

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

Фізичний факультет
(назва факультету)

Кафедра загальної фізики

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Заступник декана
з навчальної роботи
Момот О.В.

« ____ » _____ 2019 року

РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ¹

Основи сканувальної зондової мікроскопії

(повна назва навчальної дисципліни)

для студентів

галузь знань	<u>10 Природничі науки</u> <i>(шифр і назва)</i>
спеціальність	<u>104 Фізика та астрономія</u> <i>(шифр і назва спеціальності)</i>
освітній рівень	<u>бакалавр</u> <i>(молодший бакалавр, бакалавр, магістр)</i>
освітня програма	<u>Фізика, Астрономія, Оптотехніка</u> <i>(назва освітньої програми)</i>
спеціалізація <i>(за наявності)</i>	<u>Фізика наноструктур в металах та кераміках</u> <i>(назва спеціалізації)</i>
вид дисципліни	<u>вибіркова</u>

Форма навчання	<u>очна</u>
Навчальний рік	<u>2018/2019</u>
Семестр	<u>4</u>
Мова викладання, навчання та оцінювання	<u>українська</u>
Форма заключного контролю	<u>залік</u>

Викладачі: професор Боровий Микола Олександрович

(Науково-педагогічні працівники, які забезпечують викладання даної дисципліни у відповідному навчальному році)

Пролонговано: на 20__/20__ н.р. _____ (_____) «__» __ 20__ р.
(підпис, ПІБ, дата)

на 20__/20__ н.р. _____ (_____) «__» __ 20__ р.
(підпис, ПІБ, дата)

на 20__/20__ н.р. _____ (_____) «__» __ 20__ р.
(підпис, ПІБ, дата)

КИЇВ – 2019

¹ Робоча програма навчальної дисципліни є нормативним документом вищого навчального закладу і містить виклад конкретного змісту навчальної дисципліни, послідовність, організаційні форми її вивчення та їх обсяг, визначає форми та засоби поточного і підсумкового контролю.

Розробники²: Боровий Микола Олександрович, доктор фіз.-мат. наук, професор,
завідувач кафедри загальної фізики
(вказати авторів: ПІБ, науковий ступінь, вчене звання, посада, кафедра)

ЗАТВЕРДЖЕНО

Зав. кафедри _____

(підпис)

(Боровий М.О.)
(прізвище та ініціали)

Протокол № 10 від 7 травня 2019 р.

Схвалено науково-методичною комісією фізичного факультету

протокол №21 від 10 травня 2019 року

Голова науково-методичної комісії _____
(підпис)

(Оліх О.Я.)
(прізвище та ініціали)

« _____ » _____ 2019 року

² Розробляється лектором. Робоча програма навчальної дисципліни розглядається на засіданні кафедри (циклової комісії – для коледжів), науково-методичної комісії факультету/інституту (радї навчального закладу - коледжу), підписується завідувачем кафедри (головою циклової комісії), головою науково-методичної комісії факультету/інституту (головою ради) і затверджується заступником декана/директора інституту з навчальної роботи (заступником директора коледжу).

ВСТУП

1. Мета дисципліни – отримання глибоких та систематичних знань щодо фізичних принципів сканувальної зондової мікроскопії різних типів – тунельної, атомно-силової, магнітно- та електросилової, а також оптичної мікроскопії ближнього поля, з метою засвоєння основних зондових методів отримання інформації про атомно-просторову та електронну структуру поверхні конденсованих систем.

2. Попередні вимоги до опанування або вибору навчальної дисципліни:

1. Знати закони класичної електродинаміки, механіки суцільного середовища та теорії пружності, основні принципи нерелятивістської квантової механіки.
2. Вміти застосовувати попередні знання з курсів математичного аналізу, диференціальних та інтегральних рівнянь.
3. Володіти навичками розв'язку задач на проходження частинки через потенціальний бар'єр, визначення сил взаємодії систем різної конфігурації..

