

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Львівський національний університет імені Івана Франка
Фізичний факультет
Кафедра фізики твердого тіла

Затверджено

На засіданні кафедри фізики твердого тіла
фізичного факультету
Львівського національного університету імені
Івана Франка
(протокол № 1 від 29 серпня 2024 р.)

Завідувач кафедри 
Володимир КАПУСТЯНИК

Силабус

**з навчальної дисципліни «Мікроскопія нанорозмірних об'єктів»,
що викладається в межах ОПШ Нанофізика та наноматеріали
першого (бакалаврського) рівня вищої освіти для здобувачів
зі спеціальності 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»**

Назва курсу	Мікроскопія нанорозмірних об'єктів
Адреса викладання курсу	вул. Кирила і Мефодія 8, 79005 Львів
Факультет та кафедра, за якою закріплена дисципліна	фізичний факультет, кафедра фізики твердого тіла
Галузь знань, шифр та назва спеціальності	10 Природничі науки / 105 Прикладна фізика та наноматеріали
Викладачі курсу	Лекції та лабораторні роботи проводить доцент кафедри фізики твердого тіла, к.ф.-м.н. Еліяшевський Юрій Ігорович
Контактна інформація викладачів	yuriy.eliyashevskyy@lnu.edu.ua https://physics.lnu.edu.ua/employee/eliyashevskiy-yurij-ihorovych
Консультації по курсу відбуваються	Консультації в день проведення лекцій та лабораторних занять (за попередньою домовленістю). Також можливі он-лайн консультації через електронну пошту та на платформі Microsoft Teams. Для погодження часу он-лайн консультацій слід написати на електронну пошту викладача або в чат Microsoft Teams
Сторінка курсу	https://physics.lnu.edu.ua/course/mikroskopiya-nanorozmirnyh-objektiv-speprakt-prykladna-fizyka
Інформація про курс	Дисципліна «Мікроскопія нанорозмірних об'єктів» є нормативною дисципліною зі спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали для першого (бакалаврського) рівня вищої освіти, яка викладається у 4 семестрі в обсязі 3 кредитів (за Європейською Кредитно-Трансферною Системою ECTS).
Коротка анотація курсу	Розглядаються сучасні мікроскопічні методи дослідження об'єктів нанометрових розмірів. Вивчаються різні типи взаємодії електронного пучка зі зразком та способи отримання інформації про досліджуваний об'єкт за їх допомогою. Значну увагу приділено електронній просвітлюючій та растровій мікроскопії, розглянуто також супутню методику рентгенівського мікроаналізу. Також висвітлюються найсучасніші зондові методи дослідження поверхні, а саме: атомна силова та скануюча тунельна мікроскопії.
Мета та цілі курсу	Мета вивчення дисципліни – ознайомити студентів з методами скануючих растрової і зондової мікроскопії та навчити їх самостійно вибирати і обґрунтовувати свій вибір щодо оптимального методу мікроскопії для конкретного об'єкта заданої природи та їхнє практичне застосування для дослідження наноматеріалів. Цілі курсу: формувати у майбутнього фізика поняття про різні методи мікроскопії, що ґрунтуються на різноманітній природі взаємодій між зондом зі зразком.
Література для вивчення дисципліни	Базова: 1. Тузяк О.Я. Основи електронної та зондової мікроскопії: навч. посібник / О.Я. Тузяк, В.Ю. Курляк. – Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2012. – 296 с. 2. Goodhew P.J., Humphreys J., Beanland R. Electron microscopy and analysis. 3d edition.- Taylor and Francis, London and New York, 2001. 3. Michler G.H. Compact Introduction to Electron Microscopy: Techniques, State, Applications, Perspectives. - Springer Wiesbaden, 2022. – 54 p.

