КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

Факультет радіофізики, електроніки та комп’ютерних систем

Кафедра квантової радіофізики та наноелектроніки

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Декан

___________ Андрій НЕТРЕБА

« ____ » ___________ 20__ року

РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Тунельна мікроскопія та електронна спектроскопія

для студентів

галузь знань	**10 “Природничі науки”**
спеціальність	**105 "Прикладна фізика та наноматеріали"**
освітня програма	**“Прикладна фізика та наноматеріали”**
рівень вищої освіти	**другий освітньо-науковий (магістр)**
вид дисципліни	**вибіркова**

Форма навчання	**денна**
Навчальний рік	**2023-2024**
Семестр	**2**
Кількість кредитів ECTS	**5**
Мова викладання, навчання та оцінювання	**українська англійська**
Форма заключного контролю	**іспит**

Викладач:
Кулик Сергій Петрович, 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:

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

«ЗАТВЕРДЖЕНО»

Завідувач кафедри квантової радіофізики та наноелектроніки'

__________________________ Г. Ю. Карлаш

Протокол № __ від « ___ » ________ 20__ р.

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

Протокол № ___ від « ___ » _____________ 20__ р.

Голова науково-методичної комісії С. П. Радченко

« ___ » _____________ 20__ 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 оборобки 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 розвязути ті з цих рівнянь, які допускають аналітичний розв'язок.

3. студент повинен знати: базові основи радіолектроніки, фізики вакууму, фізики низьких температур та кріогенної техніки; англійську мову на базовому граматичному рівні зі словниковим запасом повсякденного вжитку.

3. Анотація навчальної дисципліни:

Вивчення дисципліни «Тунельна мікроскопія та спектроскопії» дозоляє 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, спін-поляризованій 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):

1. Надати основні відомості з курсу «тунельна мікроскопія та спектроскопія», які складають важливу частину загально-наукової підготовки магістра за спеціальністю «Прикладна фізика та наноматеріали».
2. Надати основні знання з теорії тунелювання електронів через вакуумні та твердотільні бар'єри, практичних аспектів постановки тунельних експериментів, особливостей техніки скандувальної зондової мікроскопії.
3. 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.
4. Навчити продуктивної комунікації результатів експериментів одержаних методами тунельної мікроскопії та спектроскопії перед професійною англомовною аудиторією науковців природничого напряму, перед аудиторією учнів загальноосвітніх шкіл з метою профорієнтації та науково-популярного просвітництва, перед аудиторією стейкхолдерів, зокрема потенційних інвесторів, в т.ч. англійською мовою для іноземних інвесторів, що прагнуть розвивати нанотехнологічну галузь в Україні.

Забезпечення досягнення компетентностей:
ЗК 2. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.;
ЗК 7. Здатність проведення досліджень на відповідному рівні.;
ЗК 8. Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями.;
ЗК 13. Здатність працювати автономно.;
ФК 2. Здатність брати участь у плануванні методики проведення та матеріального забезпечення експериментів та лабораторних досліджень.;
ФК 4. Здатність брати участь у виготовленні зразків матеріалів та об'єктів дослідження.;
ФК 5. Здатність брати участь у розробці схем фізичних експериментів та обранні необхідного обладнання та пристроїв для проведення експерименту.;
ФК 6. Здатність брати участь у обробленні та оформленні результатів експерименту.;
ФК 12. Здатність використовувати знання про фізичну природу об'єктів у роботах по створенню нових приладів, апаратури, обладнання, матеріалів і речовин, зокрема, наноматеріалів.;
ФК 13. Здатність брати участь у роботах зі складання наукових звітів та у впровадженні результатів проведених досліджень та розробок.;

