

# КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

Факультет радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем

Кафедра квантової радіофізики та наноелектроніки

**«ЗАТВЕРДЖУЮ»**

Заступник декана з навчальної роботи

\_\_\_\_\_ Олексій НЕЧИПОРУК

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 року

## РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

**Нанофізика та нанотехнології**

**для студентів**

рівень вищої освіти

**другий (магістерський)**

галузь знань

**10 Природничі науки**

спеціальність

**105 Прикладна фізика та наноматеріали**

освітня програма

**Прикладна фізика та наноматеріали**

вид дисципліни

**обов'язкова**

Форма навчання

денна

Навчальний рік

2022/2023

Семестр

1

Кількість кредитів ECTS

3

Мова викладання

українська

Форма заключного контролю

залік

### **Викладачі:**

Сергій КУЛИК, кандидат фіз.-мат. наук, доцент кафедри квантової радіофізики та наноелектроніки.

Володимир ІЛЬЧЕНКО, доктор фіз.-мат. наук, професор кафедри нанофізики конденсованих середовищ ННІВТ.

Пролонговано:

на 20\_\_/20\_\_ н. р. \_\_\_\_\_ ( \_\_\_\_\_ ) « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

на 20\_\_/20\_\_ н. р. \_\_\_\_\_ ( \_\_\_\_\_ ) « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Розробник:**

Андрій ГОРЯЧКО, доктор фіз.-мат. наук, доцент кафедри квантової радіофізики та наноелектроніки

**«ЗАТВЕРДЖЕНО»**

Завідувач кафедри квантової радіофізики  
та наноелектроніки

\_\_\_\_\_Ганна КАРЛАШ

Протокол № \_\_ від « \_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 р.

Схвалено науково-методичною комісією факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем

Протокол № \_\_ від « \_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 р.

Голова науково-методичної комісії

Сергій РАДЧЕНКО

« \_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 року.

## ВСТУП

**1. Мета дисципліни** – ознайомлення студентів із основними засадами нанофізики та нанотехнологій, засвоєння базових фізичних принципів, що керують властивостями зразків конденсованої речовини, розміри яких перебувають в нанометровому діапазоні, ознайомлення з сучасними розробками в нанотехнологіях.

### **2. Попередні вимоги до опанування або вибору навчальної дисципліни:**

Навчальна дисципліна «Нанофізика та нанотехнології» базується на циклі дисциплін професійної та практичної підготовки бакалавра, а саме: “Електрика та магнетизм”, “Оптика”, “Атомна фізика”, “Квантова механіка”, “Фізика конденсованого середовища”, “Фізика твердого тіла”.

Попередні вимоги:

*Студент повинен знати:* основні закони, рівняння та співвідношення курсу загальної фізики, курсу фізики конденсованого середовища, курсу квантової механіки.

*Студент повинен вміти:* будувати фізичні моделі конденсованої речовини та твердого тіла як виходячи з уявлень класичної фізики, так і згідно квантово-механічних уявлень, вирізняти основні та другорядні взаємодії, якими можна нехтувати.

*Студент повинен знати:* базові підходи до проведення фізичних експериментів та вимірювань фізичних величин, основні засади впровадження фундаментальних знань в практичні технології.

### **3. Анотація навчальної дисципліни:**

Вивчення дисципліни «Нанофізика та нанотехнології» дозволяє опанувати основні фізичні принципи, що керують властивостями зразків конденсованої речовини, розміри яких перебувають в нанометровому діапазоні. Об'єктами вивчення є нанокластери, нанокристаліти, нанорозмірні плівки, нанопоруваті матеріали, методи їхнього створення та дослідження. Розглядаються основні різновиди нанолітографії, за допомогою якої можна створювати відповідні нанорозмірні об'єкти в межах усталеного технологічного процесу. Як альтернативний шлях створення наноструктур та нанорозмірних пристроїв, вивчаються процеси самозбирання в плівках, що вирощуються на поверхні певної підкладки. Значна увага приділяється квантовому обмеженню, що накладається на власні електронні стани, та вплив, який воно чинить на властивості специфічних наноелектронних пристроїв, а також на електронні властивості зразків речовини відповідного розміру, зокрема в системах пониженої розмірності (1-вимірних, 2-вимірних). Розглядаються особливості протікання електричного струму через такі об'єкти, та врахування цих особливостей для створення нових різновидів нанорозмірних транзисторів та інших перспективних електронних приладів та систем.