	<p>4. <i>Jawand A. J.</i> AFM Handbook; Theoretical Principles and Experimental Parameters / <i>A. J. Jawand</i> . – Scholar’s Press, 2020 . – 57 p.</p> <p>Допоміжна:</p> <p>1. <i>Goldstein J.I.</i> Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis / Joseph I. Goldstein , Dale E. Newbury , Joseph R. Michael , Nicholas W.M. Ritchie , John Henry J. Scott , David C. Joy, Fours edition. – Springer-Verlag New York, 2017. – 550 p.</p> <p>2. <i>Zhou W., Wang Zh. L.</i> Scanning Microscopy for Nanotechnology / Weilie Zhou, Zhong Lin Wang . –Springer Science, 2006. – 513 p.</p> <p>3. <i>Eaton P., West P.</i> Atomic Force Microscopy / Peter Eaton Paul West. – Oxford University Press 2010. – 248 p.</p> <p>Інформаційні ресурси:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. www.afmworkshop.com 2. www.nanohub.org 3. www.znannya.org 4. www.nbu.gov.ua/portal/natural/nano/
Тривалість курсу	один семестр
Обсяг курсу	90 годин, з яких 32 годин аудиторних занять, з них 16 годин лекцій, 32 годин лабораторних занять, та 42 годин самостійної роботи
Очікувані результати навчання	<p>В результаті вивчення цього курсу студенти мають оволодіти такими компетентностями:</p> <p>Загальні компетентності (ЗК):</p> <p>ЗК 1. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.</p> <p>ЗК 2. Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності.</p> <p>ЗК 3. Здатність спілкуватися державною мовою як усно, так і письмово.</p> <p>ЗК 5. Навички використання інформаційних і комунікаційних технологій.</p> <p>ЗК 6. Здатність до проведення досліджень на відповідному рівні.</p> <p>ЗК 7. Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел.</p> <p>ЗК 10. Навички здійснення безпечної діяльності.</p> <p>Спеціальні (фахові, предметні) компетентності (СК):</p> <p>СК 1. Здатність брати участь у плануванні та виконанні наукових та науково-технічних проектів.</p> <p>СК 3. Здатність брати участь у виготовленні експериментальних зразків, інших об'єктів дослідження.</p> <p>СК 4. Здатність брати участь у впровадженні результатів досліджень та розробок. СК 5. Здатність до постійного розвитку компетентностей у сфері прикладної фізики, інженерії та комп'ютерних технологій.</p> <p>СК 6. Здатність використовувати сучасні теоретичні уявлення в галузі фізики для аналізу фізичних систем.</p> <p>СК 9. Здатність виконувати експериментальні та теоретичні дослідження автономно та у складі колективу виконавців.</p>

	<p>СК 11. Здатність продемонструвати знання характеристик і властивостей наноматеріалів та процесів їхнього виробництва та дослідження.</p> <p>Після засвоєння навчальної дисципліни студенти мають продемонструвати такі програмні результати навчання:</p> <p>ПРН 01. Знати і розуміти сучасну фізику на рівні, достатньому для розв’язання складних спеціалізованих задач і практичних проблем прикладної фізики.</p> <p>ПРН 03. Застосовувати ефективні технології, інструменти та методи експериментального дослідження властивостей речовин і матеріалів, включаючи наноматеріали, при розв’язанні практичних проблем прикладної фізики.</p> <p>ПРН 05. Вибирати ефективні методи та інструментальні засоби проведення досліджень у галузі прикладної фізики.</p> <p>ПРН 06. Відшукувати необхідну науково-технічну інформацію в науковій літературі, електронних базах, інших джерелах, оцінювати надійність та релевантність інформації.</p> <p>ПРН 10. Планувати й організувати результативну професійну діяльність індивідуально і як член команди при розробці та реалізації наукових і прикладних проєктів.</p> <p>ПРН 14. Вміння розпізнавати методи синтезу наноматеріалів, встановлювати їхні фізико-хімічні властивості, вплив на навколишнє середовище та людину.</p> <p>ПРН 15. Вміти планувати і виконувати лабораторні та експериментальні дослідження за допомогою вимірювальних приладів, оцінювати похибки проведення досліджень, робити висновки.</p>
Ключові слова	Атомно-силова мікроскопія, скануюча тунельна мікроскопія, зображення, розділення, електронний растровий мікроскоп, рентгенівський мікроаналіз.
Формат курсу	Очний
Теми	Наведено у табл.1 і табл. 2
Підсумковий контроль, форма	іспит в кінці семестру сума балів отриманих протягом семестру для кожного виду навчальної діяльності (детально описано в п. Критерії оцінювання)
Пререквізити	Для вивчення дисципліни необхідні знання одержані при вивченні загальних та спеціальних дисциплін спеціальності, насамперед “Електрика і магнетизм”, “Оптика”, “ОТ і програмування”
Навчальні методи та техніки, які будуть використовуватися під час викладання курсу	Використовуються такі методи навчання: а) <i>словесні</i> – лекція, пояснення, бесіда, інструктаж (вступний та поточний) під час виконання лабораторних робіт; б) <i>наочні</i> – ілюстрування лекційного матеріалу презентаціями, що включають в себе таблиці, схеми та графіки; в) <i>лабораторні</i> – виконання лабораторних робіт, що передбачає організацію навчальної роботи для отримання нових знань, перевірки певних наукових гіпотез на рівні досліджень, узагальнень та аналізу та формування вмінь і навичок інтерпретації результатів досліджень різноманітних об’єктів.
Необхідне обладнання	персональний комп’ютер, операційні системи (Windows, Linux), Office 365, проектор. Для виконання лабораторних робіт: атомно-силовий