3. Анотація навчальної дисципліни / референс:

У рамках курсу «Основи сканувальної зондової мікроскопії» розглядаються коло явищ, які виникають при взаємодії зондів різних типів з поверхнею конденсованих систем і дозволяють отримувати інформацію про атомно-просторову, електронну та магнітну структуру поверхні. Мета вивчення дисципліни – отримання глибоких та систематичних знань щодо фізичних принципів сканувальної зондової мікроскопії різних типів – тунельної, атомно-силової, магнітно- та електросилової. Навчальна задача курсу полягає в оволодінні принципами основних зондових методів отримання інформації про атомно-просторову та електронну структуру поверхні конденсованих систем. Результати навчання полягають в умінні застосовувати отримані знання для планування експериментальних досліджень наносистем методами сканувальної зондової мікроскопії, пояснення фізичних властивостей наносистем, оцінюванні точності отриманих результатів. Методи викладання: лекції, консультації, залік. Методи оцінювання: опитування в процесі лекції, контрольні роботи за кожним змістовним модулем, залік. Підсумкова оцінка виставляється на основі проміжних оцінок (60%) та заліку (40%).

4. Завдання (навчальні цілі) – оволодіння сучасними теоретичними підходами до опису взаємодії зондів різних типів з фізичною поверхнею та отримання навичок практичного визначення режимів роботи зондових мікроскопів для визначення фізичних параметрів поверхні конденсованих систем.

Згідно вимог проекту Стандарту вищої освіти України (другий (магістерський) рівень вищої освіти, галузь знань 10 «Фізика», спеціальність 104 «Фізика та астрономія», ОНП «Фізика наносистем») дисципліна забезпечує набуття здобувачами освіти наступних **компетентностей:**

Інтегральних:

Здатність розв'язувати складні спеціалізовані задачі та комплексні проблеми у процесі навчання із застосуванням сучасних теорій та процесів дослідження наноструктур із використанням комплексу методів.

Загальних:

- Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу (ЗК1).
- Навички використання новітніх інформаційних і комунікаційних технологій (ЗК2).
- Здатність до проведення самостійних досліджень на сучасному рівні (ЗК3).
- Здатність до пошуку, оброблення на аналізі інформації з різних джерел (ЗК4).

- Здатність застосовувати знання в галузі методів вимірювання у фізиці (ЗК8).

Фахових:

- Володіння принципами структурної й функціональної побудови наноструктур (ФК1).
- Володіння методами створення наноструктур (ФК2).
- Здатність до пошуку, обробки та аналізу інформації, розробка і впровадження інформаційних систем, виявлення та використання оптимального програмного забезпечення у фізиці наноструктур (ФК3).
- Здатність застосовувати знання основ напівпровідникової наноелектроніки (ФК5).
- Здатність застосовувати знання з фізики аморфних та наноструктурних металевих систем (ФК8).
- Здатність застосовувати знання з фізики керамічних наноматеріалів (ФК9).
- Здатність застосовувати знання з фізики конструкційних матеріалів (ФК11).
- Здатність застосовувати знання в галузі методів вимірювання фізичних властивостей наноструктур (ФК12).
- Здатність використовувати знання й уміння в галузі практичного використання комп'ютерних технологій для дослідження наноструктур (ФК13).

5. Результати навчання за дисципліною: (описуються з детальною достовірністю для розробки заходів оцінювання)

