МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Львівський національний університет імені Івана Франка
Факультет електроніки та комп'ютерних технологій
Кафедра фізичної та біомедичної електроніки

Затверджено
На засіданні кафедри фізичної та біомедичної електроніки
факультету електроніки та комп'ютерних технологій
Львівського національного університету
імені Івана Франка
(протокол №1 від 29 серпня 2023 р.)

Завідувач кафедри
професор Олег БОРДУН

_____

Силабус з навчальної дисципліни «Електронна мікроскопія», що викладається в межах ОП «Пристрої та матеріали сенсорної електроніки » другого (магістерського) рівня вищої освіти для здобувачів зі спеціальності 176 «Мікро- та наносистемна техніка »

Львів 2023

Назва курсу	Електронна мікроскопія
Адреса викладання дисципліни	вул. Драгоманова, 50, 79005 Львів
Факультет та кафедра, за якою закріплена дисципліна	Факультет електроніки і комп'ютерних технологій, кафедра фізичної та біомедичної електроніки
Галузь знань, шифр та назва спеціальності	17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації 176 Мікро- та наносистемна техніка
Викладачі дисципліни	доцент кафедри фізичної та біомедичної електроніки, канд.фіз.-мат.наук. Пенюх Богдан Романович
Контактна інформація викладачів	bohdan.penyukh@lnu.edu.ua https://electronics.lnu.edu.ua/employee/penyuh-bohdan-romanovych/
Консультації з питань навчання по дисципліні відбуваються	Консультації в день проведення лекцій та лабораторних занять (за попередньою домовленістю). Можливі також он-лайн консультації через MSTeams та електронну пошту.
Сторінка дисципліни	https://electronics.lnu.edu.ua/course/elektronna-20mikroskopiia/
Інформація про дисципліну	Дисципліна " Електронна мікроскопія " є вибірковою дисципліною зі спеціальності 176 Мікро- та наносистемна техніка для освітньої програми «Пристрої та матеріали сенсорної електроніки», яка викладається у 2 семестрі в обсязі 8 кредитів (за Європейською Кредитно-Трансферною Системою ECTS).
Коротка анотація дисципліни	Розглядаються питання взаємодії електронів з речовиною; характеристики електронного пучка; будова і принципи роботи лінз; принципи роботи електронних мікроскопів у різних режимах; принципи формування та обробка зображень, отриманих у електронному мікроскопі; методики препарування зразків для електронно-мікроскопічних досліджень.
Мета та цілі дисципліни	Метою викладання навчальної дисципліни є формування у студентів знань та практичних навичок роботи з електронними мікроскопами. Завдання: навчити студентів основ функціонування трансмісійних та скануючих мікроскопів, розуміння вимог до об'єктів, які можуть бути дослідженні в електронних мікроскопах, методик опрацювання та принципів трактування результатів електронно-мікроскопічних досліджень.
Література для вивчення дисципліни	**Основна література:** 1. David B. Williams, C. Barry Carter. Transmission Electron Microscopy. A Textbook for Materials Science / Springer ScienceBusiness Media, 2009, P.760. 2. Stephen J. Pennycook Peter D. Nellist. Scanning Transmission Electron Microscopy Imaging and Analysis / Springer Science+Business Media, 2011, P.764. 3. Anwar Ul-Hamid. A Beginners Guide to Scanning Electron Microscopy / Springer Nature Switzerland, 2018, P.402. 4. Patrick Echlin. Handbook of Sample Preparation for Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis / Springer Science+Business Media, 2009, P.330. 5. David Brandon And Wayne D. Kaplan. Microstructural Characterization of Materials 2nd ed./John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, 2008, P.536.