	мікроскоп Solver PRO47, растровий електронний мікроскоп–мікроаналізатор PEMMA-102-02.
Критерії оцінювання (окремо для кожного виду навчальної діяльності)	<p>Оцінювання проводиться за 100-бальною шкалою. Бали нараховуються за наступним співвідношенням:</p> <ul style="list-style-type: none"> • лабораторні роботи: 30% семестрової оцінки; максимальна кількість балів 35 (14 лабораторних робіт по 2,5 бали); • контрольний замір (модуль): 15% семестрової оцінки; максимальна кількість балів 15; • іспит: 50% семестрової оцінки. Максимальна кількість балів 50. <p>Підсумкова максимальна кількість балів 100.</p> <p>Критерії оцінювання лабораторних робіт:</p> <p>2,5 б. – студент повністю виконав завдання і володіє матеріалом на високому рівні;</p> <p>2 б. – студент повністю виконав завдання і володіє матеріалом на достатньо високому рівні;</p> <p>1,5 б. – студент повністю виконав завдання і володіє матеріалом на задовільному рівні;</p> <p>1 б. – студент частково виконав завдання і володіє матеріалом на задовільному рівні;</p> <p>0,5 б. – студент частково виконав завдання і тільки частково володіє матеріалом;</p> <p>0 б. – студент не виконав завдання.</p> <p>Контрольна робота – максимально 15 балів:</p> <p>15 б. – студент повністю володіє матеріалом;</p> <p>7–14 б. – студент достатньо володіє матеріалом;</p> <p>1–6 б. – студент частково володіє матеріалом;</p> <p>0 б. – студент не володіє матеріалом.</p> <p>Іспит – максимально 50 балів:</p> <p>Іспит проводиться у формі усної відповіді на питання.</p> <p>У білеті 3 питання (перше питання – 14 балів, наступні – по 18 балів, кожне).</p> <p>Критерії оцінювання описових питань іспиту:</p> <p>першого питання білету:</p> <p>14 б. – студент повністю володіє матеріалом;</p> <p>10–13 б. – студент достатньо володіє матеріалом;</p> <p>6–9 б. – студент частково володіє матеріалом;</p> <p>1–5 б. – студент має базові знання матеріалу;</p> <p>0 б. – студент не володіє матеріалом.</p> <p>другого і третього питань білету:</p> <p>18 б. – студент повністю володіє матеріалом;</p> <p>15–17 б. – студент достатньо володіє матеріалом;</p> <p>8–14 б. – студент частково володіє матеріалом;</p> <p>1–7 б. – студент має базові знання матеріалу;</p> <p>0 б. – студент не володіє матеріалом.</p> <p>Додаткові 10 балів студент також може отримати за публікацію статті або особисту участь у науковій конференції за тематикою курсу за умови, що загальне число набраних балів не перевищуватиме 100 балів.</p>

