

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кафедра _____ мікро- та наноелектроніки _____
(найменування кафедри)

СИЛАБУС НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

МЕТОДИ ДІАГНОСТИКИ ТА АНАЛІЗУ МІКРО- І НАНОСТРУКТУР
(назва навчальної дисципліни)

Освітня програма: _____ Мікро- та наноелектронні прилади і пристрої _____
(назва освітньої програми)

Спеціальність: _____ 153 Мікро- та наносистемна техніка _____
(найменування спеціальності)

Галузь знань: _____ 15 Автоматизація та приладобудування _____
(найменування галузі знань)

Ступінь вищої освіти: _____ магістр _____
(назва ступеня вищої освіти)

Затверджено на засіданні кафедри
_____ мікро- та наноелектроніки _____
(найменування кафедри)

Протокол № 1 від 17 серпня 2021 р.

Запоріжжя, 2021

1. Загальна інформація	
Назва дисципліни	<u>ОК 07</u> Методи діагностики та аналізу мікро- і наноструктур Навчальна дисципліна нормативного компонента циклу загальної підготовки
Рівень вищої освіти	Другий (магістерський) рівень
Викладач	Коротун Андрій Віталійович, доцент кафедри мікро- та наноелектроніки, канд. фіз.-матем. наук
Контактна інформація викладача	Робочий телефон: +380617698367, e-mail: andko@zp.edu.ua
Час і місце проведення навчальної дисципліни	За розкладом занять.
Обсяг дисципліни	Кількість годин – загальний обсяг 120 годин. Кредитів – 4 кредитів ЄКТС. Розподіл годин: 30 годин лекцій; 14 годин практичних занять; 66 годин самостійної роботи. Вид контролю – іспит.
Консультації	Згідно з графіком консультацій, який складається кафедрою на початку семестру. https://zp.edu.ua/kafedra-mikro-ta-nanoelektroniki
2. Пререквізити і постреквізити навчальної дисципліни	
<p>Пререквізити: Фізика твердого тіла; Схемотехніка аналогових і цифрових пристроїв обробки сигналів; Комп'ютерне моделювання; Твердотіла електроніка.</p> <p>Постреквізити: Дисципліна: Наноплазмоніка і метаматеріали; Дипломовання.</p>	
3. Характеристика навчальної дисципліни	
<p>У результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен отримати:</p> <p>загальні компетентності: ЗК1. Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу; ЗК2. Здатність спілкуватися державною мовою як усно, так і письмово; ЗК4. Здатність проводити дослідження на відповідному рівні; ЗК5. Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел; ЗК6. Здатність генерувати нові ідеї (креативність),</p> <p>фахові компетентності: СК1. Здатність ефективно використовувати складне контроль-но-вимірвальне, технологічне та дослідницьке обладнання при дослідженнях та виробництві матеріалів, компонентів, приладів і пристроїв мікро- та наносистемної техніки різноманітного призначення; СК2. Здатність здійснювати тестування та діагностику приладів та обладнання, а також оброблення і аналіз отриманих результатів;</p>	

СК3. Здатність аналізувати та синтезувати мікро- та нанoeлектронні системи різного призначення;

СК4. Здатність розробляти, обґрунтовано вибирати і використовувати сучасні методи обробки та аналізу сигналів в мікро- і нанoeлектронних приладах та системах;

СК5. Здатність аргументувати вибір методів розв'язання складних задач і проблем мікро- та наносистемної техніки, критично оцінювати отримані результати та аргументувати прийняті рішення;

СК6. Здатність користуватися сучасними системами пошуку та аналізу науково-технічної інформації, проводити патентний пошук і дослідження та здійснювати захист інтелектуальної власності;

СК7. Здатність розробляти і реалізовувати наукові та/або інноваційні проекти у сфері мікро- та наносистемної техніки, а також дотичні до неї міждисциплінарні проекти.