### **4. Завдання (навчальні цілі):**

- Надати основні відомості з курсу «Нанофізика та нанотехнології», які складають важливу частину загально-наукової підготовки магістра за спеціальністю «Прикладна фізика та наноматеріали».

- Надати основні знання з теорії поведінки квантово-механічних частинок в потенціалах, що сконцентровані в областях простору із характерними розмірами порядку довжини хвилі де Бройля, продемонструвати, як ця поведінка впливає на фізичні та хімічні властивості нанорозмірних зразків твердого тіла та конденсованої речовини.

- Навчити застосовувати одержані знання для створення новітніх та перспективних технологій виготовлення електронних приладів, функціональних матеріалів, сенсорів та інших інноваційних продуктів, зокрема оборонного та подвійного призначення.

- Навчити ефективної профорієнтації серед учнів середньої школи, таргет-комунікації в бізнес-середовищі для посилення конкурентних переваг українських виробників та розширення інвестицій в оборонний потенціал України.

Дисципліна спрямована на формування програмних компетентностей:

*Загальні компетентності:*

- ЗК 1. Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу..
- ЗК 11. Здатність працювати в команді.
- ЗК 12. Навички міжособистісної взаємодії.

*Фахові компетентності:*

- ФК 1. Здатність брати участь у складанні запитів на виконання наукових та науково-технічних проектів, в тому числі і міжнародних.

- ФК 3. Здатність брати участь у проведенні експериментальних досліджень властивостей фізичної системи, фізичних явищ і процесів.
- ФК 11. Здатність використовувати методи і засоби теоретичного дослідження та математичного моделювання для опису фізичних об'єктів, пристроїв та процесів.
- ФК 14. Здатність брати участь у роботі над інноваційними проектами, використовуючи базові методи дослідницької діяльності.

### 5. Результати навчання за дисципліною:

| Результат навчання (1, знати; 2, вміти; 3, комунікація; 4, автономність та відповідальність) |   | Форми (та/або методи і технології) викладання і навчання  | Методи оцінювання та пороговий критерій оцінювання (за необхідності) | Відсоток у підсумковій оцінці з дисципліни |
|--|---|---|--|--|
| Код  | Результат навчання  |   |  |  |
| <b>1</b>   | студент повинен <b>знати</b> :  | лекційні заняття з використанням комп'ютерної техніки в аудиторіях та/або методики дистанційного навчання | письмові модульні контрольні роботи                                  | до 45                                      |
| 1.1  | Загальні основи дискретних зв'язаних станів квантово-механічних частинок  | ==/==   | ==/==  | До 7                                       |
| 1.2  | Загальні основи фізики конденсованої речовини в нанометровому масштабі  | ==/==   | ==/==  | До 8                                       |
| 1.3  | Основні фізичні характеристики нанокластерів, нанокристалів, наноплівок та нанотрубок   | ==/==   | ==/==  | До 8                                       |
| 1.4  | Базові підходи до постановки експериментів в нанофізиці   | ==/==   | ==/==  | До 7                                       |
| 1.5  | Базові літографічні технології створення нанорозмірних пристроїв та зразків   | ==/==   | ==/==  | До 7                                       |
| 1.6  | Базові основи функціонування наноелектронних приладів   | ==/==   | ==/==  | До 8                                       |
| <b>2</b>   | студент повинен <b>вміти</b> :  | лекційні заняття з використанням комп'ютерної техніки в аудиторіях та/або методики дистанційного навчання | письмові модульні контрольні роботи                                  | до 45                                      |
| 2.1  | Створювати алгоритми обробки даних експериментів, що проводяться для дослідження конденсованої речовини в нанометровому діапазоні довжин  | ==/==   | ==/==  | До 15                                      |
| 2.2  | Здійснювати оціночні розрахунки електронного спектру нанорозмірних зразків із заданою геометрією та ефективною масою електрона  | ==/==   | ==/==  | До 15                                      |
| 2.3  | Опанувати програмні пакети, як комерційно ліцензовані, так і з відкритим кодом, для чисельного моделювання фізичних властивостей нанокластерів та наноелектронних приладів            | ==/==   | ==/==  | До 15                                      |
| <b>3</b>   | <b>комунікація</b> :  | лекційні заняття з використанням комп'ютерної техніки в аудиторіях та/або методики дистанційного навчання | письмові модульні контрольні роботи                                  | до 5                                       |
| 3.1  | Навички фахової комунікації щодо переваг та потенційних ризиків широкомасштабного впровадження нанотехнологій у повсякденне життя   | ==/==   | ==/==  | До 3                                       |
| 3.2  | Навички роботи у наукових колективах, що проводять складні експериментальні дослідження фізико-хімічних властивостей нано-об'єктів, в т.ч. на синхротронних джерелах X-випромінювання | ==/==   | ==/==  | До 2                                       |
| <b>4</b>   | <b>автономність та відповідальність</b> :   | лекційні заняття з використанням комп'ютерної техніки в аудиторіях та/або                                 | письмові модульні контрольні роботи                                  | до 5                                       |