	<p>Академічна доброчесність: очікується, що роботи студентів будуть їхніми оригінальними дослідженнями чи міркуваннями. Списування, втручання в роботу інших студентів, відсутність посилань на використані джерела становлять, але не обмежують, приклади можливої академічної не доброчесності. Виявлення ознак академічної не доброчесності в роботах студента є підставою для її не зарахування викладачем, незалежно від масштабів плагіату чи обману. Відвідування занять є важливою складовою навчання. Очікується, що всі студенти відвідають усі лекції і лабораторні заняття курсу. Студенти мають інформувати викладача про неможливість відвідати заняття. У будь-якому випадку студенти зобов'язані дотримуватися усіх строків визначених для виконання усіх видів робіт, передбачених курсом.</p> <p>Література: уся література, яку студенти не зможуть знайти самостійно. Буде надана викладачем виключно в освітніх цілях без права передачі її третім особам. Студенти заохочуються до використання також й іншої літератури та джерел, яких немає серед рекомендованих.</p> <p>Політика встановлення балів. Враховуються бали набрані за виконання та захист лабораторних робіт і самостійної роботи. При цьому враховується присутність на заняттях та активність студента під час виконання лабораторної роботи; списування та плагіат; користування мобільними пристроями в цілях не пов'язаних з навчанням; несвоєчасне виконання поставленого завдання.</p> <p>Додаткові бали можна отримати за результатами неформального та/або інформального навчання по тематиці даного курсу. Визнання та зарахування результатів такого навчання відбувається у відповідності до наданих документів про неформальне та/або інформальне навчання.</p> <p>Жодні форми порушення академічної доброчесності не толеруються.</p>
<p>Питання на екзамен</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Формування зображення в мікроскопі. 2. Роздільна здатність та обмеження оптичного мікроскопа. 3. Аберації оптичних систем. 4. Світло та електрони. Довжина хвилі де Бройля. 5. Властивості електронів у магнітному полі. Електромагнітні лінзи. 6. Взаємодія електронного пучка з речовиною. 7. Пружне та непружне розсіяння електронів. 8. Вторинні ефекти при взаємодії електронного пучка з речовиною. 9. Характеристичне та гальмівне рентгенівське випромінювання. 10. Будова та принцип роботи растрового електронного мікроскопа. 11. Дослідження топології поверхні з у пружньо-відбитих та вторинних електронах. 12. Детектор Еверхарта-Торнлі. 13. Енергодисперсійний аналіз у растровій електронній мікроскопії. 14. Спектрометр з дисперсією по довжині хвилі. 15. Зондова мікроскопія. Спектрометр з дисперсією по довжині хвилі сканувальної зондової мікроскопії. 16. Принцип роботи сканера зондових мікроскопів. Будова і недосконалості п'езосканера. 17. Явище тунелювання електронів.

	<p>18.Сканувальний тунельний мікроскоп. Принцип дії. 19.Режими роботи сканувального тунельного мікроскопа. 20.Взаємодія атомів при наближенні. Потенціал Ленарда-Джонса. 21.Сканувальна силова мікроскопія. Принцип роботи атомно-силового мікроскопа. 22.Контактна атомно-силова мікроскопія. 23.Безконтактна атомно-силова мікроскопія. 24. Напівконтактна атомно-силова мікроскопія. 25. Безконтактна атомно-силова мікроскопія. 26.Багатопрхідні методики в атомно-силовій мікроскопії. Загальна характеристика. 27. Магнітна атомо-силова мікроскопія. 28. АСМ електростатичних сил. Метод зонда Кельвіна. 29. Літографія за допомогою атомно-силового мікроскопу. 30. Дослідження розподілу електричного опору за допомогою АСМ. Точкові вольт-амперні характеристики</p>
Опитування	Анкету-оцінку з метою оцінювання якості курсу буде надано по завершенню курсу.

Схема курсу «Мікроскопія нанорозмірних об'єктів»

Тиждень	Назва теми	Форма діяльності та обсяг годин	Література	Термін виконання
1-3	<p>Вступ. Перспективи використання наноматеріалів. Короткий історичний огляд методик дослідження нанорозмірних об'єктів.</p> <p>Тема 1. Основи мікроскопії. Оптична мікроскопія</p> <p>Методи отримання зображення. Будова оптичного мікроскопа. Отримання збільшеного зображення. Роздільна здатність. Дифракційна межа. Критерій Релея. Глибина поля, глибина фокусу. Параметри, що характеризують оптичний мікроскоп. Аберації.</p>	Лекції – 3 год, самостійна робота – 3 год	Базова: 1, 2 Допоміжна: 2	3 тижні
4-6	<p>Тема 2. Електронна мікроскопія: растрова та просвітлювальна</p> <p>Фізичні основи електронної мікроскопії. Взаємодія електронного пучка зі зразком. Вторинні ефекти. Детектори електронів, їх види і характеристики. Електронний мікроскоп на просвітлення. Формування зображення у просвічуючому електронному мікроскопі (ПЕМ). Підготовка зразків. Будова, характеристики, переваги і недоліки ПЕМ. Растровий електронний мікроскоп (РЕМ). Формування зображення у РЕМ. Особливості приготування зразків. Будова, характеристики, переваги і недоліки РЕМ.</p>	Лекції – 3 год, самостійна робота – 4 год	Базова: 1- 3 Допоміжна: 1,2	3 тижні
7-9	<p>Тема 3. Рентгенівський мікроаналіз</p> <p>Генерація Х-випромінювання та його природа. Види рентгену. Реєстрація рентгену: спектрометр з дисперсією по довжинах хвиль; спектрометр з дисперсією по енергії. Якісний і кількісний мікроаналіз.</p>	Лекції – 3 год, самостійна робота – 3 год	Базова: 2, 3; Допоміжна: 1,2	3 тиждень
10-12	<p>Тема 4. Тунельна мікроскопія</p> <p>Принцип роботи зондового мікроскопа. Будова зондового мікроскопа. Будова п'єзосканера. Обмеження та недосконалості п'єзосканера. Тунелювання електронів через потенціальний бар'єр. Скануючий тунельний мікроскоп (СТМ).</p>	Лекції – 3 год, самостійна робота – 4 год	Базова: 1, 4; Допоміжна: 2,3	3 тижні

