

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

Спеціальний практикум  
(назва навчальної дисципліни)

рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ перший (бакалавр) \_\_\_\_\_  
галузь знань \_\_\_\_\_ 0402 – 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)

Програма навчальної дисципліни Спецфальний практикум складена відповідно до освітньо-професійної програми підготовки бакалавра напряму 104 – фізика та астрономія

## 1. Опис навчальної дисципліни

1.1. Метою викладання навчальної дисципліни є

ознайомити студентів із різними аспектами проблеми елементарних процесів росту кристалів та з методами вирощування кристалів

1.2. Основними завданнями вивчення дисципліни є освоїти методи дослідження елементарних процесів росту кристалів та методи вирощування 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 бути критичним і самокритичним. (ЗК 4)
- Здатність приймати обґрунтовані рішення. (ЗК 5)
- Навички міжособистісної взаємодії. (ЗК 6)
- Навички здійснення безпечної діяльності. (ЗК 7)
- Здатність оцінювати та забезпечувати якість виконуваних робіт. (ЗК 8)
- Визначеність і наполегливість щодо поставлених завдань і взятих обов'язків. (ЗК 9)
- Здатність діяти соціально відповідально та свідомо. (ЗК 11)
- 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 на практиці базові знання з математики як математичного апарату фізики і астрономії при вивченні та дослідженні фізичних та астрономічних явищ і процесів. (ФК 2)
- Здатність оцінювати порядок величин у різних дослідженнях, так само як точності та значимості результатів. (ФК 3)
- Здатність працювати із науковим обладнанням та вимірювальними приладами, обробляти та аналізувати результати досліджень. (ФК 4)
- Здатність виконувати обчислювальні експерименти, використовувати чисельні методи для розв'язування фізичних та астрономічних задач і моделювання фізичних систем. (ФК 5)
- Здатність виконувати теоретичні та експериментальні дослідження автономно та у складі наукової групи. (ФК 8)
- 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	
4-й	-й
Семестр	
7-й	-й
Лекції	
год.	год.
Практичні, семінарські заняття	
год.	год.
Лабораторні заняття	
78год.	год.
Самостійна робота	
72 год.	год.
Індивідуальні завдання	
год.	

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

**знати:** основні прийоми та методи експериментального дослідження процесів росту кристалів та методи вирощування кристалів;

**вміти:** користатися оптичними мікроскопами, знати їх можливості щодо виявлення мікроструктури кристалічних тіл, виявляти мікроструктуру кристалів.

## 2. Тематичний план навчальної дисципліни

1. Дослідження форм росту кристалів
2. Дослідження епітаксialного росту кристалів
3. Шарувато-спіральний ріст кристалів
4. Отримання епітаксialних плівок шляхом напилювання у вакуумі
5. Періодична кристалізація у тонкому шарі переохолодженого розплаву
6. Вирощування монокристалів методом Бриджмена
7. Вирощування монокристалів методом Стокбаргера
8. Очищення органічних речовин методом зонного плавлення
9. Вирощування монокристалів методом Киропулоса
10. Вирощування кристалу із розчину

## 4. 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
1. Дослідження форм росту кристалів	15			8		7
2. Дослідження епітаксiального росту кристалів	15			8		7
3. Шарувато-спiральний рiст кристалів	15			8		7
4. Отримання епітаксiальних плiвок шляхом напилювання у вакуумі	15			8		7
5. Періодична кристалізація у тонкому шарі переохолодженого розплаву	15			8		7
6. Вирощування монокристалів методом Бриджмена	15			8		7
7. Вирощування монокристалів методом Стокбаргера	15			8		7
8. Очищення органічних речовин методом зонного плавлення	15			8		7
9. Вирощування монокристалів методом Киропулоса	15			8		7
10. Вирощування кристалу із розчину	15			6		9
<b>Усього годин</b>	150			78		72

### 5. Завдання для самостійної роботи

№	Вивчення теоретичних основ процесів, що досліджуються, за допомогою методичних розробок, та рекомендованої літератури	Кількість годин
1	Дослідження форм росту кристалів	7
2	Дослідження епітаксiального росту кристалів	7
3	Шарувато-спiральний рiст кристалів	7
4	Отримання епітаксiальних плiвок шляхом напилювання у вакуумі	7
5	Періодична кристалізація у тонкому шарі переохолодженого розплаву	7
6	Вирощування монокристалів методом Бриджмена	7
7	Вирощування монокристалів методом Стокбаргера	7
8	Очищення органічних речовин методом зонного плавлення	7
9	Вирощування монокристалів методом Киропулоса	7
10	Вирощування кристалу із розчину	9
	Разом	70

### 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  $vp$ .
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. Поверхнева енергія. Її анізотропія
21. Структурні елементи поверхні кристала. TLK-модель
22. Залежність вільної енергії сходини від щільності зламів на ній. Термічна шорсткість сходини
23. Термічна шорсткість поверхні. Критерій шорсткості
24. Нормальний ріст кристалів. Кінетика росту кристала з розплаву
25. Кінетика нормального росту кристала з розчину
26. Процес пошарового росту кристалів
27. Концентрація адатомів, довжина дифузійного шляху адатома, Лінійна густина зламів на сходині
28. Швидкість руху елементарних прямолінійних сходин уздовж поверхні пошарово зростаючого кристала
29. Розподіл хімічного потенціалу атомів на поверхні поблизу ізольованої елементарної сходини
30. Кінетика переміщення елементарної сходини
31. Кінетика переміщення ешелону елементарних сходин
32. Залежність швидкості переміщення сходини від її висоти
33. Джерела сходин на поверхні досконалого кристала
34. Механізм шарувато-спірального росту
35. Шарувато-спіральний ріст кристалів з розчину і розплаву
36. Вивчення елементарних актів пошарового росту кристалів в експерименті
37. Вплив домішок на швидкість росту кристала
38. Нерівновагий захват атомарної домішки
39. Утворення напружень, дислокацій, захват маточного середовища
40. Рівноважна форма кристала
41. Метод Гіббса–Кюри–Вульфа визначення рівноважної форми
42. Метод Странського–Каішева середніх робіт відриву
43. Форма росту кристала
44. Морфологія поверхні зростаючого кристала
45. Вплив умов росту на морфологію кристала
46. Втрата стабільності форм росту
47. Методи вирощування кристалів з парової фази
48. Кристалізація з пари крізь шар рідкої фази. Ріст ниткоподібних кристалів
49. Методи вирощування кристалів з розчину
50. Методи вирощування кристалів з розплаву

## 8. Схема нарахування балів

Поточне тестування за темами	Залік	Сума
------------------------------	-------	------

T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10		
7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	30	100

T1, T2 ... – теми лабораторних робіт

Тестування з кожної теми складається з 3-ох етапів: 1) виконання лабораторної роботи (3 бали), 2) оформлення роботи (2 бала), 3) відповідь на контрольні запитання (2 бала).

Критерієм оцінювання на заліку слугує якість відповідей на запитання з кожної з 10-ти тем (3 бали за правильні відповіді з кожної теми).

### 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

### 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

#### 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. 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).