

Національна академія наук України  
Інститут скінтіляційних матеріалів

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Директор Інституту скінтіляційних  
матеріалів НАН України

Борис ГРИНЬОВ

« \_\_\_\_\_ » 2023 р.  
М.П.



## ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

### Окремі питання фізики твердого тіла

(шифр і назва навчальної дисципліни)

спеціальності 105 – Прикладна фізика та наноматеріали

132 – Матеріалознавство

освітньо-наукова програма – підготовки доктора філософії в галузях  
природничих наук і механічної інженерії

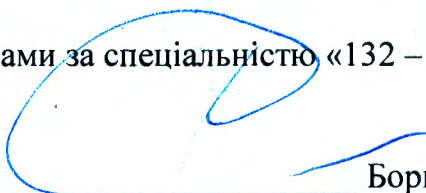
2023 навчальний рік

Програму рекомендовано до затвердження Вченою радою Інституту  
сцинтиляційних матеріалів НАН України від 29.12.2022 року, протокол № 12

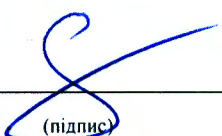
Розробники програми:

Сорокін Олександр Васильович, доктор фіз.-мат. наук, старший науковий  
співробітник

Гарант освітньо-наукової програми за спеціальністю «132 – Матеріалознавство»

  
Борис ГРИНЬОВ  
\_\_\_\_\_  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Гарант освітньо-наукової програми за спеціальністю «105 – Прикладна фізика та  
наноматеріали»

  
Олександр СОРОКІН  
\_\_\_\_\_  
(підпис) (прізвище та ініціали)

## Вступ

Програма навчальної дисципліни «Окремі питання фізики твердого тіла» складена відповідно до освітньо-наукової програми підготовки докторів філософії (третій рівень вищої освіти) за спеціальностями «105 – Прикладна фізика та наноматеріали» та «132 – Матеріалознавство».

### 1. Опис навчальної дисципліни

**Метою** викладання навчальної дисципліни є: ознайомити з фізичними законами та експериментальними даними формування атомної та електронної структури твердого тіла, а також їх фізичних властивостей (теплових, електричних, магнітних, оптичних, тощо).

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

– здатність продемонструвати глибинні професійні знання, науковий і культурний кругозір рівня здобувача наукового ступеня доктора філософії, зокрема шляхом засвоєння, узагальнення та систематизації знань та основних концепцій, теоретичних та практичних проблем фізики твердого тіла, зокрема атомну та електронну структуру твердих тіл, фізичну природу їх формування та зв'язок структурного стану з різноманітними фізичними властивостями твердих тіл, в першу чергу – оптичними;

– здатність на основі фізичних законів науково прогнозувати формування тієї чи іншої структури різноманітних твердих тіл, а також вміти прогнозувати оптимальне використання на практиці тверді тіла різних типів для розробки нових типів функціональних матеріалів, перш за все люмінесцентних та сцинтиляційних.

### Характеристика навчальної дисципліни

| Тип                                    | Нормативна дисципліна |
|--|-----------------------|
| Форма навчання                         | Денна                 |
| Рік підготовки                         | 1                     |
| Семестр                                | 2                     |
| Кількість кредитів                     | 4                     |
| Загальна кількість годин               | 120                   |
| Аудиторні заняття (лекції та семінари) | 48                    |
| Самостійна робота                      | 72                    |
| Контроль                               | Іспит                 |

## 2. Тематичний план навчальної дисципліни

- Тема 1.** Класифікація твердих кристалічних тіл. Іонні, ковалентні, металеві та молекулярні кристали.
- Тема 2.** Кристалічні решітки. Кристали та їх властивості, решітки Браве, примітивна комірка, типи кристалічних структур. Індеси Мілера, симетрія у решітках, класи симетрії.
- Тема 3.** Основи дифракційних методів визначення структури кристалів. Три фактори. Рівняння Лауе. Зворотна решітка.
- Тема 4.** Експериментальне визначення структури кристалів. Метод Лауе. Рентгенограми обертання. Методи рентгенівського гоніометра. Методи дослідження полікристалічних зразків. Методи рентгенівської дифрактометрії. Прості кристалічні структури.
- Тема 5.** Основи зонної теорії твердих тіл. Потенційна енергія електрона в кристалічній решітці. Теорема Блоха. Хвильові вектора кристалічної решітки. Зони Бріллюена. Формування енергетичних зон. Вплив поверхневих ставні і домішкових центрів.
- Тема 6.** Точкові дефекти у твердих тілах. Дефекти у кристалах. Вакансії. Міжвузольні атоми. Дифузія. Центри забарвлення. Радіаційні дефекти.
- Тема 7.** Лінійні і двовимірні дефекти. Дислокації. Контур і вектор Бюргерса. Рух і формування дислокацій.
- Тема 8.** Фонони і коливання решітки. Коливання одномірної решітки. Коливання решітки з базисом. Взаємодія фононів і фотонів.
- Тема 9.** Теплові властивості кристалів. Теплоємність. Закон Дюлонга і Пті. Модель Дебая. Щільність станів. Модель Ейнштейна. Теплопровідність. Дифузія
- Тема 10.** Основні властивості металів. Модель вільного електронного газу. Енергія Фермі. Розподілення Фермі-Дірака. Внесок електронів до теплоємності. Електрична провідність. Електронна теплопровідність. Ефект Холла.
- Тема 11.** Напівпровідникові кристали. Власна провідність. Заборонена зона. Прямі і непрямі оптичні переходи. Закон діючих мас. Домішкова провідність. Рухливість носіїв току. Циклотронний резонанс. Електронно-діркові переходи.