	Характеристики та режими СТМ. Области застосування.			
13-16	Тема 5. Атомно-силова мікроскопія Огляд типів міжатомних взаємодій. Атомний силовий мікроскоп (АСМ), його принцип дії та характеристики. Режими роботи атомного силового мікроскопа. Контактний режим. Особливості застосування. Напівконтактний режим роботи АСМ. Безконтактний режим роботи АСМ. Двопрохідні методи дослідження фізичних властивостей поверхні за допомогою АСМ. Магнітна атомо-силова мікроскопія. АСМ електростатичних сил. Метод зонда Кельвіна. Літографія за допомогою атомно-силового мікроскопу.	Лекції – 4 год, самостійна робота – 6 год	Базова: 1, 4; Допоміжна: 2,3	4 тижні

Таблиця 2

Теми лабораторних занять

Тиждень	Назва теми	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
1	Вступне заняття. Правила техніки безпеки при роботі на електронному мікроскопі.	лаборатор. заняття – 2 год	1 тиждень
2	Вивчення будови електронного мікроскопа-мікроаналізатора РЕММА-102-02	лаборатор. заняття – 2 год, самостійна робота – 1 год	1 тиждень
3	Приготування зразків для дослідження растровим електронним мікроскопом.	лаборатор. заняття – 2 год, самостійна робота – 2 год	1 тиждень
4	Отримання зображення поверхні зразка в режимі відбитих електронів.	лаборатор. заняття – 2 год, самостійна робота – 2 год	1 тиждень
5	Отримання зображення поверхні зразка в режимі вторинних електронів.	лаборатор. заняття – 2 год, самостійна робота – 2 год	1 тиждень
6	Проведення енергодисперсного рентгенівського мікроаналізу.	лаборатор. заняття – 2 год, самостійна робота – 2 год	1 тиждень
7	Вивчення хвильового рентгенівського мікроаналізу.	лаборатор. заняття – 2 год, самостійна робота – 2 год	1 тиждень
8	Будова та умови експлуатації мікроскопа СЗМ Solver P47.	лаборатор. заняття – 2 год, самостійна робота – 1 год	1 тиждень
9	Приготування вістря для атомно-силової мікроскопії.	лаборатор. заняття – 2 год, самостійна робота – 2 год	1 тиждень
10	Контактна атомно-силова мікроскопія.	лаборатор. заняття – 2 год, самостійна робота – 2 год	1 тиждень
11	Напівконтактний режим роботи скануючого атомно-силового мікроскопа.	лаборатор. заняття – 2 год, самостійна робота – 2 год	1 тиждень
12	Робота СЗМ Solver P47 у режимі скануючого тунельного мікроскопа.	лаборатор. заняття – 2 год, самостійна робота – 2 год	1 тиждень

13	Вивчення феромагнітних доменів у феромагнетику методом скануючої зондової мікроскопії.	лаборатор. заняття – 2 год, самостійна робота – 2 год	1 тиждень
14	Дослідження сегнетоелектричних доменів методом скануючої зондової мікроскопії.	лаборатор. заняття – 2 год, самостійна робота – 2 год	1 тиждень
15	Методи обробки зображень, отриманих електронним мікроскопом.	лаборатор. заняття – 2 год, самостійна робота – 2 год	1 тиждень
16	Заключне заняття	лаборатор. заняття – 2 год	1 тиждень