Результат навчання (1. знати; 2. вміти; 3. комунікація*; 4. автономність та відповідальність*)		Методи викладання і навчання	Методи оцінювання	Відсоток у підсумковій оцінці з дисципліни
Код	Результат навчання			
1.1	Знати фізичний зміст основних процесів, що відбуваються при проходженні тунельного струму в області зонд-поверхня, при атомно-силовій, магнітній, електричній взаємодії зондів з поверхнею, а також при розповсюдженні світла в отворах, суттєво менших за довжину світлової хвилі.	лекції	Модульна контрольна робота	20
1.2	Знати принципи дії, призначення та точність основних типів скануючих зондових мікроскопів, зокрема, тунельного, атомно-, магнітно-, електро-силових мікроскопів, ближньопольового скануючого оптичного мікроскопу, а також можливості і межі їх застосування. Знати основні методики реєстрації сигналів у скануючій зондовій мікроскопії та методи обробки і виправлення зондових спектрів.	лекції	Модульна контрольна робота	20
2.1	Вміти логічно та послідовно формулювати основні фізичні принципи скануючої зондової мікроскопії, здійснювати математичний опис	лекції	Модульна контрольна	10

* заповнюється за необхідністю, наприклад для практик, лабораторних курсів тощо.

	<i>процесів, що відбуваються при проходженні тунельного струму в області зонд-поверхня, при атомно-силової, магнітній, електричній взаємодії зондів з поверхнею, а також при розповсюдженні світла в отворах, суттєво менших за довжину світлової хвилі. Розв'язувати основні типи задач щодо вказаних процесів.</i>			
2.2	<i>Вміти планувати експериментальні дослідження атомно-просторової структури поверхні конденсованих систем, її електричних та магнітних властивостей. Оцінювати точність основних методів скануючої зондової мікроскопії. Самостійно працювати з науковою літературою в галузі зондової скануючої мікроскопії</i>	лекції	Модульна контрольна	10

6. Співвідношення результатів навчання дисципліни із програмними результатами навчання (необов'язково для вибіркових дисциплін)

Результати навчання дисципліни				
Програмні результати навчання	1.1	1.2	2.1	2.2
ПРН 2.1. Вміти оцінювати точність основних експериментальних методів спостереження дифракції рентгенівських променів та нейтронів низькорозмірними та нанорозмірними системами;	+	+		
ПРН 2.2. Вміти експериментально визначити структуру та фазовий склад керамічних систем		+		
ПРН 2.3. Вміти встановлювати зв'язки між характеристиками конденсованих середовищ, їх будовою та фізичними процесами в них			+	+

7. Структура курсу

Курс складається з 2-х змістових модулів: “Основні принципи скануючої тунельної та атомно-силової мікроскопії», який включає в себе 8 лекцій, та “Методи електро-, магнітно-силової зондової мікроскопії та ближньопольової оптичної мікроскопії” який складається з 7 лекцій.

8. Схема формування оцінки:

8.1 Форми оцінювання студентів: (азначається перелік видів робіт та форм їх контролю / оцінювання із зазначенням Min. – рубіжної та Max. кількості балів чи відсотків)

- семестрове оцінювання:

1. Модульна контрольна робота 1 (12 балів – 20 балів). Контроль с.р.с. (12 балів – 20 балів).
2. Модульна контрольна робота 2 (12 балів – 20 балів).

- підсумкове оцінювання у формі заліку

Підсумкове оцінювання у формі екзамену³: (обов'язкове проведення екзаменаційного оцінювання в письмовій формі)

³ Семестрову кількість балів формують бали, отримані студентом у процесі теоретичного засвоєння матеріалу з усіх розділів дисципліни, семінарських занять, виконання практичних, лабораторних, індивідуальних, підсумкових контрольних робіт, творчих робіт впродовж семестру, передбачених робочою навчальною програмою (100 балів - для

	ЗМ1/Частина 1 (за наявності)	ЗМ2/Частина 2 (за наявності)	Залік	Підсумкова оцінка
Мінімум	<u>24</u>	<u>12</u>	<u>24</u>	<u>60</u>
Максимум	<u>40</u>	<u>20</u>	<u>40</u>	<u>100</u>

у випадку комплексного екзамену слід вказати питому вагу складових

Студент не допускається до заліку, якщо під час семестру набрав менше 36 балів.

(слід чітко прописати умови, які висуваються викладачами даної дисципліни).