- Тема 12.** Діелектрики. Поляризація діелектриків. Основні характеристики поляризації. Види поляризації. Діелектрична проникність. Її частотна залежність. П'єзоелектрики. Сегнетоелектрики. Діелектричні втрати.
- Тема 13.** Магнітні властивості твердих тіл. Класифікація магнетиків. Діамагнетизм і парамагнетизм. Феромагнетизм. Молекулярне поле Вейсса. Обмінна взаємодія. Антиферомагнетизм і феримагнетизм. Електронний парамагнітний резонанс і ядерний магнітний резонанс.
- Тема 14.** Наноматеріали. Класифікація дисперсних систем. Особливості термодинамічних властивостей наноматеріалів. Структура нанорозмірних матеріалів. Внесок поверхні.
- Тема 15.** Основи спектроскопії. Рівні енергії воднеподібних атомів. Імовірності переходів. Сили осциляторів. Інтенсивності спектрів. Ширина спектральних ліній.
- Тема 16.** Основи атомної спектроскопії. Спектри багатоелектронних атомів. Правила відбору. Терми багатоелектронних атомів. Розщеплення спектральних ліній у магнітному та електронних полях.
- Тема 17.** Оптичні властивості твердих тіл. Особливості енергетичної структури кристалів. Механізми оптичних переходів у твердих тілах. Міжзонні переходи. Екситони. Центри забарвлення. Домішкові центри.
- Тема 18.** Релаксація збуджених станів. Захоплення на пастки. Термостимульована і оптично стимульована люмінесценція. Крос-люмінесценція. Up- і down- конверсія.
- Тема 19.** Сцинтилятори. Основні поняття фізики сцинтиляторів. Види сцинтиляторів. Взаємодія іонізуючого випромінювання з речовиною. Основи фізики сцинтиляційного процесу.
- Тема 20.** Оптичні властивості наноматеріалів. Квантово-розмірний ефект. Оптичні властивості вуглецевих кластерів. Вуглецеві наночастинки. Люмінесцентні металеві кластери. Металеві наночастинки. Квантові точки. Нанокристалічні діелектрики.
- Тема 21.** Деякі колективні ефекти в твердих тілах (полярони, автолокалізація електронів і екситонів, надвипромінювання Діке, екситонне надвипромінювання, ефект Парсела)
- Тема 22.** Фізичні властивості аморфних твердих тіл. Енергетичний спектр некристалічних твердих тіл. Аморфні напівпровідники.
- Тема 23.** Консультація перед іспитом. Іспит.

### 3. Структура навчальної дисципліни

| Назви модулів і тем | Кількість годин |                   |          |                      |
|---------------------|-----------------|-------------------|----------|----------------------|
|                     | Усього          | у тому числі      |          |                      |
|                     |                 | Аудиторні заняття |          | самостійна<br>робота |
|                     |                 | лекції            | семінари |                      |
| 1                   | 2               | 3                 | 4        | 5                    |
| Тема 1.             | 5               | 2                 |          | 3                    |
| Тема 2.             | 5               | 2                 |          | 3                    |
| Тема 3              | 5               | 2                 |          | 3                    |
| Тема 4              | 5               | 2                 |          | 3                    |
| Тема 5              | 5               | 2                 |          | 3                    |
| Тема 6              | 5               | 2                 |          | 3                    |
| Тема 7.             | 5               | 2                 |          | 3                    |
| Тема 8.             | 5               | 2                 |          | 3                    |
| Тема 9.             | 5               | 2                 |          | 3                    |
| Тема 10.            | 5               | 2                 |          | 3                    |
| Тема 11.            | 5               | 2                 |          | 3                    |
| Тема 12.            | 5               | 2                 |          | 3                    |
| Тема 13.            | 5               | 2                 |          | 3                    |
| Тема 14.            | 5               | 2                 |          | 3                    |
| Тема 15.            | 5               | 2                 |          | 3                    |
| Тема 16.            | 5               | 2                 |          | 3                    |
| Тема 17.            | 6               | 2                 |          | 4                    |
| Тема 18.            | 6               | 2                 |          | 4                    |
| Тема 19.            | 6               | 2                 |          | 4                    |
| Тема 20.            | 6               | 2                 |          | 4                    |
| Тема 21.            | 6               | 2                 |          | 4                    |
| Тема 22.            | 6               | 2                 |          | 4                    |
| Тема 23.            | 4               | 4                 |          |                      |
| <b>Усього годин</b> | <b>120</b>      | <b>48</b>         |          | <b>72</b>            |

