

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ**  
**Інститут фізики НАН України**



**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Директором Інституту фізики НАН  
України, член-кор. НАНУ, д.ф.-м.н.

*М.В. Бондар* **М.В. Бондар**

(підпис)

*2008.07.18* 2021 р.

**РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ**

**ННД.05**

**Ієрархія структурної будови твердих тіл**

для аспірантів

спеціальності: 104 Фізика і астрономія

третього (освітньо-наукового) рівня  
вищої освіти – доктор філософії

**Київ - 2021**

**Розробник:**

с.н.с, провідний наук. спів. відділу фізики магнітних явищ Інституту фізики НАНУ,  
доктор фіз.-мат. наук.. А.М. Морозовська /Г.М. Морозовська/

**Робочу програму узгоджено науково-методичною радою**

Протокол № 1 від 30.09 2021 р.

Головою науково-методичної ради М.В. Бондар /М.В. Бондар/

**Робочу програму затверджено Вченою радою Інституті фізики НАНУ**

Протокол № 10 від 21.10 2021 р.

Голова Вченої ради М.В. Бондар /М.В. Бондар/

**Робочу програму погоджено з гарантом освітньо-наукової програми зі спеціальності 104 «Фізика та астрономія» 21.10. 2021 р.**

Гарант освітньої програми М.В. Бондар /М.В. Бондар/

**Пролонговано Вченою радою Інституту фізики НАН України:**

| навчальні роки пролонгації | Голова Вченої ради ІФ НАН України | підпис | № протоколу | дата протоколу |
|----------------------------|-----------------------------------|--------|-------------|----------------|
| 20__/20__                  |                                   |        |             |                |
| 20__/20__                  |                                   |        |             |                |
| 20__/20__                  |                                   |        |             |                |
| 20__/20__                  |                                   |        |             |                |

## 1. Загальні відомості

| Найменування показників                  | Характеристика дисципліни за денною формою навчання |
|--|---|
| Вид дисципліни                           | вибіркова   |
| Мова викладання, навчання та оцінювання  | українська  |
| Загальний обсяг кредитів / годин         | 4/120   |
| Курс                                     | 2   |
| Семестр                                  | 1   |
| Кількість змістових модулів з розподілом | 1   |
| Обсяг кредитів                           | 4   |
| Обсяг годин,<br>В тому числі:            | 120   |
| Лекції                                   | 30  |
| Практичні заняття                        | 15  |
| Самостійна робота                        | 75  |
| Форма підсумкового контролю              | екзамен   |

## 2. Мета, завдання та очікувані результати навчальної дисципліни

Робоча програма навчальної дисципліни ННД.05 «Ієрархія структурної будови твердих тіл» є нормативним документом, який розроблений на основі освітньо-наукової програми, далі ОП, (затверджена Вченою радою Інституту фізики НАН України, протоколом № від 20 року) підготовки здобувача третього рівня відповідно до навчального плану спеціальності 104 «Фізика та астрономія»

**Передумова вивчення.** Навчальний курс ННД.05 «Ієрархія структурної будови твердих тіл» є складовою циклу обов'язкової підготовки фахівців третього освітньо-кваліфікаційного рівня “доктор філософії”. Програма курсу орієнтована на аспірантів, які вже знайомі з загальним курсом фізики твердого тіла, молекулярної фізики, термодинаміки та математичною фізикою.

**Мета навчальної дисципліни.** ННД.05 «Ієрархія структурної будови твердих тіл»: формування систематичних знань з окремих розділів фізики твердого тіла, які вивчають структурну будову твердих тіл. Ознайомлення з сучасними теоретичними та експериментальними методами дослідження структурної будови твердих тіл, вміння застосовувати ці методи у науковій та практичній роботі..

**Зміст навчальної дисципліни.** Теоретичні та практичні знання, набуті при вивченні дисципліни ННД.05 «Ієрархія структурної будови твердих тіл», є поглиблення знань в області сучасної теоретичної та експериментальної фізики твердого тіла, основної ієрархії структурної будови твердих тіл та розумінні фізичних механізмів розмірних ефектів електрофізичних властивостей наносистем. Особлива увага приділена теоретичним основам сучасної феноменологічної теорії фазових перетворень Ландау-Гінзбурга-Девоншира, володінні її методами.

