

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

**Фізичний факультет**  
(назва факультету, інституту, центру, коледжу)

Кафедра оптики

**«ЗАТВЕРДЖУЮ»**  
Заступник декана  
з навчальної роботи  
Момот О.В.  
« 31 » серпня 2023 року

**РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ**  
**Основи наноелектроніки**

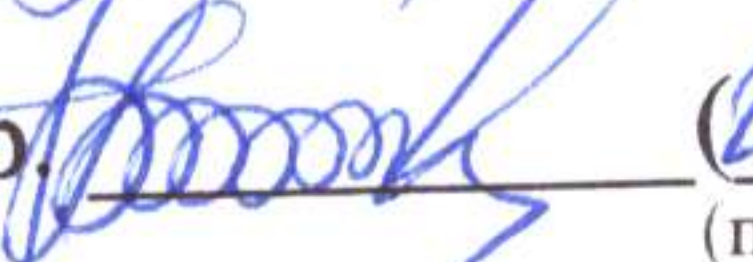
для студентів

галузь знань **10 Природничі науки**  
спеціальність **104 Фізика та астрономія**  
освітній рівень **магістр**  
освітня програма **Оптика, лазерна фізика**  
спеціалізація  
(за наявності) \_\_\_\_\_  
вид дисципліни **обов'язкова**

Форма навчання	<b>денна</b>
Навчальний рік	<b>2023/2024</b>
Семестр	<b>2</b>
Кількість кредитів ECTS	<b>6</b>
Мова викладання, навчання та оцінювання	<b>українська</b>
Форма заключного контролю	<b>залік</b>

Викладачі: проф. Кондратенко С.В.

Пролонговано: на 20~~23~~<sup>25</sup>/20~~25~~<sup>26</sup> н.р.  (О. Момот) «18» 06 20~~23~~<sup>25</sup> р.  
(підпис, ПІБ, дата)

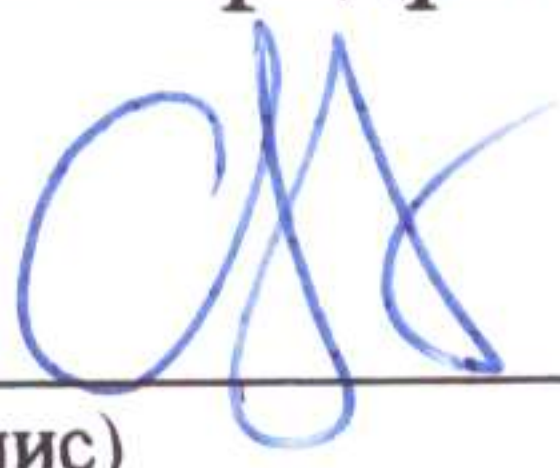
на 20~~25~~<sup>26</sup>/20~~26~~<sup>27</sup> н.р.  (О. Момот) «05» 06 20~~25~~<sup>26</sup> р.  
(підпис, ПІБ, дата)

**КИЇВ – 2023**

Розробник(и): Кондратенко С.В., д.ф.-м.н., професор, професор кафедри оптики

---

ЗАТВЕРДЖЕНО  
В.о. зав. кафедри оптики

  
\_\_\_\_\_ (Кондратенко С.В.)  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Протокол № 12 від « 16 » червня 2023 р.

Схвалено науково - методичною комісією фізичного факультету

Протокол від « 30 » червня 2023 року № 16

Голова науково-методичної комісії \_\_\_\_\_ (Оліх О.Я.)  
(підпис) (прізвище та ініціали)

## ВСТУП

**1. Мета дисципліни** – надати базові знання з фізики низькорозмірних структур, необхідні як для розуміння фізичних процесів, що відбуваються в наноструктурах та електронних пристроях з нанорозмірними елементами.

**2. Попередні вимоги до опанування або вибору навчальної дисципліни:**

- 1. Знати основи фізики напівпровідників, квантової механіки, принципи теорії твердого тіла.*
- 2. Вміти - вимірювати основні параметри і характеристики напівпровідників, електрофізичні параметри пристроїв електроніки, аналізувати роботу електронних схем.*
- 3. Володіти елементарними навичками вибору компонент мікроелектронних та оптоелектронних пристроїв.*

**знати:** визначальні ознаки напівпровідників, основні електричні, фотоелектричні та оптичні явища в наноструктурах, статистику електронів та дірок, кінетичні явища в наноструктурах, а також фізичні основи роботи основних типів електронних структур з нанооб'єктами.