Очікувані програмні результати навчання:

P1. Формулювати і розв'язувати складні інженерні, виробничі та/або наукові задачі під час проектування, виготовлення і дослідження мікро- та наносистемної техніки різноманітного призначення та створення конкурентоспроможних розробок, втілення результатів у бізнес-проектах;

P3. Оптимізувати конструкції систем, пристроїв та компонентів мікро- та наносистемної техніки, а також технології їх виготовлення;

P6. Розробляти вироби та компоненти мікро- та наносистемної техніки, враховуючі вимоги до їх характеристик, технологічні та ресурсні обмеження; використовувати сучасні інструменти автоматизації проектування;

P7. Розв'язувати задачі синтезу та аналізу приладів та пристроїв мікро- та наносистемної техніки;

P8. Збирати необхідну інформацію, використовуючи науково-технічну літературу, бази даних та інші джерела, аналізувати і оцінювати її;

P9. Забезпечувати якість виробництва; обирати технології, що гарантують отримання необхідних характеристик твердотільних пристроїв; застосовувати сучасні методи контролю мікро- та наносистемної техніки;

P11. Досліджувати процеси у мікро- та нанoeлектронних системах, приладах й компонентах з використанням сучасних експериментальних методів та обладнання, здійснювати статистичну обробку та аналіз результатів експериментів;

P16. Досліджувати дефекти ультратонких покриттів і дисперсних середовищ (зокрема, фарб-ксераліків) методами оптичної дефектоскопії та вміти візуалізувати вказані дефекти.

4. Мета вивчення навчальної дисципліни

Метою вивчення дисципліни є ознайомлення студентів з фундаментальними фізичними процесами, що лежать в основі сучасних методів діагностики та аналізу мікро- і наноструктур, а також вивчення принципу роботи і структури устаткування, що реалізовує ці методи.

5. Завдання вивчення дисципліни

Завданнями вивчення дисципліни є:

- вивчення основ статистичної обробки експериментальних даних;
- вивчення фізичних ефектів, що лежать в основі сучасних методів діагностики параметрів матеріалів і структур;
- вивчення сучасних методів спектроскопії поверхні;
- формування знань у області останніх досягнень сучасних методів діагностики параметрів матеріалів і структур;

- забезпеченні розуміння можливостей та застосовності сучасних методів діагностики та аналізу мікро- і наноструктур, їх точності, чутливості, локальності;
- набутті студентами уявлень про сучасні прилади, що дозволяють отримувати інформацію про хімічний склад і структуру нанооб'єктів.

6. Зміст навчальної дисципліни

Змістовий модуль 1

Обробка експериментальних даних. Властивості поверхні твердого тіла. Електричні й оптичні методи діагностики матеріалів.

Вступ

Загальна класифікація і сучасний стан методів діагностики та аналізу мікро- і наноструктур.

Тема 1. Обробка експериментальних даних

Вимірювання та їх похибки. Точність, збіжність, відтворюваність. Характеристики випадкових розподілів. Нормальний розподіл. Розподіли Стьюдента, Пірсона. Довірча ймовірність і довірчий інтервал.

Статистична перевірка гіпотез. Коректна статистична обробка результатів кількісних вимірювань.

Похибки непрямих вимірювань. Оцінка придатності експериментальних даних. Представлення результатів експерименту за допомогою математичних моделей.

Кореляційний аналіз. Порівняльний комп'ютерний аналіз впорядкованих наноструктур: Фур'є-аналіз, вейвлет, фрактальна розмірність.

Тема 2. Атомна структура поверхні кристала. Процеси на атомарно-чистій поверхні

Релаксація поверхні. Реконструкція поверхні. Електронна структура поверхні кристала.

Тема 3. Методи визначення параметрів напівпровідникових матеріалів

Визначення питомого опору матеріалів дво- і чотиризондовими методами, методом опору розтікання і методом Ван-дер-Пау.

Ефект Холла і магніторезистивний ефект. Визначення концентрації і рухливості носіїв заряду методами, заснованими на ефекті Холла.

Методи вимірювання дрейфової рухливості неосновних носіїв заряду. Вимірювання часу життя носіїв заряду методом модуляції провідності.

Ємнісні методи визначення параметрів станів на межі поділу структур і в об'ємі матеріалу.