**Предметом навчальної дисципліни** ННД.05 «Ієрархія структурної будови твердих тіл» є вибрані розділи сучасної теоретичної та експериментальної фізики твердого тіла. В класифікації структурної будови твердих тіл особлива увага приділена низьковимірним системам та їх ієрархії, зокрема квантовим точкам, квантовим ямам, нанокластерам, тонким плівкам, наночастинкам, нанотрубках, нанопорошкам та нанокомпозитам на їх основі. Розмірні та квантово-розмірні ефекти в твердотільних системах розглянуті на прикладі нанорозмірних та наноструктурованих фероїків, мультифероїків та феро-іоніків, та 2Д-напівпровідників, таких як графен, графено-подібні наноматеріали, бі-халькогеніди та клатрати.

**Основними завданнями навчальної дисципліни** ННД.05 «Ієрархія структурної будови твердих тіл» є вивчення аспірантами класифікації структурної будови твердих тіл та набуття фізичного розуміння механізмів основних розмірних ефектів в твердотільних наносистемах.

1) Вивчення аспірантами основної класифікації структурної будови твердих тіл та набуття фізичного розуміння механізмів основних розмірних ефектів в твердотільних наносистемах.

- 2) Набути здатність застосовувати ці знання у практичних ситуаціях для розуміння електрофізичних властивостей різноманітних твердотільних наносистем.
- 3) Підвищити здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями в галузі нанофізики твердого тіла, здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел, в тому числі, електронних ресурсів, та здатність студентів до абстрактного мислення, аналізу та синтезу матеріалу з всіх фізичних дисциплін.
- 4) Формування фізичного мислення у аспірантів в межах матеріалу, що вивчається. Дисципліна готує аспірантів до сприймання матеріалу спецкурсів, передбачених програмою спеціалізації.

**Фахові програмні результати навчання (вимоги до знань та вмінь)**

В результаті вивчення навчальної дисципліни аспірант повинен

**Знати:** основні властивості структурної будови твердих тіл, їх ієрархію та області практичних застосувань набутих знань.

**Вміти:** застосувати набуті знання в науково-дослідних та навчальних установах. Зокрема:

- 1) вміти проводити класифікацію структурної будови вибраного твердотільного об'єкту; застосовувати аналітичні методи феноменологічної теорії фазових переходів для розв'язання вибраних задач нанофізики.
- 2) вміти робити якісні та кількісні оцінок впливу вільної поверхні, градієнтів параметрів порядку (поляризації, намагніченості, структурної деформації) та механічних напружень на властивості тонких плівок фероїків; впливу кривизни поверхні та розмірів низьковимірних систем на їх електрофізичні властивості та фазові діаграми.

**Завданням навчальної дисципліни (відповідно до переліку ОП) ННД.05 «Ієрархія структурної будови твердих тіл»** набути компетентності:

Загальні: ЗК1, ЗК2, ЗК3, ЗК4, ЗК5, ЗК6, ЗК7, ЗК8.

Фахові: ФК1, ФК2, ФК3, ФК5

Програмні результати навчання ПРН2, ПРН3, ПРН4, ПРН5, ПРН6, ПРН7, ПРН8, ПРН9, ПРН10, ПРН11, ПРН12, ПРН13, ПРН14.

### 3. Тематичний план

(структура залікового кредиту)

з навчальної дисципліни ДВІ.04.02 «Ієрархія структурної будови твердих тіл»

(2 курс – 1 семестр)