**вміти:** користуватись основними формулами для оцінки параметрів нанорозмірних структур, а також величин, що характеризують кінетичні, оптичні та електричні явища в наноструктурах, вплив ефектів розмірного квантування на параметри електронних приладів, вміти проводити відповідні виміри та розрахунки.

**3. Анотація навчальної дисципліни:**

Навчальна дисципліна "Основи наноелектроніки" має на меті надати студентам знання про основні фізичні властивості матеріалів, які використовуються в наноелектроніці. Студенти ознайомляться з фізичними принципами функціонування основних елементів наноелектроніки, таких як нанотранзистори, квантові ями, нанодоти, квантові точки та молекулярні електронні пристрої, будуть розглянуті основні методи аналізу властивостей нанорозмірних матеріалів, зокрема методами атомно-силової мікроскопії, електронною мікроскопії та оптичними методами. Крім того, студенти дослідять різноманітні підходи щодо керування властивостями матеріалів наноелектроніки, такі як зонна інженерія, нанолітографія тощо. У кінцевому результаті студенти зможуть зрозуміти основні властивості матеріалів наноелектроніці, що дозволить їм використовувати ці знання в у різних галузях, таких як інформаційні технології, енергетика, медицина та сенсорика.

**4. Завдання (навчальні цілі):** - ознайомлення студентів з фізичними властивостями нанорозмірних матеріалів, з основними поняттями та ідеями сучасної наноелектроніки та оптоелектроніки, підготовка студентів до вивчення спеціальних оглядів та оригінальних робіт з окремих питань даної області. Ознайомлення із сучасними методами дослідження основних параметрів та властивостей нанорозмірних структур.

Відповідно до Стандарту вищої освіти України (другий рівень вищої освіти, галузь знань 10 «**Природничі науки**», спеціальність 104 «**Фізика та астрономія**») дисципліна забезпечує набуття здобувачами освіти перелічених нижче компетентностей:

Інтегральна компетентність: здатність розв'язувати складні задачі і проблеми дослідницького та/або інноваційного характеру у фізиці та астрономії.

**Загальні компетентності (ЗК):**

ЗК2. Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності.

ЗК3. Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел.

ЗК4. Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями.

ЗК7. Здатність проведення досліджень на відповідному рівні.

**Спеціальні (фахові) компетентності:**

СК02. Здатність формулювати, аналізувати та синтезувати рішення наукових проблем в області фізики та/або астрономії.

СК05. Здатність сприймати новоздобуті знання в області фізики та астрономії та інтегрувати їх із уже наявними, а також самостійно опановувати знання і навички, необхідні для розв'язання складних задач і проблем у нових для себе деталізованих предметних областях фізики та/або астрономії й дотичних до них міждисциплінарних областях.

СК10. Вміти використовувати методи чисельних та аналітичних розрахунків в оптиці.

СК11. Здатність проводити теоретичні та експериментальні дослідження фізичних явищ в середовищах, які перебувають в різних фазових станах із застосуванням оптичних методів.

#### Програмні результати навчання:

ПРН02. Проводити експериментальні та/або теоретичні дослідження з фізики та астрономії, аналізувати отримані результати в контексті існуючих теорій, робити аргументовані висновки (включаючи оцінювання ступеня невизначеності) та пропозиції щодо подальших досліджень.

ПРН04. Обирати і використовувати відповідні методи обробки та аналізу даних фізичних та/або астрономічних досліджень і оцінювання їх достовірності.

ПРН07. Оцінювати новизну та достовірність наукових результатів з обраного напрямку фізики та/або астрономії, оприлюднених у формі публікації чи усної доповіді.

ПРН08. Презентувати результати досліджень у формі доповідей на семінарах, конференціях тощо, здійснювати професійний письмовий опис наукового дослідження, враховуючи вимоги, мету та цільову аудиторію.

ПРН15. Планувати наукові дослідження з урахуванням цілей та обмежень, обирати ефективні методи дослідження, робити обґрунтовані висновки за результатами дослідження.

ПРН17. Знати і розуміти фізичні основи функціонування оптичних пристроїв та систем.