Тема 4. Оптичні методи досліджень

Контроль якості поверхні пластин і прозорих плівок за інтенсивністю відбитого монохроматичного випромінювання. Еліпсометричні методи дослідження оптичних властивостей структур «діелектрик – напівпровідник».

Методи оптичної спектроскопії. Фотоелектрична діагностика квантово-розмірних структур. Люмінесцентні методи аналізу.

Змістовий модуль 2

Класичні методи спектроскопії та мікроскопії. Дифракційний аналіз

Тема 5. Методи іонної спектроскопії та мас-спектроскопії

Фізичні основи методу резерфордівського зворотного розсіювання іонів. Розсіювання іонів низьких енергій. Розподіл елементів за глибиною.

Загальна характеристика мас-спектрометричних методів. Мас-спектрометри та їх характеристики. Вторинна іонна мас-спектрометрія (ВІМС). Каналювання.

Тема 6. Методи електронної спектроскопії

Класифікація методів електронної спектроскопії. Фізичні основи методів електронної спектроскопії. Енергетичний спектр електронів. експериментальне устаткування. Загальні характеристики електронних спектрометрів у електронній спектроскопії.

Електронна оже-спектроскопія. Використання електронної оже-спектроскопії для кількісного аналізу.

Спектроскопія характеристичних втрат енергії електронами.

Методи фотоелектронної спектроскопії. Рентгенівська фотоелектронна спектроскопія. Ультрафіолетова фотоелектронна спектроскопія.

Тема 7. Електронна мікроскопія

Взаємодія електронів із речовиною. Будова електронного мікроскопа. Збільшення і розрізнення просвічуючих електронних мікроскопів. Контраст і формування зображення. Розсіювання електронів речовиною. Утворення дифракційної картини в електронному мікроскопі.

Растрова електронна мікроскопія (РЕМ). Підготовка зразків для дослідження на РЕМ. Особливості РЕМ.

Скануюча електронна мікроскопія (СЕМ). Формування зображення в СЕМ. Експериментальне устаткування. Оптична схема і принцип дії СЕМ.

Тема 8. Дифракційні методи аналізу

Дифракція рентгенівського випромінювання, електронів і нейтронів. Атоми, молекули і нанокластери як розсіювальні центри.

Малокутове розсіювання. Рентгеноструктурний аналіз.

Дифракція електронів (електронографія). Нейтронографія.

Змістовий модуль 3

Методи діагностики нанооб'єктів

Тема 9. Методи спостереження поверхневих плазмонів

Поняття про поверхневі плаزمони. Класифікація методів спостереження поверхневих плазмонів.

Метод порушеного повного внутрішнього відбивання. Комбінаційне розсіяння світла. Збудження поверхневих поляритонів на дифракційних ґратках та шорстких поверхнях. Метод нанолокалізованих джерел світла.

Фізичні принципи оптичної мікроскопії. Просторова роздільна здатність і дифракційна границя Аббе.

Плазмонна мікроскопія високого розрізнення. Поляризація сильно-сфокусованого лазерного світла.

Конфокальний флуоресцентний мікроскоп. Розвиток методів субхвильової оптичної мікроскопії.

Тема 11. Скануюча тунельна мікроскопія

Теоретичні основи процесу одновимірного тунелювання. Основні принципи роботи скануючого тунельного мікроскопа (СТМ). Конструкція СТМ. Режими роботи СТМ, переваги і недоліки. Методи отримання атомарної роздільної здатності та обмеження в СТМ.

Ефекти електронних станів у скануючій тунельній мікроскопії.

Тема 12. Атомно-силова мікроскопія

Сили, що діють між вістрям атомно-силового мікроскопу та зразком. Основні принципи роботи атомно-силового мікроскопа (АСМ). Властивості поверхні в атомно-силовій мікроскопії. Контактний і напівконтактний методи дослідження поверхні. Метод фазового контрасту в АСМ.

Тема 13. Методи позитронної анігіляційної спектроскопії

Джерела, сповільнювачі і пучки повільних позитронів. Метод кутового розподілу анігіляційних фотонів. Метод доплерівського уширення. Позитронна спектроскопія наноструктурних матеріалів. Анігіляція, час життя і швидкість захоплення позитрона. Робота виходу позитронів. Атом позитронію. Позитронієва спектроскопія.