Оцінка за іспит не може бути меншою **24 балів** для отримання загальної позитивної оцінки за курс.

8.2 Організація оцінювання: (обов'язково зазначається порядок організації передбачених робочою навчальною програмою форм оцінювання із зазначенням, у тому числі, результатів навчання, опанування яких перевіряється конкретним оцінюванням).

Шкала відповідності

Відмінно / Excellent	90-100
Добре / Good	75-89
Задовільно / Satisfactory	60-74
Незадовільно з можливістю повторного складання / Fail	35-59
Незадовільно з обов'язковим повторним вивченням дисципліни / Fail	0-34
Зараховано / Passed	60-100
Не зараховано / Fail	0-59

СТРУКТУРА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН ЛЕКЦІЙ І ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТЬ

№ п/п	Назва теми	Кількість годин		
		лекції	лабораторні	Самостійна робота
Частина 1.				
Основні принципи сканувальної тунельної та атомно-силової мікроскопії				
1	Тема 1. Загальна характеристика скануювальної зондової мікроскопії (СЗМ) та сканувальної тунельної мікроскопії (СТМ). с.р.с. Вивчення матеріалу лекції.	2		4
2	Тема 2. Елементи конструкції та режими роботи СТМ. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції.	2		4
3	Тема 3. Методи обробки інформації в СТМ. Тунельна спектроскопія. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції.	2		4
4	Тема 4. Фізичні основи атомно-силової мікроскопії (АСМ). с.р.с. Вивчення матеріалу лекції.	2		4
5	Тема 5. Будова та функціонування атомно-силового мікроскопу. Режими роботи кантилевера. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції.	2		4
6	Тема 6.	2		4

залікових дисциплін, у випадку, якщо дисципліна завершується екзаменом, то розподіл здійснюється за таким алгоритмом: **60 балів (60%) – семестровий контроль і 40 балів (40%) – екзамен**.

	Методи вимірювань в АСМ: контактний, напівконтактний, безконтактний. Калібрування АСМ для визначення рельєфу поверхні. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції.			
7	Тема 7. Дослідження рельєфу поверхні з використанням напівконтактного методу. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції.	2		4
8	Тема 8. Граничне розділення АСМ. Підготовка до підсумкової модульної контрольної роботи.	2		4
	<i>Підсумкова модульна контрольна робота 1</i>			
Частина 2. Методи електро-, магнітно-силової зондової мікроскопії та ближньопольової оптичної мікроскопії				
9	Тема 9. Фізичні основи електро-силової сканувальної мікроскопії с.р.с. Вивчення матеріалу лекції.	2		4
10	Тема 10. Фізичні принципи магнітно-силової сканувальної мікроскопії. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції.	2		4
11	Тема 11. Фізичні основи ближньопольової оптичної мікроскопії (БОП) с.р.с. Вивчення матеріалу лекції.	2		4
12	Тема 12. Методи та можливості сканувальної ближньопольової оптичної мікроскопії (СБОП) с.р.с. Вивчення матеріалу лекції.	2		4
13	Тема 13. Загальні принципи та сучасні тенденції зондових нанотехнологій. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції.	2		4
14	Тема 14. Модифікація властивостей поверхні за допомогою СТМ/АСМ/МСМ. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції.	2		4
15	Тема 15 Модифікація властивостей поверхні методом СБОМ с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Підготовка до підсумкової модульної контрольної роботи.	2		4
	<i>Підсумкова модульна контрольна робота</i>			
	ВСЬОГО	30		60

Примітка: слід зазначити теми, винесені на самостійне вивчення

Загальний обсяг 90 год.⁴, в тому числі:

Лекцій – **30 год.**

Семінари – **0 год.**

Практичні заняття – **0 год.**

Лабораторні заняття – **0 год.**

Тренінги – **0 год.**

Консультації - **___ год.**

Самостійна робота - **60 год.**

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТІВ

⁴ Загальна кількість годин, відведених на дану дисципліну згідно навчального плану.