|     |   |                                |    |      |
|-----|---|--------------------------------|----|------|
|     |   | методик дистанційного навчання |    |      |
| 4.1 | Здатність до самостійної роботи з науковою літературою, в т.ч. зарубіжною, виданою іноземними мовами за тематикою дисципліни                    | ==                             | == | До 3 |
| 4.2 | Здатність до здійснення експертної оцінки потенційної продуктивності та валідності пропозицій промислового впровадження новітніх нанотехнологій | ==                             | == | До 2 |

## 6. Співвідношення результатів навчання дисципліни із програмними результатами навчання:

| Програмні результати навчання  | Результати навчання дисципліни |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |
|--|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
|  | 1.1                            | 1.2 | 1.3 | 1.4 | 1.5 | 1.6 | 2.1 | 2.2 | 2.3 | 3.1 | 3.2 | 4.1 | 4.2 |  |
| ПРН 3. Знання сучасних обчислювальних та інформаційних технологій.   | +                              | +   | +   | +   | +   | +   | +   | +   | +   | +   |     | +   | +   |  |
| ПРН 4. Знання іноземної мови.  | +                              | +   |     |     | +   |     | +   |     |     | +   |     | +   | +   |  |
| ПРН 5. Знання етичних та соціально-економічних основ сучасного суспільства.  |                                |     | +   |     |     | +   |     |     | +   | +   |     |     |     |  |
| ПРН 6. Знаходити і аналізувати науково-технічну інформацію з різних джерел з використанням сучасних інформаційних технологій.    | +                              | +   | +   | +   | +   | +   | +   | +   |     |     | +   | +   |     |  |
| ПРН 7. Застосовувати фізичні, математичні та комп'ютерні моделі для дослідження фізичних явищ, приладів і наукоємних технологій. |                                |     |     | +   | +   |     |     |     | +   |     |     |     | +   |  |
| ПРН 9. Встановлювати та аргументувати нові залежності між параметрами та характеристиками фізичних систем.                       |                                |     |     |     |     |     |     | +   | +   |     | +   |     |     |  |

## 7. Схема формування оцінки

**7.1. Форми оцінювання студентів:** рівень досягнення всіх запланованих результатів навчання визначається за результатами написання письмових контрольних робіт. Внесок результатів навчання у підсумкову оцінку, за умови їх опанування на належному рівні:

- результати навчання 1.1 – 1.6 [знання] – до 45 %;
- результат навчання 2.1 – 2.3 [вміння] – до 45%;
- результат навчання 3.1-3.2 [комунікація] – до 5%;
- результат навчання 4.1-4.2 [автономність та відповідальність] – до 5%;

Форми оцінювання студентів:

**семестрове оцінювання:** контроль здійснюється за таким принципом.

1. Контрольна робота з тем 1-8 (письмово): РН 1.1-3, РН 2.1, РН 3.1, РН 4.1 – 30 балів.