7. План вивчення навчальної дисципліни

№ тижня	Назва теми	Форми організації навчання	Кількість годин
1	Вступ. Тема 1. Обробка експериментальних даних.	Лекція	2
1	Обробка експериментальних даних.	Практичне заняття	2
2	Тема 2. Атомна структура поверхні кристала. Процеси на атомарно-чистій поверхні.	Лекція	2
3	Тема 3. Методи визначення параметрів напівпровідникових матеріалів.	Лекція	2
3	Атомна структура поверхні кристала. Процеси на атомарно-чистій поверхні.	Практичне заняття	2
4	Тема 3. Методи визначення параметрів напівпровідникових матеріалів. Тема 4. Оптичні методи досліджень.	Лекція	2
5	Тема 4. Оптичні методи досліджень. Тема 5. Методи іонної спектроскопії та мас-спектроскопії.	Лекція	2
5	Методи визначення параметрів напівпровідникових матеріалів.	Практичне заняття	2
6	Тема 6. Методи електронної спектроскопії.	Лекція	2
7	Тема 7. Електронна мікроскопія.	Лекція	2
7	Оптичні методи досліджень.	Практичне заняття	2
8	Тема 8. Дифракційні методи аналізу.	Лекція	2
9	Тема 9. Методи спостереження поверхневих плазмонів.	Лекція	2
9	Стійкість підсилювачів.	Практичне заняття	2
10	Тема 9. Методи спостереження поверхневих плазмонів. Тема 10. Оптична мікроскопія.	Лекція	2
11	Тема 10. Оптична мікроскопія. Тема 11. Скануюча тунельна мікроскопія.	Лекція	2
11	Методи іонної спектроскопії та мас-спектроскопії. Електронна мікроскопія.	Практичне заняття	2
12	Тема 11. Скануюча тунельна мікроскопія.	Лекція	2
13	Тема 11. Скануюча тунельна мікроскопія.	Лекція	2

	Тема 12. Атомно-силова мікроскопія.		
13	Дифракційні методи аналізу. Скануюча тунельна мікроскопія.	Практичне заняття	2
14	Тема 12. Атомно-силова мікроскопія.	Лекція	2
15	Тема 13. Методи позитронної анігіляційної спектроскопії.	Лекція	2
15	Атомно-силова мікроскопія. Методи позитронної анігіляційної спектроскопії.	Практичне заняття	2

Індивідуальні завдання

Студенти денної форми навчання готують два індивідуальних домашніх завдання у вигляді розв'язаних задач. Максимальна оцінка індивідуального завдання складає 15 балів. Для студентів заочної форми навчання передбачена *контрольна робота*.

8. Самостійна робота

№ тижня	Назва тем	Види СР	Кількість годин	Контрольні заходи
Змістовий модуль 1				
1	Вступ. Обробка експериментальних даних.	Проробка літературних джерел, вивчення лекційного матеріалу, доопрацювання завдань практичних занять.	6	Усне опитування на лекціях, перевірка виконаних завдань практичних робіт.
2	Атомна структура поверхні кристала. Процеси на атомарно-чистій поверхні.	Самостійна робота № 1.	4	Перевірка виконаної роботи викладачем.
3	Методи визначення параметрів напівпровідникових матеріалів.	Самостійна робота № 2.	8	Перевірка виконаної роботи викладачем.
4	Оптичні методи досліджень.	Проробка літературних джерел, вивчення лекційного матеріалу, доопрацювання завдань практичних занять.	6	Усне опитування на лекціях, перевірка виконаних завдань практичних робіт.
5,6	Методи іонної спектроскопії та мас-спектроскопії.	Проробка літературних джерел, вивчення лекційного матеріалу, доопрацювання завдань практичних занять.	4	Усне опитування на лекціях, перевірка виконаних завдань практичних робіт.
Змістовий модуль 2				
7	Методи електронної спектроскопії.	Підготовка до написання кваліфікаційного завдання.	6	Перевірка виконаної роботи викладачем.