1. Конструктивні особливості та режими роботи зондових мікроскопів.
2. Комбінації різних типів мікроскопів в одному приладі.
3. Принципи скануючої тунельної мікроскопії.
4. Квантово-механічний опис проходження частинки через потенціальний бар'єр.
5. Конструкції скануючі тунельних мікроскопів (СТМ).
6. Системи зближення голки та зразка. Скануючі елементи. Способи виготовлення СТМ-зондів.
7. Отримання зображень поверхні в режимах постійного тунельного струму та постійної середньої висоти.
8. Отримання інформації про розподіл локальної роботи виходу електронів вздовж поверхні. Система автоматизації СТМ.
9. Характерні спотворення зображень та методи їх усунення.
10. Спектральний та кореляційний аналіз зображення поверхні.
11. Тунельна спектроскопія.
12. Вольт-амперні характеристики тунельних контактів.
13. Залежність тунельного струму від відстані зонд-зразок.
14. Резонансні ефекти в СТМ.
15. Низькотемпературний СТМ.
16. Спектроскопія надпровідників.
17. Силова взаємодія зонда з поверхнею.
18. Сили Ван-дер-Ваальса, адгезійні сили.
19. Електростатична взаємодія зонда з поверхнею.
20. Руйнування поверхонь зонда і зразка.
21. Загальна схема взаємодії основних елементів АС-мікроскопа.
22. Конструкція датчика силової взаємодії: кантилевер і зонд атомно-силового мікроскопа. Вимірювальна головка АСМ.
23. Оптична система реєстрації відхилень кантилевера.
24. Скануючі елементи (сканери) зондових мікроскопів.
25. Конструкції п'єзосканерів. Трубковий п'єзоелемент, трипод.
26. Недоліки п'єзосканерів.
27. Сканери з датчиками переміщень.
28. Ємнісні датчики для X,Y сканерів. Система зворотного зв'язку.
29. Власні коливання кантилевера.
30. Добротність кантилевера.
31. Коливання за наявності зовнішньої періодичної сили.
32. Малі коливання кантилевера в силовому полі.
33. Амплітудно-частотна і фазово-частотна характеристики кантилевера.
34. Зміна фази, амплітуди і частоти коливань в силовому полі.
35. Криві підведення зонда до зразка.
36. Вимірювання рельєфу поверхні з використанням контактного квазістатичного методу. Однопрохідні і багатопрохідні методи, зондова нанолітографія.
37. Вимірювання рельєфу поверхні методом постійної висоти і методом постійної сили.
38. Схема петлі зворотного зв'язку в контактному методі.
39. Метод латеральних сил.
40. Достоїнства і недоліки контактного методу АСМ.
41. Принцип роботи АСМ за напівконтактним коливальним методом.
42. Розгойдування кантилевера.
43. Обробка змінного сигналу DFL.
44. Схема петлі зворотного зв'язку в напівконтактному методі.
45. Залежність сигналу MAG від зсуву кантилевера уздовж вертикальної осі (напівконтактні криві приводу-відведення).
46. Визначення абсолютного значення амплітуди коливань кантилевера.
47. Безконтактний метод роботи АСМ.
48. Лінійні міри для растрових електронних і атомний-силових мікроскопів.
49. Періодичні крокові і поодинокі структури.
50. Властивості універсальної лінійної рельєфної міри.
51. Створення структури з трапецієвидним профілем.
52. Вплив пружних деформацій на роздільну здатність АСМ.
53. Ефект розширення профілю. Ефект заниження висот.
54. Межа розділення, обумовлена пружними деформаціями, для різних матеріалів.
55. Вплив радіусу заокруглення зонда і кута розчину конуса.
56. Конволюція форми зонда з рельєфом поверхні.
57. Латеральна роздільна здатність АСМ.
58. Артефакти, обумовлені просторовим розділенням. Атомарне та псевдоатомарне розділення.