	6. .Бойко Б.Т., Шкалето В.І., Хрипунов Г.С., Зайцев Р.В. Фізичне матеріалознавство для мікро- та наноелектроніки: дослідження структури плівок електронографічним методами: навч. посібник. Том 1. –Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – 142с. 7. Nikodem Tomczak Kuan Eng Johnson Goh. SCANNING PROBE MICROSCOPY /World Scientific Publishing, 2011, P.261. 8. Qiang Wu, Fatima Merchant, Kenneth R.Castleman. Microscope image processing. –Elsevier, 2008. –P.583 **Додаткова література:** 1. Лобода В.Б., Іваній В.С., Хурсенко С.М. та ін. Сучасні методи дослідження структури речовини. Спеціальний фізичний практикум.: навч. посібник. – Суми: Університетська книга, 2010. – 259с. 2. Гірін О.Б., Овчаренко В.І. Методичні вказівки до виконання лабораторного практикуму з розділу «Прикладний електронно-мікроскопічний аналіз матеріалів» – Д.: ДВНЗ УДХТУ, 2017. – 35 с. 3. A.J. Garratt-Reed, D.C. Bell. Energy-Dispersive X-ray Analysis in the Electron Microscope/ Microscopy Handbook 49/ – BIOS Scientific Publishers Limited, 2003. – P.163 4. Бутенко Т.І., Колінько С.О., Ващенко В.А.] Контроль структури, елементного та фазового складу матеріалів – Черкаси : ЧДТУ, 2021. – 75 с. 5. Шпетний І. О. Методичні вказівки до виконання практичних робіт з курсу «Сучасні експериментальні методи дослідження властивостей матеріалів в прикладній фізиці та наноматеріалознавстві» – Суми : Сумський державний університет, 2022 – 33 с.
Тривалість дисципліни	один семестр
Обсяг дисципліни	240 год, з яких 64 год аудиторних занять, з них 32 год лекцій, 32 год лабораторних занять та 176 год самостійної роботи
Очікувані результати навчання	У результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен: **знати:** класифікацію сучасних електронних мікроскопів; будову та принципи роботи основних елементів електронних мікроскопів; фізичні принципи роботи електронних мікроскопів у різних режимах; фактори, що впливають на контраст зображення у електронному мікроскопі та спеціальні методики їх обробки; методи препарування зразків для електронно-мікроскопічних досліджень. **вміти:** працювати з вакуумною системою електронного мікроскопу; виготовляти та заміняти термоелектронні катоди для електронно-оптичної гармати мікроскопа; дослідити структуру плівок методом електронографії; дослідити розподіл кристалітів за розмірами у напилених плівках; препарувати зразки для електронно-мікроскопічних досліджень.
Ключові слова	Трансмісійний електронний мікроскоп (TEM), скануючий електронний мікроскоп (СЕМ), скануючий тунельний електронний мікроскоп (СТМ).
Формат дисципліни	Очний

	проведення лекцій, лабораторних робіт та консультації для кращого розуміння тем
Теми	Див. СХЕМА КУРСУ
Підсумковий контроль, форма	залік у кінці семестру
Пререквізити	Для вивчення курсу студенти потребують базових знань у галузі 17 – Електроніка, автоматизація та електронні комунікації. Навчальна дисципліна «Електронна мікроскопія» вивчається у логічному взаємозв'язку з іншими навчальними дисциплінами, що обумовлює необхідність постійного обліку та реалізації викладачами існуючих міжпредметних зв'язків з суміжними навчальними курсами, зокрема, такими як «Твердотільна електроніка», «Фізична електроніка», «Тонкоплівкові технології в мікроелектроніці», «Наноінженерія та електронна спектроскопія поверхні», «Наносистеми та нанотехнології» та інші.
Навчальні методи та техніки, які будуть використовуватися під час викладання курсу	лекції (презентації, відео демонстрації), лабораторні роботи, обговорення, дискусії.
Необхідне обладнання	платформа MS Teams, комп'ютерне програмне забезпечення, електронні мікроскопи: ПЕМ-100, ПЕМ-100М, РЕМ-102, JEOL-220A, вакуумні пости ВУП-5М, ультрамікротом, світлові мікроскопи.
Критерії оцінювання (окремо для кожного виду навчальної діяльності)	Оцінювання проводиться упродовж семестру за 100-бальною шкалою. Бали нараховуються за такими видами робіт із таким співвідношенням: • лабораторні роботи — 60% оцінки, максимальна кількість балів — 60 (6x10 балів). • модульні контрольні роботи — 40% оцінки, максимальна кількість балів — 40 (2x20 балів). Загалом 100 балів. **Контрольні заміри проводяться у формі контрольних модульних робіт**. **Академічна доброчесність**: Студенти повинні самостійно виконати ряд лабораторних робіт, а також підготувати реферат або проєкт за тематикою курсу. Відсутність у звітах до лабораторних робіт, а також в контрольних роботах посилань на використані джерела, фабрикування джерел, списування, втручання в роботу інших студентів становлять, але не обмежують, приклади можливої академічної недоброчесності. Виявлення ознак академічної недоброчесності в роботі студента є підставою для її незарахування 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. Студенти зобов'язані дотримуватися усіх термінів визначених для виконання усіх видів робіт, передбачених курсом. **Література.** Уся література, яку студенти не зможуть знайти самостійно, буде надана викладачем виключно в освітніх цілях без права її передачі третім особам. Студенти заохочуються до використання також й іншої літератури та джерел, яких немає серед рекомендованих.

