

# 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

**Тунельна мікроскопія та спектроскопія**

**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

**вибіркова**

Форма навчання

денна

Навчальний рік

2022/2023

Семестр

2

Кількість кредитів ECTS

4

Мова викладання

українська

Форма заключного контролю

іспит

### **Викладач:**

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

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 « \_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 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 усіма основними аспектами сучасної сканувальної тунельної мікроскопії та сканувальної тунельної спектроскопії.

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

Навчальна дисципліна «Тунельна мікроскопія та спектроскопія» базується на циклі дисциплін професійної та практичної підготовки бакалавра, а саме: «Загальна фізика», «Фізика твердого тіла», «Квантова механіка», «Фізика поверхні», «Методи обробки даних».

Попередні вимоги:

1. студент повинен знати: основні закони та рівняння загальної фізики, фізики твердого тіла, фізики поверхні, фізики напівпровідників, квантової механіки.

2. студент повинен вміти: будувати фізичні моделі твердого тіла, металів, напівпровідників, діелектриків та їхніх приповерхневих шарів, а також моделі базових стаціонарних та нестаціонарних квантово-механічних процесів, записувати основні математичні рівняння цих моделей, вміти розв'язати ті з цих рівнянь, які допускають аналітичний розв'язок.

3. студент повинен знати: базові основи радіоелектроніки, фізики вакууму, фізики низьких температур та криогенної техніки.

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

Вивчення дисципліни «Тунельна мікроскопія та спектроскопія» дозволяє вивчити фізичні та технічні принципи сучасних сканувальних зондових мікроскопів. Це, в першу чергу, сканувальні тунельні мікроскопи. Велику увагу приділено фізичним принципам, що лежать в основі функціонування методики сканувальної тунельної мікроскопії, а також багатьох інших похідних від неї: сканувальній тунельній спектроскопії, балістичній електронно-емісійній мікроскопії, спінополяризованій тунельній мікроскопії та спектроскопії, тощо. Для кожної з вищеперерахованих методик розглядаються відповідні види спектроскопії, які, враховуючи високу просторову роздільну здатність, стають фактично відповідними методиками спектромікроскопії. Розглядається фізична інтерпретація експериментальних даних, одержаних за допомогою усіх вищевказаних методик мікроскопії та спектроскопії, механізми утворення контрасту на зображеннях, реконструкція карт розподілу локальної густини електронних станів. Значну увагу приділено математичним методам обробки зображень та спектрів одержаних вищеперерахованими методами. Розкриваються застосування методик тунельної мікроскопії та спектроскопії для розв'язання практичних фундаментальних та прикладних задач в таких галузях як нанофізика, нанохімія та нанокаталіз, мікро- та наноелектроніка, квантові технології, нанобіотехнології, наносенсорика.

### **4. Завдання (навчальні цілі):**

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

- Надати основні знання з теорії тунелювання електронів через вакуумні та твердотільні бар'єри, практичних аспектів постановки тунельних експериментів, особливостей техніки сканувальної зондової мікроскопії.

- Навчити застосовувати знання в галузі тунельної мікроскопії та спектроскопії у подальших власних наукових дослідженнях або в прикладній діяльності спрямованій на розробку нових нанотехнологій, матеріалів та приладів.

- Навчити продуктивної комунікації результатів експериментів одержаних методами тунельної мікроскопії та спектроскопії перед професійною аудиторією науковців природничого напрямку, перед аудиторією учнів загальноосвітніх шкіл з метою профорієнтації та науково-популярного просвітництва, перед аудиторією стейкхолдерів, зокрема потенційних інвесторів, що прагнуть розвивати нанотехнологічну галузь.

Дисципліна спрямована на формування програмних компетентностей:

*Загальні компетентності:*

- ЗК 2. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.

*Фахові компетентності:*

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

- ФК 12. Здатність використовувати знання про фізичну природу об'єктів у роботах по створенню нових приладів, апаратури, обладнання, матеріалів і речовин, зокрема, наноматеріалів.

### 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>	<b>студент повинен знати:</b>	Лекції та семінари з використанням медійних та дистанційних технологій	Модульні контрольні роботи	до 45
1.1	Основи застосування стаціонарного та нестаціонарного рівнянь Шредінгера, рівняння Паулі.	==	==	До 8
1.2	Базові підходи до обчислення тунельного струму в різних наближеннях, включаючи аналітичні та чисельні методи	==	==	До 7
1.3	Основні робочі параметри сканувальних тунельних мікроскопів, що працюють у вакуумі, рідині та газі	==	==	До 8
1.4	Основні конструктивні особливості сканувальних тунельних мікроскопів різних типів	==	==	До 8
1.5	Основні фізичні характеристики поверхні твердого тіла, які досліджуються методом тунельної мікроскопії / спектроскопії	==	==	До 7
1.6	Основи електронної схемотехніки та комп'ютерних алгоритмів, що забезпечують проведення експериментів з тунельної мікроскопії та спектроскопії	==	==	До 7
<b>2</b>	<b>студент повинен вміти:</b>	Лекції та семінари з використанням медійних та дистанційних технологій	Модульні контрольні роботи	до 45
2.1	Розробляти та планувати експерименти із використанням методик тунельної мікроскопії	==	==	До 15
2.2	Розраховувати рівень похибок вимірних величин виходячи з паспортного рівня шуму електронної схеми керування сканувального зондового мікроскопу	==	==	До 15
2.3	Інтерпретувати необроблені дані вимірювань методами тунельної мікроскопії та спектроскопії виходячи з механізмів формування контрасту та спектральних особливостей	==	==	До 15
<b>3</b>	<b>комунікація:</b>	Лекції та семінари з використанням медійних та дистанційних технологій	Модульні контрольні роботи	до 5
3.1	Здатність ефективно презентувати результати досліджень методами тунельної мікроскопії та спектроскопії на фахових конференціях, засіданнях робочих груп, тощо	==	==	До 3
3.2	Здатність до оформлення наукових публікацій, фахових звітів та науково-популярних матеріалів, що містять тунельні зображення та спектри	==	==	До 2
<b>4</b>	<b>автономність та відповідальність:</b>	Лекції та семінари з використанням медійних та дистанційних технологій	Модульні контрольні роботи	до 5
4.1	Здатність до автономної наукової роботи в галузі сканувальної зондової мікроскопії / спектроскопії	==	==	До 3
4.2	Здатність до самостійного пошуку необхідних даних в фахових виданнях за тематикою	==	==	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 1. Глибокі знання в галузі сучасної прикладної фізики і фізики наноматеріалів.				+	+					+	+		+	+
ПРН 4. Знання іноземної мови.	+				+								+	
ПРН 8. Знаходити прогресивні та інноваційні рішення проблем і завдань при виконанні науково-технічних проектів			+		+	+		+				+		
ПРН 17. Об'єктивна самооцінка отриманих результатів та спроможність забезпечувати їх надійність	+	+					+							