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			
1	студент повинен **знати**:	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 наближення, включаючи аналітичні та чисельні методи	=//=	=//=	*До 7*
1.3	Основні робочі параметри сканувальних тунельних мікроскопів, що працюють у вакуумі, рідині та газі, їхні конструктуивні особливостч	=//=	=//=	*До 8*
1.4	Специфічні англомовні терміни в галузі сканувальної зондової мікроскопії та спектроскопії, необхідні для розуміння змісту публікацій відповідної тематики в періодичних фаховиї виданнях англійською мовою	=//=	=//=	*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*
2	студент повинен **вміти**:	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 виміряних 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*

3	**комунікація:**	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 міжнародних фахових конференціях англійською мовою, 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, державною та англійською мовами	=//=	=//=	*До 2*
4	**автономність та відповідальність:**	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 тунельної мікроскопії та спектроскопії, в т.ч. англомовних	=//=	=//=	*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 2. Розуміння технологій та теоретичних та експериментальних методів дослідження властивостей речовин і матеріалів.	+				+							+	
ПРН 6. Знаходити і аналізувати науково-технічну інформацію з різних джерел з використанням сучасних інформаційних технологій.			+		+	+		+			+		
ПРН 12. Інтерпретувати науково-технічну інформацію.	+	+					+						
ПРН 19. Проводити наукові дослідження в галузі прикладної фізики та ефективно використовувати їх результати для вирішення комплексних проблем або вивчення складних явищ на основі інтердисциплінарних знань.	+										+	+	+

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 – 20 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 – 20 балів.

3. Реферат англійською мовою за наданими викладачем англомовними фаховими публікаціями, в яких описано результати досліджень одержаних методами сканувальної тунельної мікроскопії та електронної спектроскопії — 20 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; *(обов'язково зазначається порядок організації передбачених робочою навчальною програмою форм оцінювання із зазначенням орієнтованого графіку оцінювання):*

Оцінювання за формами контролю:

Семестрова робота	Кількість балів	
	Min. – балів	Max. – балів
Модульна контрольна робота №1	12	20
Модульна контрольна робота №2	12	20
Реферат англійською мовою	12	20

Орієнтований графік оцінювання:

Форма оцінювання	Орієнтовний період для здійснення відповідної форми оцінювання
Модульна контрольна робота №1	березень
Модульна контрольна робота №2	квітень
Реферат англійською мовою	протягом семестру
Іспит	травень

Розрахунок балів, які отримують при успішній здачі іспиту:

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

7.3. Шкала відповідності оцінок

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

8. Структура навчальної дисципліни. Тематичний план практичних занять

№ з/п	Назва теми	У тому числі - кількість годин Лекції	У тому числі - кількість годин		
			Семі-нари	Лабора-торні	Самостій-на робота
1	Квантовомеханічний тунельний ефект як фізична основа тунельної мікроскопії та спектроскопії	2	1	0	1
2	Англомовна термінологія в галузі сканувальної тунельної	1	2	0	20

	мікроскопії / спектроскопії				
3	Сканувальна тунельна мікроскопія - постановка експерименту та інструментальні аспекти	2	1	4	10
4	Сканувальна тунельна мікроскопія в різних середовищах та при змінних температурах	2	1	4	10
5	Електронно-програмне керування експериментом в сканувальній тунельній мікроскопії	2	1	4	10
6	Фізична інтерпретація експериментальних даних тунельної мікроскопії.	2	1	0	10
7	Тунельна спектроскопія та сканувальна тунельна спектроскопія (спектромікроскопія)	2	1	2	10
8	Спеціальні методики - балістична електронно емісійна мікроскопія	1	1	0	10
9	Спеціальні методики - тунельна спектроскопія непружнього тунелювання	2	1	0	5
10	Спеціальні методики - спін-поляризована тунельна мікроскопія	2	1	0	5
11	Спеціальні методики - нанолітографія за допомогою сканувального тунельного мікроскопа	1	1	0	5
12	Моделювання результатів експериментів в тунельній мікроскопії та спектроскопії за допомогою чисельних розрахунків з перших принципів	1	2	0	5
Всього		**20**	**14**	**14**	**101**