	Політика виставлення балів. Враховуються бали набрані на поточному тестуванні, самостійній роботі та бали підсумкового тестування. При цьому обов'язково враховуються присутність на заняттях та активність студента під час лабораторного заняття; недопустимість пропусків та запізнень на заняття; користування мобільним телефоном, планшетом чи іншими мобільними пристроями під час заняття в цілях не пов'язаних з навчанням; списування та плагіат; несвоєчасне виконання поставленого завдання і т. ін. Жодні форми порушення академічної доброчесності не толеруються.
Питання до модульних контролів (замірів знань)	1. Перелічіть основні процеси при взаємодії електронного пучка з речовиною. 2. Перелічіть характеристики електронного пучка. 3. Аберації в магнітних лінзах. 4. Будова та принцип роботи детектора Еверхарта-Торнлі. 5. Стадії препарування зразка для дослідження у ТЕМ 6. Діаграми променів у паралельному пучку. 7. Пружне розсіяння електронів з точки зору отримання інформації в ел. мікроскопії. Розпилення і радіоліз. 8. Режими роботи ел. гармати з термоемісійним катодом 9. Типи об'єктних лінз та їх призначення. 10. Будова та принцип роботи напівпровідникових детекторів електронів. 11. Будова тримачів зразків в ТЕМ та їх характеристики. 12. Реалізація трансляції та нахилу пучка у ТЕМ. 13. Непружне розсіяння електронів з точки зору отримання інформації в ел. мікроскопії. 14. Типи джерел електронів та їх порівняльна характеристика. 15. Роздільна здатність електронного мікроскопа. Критерій Релея. 16. Детектори в ел. спектроскопії та їх характеристики. 17. Принцип роботи ультрамікротома та його застосування. 18. Діаграми променів у збіжному пучку. 19. Закономірності генерації фотонів при опроміненні зразка пучком електронів. 20. Будова та принципи роботи FEG та проектора Шотткі. 21. Глибина фокусу та глибина поля у ел. мікроскопі. 22. Будова тримачів зразків в СЕМ та їх характеристики. 23. Системи для дослідження катодолюмінесценції у ТЕМ та СЕМ. 24. Принципи роботи конденсорно-об'єктивної системи для формування електронного зонда 25. Яку інформацію можна отримати з ДК у рамках кінематичного наближення? 26. Принципи розшифрування ДК від полікристалічних плівок. 27. Принципи роботи СЕМ в режимі пружно відбитих електронів. 28. Сфера Евальда. Вектор відхилення. 29. Дозволені і заборонені рефлекси на ДК. Причина їх виникнення.

	30. Контраст густини-товщини. Особливості реєстрації ТЕМ зображення в умовах амплітудного контрасту. 31. Суть кінематичного наближення для дифракції електронів. 32. Порядок індексування рефлексів на ДК. 33. Принципи роботи СЕМ в режимі вторинних електронів.
Опитування	Анкету-оцінку з метою оцінювання якості курсу буде надано по завершенню курсу.