| №  | Зміст  | Лекції,<br>год. | Практичні,<br>год. | Самостійна<br>робота, год. | Разом,<br>год. |
|----|--|-----------------|--------------------|----------------------------|----------------|
| 1. | <b>Тема 1.</b><br>Вступ. Загальні означення 3Д, 2Д, 1Д наноматеріалів та ієрархія їх структурної будови. Нанокластери, нанотрубки, нанодроти, наночастинки, клатрати, квантові точки, квантові ями. Сучасні технології їх отримання і дослідження структурної будови.  | 3               | 0                  | 7                          | 10             |
| 2. | <b>Тема 2.</b><br>Ієрархія структурної будови наноматеріалів. Вуглецеві нанотрубки і графені. Зв'язок електропровідності одностінних вуглецевих нанотрубок з їх хиральністю. Класичні та квантові ефекти у графені та графеноподібних матеріалах. Існуючі та перспективні застосування графену та споріднених 2Д напівпровідників у наноелектроніці та спінтроніці | 3               | 3                  | 7                          | 13             |
| 3. | <b>Тема 3.</b><br>Синтез, очищення, і функціоналізація нанотрубок і нанодротів. Створення масивів нанотрубок, нанодротів і їх мереж. Самосборка. Основні застосування нанотрубок і нанодротів. Альтернативні джерела електричної енергії на основі нанодротів і нанотрубок фероїків.   | 3               | 0                  | 8                          | 11             |
| 4. | <b>Тема 4.</b><br>Нанокластерні фази: методи отримання, структурна будова, енергетичний спектр. Гетероструктури, надгратки. Сучасні методи дослідження структурної досконалості квантових ям та надграток. Енергетичний спектр та густини станів енергетичних збуджень квантових ям та надграток.  | 3               | 0                  | 7                          | 10             |
| 5. | <b>Тема 5.</b><br>Роль зонної теорії у поясненні електричних властивостей 3Д, квазі-2Д та 2Д напівпровідникових матеріалів. Квантово-розмірні ефекти. Конкретні приклади впливу обмежень за розмірами.   | 3               | 3                  | 7                          | 13             |
| 6. | <b>Тема 6.</b>   | 3               | 3                  | 8                          | 14             |

|               |  |           |           |           |            |
|---------------|--|-----------|-----------|-----------|------------|
|               | Сучасні методи розрахунків зонної структури, густини електронних станів, пружних та полярних властивостей твердих тіл і їх тонких шарів. Основні методи розрахунків енергії формування домішок та домішкових комплексів. Основи сучасної теорії функціоналу густини.                               |           |           |           |            |
| 7.            | <b>Тема 7.</b><br>Ферроїки. Означення фероїків та мультифероїків. Приклади параметрів далекого порядку у фероїках та мультифероїках. Матеріали з антиферодисорсією. Фазові переходи першого та другого роду. Фазові переходи, індуковані розміром.   | 3         | 3         | 8         | 14         |
| 8.            | <b>Тема 8.</b><br>Вплив розмірних ефектів на температурні та польові властивості макро-, мікро- та нанорозмірних фероїків. Експеримент та графічні залежності та їх вивід в рамках теорії Ландау. Сучасні та перспективні застосування макро-, мікро- та нанорозмірних фероїків та мультифероїків. | 3         | 0         | 8         | 11         |
| 9.            | <b>Тема 9.</b><br>Методологія опису фазових діаграм та розмірних ефектів фізичних властивостей фероїків в рамках теорії Ландау-Гінзбурга- Девоншира, теорії груп та симетрії. Просторово-модульовані структури у нанорозмірних та наноструктурованих фероїках та мультифероїках.                   | 3         | 3         | 8         | 14         |
| 10.           | <b>Тема 10.</b><br>Феро-іоніки. Нелінійні електротранспортні та електромеханічні властивості твердотільних електролітів та їх тонких плівок. Їх кореляції та зв'язок з експериментами по високоточній інтерферометрії.   | 3         | 0         | 7         | 10         |
| <b>Всього</b> |  | <b>30</b> | <b>15</b> | <b>75</b> | <b>120</b> |

**Методичне забезпечення навчальної дисципліни:**

презентації лектора, конспекти лекцій, бібліотечні та електронні джерела зі списку рекомендованої літератури, довідково-інформаційні інтернет-джерела тощо.

## 4. Зміст навчальної дисципліни

### ДВІ.04.02 «Ієрархія структурної будови твердих тіл»

. **Тема 1.** Вступ. Загальні означення 3Д, 2Д, 1Д наноматеріалів та ієрархія їх структурної будови. Нанокластери, нанотрубки, нанодропи, наночастинки, клатрати, квантові точки, квантові ями. Сучасні технології їх отримання і дослідження структурної будови.

**Література:** 1 – 4, 11

#### **Завдання для самостійної роботи (7 год.)**

1. Вивчення матеріалу лекції.

2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення:

Розподіл по розвинутих країнах використання сучасних технологій отримання нанотрубок, нанодротів, наночастинок, та клатратів (пошук по відкритим науковим та науково-популярним джерелам, в яких країнах які технології використовуються)

2. **Тема 2.** Ієрархія структурної будови наноматеріалів. Вуглецеві нанотрубки і графені. Зв'язок електропровідності одностінних вуглецевих нанотрубок з їх хіральністю. Класичні та квантові ефекти у графені та графеноподібних матеріалах. Існуючі та перспективні застосування графену та споріднених 2Д напівпровідників у наноелектроніці та спінтроніці

**Література:** 3 – 7, 11, 12

#### **Завдання для самостійної роботи (7 год.)**

1. Вивчення матеріалу лекції та **практичного заняття** на тему «Виникнення р-п переходів у графеновому каналі на фероелектричній підкладці, які створені 180-градусною фероелектричною доменною структурою».