2. Контрольна робота з тем 8-15 (письмово): РН 1.4-6, РН 2.2-3, РН 3.2, РН 4.2 – 30 балів.

**підсумкове оцінювання (у формі заліку):** форма заліку – письмово-усна. Всього за залік можна отримати від **0 до 40 балів**. Умовою досягнення позитивної оцінки за дисципліну є отримання не менш ніж **60 балів**, при цьому, оцінка за залік не може бути меншою **25 балів**.

**умови допуску до заліку:** отримання студентом сумарно не менше, ніж *критично-розрахунковий мінімум* за семестр – **35 балів**.

## 7.2. Організація оцінювання:

Оцінювання за формами контролю:

| Семестрова робота             | Кількість балів |              |
|-------------------------------|-----------------|--------------|
|                               | Min. – балів    | Max. – балів |
| Модульна контрольна робота №1 | 15              | 30           |
| Модульна контрольна робота №2 | 20              | 30           |

## Орієнтований графік оцінювання:

| Форма оцінювання              | Орієнтовний період для здійснення відповідної форми оцінювання |
|-------------------------------|--|
| Модульна контрольна робота №1 | жовтень  |
| Модульна контрольна робота №2 | листопад   |
| Залік                         | грудень  |

## Розрахунок балів, які отримують при успішній здачі заліку:

| Значення | Семестр | Іспит | Підсумкова оцінка |
|----------|---------|-------|-------------------|
| Мінімум  | 35      | 25    | 60                |
| Максимум | 60      | 40    | 100               |

## 7.3. Шкала відповідності оцінок:

| Оцінка (за національною шкалою) / National grade | Рівень досягнень, % / Marks, % |
|--|--------------------------------|
| <b>Зараховано</b> / Passed                       | 60-100%                        |
| <b>Не зараховано</b> / Not passed                | 0-59%                          |

## 8. Структура навчальної дисципліни. Тематичний план лекційних занять

| № з/п | Назва теми  | У тому числі - кількість годин |                   |
|-------|---|--------------------------------|-------------------|
|       |   | Лекції                         | Самостійна робота |
| 1     | Вирощування самоорганізованих квантових точок та квантових шнурів в напружених наноструктурах. Методи отримання масивів квантових точок та квантових дротів. Дослідження квантових дротів / точок на поверхні підкладинки методом сканувальної зондової мікроскопії.            | 2                              | 4                 |
| 2     | Електронна та йонна літографія. Їхні переваги над оптичною літографією. Характерні параметри роздільної здатності та швидкості літографічних процесів. Атомно-силова мікроскопія як інструмент метрологічної сертифікації літографічного обладнання.                            | 2                              | 4                 |
| 3     | X-променева літографія. Особливості технологічного процесу X-променевої літографії. Роздільна здатність, порівняння з оптичною літографією та літографією екстремального ультрафіолету.   | 2                              | 4                 |
| 4     | Плівки Ленгмюра-Блоджетт. Найбільш відомі методи отримання таких плівок та основні властивості. Самозбирання та приклади процесів самозбирання. Дослідження динаміки самозбирання молекулярних наноструктур в рідких розчинах за допомогою сканувальної тунельної мікроскопії.  | 2                              | 4                 |
| 5     | Квантове обмеження. Електронний спектр для 2-вимірних об'єктів. Дослідження електронного спектру 2-вимірного електронного газу методом сканувальної тунельної спектроскопії.  | 2                              | 4                 |
| 6     | Ідея створення приладу з 2D каналом з високою рухливістю носіїв. Особливості НЕМТ транзисторів. Конструкція та застосування НЕМТ структур. Поточний контроль технологічного процесу виготовлення НЕМТ структур за допомогою атомно-силової мікроскопії в безконтактному режимі. | 2                              | 4                 |
| 7     | Кулонівська блокада. Одноелектронний транзистор. Специфічні властивості одноелектронних приладів. Основні теоретичні підходи до квантово-механічного опису процесу тунелювання.   | 2                              | 4                 |