СХЕМА КУРСУ

Тиж.	Тема, план, короткі тези	Форма діяльності (заняття)	Література. Ресурси в Інтернеті	Завдання (лабораторна робота), год	Термін виконання
1	**Тема 1.1. Вступ до курсу**. Історія та перспективи розвитку електронної мікроскопії. Основні процеси, що протікають при взаємодії пучка електронів із речовиною.	лк	1, 3, (1,4дод)	Ознайомлення з принципами роботи та конструкцією трансмісійного електронного мікроскопа. 4 год	1, 2 тиж. семестру
2	**Тема 1.2. Характеристики електронного пучка**. Яскравість, просторова і часова когерентність, розмір джерела та його стабільність. Будова, типи та характеристики електронних гармат.	лк	1, 2, 3 (1 дод)	Виготовлення катодів для ТЕМ, СЕМ та СТМ мікроскопів 4 год	3, 4 тиж. семестру
3	**Тема 1.3. Лінзи**. Апертури та діафрагми. Дефекти лінз. Сферична і хроматична аберації та астигматизм. Роздільна здатність, критерій Релея. Глибина фокуса і глибина поля.	лк	1, 2, 3 (1,4дод)	Принципи юстування та калібрування трансмісійного електронного мікроскопа. 4 год	5, 6 тиж. семестру
4-5	**Тема 1.6. Принципи електронографії**. Дифракція в кінематичному наближенні. Закон Брегга. Обернена гратка. Індекси Міллера-Вейса. Сфера Евальда. Вектор відхилення. Атомний та структурний фактор розсіювання. Дозволені рефлекси. Індексування рефлексів.	лк	1, 2, 5,6, (1,2,4,5.дод)	Дослідження структури металевих плівок з кубічною граткою методом електронографії. 4 год	7, 8 тиж. семестру
6-7	**Тема 1.7. Зображення і контраст в ТЕМ**. Контраст густини і товщини. Z-контраст. Дифракційний контраст, двопучкова геометрія. Ефекти товщини та деформації плівки. Зображення плоских дефектів. Трансляційний контраст. .	лк	1, 2, 5, 6 (1,2,4,,5.дод)		
8-9	**Тема 1.8. Електронна мікроскопія високої роздільної здатності**. Фазовий контраст. ТЕМ у режимі високої роздільної здатності. Контраст кристалічної гратки. Елементи теорії зображення. Функції передачі. Контраст муару. Трансляційний і ротаційний муар, приклади використання.	лк	1, 3, 4, 5,7,8		

	Контраст Френеля. Лоренцівська трансмісійна електронна мікроскопія.				
10-11	**Тема 2.1. Скануючий електронний мікроскоп**. Будова СЕМ. Режими роботи і характеристики СЕМ.	лк	2,3, 4, 5, 6 (1,4 дод)	Ознайомлення з принципами роботи та конструкцією скануючого растрового електронного мікроскопа. 4 год	9, 10 тиж. семестру
12	**Тема 2.2. Спектрометрія в ЕМ.** Х-променева спектрометрія. Детектори: принципи роботи та характеристики. Кількісний аналіз.	лк	3, 5, 6 (1,3 дод)		
13-14	**Тема 2.3. Методи приготування зразків для електронно-мікроскопічних досліджень**. Загальні вимоги до об'єктів електронно-мікроскопічних досліджень. Методи препарування зразків для електронно-мікроскопічних досліджень. Особливості препарування фізичних, геологічних та біологічних зразків.	лк	1, 2, 3, 4, 7 (1,2,,5 дод)	Препаруваннч зразків для електронно-мікроскопічних досліджень. 4 год	11, 12 тиж. семестру
15	**Тема 2.4. Скануючий тунельний електронний мікроскоп**. Принципи та режими роботи СТМ. Обробка інформації та роздільна здатність СТМ у різних режимах.	лк	7 (4,5 дод)	Ознайомлення з принципами роботи та конструкцією скануючого автоелектронного мікроскопа. 4 год	13, 14 тиж. семестру
16	**Тема 2.5. Опрацювання результатів досліджень в електронній мікроскопії за допомогою ПК.** Поширені програмні пакети для обробки результатів електронно-мікроскопічних досліджень.	лк	1, 2, 3, 8(1,2,5 дод)	Дослідження розподілу кристалітів за розмірами у металевих плівкових зразків. 4 год	15, 16 тиж. семестру