



## Силабус освітнього компонента

Програма навчальної дисципліни

# ЕЛЕКТРОНОГРАФІЯ НАНОМАТЕРІАЛІВ

### Шифр та назва спеціальності

105 - Прикладна фізика та наноматеріали

### Інститут

ННІ Комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики

### Освітня програма

Прикладна фізика та наноматеріали для енергетики, медицини, радіоелектроніки та телекомунікацій

### Кафедра

фізики металів та напівпровідників (165)

### Рівень освіти

Бакалавр

### Тип дисципліни

вибіркова

### Семестр

6

### Мова викладання

Українська

## Викладачі, розробники



### Зубарєв Євгеній Миколайович

[enzubarev@gmail.com](mailto:enzubarev@gmail.com)

Доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри фізики металів та напівпровідників НТУ «ХПІ».

Досвід роботи – 42 роки. Автор понад 180 наукових та навчально-методичних праць. Провідний лектор з дисциплін: «Атомна дифузія в твердих тілах», «Фізичні властивості матеріалів», «Електронографія», «Радіаційна стійкість матеріалів», «Рентгено-флуоресцентний аналіз». Сфера наукових інтересів електронна мікроскопія, рентгено-структурний аналіз, рентгенівська оптика, дифузія та фазові перетворення в нанорозмірних плівкових системах.

[Детальніше про викладача на сайті кафедри](#)

## Загальна інформація

### Анотація

В даному курсі студенти вивчають основи електронної оптики: рух електронів в однорідних і неоднорідних електростатичних і магнітних полях, типи електронних ліз і рух електронів в них, аберації електронних лінз. Основну увагу приділено кінематичній теорії дифракції електронів на окремому атомі, примітивній елементарній комірці, досконалому кристалі, на простих центрованих кристалічних комірках. Детально обговорюються особливості електронографічного метода, які пов'язані з малою довжиною хвилі де Бройля, сильною взаємодією електронів з речовиною і малою товщиною зрізів. Тракткування дифракційного експерименту проводиться в термінах оберненої решітки і вектора оберненої решітки. Курс є базовим для задач прикладної фізики для отримання необхідної інформації про атомну структуру твердотільних об'єктів. Призначений для студентів фізичних, інженерно – технічних спеціальностей 10 галузі знань – «природничі науки».

## Мета та цілі дисципліни

Мета вивчення та засвоєння матеріалу з навчальної дисципліни полягає в формуванні у студентів основних понять про роль метода електроннографії при дослідженні атомної структури матеріалів. Метод електроннографії є невід'ємною частиною сучасної електронної мікроскопії з атомним розділенням, яка є основним методом дослідження реальної кристалічної структури різноманітних твердотільних матеріалів, візуалізації і контролю елементів наноелектроніки. Отримуються знання для вирішення важливої задачі прикладної фізики по створенню нових матеріалів з особливими фізичними властивостями..

## Формат занять

Лекції, лабораторні і практичні роботи, самостійна робота, консультації. Підсумковий контроль – іспит.

## Компетентності

1. ЗК1. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.
2. ЗК2. Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності.
3. ЗК7. Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел.
4. СК2. Здатність брати участь у плануванні і виконанні експериментів та лабораторних досліджень властивостей фізичних систем, фізичних явищ і процесів, обробленні й презентації їхніх результатів.
5. СК3. Здатність брати участь у виготовленні експериментальних зразків, інших об'єктів дослідження.
6. СК7. Здатність використовувати методи і засоби теоретичного дослідження та математичного моделювання в професійній діяльності.
7. СК8. Здатність працювати в колективах виконавців, у тому числі в міждисциплінарних проектах.

## Результати навчання

- Р01. Знати і розуміти сучасну фізику на рівні, достатньому для розв'язання складних спеціалізованих задач і практичних проблем прикладної фізики.
- Р02. Застосовувати сучасні математичні методи для побудови й аналізу математичних моделей фізичних процесів.
- Р06. Відшукувати необхідну науково-технічну інформацію в науковій літературі, електронних базах, інших джерелах, оцінювати надійність та релевантність інформації.

## Обсяг дисципліни

Загальний обсяг дисципліни 150 год. (5 кредитів ECTS): лекції – 36 год., лабораторні роботи – 12 год., практичні роботи – 12 год., самостійна робота – 90 год.

## Передумови вивчення дисципліни (пререквізити)

Для успішного проходження курсу необхідно знати основні поняття з курсів: вища математика, загальна фізика, кристалографія, методи структурного аналізу.

## Особливості дисципліни, методи та технології навчання

Лекції проводяться інтерактивно з використанням мультимедійних технологій.

## Програма навчальної дисципліни

### Теми лекційних занять

#### Тема 1. Вступ

Історія відкриття електрону. Енергія і швидкість руху електронів. Опит Девісона-Джермера. Використання дифракції електронів при дослідженні матеріалів і в сучасних технологіях.

#### Тема 2. Закони руху електронів в електростатичних і магнітних полях

Основні характеристики електростатичного поля. Рух електронів в однорідному електростатичному полі. Основні характеристики магнітного поля. Рух електронів в однорідному магнітному полі.

#### Тема 3. Електростатичні лінзи

Зіставлення геометричної електронної оптики зі світловою оптикою. Сіткові лінзи.

Окрема діафрагма, одиночна лінза, імерсійна лінза.

#### Тема 4. Магнітні лінзи

Розподіл магнітного поля вздовж осі електромагнітної лінзи. Рух електрону в електромагнітній лінзі. Типи електромагнітних лінз.