2. Опрацювання матеріалу, що винесений для самостійного розв'язку після практичного заняття: Провести розрахунок електропровідності такого каналу (або відслідкувати результати розрахунку по рекомендованій літературі). Статична картина та рух стінок.

3. **Тема 3.** Синтез, очищення, і функціоналізація нанотрубок і нанодротів. Створення масивів нанотрубок, нанодротів і їх мереж. Самосборка. Основні застосування нанотрубок і нанодротів. Альтернативні джерела електричної енергії на основі нанодротів і нанотрубок фероїків.

**Література:** 4

#### **Завдання для самостійної роботи (8 год.)**

1. Вивчення матеріалу лекції.

2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення:

П'єзоелектричні та піроелектричні наногенератори електричної енергії на основі нанодротів і нанотрубок фероїків. Переваги та недоліки (провести пошук по відкритим англомовним науковим джерелам)

4. **Тема 4.** Нанокластерні фази: методи отримання, структурна будова, енергетичний спектр. Гетероструктури, надгратки. Сучасні методи дослідження структурної досконалості квантових ям та надграток. Енергетичний спектр та густини станів енергетичних збуджень квантових ям та надграток.

**Література:** 5 - 7.

#### **Завдання для самостійної роботи (7 год.)**

1. Вивчення матеріалу лекції.

2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення:

Сучасні методи дослідження структурної досконалості квантових ям та надграток (пошук по відкритим англомовним науковим джерелам).

5. **Тема 5.** Роль зонної теорії у поясненні електричних властивостей 3Д, квазі-2Д та 2Д напівпровідникових матеріалів. Квантово-розмірні ефекти. Конкретні приклади впливу обмежень за розмірами. Моделі типу Кроніга-Пенні з урахуванням обмежень за лінійними розмірами.

**Література:** 2 - 3

**Завдання для самостійної роботи (7 год.)**

1. Вивчення матеріалу лекції та **практичного заняття** на тему «Моделі типу Кронінга-Пенні з урахуванням обмежень за лінійними розмірами».
2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення після практичного заняття: На прикладі моделі Кронінга-Пенні з урахуванням обмежень за лінійними розмірами, навести розрахунок зонної структури одновимірного кристалу.

**6. Тема 6.** Сучасні методи розрахунків зонної структури, густини електронних станів, пружних та полярних властивостей твердих тіл і їх тонких шарів. Основні методи розрахунків енергії формування домішок та домішкових комплексів. Основи сучасної теорії функціоналу густини.

**Література:** 8 – 10, відкриті джерела

**Завдання для самостійної роботи (8 год.)**

1. Вивчення матеріалу лекції та **практичного заняття** на тему «Основи сучасної теорії функціоналу густини».
2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення після практичного заняття: Успіхи гібридних моделей розрахунку зонної структури та густини електронних станів низьковимірних твердих тіл. Фактично мова йде про гібрид самоузгодженої нелінійної моделі типу Хартрі-Фока та лінійної теорії функціоналу густини (провести пошук по відкритим англомовним науковим джерелам).

**7. Тема 7.** Ферроїки. Означення фероїків та мультифероїків. Приклади параметрів далекосяжного порядку у фероїках та мультифероїках. Матеріали з антиферодисорсією. Фазові переходи першого та другого роду. Фазові переходи, індуковані розміром. Залежність параметра порядку та узагальненої сприйнятливості фероїка поблизу фазових переходів від температури, розміру та зовнішніх полів.

**Література:** 8 – 10, 11

**Завдання для самостійної роботи (8 год.)**

1. Вивчення матеріалу лекції та **практичного заняття** на тему «Залежність параметра порядку та узагальненої сприйнятливості фероїка поблизу фазових переходів від температури, розміру та зовнішніх полів».
2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення після практичного заняття: Температурна поведінка та польовий гістерезис параметрів порядку у феромагнетиках, фероелектриках, антиферомагнетиках, антифероелектриках (навести графічні залежності та їх вивід в рамках теорії Ландау).