|               |  |           |           |
|---------------|--|-----------|-----------|
| 8             | Поруваті матеріали. Поруватий кремній. Методи його отримання та властивості. Вирощування поруватих плівок Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . Особливості застосування поруватого Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . Типові артефакти, що виникають при застосуванні сканувальних зондових методик в дослідженнях поверхонь поруватих матеріалів. | 2         | 4         |
| 9             | Дві парадигми вирощування наноб'єктів (квантових точок) «знизу-догори» та «згори-донизу». Наногетероструктури. Напружені надгратки та їх основні властивості. Дослідження поперечних перерізів наногетероструктур методом крос-секціональної сканувальної тунельної мікроскопії та спектроскопії.  | 2         | 4         |
| 10            | Зондова технологія для маніпулювання атомами на поверхні. Специфічні «паралельні» та «перпендикулярні» процеси. Технологія нанодруку. Пензель-нанолітографія. Основи фізики роботи атомно-силового мікроскопа в контактному режимі. Наноіндентування.  | 2         | 4         |
| 11            | Балістичний транспорт. Особливості балістичного транспорту в наноелектронних приладах. Формалізм Ландауера-Бютікера. Основи методики сканувальної тунельної спектроскопії в непружному режимі.   | 2         | 4         |
| 12            | Вуглецеві нанотрубки. Хіральність нанотрубок та її зв'язок з фізичними властивостями. Польові транзистори на основі вуглецевих одностінних нанотрубок. Методи отримання нанотрубок та їхнє практичне застосування. Вуглецева нанотрубка як зонд в сканувальній зондовій мікроскопії та спектроскопії.  | 2         | 4         |
| 13            | Квантове обмеження. Електронний спектр для 1- та 0- вимірних об'єктів. Дослідження морфології та електронних властивостей поверхневих 1- та 0-вимірних об'єктів методом сканувальної тунельної мікроскопії / спектроскопії при субкельвінівських температурах.   | 2         | 4         |
| 14            | Моди самоорганізації при епітаксійному вирощуванні наноструктур. Квантова точка. Властивості та характерні особливості квантових точок для різних матеріальних систем. Квантові точки 1-го та 2-го типів. Дослідження квантових точок методом оптичної сканувальної мікроскопії ближнього поля.  | 2         | 4         |
| 15            | Технологічні методи створення нанокластерів та нанокристалітів. Найбільш відомі методи їх отримання. Порівняння граничних можливостей дослідження нанокластерів та нанокристалітів методами сканувальної зондової мікроскопії та електронної мікроскопії.  | 2         | 4         |
| <b>Всього</b> |  | <b>30</b> | <b>60</b> |

Загальний обсяг           **90** год., в тому числі:  
Лекції                       **30** год.  
Самостійна робота       **60** год.

## **9. Рекомендовані джерела:**

### **Основні джерела:**

1. D.G. Steel. Introduction of Quantum Nanotechnology - A Problem Focused Approach. – Oxford University Press, 2021. – 370 pp.
2. M. Rocca, T.S. Rahman, L. Vattuone. Springer Handbook of Surface Science. – Springer Nature Switzerland AG, 2020. – 1260 pp.
3. K.D. Sattler. 21st Century Nanoscience - A Handbook / Nanophysics Sourcebook. – Taylor & Francis Group, LLC, 2020. – 371 pp.
4. Ю.М. Поплавко, О.В. Борисов, Ю.І. Якименко, Нанофізика, наноматеріали, наноелектроніка. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 300 с.
5. О.В. Третяк, В.З. Лозовський, Фізика низьковимірних систем, К. : Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2013. – 372 с.
6. Edward E. Wolf. Nanophysics and Nanotechnology. An Introduction to Modern Concepts in Nanoscience. Second Edition, WILEY-VCH, 2006. – 301 pp.

### **Додаткові джерела:**

1. E. Meyer, R. Bennewitz, H.J. Hug. Scanning Probe Microscopy. – The Lab on a Tip. – Springer Nature Switzerland AG, 2021. – 322 pp.
2. U. Celano. Electrical Atomic Force Microscopy for Nanoelectronics. – Springer Nature Switzerland AG, 2019. – 408 pp.
3. P. Hawkes, J.C.H. Spence. Springer Handbook of Microscopy. – Springer Nature Switzerland AG, 2019. – 1543 pp.