#### Тема 5. Аберації електронних лінз

Геометричні аберації: сферична аберация, кома, астигматизм, дисторсія.

Друга підтема. Хроматична аберация.

#### Тема 6. Електронні гармати електронних мікроскопів

Джерела електронів: вольфрамові V-подібні катоди, катоди з гексабориду лантану (LaB6).

Гармати з польовою емісією.

#### Тема 7. Кінематична теорія дифракції електронів

Хвильове рівняння Шредингера.

Розсіювання електронів на окремих атомах. Розсіювання електронів на елементарній кристалічній комірці та досконалому кристалі.

#### Тема 8. Розсіювання електронів на досконалому кристалі

Зворотна решітка. Рівняння і сфера Евольда. Вплив структурного фактора на амплітуду розсіяних електронів. Вплив форми кристалу на амплітуду розсіяних електронів.

#### Тема 9. Геометрія електроннограм

Геометричні основи трактовки електроннограм. Прецизійне визначення міжплощинних відстаней кристалів за допомогою електроннограм.

#### Тема 10. Електроннограми від монокристалів

Особливості дифракції електронів і сфери Евольда.

### Теми практичних занять

Тема 1. Визначення законів згасання для ОЦК решітки. Побудова оберненої решітки.

Тема 2. Визначення законів згасання для ГЦК решітки. Побудова оберненої решітки.

Тема 3. Алгоритм побудови теоретичних електроннограм для кубічних кристалічних решіток (ОЦК і ГЦК).

Тема 4. Побудова перерізів (теоретичних електроннограм) зворотної ОЦК решітки.

Тема 5. Побудова перерізів (теоретичних електроннограм) зворотної ГЦК решітки.

Тема 6. Розшифровка електроннограм від монокристалів.

### Теми лабораторних робіт

Робота 1. Пристрій електронного мікроскопу ПЕМ- У: вакуумна система, електронна гармата, лінзи, відхиляючі системи, стигматори лінз. та режими його роботи: режим електронно-мікроскопічного зображення і режим мікродифракції.

Робота 2. Методи виготовлення зразків для електроннографічних і електронно-мікроскопічних досліджень.

Робота 3. Режими роботи електронного мікроскопа: режим електронно-мікроскопічного зображення і режим мікродифракції.

Робота 4. Електроннограми від монокристалів, полікристалів, текстурованих зразків і аморфних матеріалів.

Робота 5. Дифракція електронів від двошарових монокристалічних плівок і її розшифрування.

Робота 6. Прецизійне визначення міжплощинних відстаней кристалів за допомогою електроннограм.

### Самостійна робота

Студенти самостійно опрацьовують лекційний матеріал і вивчають теми та питання, які не викладаються на лекційних заняттях. Студенти готуються до контрольних робіт, самостійно оформлюють лабораторні роботи і готуються до їх здавання викладачу. Виконують завдання з розшифрування електроннограм від кубічних центрованих решіток.

## Література та навчальні матеріали

Основна:

1. С.П. Зелев, Л.С. Рабоча, І.О. Шпетний. Оптика електронно-променевиx приладів. –Сумський державний університет, 2011. – 208 с.
2. P.B. Hirsch, A. Howie, R.B. Nicholson, D.W. Pashley, M.J. Whelan. Electron microscopy of thin crystal.– London: Butterworths, 1965. – 550 p.
3. D.B. Williams, C.B. Carter. Transmission electron microscopy. A textbook for material science. –New York: Springer science-business media, 2009. – 776 p.
4. K. Andrews, D. Dyson, S. Keown. Interpretation of electron diffraction. – New York: Plenum Press, 1971. – 212 p.

Додаткова:

5. G. Tomas, M.J. Goring. Transmission electron microscopy of materials. – New York: John Wiley&Sons, 1979. –320 p.
6. J.M. Cowly. Diffraction physics. – New York: Elsevier, 1979. –432..

## Система оцінювання

### Критерії оцінювання успішності студента та розподіл балів

100% підсумкової оцінки складаються з результатів оцінювання у вигляді екзамену (40%) та поточного оцінювання (60%).  
Екзамен: письмове завдання (3 запитання) та усна доповідь.  
Поточне оцінювання: 2 онлайн тести (по 10%), практична та лабораторні роботи (20%), ІДЗ (20%),

### Шкала оцінювання

Сума балів	Національна оцінка	ECTS
90–100	Відмінно	A
82–89	Добре	B
75–81	Добре	C
64–74	Задовільно	D
60–63	Задовільно	E
35–59	Незадовільно (потрібне додаткове вивчення)	FX
1–34	Незадовільно (потрібне повторне вивчення)	F

## Норми академічної етики і політика курсу


Студент повинен дотримуватися «Кодексу етики академічних взаємовідносин та доброчесності НТУ «ХПІ»: виявляти дисциплінованість, вихованість, доброзичливість, чесність, відповідальність. Конфліктні ситуації повинні відкрито обговорюватися в навчальних групах з викладачем, а при неможливості вирішення конфлікту – доводитися до відома співробітників дирекції інституту. Нормативно-правове забезпечення впровадження принципів академічної доброчесності НТУ «ХПІ» розміщено на сайті: <http://blogs.kpi.kharkov.ua/v2/nv/akademichna-dobrochesnist/>

## Погодження

Силабус погоджено



Завідувач кафедри  
Сергій МАЛИХІН



Гарант ОП  
Сергій КОЗЛОВ