**8. Тема 8.** Вплив розмірних ефектів на температурні та польові властивості макро-, мікро- та нанорозмірних фероїків. Експеримент та графічні залежності та їх вивід в рамках теорії Ландау. Сучасні та перспективні застосування макро-, мікро- та нанорозмірних фероїків та мультифероїків.

**Література:** 8, 9 – 11, 13 – 15, 16

**Завдання для самостійної роботи (8 год.)**

1. Вивчення матеріалу лекції.
2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення: Деякі перспективні застосування нанорозмірних перовськітних фероїків у наноелектроніці та альтернативній енергетиці.

**9. Тема 9.** Методологія опису фазових діаграм та розмірних ефектів фізичних властивостей фероїків в рамках теорії Ландау-Гінзбурга-Девоншира, теорії груп та симетрії. Прострово-модульовані структури у нанорозмірних та наноструктурованих фероїках та мультифероїках.

**Література:** 8, 9 – 11, 13 – 15, 16

**Завдання для самостійної роботи (8 год.)**

1. Вивчення матеріалу лекції та **практичного заняття** на тему «Прострово-модульовані структури у нанорозмірних та наноструктурованих фероїках та мультифероїках».
2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення після лекції та практичного



заняття:

Поля деполяризації та їх внесок у розмірний ефект. Розрахунок поля деполяризації для плоского конденсатора з неоднорідним розподілом спонтанної поляризації. Вважати задачу одновимірною, а вектор поляризації - перпендикулярний обкладинкам конденсатора.

П'єзоелектричні, п'єзомагнітні, електрострикційні, магнітострикційні, флексоелектричні та флексомагнітні ефекти у фероїках. Навести відповідні тензори, та описати їх внутрішню (перестановочну) симетрію.

**10. Тема 10.** Феро-іони. Нелінійні електротранспортні та електромеханічні властивості твердотільних електролітів та їх тонких плівок. Вольт-амперні, вольт-фарадні та локальні п'єзоелектричні характеристики феро-іоніків. Їх кореляції та зв'язок з експериментами по високоточній інтерферометрії.

**Література:** 16.

**Завдання для самостійної роботи (7 год.)**

1. Вивчення матеріалу лекції.

2. Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення:

Зробити історичний огляд літератури за тематикою «від супер-іоніків до феро-іоніків». Сучасні та перспективні застосування твердотільних електролітів з наночастинками.

## **5. Практичні заняття**

з навчальної дисципліни ННД.05 «Ієрархія структурної будови твердих тіл»

Практичне закріплення лекційного матеріалу та наукові доповіді аспіранта пов'язані з темами лекцій і є частиною змісту дисципліни.

## **6. Самостійна робота**

з навчальної дисципліни ННД.05 «Ієрархія структурної будови твердих тіл»

| №                                     | Зміст самостійної роботи аспірантів                        | Обсяг, годин |
|---------------------------------------|--|--------------|
| 1.                                    | Вивчення матеріалу лекції                                  | 30           |
| 2.                                    | Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення | 45           |
| <b>Усього за навчальну дисципліну</b> |  | <b>75</b>    |

## **7. Методи викладання**

з навчальної дисципліни ННД.05 «Ієрархія структурної будови твердих тіл»

У процесі викладання дисципліни використовуються такі методи:

- 1) методи організації та здійснення навчально-пізнавальної діяльності (бесіда, лекція; ілюстрація; лабораторні роботи, реферати; самостійна робота студентів);
- 2) методи стимулювання й мотивації навчально-пізнавальної діяльності (навчальні дискусії, модульно-рейтингова система знань);
- 3) методи контролю (самоконтролю, взаємоконтролю), корекції (самокорекції, взаємокорекції) за ефективністю навчально-пізнавальної діяльності.

## **8. Рейтингова система оцінювання**

з навчальної дисципліни ННД.05 «Ієрархія структурної будови твердих тіл»

Основними формами організації контролю у процесі вивчення студентами даної дисципліни є індивідуальна, групова та фронтальна перевірка знань, вмінь та навичок студентів (усна та письмова). Рейтинг аспіранта складається з наступних отриманих балів:

1. Експрес-контроль – 20 балів. (усне опитування чи самостійні роботи під час навчального процесу)

2. Практичні заняття та самостійна робота – 40 балів.
3. Екзамен – 40 балів.