8	Електронна мікроскопія.	Самостійна робота № 3.	6	Перевірка виконаної роботи викладачем.
9	Дифракційні методи аналізу.	Самостійна робота № 4.	4	Перевірка виконаної роботи викладачем.
10,11	Методи спостереження поверхневих плазмонів.	Проробка літературних джерел, вивчення лекційного матеріалу, доопрацювання завдань практичних занять.	4	Усне опитування на лекціях, перевірка виконаних завдань практичних робіт.
Змістовий модуль 3				
12	Оптична мікроскопія.	Проробка літературних джерел, вивчення лекційного матеріалу, доопрацювання завдань практичних занять.	4	Усне опитування на лекціях, перевірка виконаних завдань практичних робіт.
13	Скануюча тунельна мікроскопія.	Проробка літературних джерел, вивчення лекційного матеріалу.	6	Усне опитування на лекціях, перевірка виконаних завдань практичних робіт.
13	Атомно-силова мікроскопія.	Самостійне вивчення теми на основі опрацювання літературних джерел і матеріалів, наданих викладачем.	4	Усне опитування на лекціях, перевірка виконаних завдань практичних робіт.
14	Методи позитронної анігіляційної спектроскопії.	Підготовка до написання кваліфікаційного завдання та іспиту.	4	Перевірка виконаної роботи викладачем, іспит.

Консультативна допомога студенту надається у таких формах:

- особиста зустріч викладача і студента за графіком консультацій (не менш ніж 2 години на тиждень або за попередньою домовленістю);
- використання системи дистанційного навчання Moodle:
- <https://moodle.zp.edu.ua/enrol/index.php?id=2476>;
- листування за допомогою електронної пошти andko@zp.edu.ua (у форматі 24/7 кожного дня);
- відеозустріч в системі ZoomMeeting, аудіоспілкування або повідомлення у сервісах Viber та WhatsApp (за графіком консультацій викладача);
- спілкування по телефону (за графіком консультацій викладача).

9. Система та критерії оцінювання курсу

Оцінка знань студентів здійснюється за кредитно-модульною системою. Навчальний семестр складається з трьох змістових модулів.

Для студентів денної форми навчання кожен змістовий модуль оцінюється за 100-бальною шкалою. Підсумкова оцінка визначається як середня трьох контролів за змістові модулі. Студент має право додатково скласти іспит за 100-бальною шкалою. В цьому випадку підсумкова оцінка визначається як середня в цілому трьох змістових модулів та

іспиту.

Для студентів заочної форми навчання навчальна дисципліна в цілому оцінюється за 100-бальною шкалою.

Оцінка за 100-бальною шкалою переводиться відповідно у національну шкалу («відмінно», «добре», «задовільно», «незадовільно») та шкалу європейської кредитно-трансферної системи (ЄКТС –А, В, С, D, E, FX, F).

Шкала оцінювання при виді контролю: іспит

Сума балів за всі види навчальної діяльності	ОцінкаЄСТS	Оцінка за національною шкалою
90-100	A	Відмінно
85-89	B	Добре
75-84	C	
70-74	D	
60-69	E	Задовільно
35-59	FX	Незадовільно з можливістю повторного складання
1-34	F	Незадовільно з обов'язковим повторним вивченням дисципліни

Оцінка «відмінно» виставляється студентові за повне та відмінне виконання завдання без помилок, або з незначними помилками. Оцінка «добре» - за правильне виконання завдання, але з деякими помилками. Оцінка «задовільно» виставляється за виконання завдання в достатньому обсязі зі значною кількістю недоліків або в мінімальному обсязі. Оцінка «незадовільно» виставляється студентові, який не виконав завдання, або обсяг виконання завдання недостатній та містить грубі помилки, а також у випадку, коли у студента відсутні знання базових положень навчальної дисципліни або їх недостатньо для продовження навчання чи початку професійної діяльності.

Критерії оцінювання курсу

Оцінювання навчальних успіхів студентів реалізується шляхом проведення поточного та підсумкового контролю успішності.