Загальний обсяг **150** год., в тому числі:
Лекції **20** год.
Семінари **14** год.
Лабораторні **14** год.
Консультації **1** год.
Самостійна робота **101** 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:

1. D. Sarid. Exploring Scanning Probe Microscopy with MATHEMATICA. – WILEY-VCH Verlag GmbH, 2007. – 310 pp.
2. B. Bhushan, H. Fuchs. Applied Scanning Probe Methods. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. – 235 pp.
3. M. Rocca, T.S. Rahman, L. Vattuone. Springer Handbook of Surface Science. – Springer Nature Switzerland AG, 2020. – 1260 pp.
4. Для написання реферату англійською мовою, студенти отримують від викладача в електронному вигляді актуальні англомовні наукові публікації за тематикою навчальної дисципліни, які нещодавно (на час виконання реферату) з'явились у вільному доступі на сайті одного з провідних міжнародних видавництв.

<u>Short vocabulary in Tunneling Microscopy and Electronic Spectroscopy</u>

Atomic resolution – атомна роздільна здатність;
Current imaging tunneling spectroscopy (CITS) – тунельна спектроскопія струмового зображення;
Coarse approach – грубе наближення (вістря до досліджуваної поверхні);
Contrast reversal – інверсія контрасту;
Creep – повзучість (п'єзоматеріалу);
Density functional theory – теорія функціоналу густини;
Elastic tunneling – пружнє (ізоенергетичне) тунелювання (електронів);
Empty states image – зображення у вільних станах;
Field desorption – десорбція (адсорбатів) в електричному полі;
Inverse piezoelectric effect – обернений п'єзоелектричний ефект;
Inelastic tunneling – непружнє тунелювання (електронів);
Inelastic electron tunneling spectroscopy – спектроскопія непружнього тунелювання електронів;
Lateral resolution – латеральна (в площині зображення) роздільна здатність;
Local density of electronic states (LDOS) – локальна густина електронних станів;
Occupied states image – зображення в зайнятих станах;
Piezoscanner – п'єзосканер;
Probe tip – вістря-зонд;
Scanning tunneling microscope (STM) – сканувальний тунельний мікроскоп;
Scanning tunneling spectroscopy – сканувальна тунельна спектроскопія;
Thermal drift – термодрейф;
Tunneling barrier – тунельний бар'єр;
Vibroisolation – віброізоляція;
Vertical resolution – вертикальна (в напрямку перпендикулярному до площини зображення) роздільна здатність;

Atomic layer deposition – атомно-шарове нанесення (плівок);
Analog to digital convertor – аналогово-цифровий перетворювач;
Bipolar technology – технології на базі біполярних транзисторів;
Complementary metal oxide semiconductor technology – технології на базі комплементарних транзисторів типу метал-оксид-напівпровідник;
Digital to analog convertor – цифрово-аналоговий перетворювач;
Extreme ultra-violet lithography – літографія екстремального ультрафіолету;
Heteroepitaxy – гетероепітаксія;
Integrated circuit – інтегральна схема (мікросхема);
Integrated electronics – інтегральна електроніка;
Integration level – ступінь інтеграції;
Ion implantation – іонна імплантація;
Metal-organic chemical vapor deposition – метало-органічне хімічно-парове нанесення (плівок);
Physical vapor deposition – фізично-парове нанесення (плівок);
Plasma enhanced chemical vapor deposition – плазмово-активоване хімічно-парове осадження (плівок);
Qunatum dot – квантова точка;
Quantum well – квантова яма;
Quantum wire – квантовий дріт;
Quantum Cellular Automata – квантові коміркові автомати;
Reactive ion etching – реактивне іонне травлення;
Resonant tunneling diode – резонансний тунельний діод;
Silicon on insulator technology – технологія кремній на ізоляторі;