### Заохочувальні та штрафні бали

1. При відсутності на лекції/практичному занятті без поважних причин -2 бали
  2. Подана в журнал стаття чи виступ на конференції за темою курсу +10 балів.
- Сума як штрафних так і заохочуваних балів розраховується за формулою  $0,1R$ , де  $R$  – загальна кількість балів, і не має перевищувати в цілому 10 балів.

### Шкала рейтингів.

Загальна кількість балів, яку аспіранта може отримати під час вивчення курсу складається із суми вагових балів отриманих протягом вивчення дисципліни

$$R=20+40+40=100 \text{ (балів)}$$

### Шкала відповідності оцінок

| Рейтингова оцінка | Значення оцінки   | Рейтинг у відсотках, % |
|-------------------|---|------------------------|
| <b>A</b>          | <b>Відмінно</b> – відмінний рівень знань (умінь) в межах обов'язкового матеріалу з, можливими незначними недоліками.  | 90-100                 |
| <b>B</b>          | <b>Дуже добре</b> – достатньо високий рівень знань (умінь) в межах обов'язкового матеріалу без суттєвих (грубих) помилок.   | 82-89                  |
| <b>C</b>          | <b>Добре</b> – добрий рівень знань (умінь) в межах обов'язкового матеріалу з незначною кількістю помилок.   | 75-81                  |
| <b>D</b>          | <b>Задовільно</b> – посередній рівень знань (умінь) в межах обов'язкового матеріалу із значною кількістю недоліків, достатній для подальшого навчання або ж професійної діяльності.         | 69-74                  |
| <b>E</b>          | <b>Достатньо</b> - мінімально можливий допустимий рівень знань (умінь) в межах обов'язкового матеріалу.   | 60-100                 |
| <b>FX</b>         | Незадовільно з можливістю повторного складання – незадовільний рівень знань (умінь) в межах обов'язкового матеріалу з можливістю повторного перескладання після самостійного доопрацювання. | 35-59                  |
| <b>F</b>          | Незадовільно з з обов'язковим повторним вивченням курсу – низький рівень знань (умінь) в межах обов'язкового матеріалу, що вимагає повторного вивчення матеріалів курсу.                    | 1-34                   |

## 9. Орієнтовний перелік екзаменаційних питань

з навчальної дисципліни ННД.05 «Ієрархія структурної будови твердих тіл»

1. Нанотрубки і графени. зв'язок електропровідності одностінних вуглецевих нанотрубок з їх хіральністю.
2. Синтез, очищення, і функціоналізація нанотрубок і нанодротів. Створення масивів нанотрубок, нанодротів і їх мереж. Самосборка.
3. Основні застосування нанотрубок і нанодротів.
4. Альтернативні джерела електричної енергії на основі нанодротів і нанотрубок.
5. Нанокластерні фази: методи отримання, структурна будова, енергетичний спектр. Гетероструктури, надгратки.
6. Сучасні методи дослідження структурної досконалості квантових ям та надграток. Енергетичний спектр та густини станів енергетичних збуджень квантових ям та надграток.
7. Сучасні методи розрахунків зонної структури, густини електронних станів, пружних та полярних властивостей твердих тіл і їх тонких шарів.
8. Теорія функціоналу густини.

9. Ферроїки. Стисла історія питання. Означення фероїків та мультифероїків. Приклади параметрів далекосяжного порядку у фероїках та мультифероїках. Матеріали з антиферодисорсією.
10. Розмірні ефекти полярних та діелектричних властивостей фероелектричних наноматеріалів. Тонкі плівки фероелектриків, антифероелектриків, віртуальних фероелектриків, релаксори. Фазові діаграми та властивості нанорозмірних фероїків.
11. Методологія опису фазових діаграм та розмірних ефектів фізичних властивостей ферроїків в рамках теорії Ландау-Гінзбурга- Девоншира (ЛГД).
12. Просторово-модульовані структури, індуковані флексоєфектами у нанорозмірних та наноструктурованих фероїках та мультифероїках.
13. Ротомагнітні антиферодисторсійні-антиферомагнітні зв'язки та їх вплив на властивості мультифероїків (параметри порядку, сприйнятливості, род переходу, температури Нееля та Кюрі).
14. Ротомагнітні ефекти поблизу температурних фазових переходів. Зовнішнє (магнітне та електричне) поле як засіб керування фазовим станом мультифероїка.
15. Електротранспортні та електромеханічні властивості твердих електролітів та їх тонких плівок. Рівняння Пуассона, рівняння неперервності, вирази для електрохімічних потенціалів. Стерічні ефекти.
16. Вплив електродів на особливості просторових розподілів носіїв різного типу у тонких плівках твердих електролітів. Граничні умови для закритих, прозорих та частково прозорих електродів.
17. Електротранспортні та електромеханічні властивості твердих електролітів та їх тонких плівок. Вольт-амперні, вольт-фарадні та локальні п'єзоелектричні характеристики. Їх кореляції.
18. Вплив акумуляції носіїв заряду на кривизну поверхні твердого електроліту. Зв'язок з експериментами по високоточній інтерферометрії.
19. Класичні та квантові ефекти у графені та графеноподібних матеріалах. Формула Ландауера для квантованої провідності. Рівні Ландау. Квантовий ефект Холла. Ефект Рашби. Спінтроніка та магнетотроніка.
20. Графен-на-фероїку (фероелектрику або феромагнетику). Про існуючі та перспективні застосування графену та споріднених 2Д напівпровідників.