59. Мікроскопія індукованого електричного поля провідних і діелектричних нанооб'єктів.
60. Ємнісна мікроскопія та мікроскопія електричного потенціала (Кельвін-ефект).
61. Застосування мікроскопії індукованого електричного поля. для визначення провідних об'єктів в діелектричній матриці.
62. Принципи роботи та конструкції магнітно-силових мікроскопів.
63. Взаємодія зонда з магнітними полями зразка.
64. Особливості формування МСМ-контрасту від різних структур.
65. Реєстрація магнітострикційного відгуку поверхні.
66. Проходження світла через отвори з розмірами, меншими за довжину світлової хвилі. Принципи роботи ближньопольових оптичних мікроскопів.
67. Режими роботи БОП.
68. Типи ближньопольових оптичних зондів та методи їх виготовлення.
69. Зонди скануючої ближньопольової оптичної мікроскопії (СБОП) на основі оптичного волокна.
70. Ближньопольова спектроскопія напівпровідникових структур.
71. Дослідження фотолюмінесценції квантових точок, ниток та ям з високим просторовим розділенням. Фізико-хімічні ефекти в зондових нанотехнологіях.
72. Контактне та безконтактне формування нанорельєфу поверхні підложок.
73. Міжелектродний масоперенос з манометровим розділенням.
74. Модифікація властивостей середовища в зазорі між ривідним зондом і підложкою. Локальне анодне окислення.
75. Теплові ефекти в пристроях вакуумної мікро- та наноелектроніки.
76. Дослідження нанорозмірних структур на поверхні тривимірних макрооб'єктів.
77. Термохімічні процеси на поверхні, які стимульовано проходженням струму через контакт.
78. Магнітний вплив зонду на поверхню магнітних згазків.
79. Створення поверхневих структур нанометрового масштабу.
80. Надщільний запис інформації методом МСМ.
81. Ініціювання фотохімічних, термохімічних реакцій та процесів дифузії під дією оптичного випромінення.
82. Ближньопольова фотолітографія.
83. Фізичні та технологічні обмеження методу. Надщільний запис інформації методом БОМ.
84. Реверсивний та нереверсивний запис інформації.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА⁵:

Основна: (Базова)

1. Е.Г. Дедкова, А.А Чуприк, И.И. Бобринецкий, В. К. Неволин. Приборы и методы зондовой микроскопии. Учебное пособие. М.: МФТИ, 2011, 160 с.
2. И.И. Бобринецкий, В. К. Неволин. Зондовая микроскопия в нанотехнологии. М.: Из-во МИСИ, 2008, 132 с.
3. В.Л. Миронов. Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Техносфера, 2004, 143 с.

Додаткова:

4. В.А. Быков, М.И. Лазарев, С.А. Саунин - Сканирующая зондовая микроскопия для науки и промышленности. М.: //Электроника: наука, технология, бизнес, 1997, № 5, стр. 7 - 14.
5. А.П.Володин. Новое в сканирующей микроскопии. // Приборы и техника эксперимента, 1998, № 6, стр. 3 - 42.
6. Scanning probe microscopy and spectroscopy: methods and applications by Roland Wiesendanger Cambridge University Press, 1994 ISBN 0521428475, 9780521428477.
7. Scanning Probe Microscopy - Analytical Methods by Roland Wiesendanger, Springer, 1998 ISBN 3540638156, 9783540638155.
8. Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy : Theory, Techniques, and Applications by Dawn Bonnell (Editor), Wiley-VCH, 2000.
9. Scanning Probe Microscopy: The Lab on a Tip by Ernst Meyer ,Hans Josef Hug, Roland Bennewitz, Springer-Verlag, 2003, ISBN: 3540431802.

⁵ В тому числі Інтернет ресурси