### 4. Завдання для самостійної роботи

| № з/п | Назва теми  | Кількість годин |
|-------|---|-----------------|
| 1.    | Структура твердих тіл. Аморфна та кристалічна структура. Рідкі кристали. Енергетичні критерії та ознаки різних твердих тіл.   | 3               |
| 2.    | Експериментальні методи дослідження структури твердих тіл. Рентгенографія. Закон Вульфа – Брега для кристалічної структури. Електронна мікроскопія. Нейтронографія. Оптичні методи. | 3               |

|     |   |   |
|-----|---|---|
| 3.  | Типи енергії зв'язку твердих кристалічних структур: молекулярна, іонна, металева, ковалентна. Загальні характеристики. Характерні фізичні властивості, які притаманні для кожного типу зв'язку.   | 3 |
| 4.  | Теплоємність твердого тіла. Теплоємність діелектриків при підвищених температурах. Експериментальні дані. Статистика Максвела – Больцмана. Закон Дюлонга – Пті.   | 3 |
| 5.  | Теплоємність твердих тіл при низьких температурах. Квантова теорія теплоємності атомів (теорії Ейнштейна та Дебая). Фонони в кристалах та їх взаємодія. Характеристична температура Дебая.  | 3 |
| 6.  | Теплоємність металів. Роль електронів. Статистика Фермі – Дірака. Енергія Фермі. Критична температура, при якій зрівнюються електронна та атомна складові теплоємності в металах.   | 3 |
| 7.  | Теплове розширення твердого кристалічного тіла. Ангармонізм коливання атомів. Зв'язок коефіцієнту теплового розширення з іншими константами твердого тіла.  | 3 |
| 8.  | Теплопровідність твердих кристалічних тіл. Теплопровідність діелектричних кристалів. Експериментальні дані. Класична теорія теплопровідності. Фонон – фононна взаємодія та розсіювання фононів при підвищених температурах. Теплоємність кристалів при низьких температурах | 3 |
| 9.  | Теплопровідність металів. Довжина пробігу електрона. Взаємодія електронів та фононів. Розсіювання електронів на фононах при підвищених температурах. Розсіювання електронів на атомах сторонніх елементів при низьких температурах  | 3 |
| 10. | Електропровідність металів. Закон Ома. Класична теорія. Правило Матіссена. Закон Відемана – Франца. Врахування квантових властивостей електронів для пояснення температурної залежності електропровідності в металах  | 3 |
| 11. | Загальна інформація про електричну провідність іонних кристалів. Експериментальні дані. Температурна залежність коефіцієнту електропровідності іонних   | 3 |

|     |   |   |
|-----|---|---|
|     | кристалів. Елементарний заряд носія електричного току.<br>Роль сторонніх атомів   |   |
| 12. | Дифузія в кристалах. Точкові дефекти. Енергія активації дифузії. Співвідношення Ареніуса. Закони Фіка. Експериментальні методи вивчення дифузії в кристалічних тілах  | 3 |
| 13. | Теорія Нернста – Ейнштейна для електропровідності іонних кристалів. Зв'язок між коефіцієнтом дифузії атомів та коефіцієнтом електропровідності в іонних кристалах. Вплив сторонніх атомів з іншою валентністю   | 3 |
| 14. | Точкові дефекти в кристалах. Вакансії Шотки та пари Френкеля. Рівноважна концентрація точкових дефектів. Методи експериментального визначення енергії формування точкового дефекту та їх концентрації.  | 3 |
| 15. | Лінійні дефекти в кристалічних тілах. Дислокації. Вектор Бюргерса. Бар'єр Пайерлса. Механізми переміщення дислокацій (ковзання, переповзання). Зв'язок швидкості пластичної деформації з густиною дислокацій  | 3 |
| 16. | Руйнування кристалів. Механізми гальмування дислокацій. Механізми руйнування кристалів: механізми Стро, Котрела та інші   | 3 |
| 17. | Приближення сильного зв'язку між електронами та атомами в конденсованому середовищі. Модель квазі – вільних електронів. Походження енергетичної щілини. Електронні хвилі у періодичному потенціальному полі. Кількість енергетичних зон в енергетичному спектрі та енергетичних рівнів в енергетичній зоні. | 3 |
| 18. | Переміщення електрона в потенційному полі атомів. Ефективна маса електрона. Поняття дірки як носія електричного заряду. Заповнення енергетичних зон електронами: провідники, напівпровідники, ізолятор.   | 3 |
| 19. | Напівпровідники. Діркові та електронні напівпровідники. Донорні та акцепторні рівні. Концентрація носіїв заряду та їх рухливість. Розподіл електронів за енергією. Температурна залежність коефіцієнту електричної провідності в напівпровідниках.  | 3 |
| 20. | Фотопровідність напівпровідників. Червона межа фотопровідності. Екситони. Люмінесценція. Технічні застосування напівпровідників.  | 4 |