## 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. Модульна контрольна робота №1 з тем 1-7 (письмово): РН 1.1-3, РН 2.1, РН 3.1, РН 4.1 – 30 балів.

2. Модульна контрольна робота №2 з тем 8-13 (письмово): РН 1.4-6, РН 2.2-3, РН 3.2, РН 4.2 – 30 балів.

**підсумкове оцінювання (у формі іспиту):** форма іспиту – письмово-усна. Всього за іспит можна отримати від 0 до 40 балів. Умовою досягнення позитивної оцінки за дисципліну є отримання не менш ніж 60 балів, при цьому, оцінка за іспит не може бути меншою **24 балів**.

**умови допуску до підсумкового іспиту:** умовою допуску до іспиту є отримання студентом сумарно не менше, ніж *критично-розрахунковий мінімум* за семестр – **36 балів**.

## 7.2. Організація оцінювання:

Оцінювання за формами контролю:

Семестрова робота	Кількість балів	
	Min. – балів	Max. – балів
Модульна контрольна робота №1	18	30
Модульна контрольна робота №2	18	30

Орієнтований графік оцінювання:

Форма оцінювання	Орієнтовний період для здійснення відповідної форми оцінювання
Модульна контрольна робота №1	березень
Модульна контрольна робота №1	квітень
Іспит	травень

Розрахунок балів, які отримують при успішній здачі іспиту:

Значення	Семестр	Залік	Підсумкова оцінка
Мінімум	36	24	60
Максимум	60	40	100

### 7.3. Шкала відповідності оцінок

Оцінка (за національною шкалою) / National grade	Рівень досягнень, % / Marks, %
<b>Відмінно</b> / Excellent	90-100%
<b>Добре</b> / Good	75-89%
<b>Задовільно</b> / Satisfactory	60-74%
<b>Не задовільно</b> / Unsatisfactory	0-59%

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

№ з/п	Назва теми	У тому числі - кількість годин		
		Лекції	Семинари	Самостійна робота
1	Вступ та огляд курсу	2	2	5
2	Квантово-механічний тунельний ефект як фізична основа тунельної мікроскопії та спектроскопії	2	1	5
3	Сканувальна тунельна мікроскопія. Постановка експерименту	2	1	5
4	Інструментальні аспекти сканувальної тунельної мікроскопії в різних середовищах та при різних температурах	2	1	5
5	Електронно-програмне керування експериментом в сканувальній тунельній мікроскопії	2	1	5
6	Фізична інтерпретація експериментальних даних тунельної мікроскопії.	2	1	5
7	Тунельна спектроскопія та сканувальна тунельна спектроскопія (спектромікроскопія)	2	1	5
8	Фізична інтерпретація експериментальних даних тунельної спектроскопії. Локальна густина електронних станів	2	1	5
9	Спеціальні методики – балістична електронно-емісійна мікроскопія	2	1	5
10	Спеціальні методики – тунельна спектроскопія непружного тунелювання	2	1	5
11	Спеціальні методики – спіно-поляризована тунельна мікроскопія	2	1	10
12	Спеціальні методики – нанолітографія за допомогою сканувального тунельного мікроскопа	2	1	10

13	Моделювання результатів експериментів в тунельній мікроскопії та спектроскопії за допомогою чисельних розрахунків з перших принципів	2	1	10
<b>Всього</b>		<b>26</b>	<b>14</b>	<b>80</b>

Загальний обсяг **120** год., в тому числі:

Лекції **26** год.

Семінарські **14** год.

Самостійна робота **80** год.

### 9. Рекомендовані літературні джерела:

#### Основні 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. B. Voigtlander. Scanning Probe Microscopy. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015. – 382 pp.

3. P. Hawkes, J.C.H. Spence. Springer Handbook of Microscopy. – Springer Nature Switzerland AG, 2019. – 1543 pp.

#### Додаткові джерела:

4. D. Sarid. Exploring Scanning Probe Microscopy with MATHEMATICA. – WILEY-VCH Verlag GmbH, 2007. – 310 pp.

5. B. Bhushan, H. Fuchs. Applied Scanning Probe Methods. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. – 235 pp.

6. M. Rocca, T.S. Rahman, L. Vattuone. Springer Handbook of Surface Science. – Springer Nature Switzerland AG, 2020. – 1260 pp.