## **10.Рекомендована література:**

з навчальної дисципліни ННД.05 «Ієрархія структурної будови твердих тіл»

### **Основна:**

1. М. Ратнер, Д. Ратнер. Нанотехнология: простое объяснение очередной гениальной идеи: Пер. с англ. - М.: Издательский дом "Вильямс", 2004.- 235 ст.
2. Н. Ашкрофт, Н Мермин. Физика твердого тела. Ч.1. М.: Мир, 1979.
3. В.В. Погосов. Введение в физику зарядовых и размерных эффектов. Поверхность, кластеры, низкоразмерные системы. Москва. Физматлит, 2006 г., 328 ст.
4. Г.С. Свечников, А.Н. Морозовская. - Нанотрубки и графен - материалы электроники будущего. – Київ. – видавництво “Логос”. - 2009, 170 с. – ISBN 976-966-171-200-2.
5. І.М. Дмитрук. Електронні процеси в наноструктурах. Видавництво Київського національного університету ім.Тараса Шевченка. Київ. 2013 рік., 207 ст.
6. В.П. Кладько, В.Ф. Мачулін і др.. Рентгено-оптичні ефекти в багаточарових періодичних квантових структурах. Київ. Наукова думка. 2006 р., 287ст.
7. М.С. Бродин, И.В. Блонский. Экситонные процессы в многокомпонентном газе квазичастиц. Киев. Наукова думка, 1986, 254 ст.
8. E. Roduner. Nanoscopic Materials. Size-dependent phenomena. RSC Publishing (Cambridge, 2006).
9. V.K. Wadhawan. Introduction to ferroic materials. Gordon and Breach Science Publishers (New York, 2000).
10. М.Д. Глинчук, А.В. Рагуля. Наноферроїки – Київ. – видавництво “Наукова думка” НАН України. - 2010, 311 с. Тираж. 300. – ISBN 978-966-00-0858-9.

### **Додаткова:**

11. Handbook of Nanophysics: Functional Nanomaterials, Ed. K.D. Sattler. – Taylor&Francis. – 2010. – Vol.5, ISBN 978-1-4200-7552-6.
12. M. V. Strikha, A. I. Kurchak, and A. N. Morozovska, Impact of the domain structure in ferroelectric

substrate on graphene conductance. LAP LAMBERT Academic Publishing (2018) ISBN: 978-613-4-90909-9

13. А.Н. Морозовская, Г.С. Свечников, Е.А. Елисеев. - Теория локальных полярных свойств сегнетоэлектриков. - Одесса, «Астропринт» (2012). 430 с. – ISBN 978-966-190-708-8.
14. Nanoscale Electromechanics of Ferroelectric and Biological Systems: A New Dimension in Scanning Probe Microscopy (review) S.V. Kalinin, B.J. Rodriguez, S. Jesse, E. Karapetian, B. Mirman, E.A. Eliseev, A.N. Morozovska. Annual Review of Materials Research. - 2007. - Vol. 37 - P. 189-238.
15. S. V. Kalinin, A.N. Morozovska, Long Qing Chen, Brian J. Rodriguez, Local polarization dynamics in ferroelectric materials (review). Rep. Prog. Phys. 2010. – 73. – 056502-1-67.
16. S. V. Kalinin, Y. Kim, D. Fong, and A. Morozovska: Surface Screening Mechanisms in Ferroelectric Thin Films and its Effect on Polarization Dynamics and Domain Structures. Rep. Prog. Phys. 81, 036502 (2018)