Для студентів денної форми навчання:

1. Курсом передбачені практичні заняття. Враховуючи активність студента на практичних заняттях та результати аудиторних контрольних робіт студент може отримати в кожному модулі максимально 25 балів.

2. За індивідуальне завдання, яке включає в себе розв'язок та захист набору задач за варіантами, студент може отримати в кожному модулі максимально 15 балів, за умови демонстрації високого рівня знань, а також творчої, розумової, нерепродуктивної діяльності під час застосування теоретичних знань на практиці.

3. По закінченню першого і другого напівсеместру проводиться рубіжні контролю у вигляді аудиторної модульної контрольної роботи. Максимальна рейтингова оцінка цих видів контролю – 60 балів.

4. За підсумками першого та другого рубіжного модульного контролю студенту формується підсумкова оцінка знань, яка оголошується до початку екзаменаційної сесії. Під час екзаменаційної сесії студенти, які незгодні з оцінкою за підсумками рубіжного контролю або отримали незадовільну оцінку, з'являються на екзамен.

Для студентів заочної форми навчання захист контрольної роботи, розв'язування задач, усний або письмовий іспит.

Критерії оцінювання

Поточне тестування та самостійна робота								Підсумкова
Модуль №1				Модуль № 2				
ПЗ	ІДЗ	МК	Σ	ПЗ	ІДЗ	МК	Σ	
25	15	60	100	25	15	60	100	

ПЗ – практичні заняття; ІДЗ – індивідуальне домашнє завдання; МК – модульна контрольна робота.

Отже, сумарна кількість балів, яку отримує студент впродовж семестру, складає 100. В залежності від отриманої суми балів до залікової відомості та в залікову книжку виставляється оцінка згідно національної шкали.

10. Політика курсу

Політика щодо академічної доброчесності

Складати всі проміжні та фінальні завдання самостійно без допомоги сторонніх осіб. Надавати для оцінювання лише результати власної роботи.

Не вдаватися до кроків, що можуть нечесно покращити ваші результати чи погіршити/покращити результати інших студентів.

Не публікувати відповіді на питання, що використовуються в рамках курсу для оцінювання знань студентів

Політика щодо відвідування аудиторних занять (особиста присутність студента)

Студентам рекомендується відвідувати заняття, оскільки на них викладається теоретичний матеріал та розвиваються навички, необхідні для виконання семестрового індивідуального завдання. Система оцінювання орієнтована на отримання балів за активність студента, а також виконання завдань, які здатні сформувати загальні та фахові компетентності. Самостійну роботу студент може виконати у системі дистанційного навчання (<https://moodle.zp.edu.ua/enrol/index.php?id=2476>) з подальшим захистом. За об'єктивних причин (наприклад, лікарняні, стажування, мобільність, індивідуальний графік, інше) аудиторні види занять та завдань також можуть бути трансформовані в систему дистанційного навчання (сервіс Moodle).

Політика щодо дедлайнів

Студент зобов'язаний дотримуватись крайніх термінів (дата для аудиторних видів робіт або час в системі дистанційного навчання), до яких має бути виконано певне завдання. За наявності поважних причин (відповідно до інформації, яку надано деканатом) студент має право на складання індивідуального графіка вивчення окремих тем дисципліни.

Політика щодо оскарження результатів контрольних заходів

Студенти мають можливість підняти будь-яке питання, яке стосується процедури контрольних заходів та очікувати, що воно буде розглянуто. Студенти мають право оскаржити результати контрольних заходів, але обов'язково аргументовано, пояснивши з яким критерієм не погоджуються.

Політика щодо дотримання прав та обов'язків студентів

Права і обов'язки студентів відображено у п.7.5 Положення про організацію освітнього процесу в Національному університеті «Запорізька політехніка» (https://zp.edu.ua/uploads/dept_nm/Polozhennia_pro_organizatsiyu_osvitnoho_protseesu.pdf).

Політика щодо конфіденційності та захисту персональних даних

Обмін персональними даними між викладачем і студентом в межах вивчення дисципліни, їх використання відбувається на основі Закону України «Про захист персональних даних» (<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2297-17#Text>). Стаття 10, п.3.