|     |   |           |
|-----|---|-----------|
| 21. | Магнітні властивості твердого тіла. Парамагнетизм та діамагнетизм атомів. Парамагнетизм електронів в металах по теорії Паулі. Діамагнетизм електронного «газу» в металах по теорії Ландау. Фізика ферромагнетизму. Формальна теорія Ланжевена – Вейса. Закон Кюри – Вейса. Феррімагнетики. Антиферромагнетики | 3         |
| 22. | Модель потенційних кривих та спектральні закономірності внутрішньоцентрної люмінесценції. Термостимульована люмінесценція. Визначення параметрів центрів захоплення. Релаксація електронних збуджень та формування спектру люмінесценції.   | 4         |
| 23. | Взаємодія іонізуючого випромінювання з речовиною. Основи фізики сцинтиляційного процесу.  | 4         |
|     | <b>Разом</b>  | <b>72</b> |

### 5. Методи контролю

Письмові відповіді на запитання екзаменаційного завдання

### 6. Розподіл балів, які отримують

| Поточний контроль та самостійна робота | Підсумковий контроль (іспит) | Сума |
|--|------------------------------|------|
| 40                                     | 60                           | 100  |

### Шкала оцінювання

| Сума балів за всі види навчальної діяльності протягом семестру | Оцінка                              |                                  |
|--|-------------------------------------|----------------------------------|
|  | для чотирирівневої шкали оцінювання | для дворівневої шкали оцінювання |
| 90 – 100   | відмінно                            | зараховано                       |
| 70-89  | добре                               |                                  |
| 50-69  | задовільно                          |                                  |
| 1-49   | незадовільно                        | не зараховано                    |

## 7. Рекомендована література

### Базова

1. Ch. Kittel. Introduction to Solid State Physics. Eighth Ed. – John Wiley & Sons, 2005. – 680 p.
2. J. Blakemore. Solid State Physics. 2nd ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 1985. – 506 p.
3. N.W. Ashcroft, N.D. Mermin. Solid State Physics. – Orlando: Harcourt, Inc., 1976. – 826 p.
4. S.H. Simon. The Oxford Solid State Basics. – Oxford: Oxford University Press, 2013. – 290 p.
5. В.В. Бібик, Т.М. Гричановська, Л.В. Однодворець, Н.І. Шумакова. Фізика твердого тіла: навчальний посібник. – Суми: Видавництво СумДУ, 2010. – 200 с.
6. Ю.М. Поплавко. Фізика твердого тіла: підручник. В 2-х томах. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017. – Том 1: Структура, квазічастинки, метали, магнетики. – 415 с.
7. Ю.М. Поплавко. Фізика твердого тіла: підручник. В 2-х томах. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017. – Том 2: Діелектрики, напівпровідники, фазові переходи. – 379 с.

### Допоміжна

1. B. Valeur. Molecular Fluorescence. Principles and Applications. – Weinheim: WILEY-VCH Verlag, 2002. – 381 p.
2. M. Fox. Optical Properties of Solids. – New York: Oxford University Press Inc., 2001. – 305 p.
3. R.A.L. Jones. Soft Condensed Matter. – New York: Oxford University Press Inc., 2002. – 196 p.
4. P. Lecoq, A. Gektin, M. Korzhik, Inorganic Scintillators for Detector Systems: Physical Principles and Crystal Engineering. Second Edition. – Cham: Springer International Publishing, 2017. – 408 p.
5. G. Iadonisi, G. Cantele, M.L. Chiofalo. Introduction to Solid State Physics and Crystalline Nanostructures. – Milan: Springer-Verlag, 2014. – 685 p.
6. M. Dresselhaus, G. Dresselhaus, S.B. Cronin, A.G. Souza Filho. Solid State Properties: From Bulk to Nano. – Berlin: Springer-Verlag GmbH, 2018. – 517 p.