ 2	Розділ 3	Розділ 4	Розділ 5	Розділ 6	Розділ 7	Разом		
T1-T2	T3-T6	T7-T8	T9-T10	T11-T12	T13-T22	T23-T24			
4	4	4	12	4	24	8	60	40	100

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

Критерії оцінювання

Шляхом усного **опитування** викладач перевіряє розуміння аспірантами теоретичного програмного матеріалу в цілому (оцінюється до 4 балів).

Під час **практичного** заняття перевіряється здатність творчо використовувати накопиченні знання та вміння (оцінюється до 4 балів).

Залік проводиться після 3-го семестру по матеріалу за темами з 1 по 12. Аспіранту, який набув за результатами поточного контролю в семестрі 28 рейтингових балів, залік зараховується автоматично. Якщо аспірант має менше 28 балів, набуті їм бали за поточний контроль одвоюються, і він/вона складає залік за матеріалом тем 1-12 (питання 1-31).

Аспіранти складають екзамен після закінчення навчання за обсягом усього навчального матеріалу.

Екзамен та залік оцінюються за наступною системою балів:

40 балів	аспірант продемонстрував глибоке знання змісту питання; відповідь побудована лаконічно, чітко, логічно та послідовно; відповідь демонструє високий рівень засвоєння навчального матеріалу
30-39 балів	аспірант продемонстрував знання змісту питання; відповідь побудована лаконічно та послідовно, проте допущені певні неточності та похибки у логіці викладу матеріалу;
20-29 балів	аспірант продемонстрував певне знання змісту питання, відповідь є недостатньо послідовною, та логічною;
10-19 балів	аспірант продемонстрував уявлення з залікового питання, відповідь є фрагментарною, відповідь не послідовна, не логічна, не зовсім відповідає змісту питання
1-20 балів	відповідь часткова; відповідь не послідовна, не логічна, не зовсім відповідає змісту питання.
0 балів	відповідь відсутня, або не відповідає змісту питання

Питання до заліку/екзамену

1. Діаграми стану.
2. Утворення зародків кристалів.
3. Гідродинамічна теорія Гіббса.
4. Модель Коссея-Странського.
5. Дислокаційна теорія росту.
6. Механізм приєднання кристалічних елементів к анізотропній решітці.
7. «Зеренна», фрактальна теорія росту кристалів.
8. Правило Кюри - Вульфа. Правило Браве.
9. Вплив умов росту на форму кристалу.
10. Морфологічна стійкість росту.
11. Термодинаміка захвату домішок.
12. Вплив домішок на зміщення рівноваги між кристалом і середовищем росту.
13. Коефіцієнт входження домішки.
14. Вплив домішок на властивості кристалу.
15. Механізм затвердіння розплаву.
16. Зв'язок кристалізації з швидкістю охолодження.
17. Коміркова та вакансійна моделі розплаву.
18. Ультразвуковий вплив на розплав.
19. Одномірні дефекти.
20. Двомірні дефекти. Трьохмірні дефекти.
21. Механізми утворення дислокацій.
22. Теорія утворення газових включень в розплавах, розчинах та кристалах.
23. Взаємодія структурних дефектів.
24. Утворення структурних дефектів при обробці та опроміненні кристалів.
25. Центри забарвлення.
26. Конкуренція структурних та домішкових центрів в кристалі.
27. Наслідкування структурних дефектів при рості кристалів.
28. Фізико-хімічні методи оцінки якості сировини.
29. Методи очистки сировини.
30. Методи сепарації порошоків.
31. Контейнерні та безконтейнерні методи росту кристалів.
32. Метод Вернейля.
33. Метод Пфанна (зонне вирощування).
34. ГСК. Метод Штебера, НЕМ-метод. Метод вирощування із гарнісажу.
35. Метод Чохральського.
36. Метод Кіропулоса.
37. Метод Степанова.
38. Методи Обреїмова-Шубнікова, Стокбаргера и Бриджмена.
39. Методи вирощування кристалів із газової фази.
40. Методи вирощування із розчинів.
41. Методи дослідження процесів росту із розчинників.

42. Розчинення кристалів. Виявлення кристалографічної форми.
43. Кристалізація біологічних об'єктів.
44. Порівняльна оцінка можливостей методів вирощування кристалів.
45. Методи відпалу кристалів.
46. Поводження домішок при відпалі.
47. Шляхи зміни оптичних та лазерних властивостей кристалів при відпалі.
48. Вплив відпалу на щільність структурних дефектів в кристалах

Рекомендована література

1. В.В. Богданов, Основи теорії росту кристалів: навчальний посібник / Харків: ХНУ ім. Каразіна, 2010, 313 с.
2. H.J. Scheel, T. Fukuda Crystal Growth Technology, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England, 2003, 695 p.
3. E. Dobrovinskaya, L. Lytvynov, V. Pischik. Sapphire in Science and Engineering. STC "Institute for Single Crystals", 2007, 480 p.
4. Crystal Growth Technology: Semiconductors and Dielectrics, Eds.: P. Capper, P. Rudolph, Wiley-VCH, 2010, 366 p.
5. Crystal Growth Technology, Eds.: K. Byrappa, T. Ohachi, W. Michaeli, H. Warlimont, E. Weber, William Andrew Inc., 2003, 590 p.
6. E. Dobrovinskaya, L. Lytvynov, V. Pischik. Sapphire. Material, Manufacturing, Applications. Springer, 2009, 481 p.
7. Single Crystals of Electronic Materials, Edited by R. Fornary, Woodhead Publisher Elsevier, 2018, 583 p.
8. I.V. Markov, Crystal Growth for Beginners. Fundamentals of Nucleation, Crystal Growth and Epitaxy, World Scientific Publishing, Singapore, 1995, 422 p.
9. K.A. Jackson, Kinetic Processes. Crystal Growth, Diffusion, and Phase Transitions in Materials, Wiley – VCH, 2004, 409 p.
10. Handbook of Industrial Crystallization, Third Edition, Ed. A.S. Myerson, D. Erdemir, A.Y. Lee, Cambridge University Press, 2019, 528 p.
11. Crystallization, Fourth Edition, Ed. J.W. Mullin, Butterworth-Heinemann, 2001, 594 p.
12. M.E. Glicksman, Principles of Solidification. An Introduction to Modern Casting and Crystal Growth Concepts, Springer, 2011, 520 p.