ПРН18. Вміти здійснювати планування та проводити експериментальне дослідження структурних, оптичних та електрофізичних властивостей органічних (в тім числі біологічних та наноб'єктів) і неорганічних середовищ.

#### 5. Результати навчання за дисципліною:

Результат навчання (1. знати; 2. вміти; 3. комунікація; 4. автономність та відповідальність)		Методи викладання і навчання	Методи оцінювання та пороговий критерій оцінювання (за необхідності)	Відсоток у підсумковій оцінці з дисципліни
Код	Результат навчання			
1.1	Класифікацію матеріалів наноелектроніки, основи зонної теорії наноструктур.	Лекції та практичні заняття	Щотижневий контроль попереднього матеріалу шляхом відповідей на конкретну кількість питань, модульна контрольна робота	10
2.1	Статистику електронів та дірок, кінетичні явища в наноструктурах, а також фізичні основи роботи основних типів пристроїв наноелектроніки, вплив ефектів розмірного квантування на параметри та характеристики наноелектронних пристроїв	Лекції та практичні заняття	Щотижневий контроль попереднього матеріалу шляхом відповідей на конкретну кількість питань,	10
2.2	Застосувати набуті знання для оцінки параметрів низько-розмірних	Лекції та практичні заняття	Щотижневий контроль	10

	матеріалів, користуватись основними формулами для оцінки параметрів нанорозмірних структур, вміти проводити відповідні виміри та розрахунки.		попереднього матеріалу, модульна контрольна робота	
2.3	Використати набуті навички на виробничих підприємствах та в лабораторіях науково-дослідних і навчальних установ.	Лекції та практичні заняття	Щотижневий контроль попереднього матеріалу шляхом відповідей на конкретну кількість питань,	10

## 6. Співвідношення результатів навчання дисципліни із програмними результатами навчання

Результати навчання дисципліни		1	2
<b>Програмні результати навчання</b>			
ПРН02. Проводити експериментальні та/або теоретичні дослідження з фізики та астрономії, аналізувати отримані результати в контексті існуючих теорій, робити аргументовані висновки (включаючи оцінювання ступеня невизначеності) та пропозиції щодо подальших досліджень.		+	+
ПРН04. Обирати і використовувати відповідні методи обробки та аналізу даних фізичних та/або астрономічних досліджень і оцінювання їх достовірності.		+	+
ПРН07. Оцінювати новизну та достовірність наукових результатів з обраного напрямку фізики та/або астрономії, оприлюднених у формі публікації чи усної доповіді.		+	+
ПРН08. Презентувати результати досліджень у формі доповідей на семінарах, конференціях тощо, здійснювати професійний письмовий опис наукового дослідження, враховуючи вимоги, мету та цільову аудиторію.		+	+
ПРН15. Планувати наукові дослідження з урахуванням цілей та обмежень, обирати ефективні методи дослідження, робити обґрунтовані висновки за результатами дослідження.			+
ПРН17. Знати і розуміти фізичні основи функціонування оптичних пристроїв та систем.			+
ПРН18. Вміти здійснювати планування та проводити експериментальне дослідження структурних, оптичних та електрофізичних властивостей органічних (в тім числі біологічних та нанооб'єктів) і неорганічних середовищ.			+

## 7. Схема формування оцінки.

### 7.1 Форми оцінювання студентів:

#### - семестрове оцінювання:

1. Модульна контрольна робота 1: 20 балів
2. Модульна контрольна робота 2: 20 балів

- підсумкове оцінювання у формі заліку: - 60 балів

#### - умови допуску до підсумкового заліку:

Студент не допускається до екзамену, якщо під час семестру набрав менше ніж 20 балів.

### 7.2 Організація оцінювання:

Контроль здійснюється за модульно-рейтинговою системою, яка складається із 2 змістових модулів. Система оцінювання знань включає поточний, модульний та семестровий контроль знань. Результати навчальної діяльності студентів оцінюються за 100-бальною шкалою. Форми поточного контролю: оцінювання контрольних робіт, звітів з лабораторних робіт, реферату, усних відповідей під час лекції, письмових та усних самостійних завдань. Модульний контроль: 2 модульні контрольні роботи, за які студент може отримати максимально **40 балів** (по **20 балів** за кожну роботу). Підсумковий семестровий контроль проводиться у формі іспиту, під час якого студент може отримати максимально **40 балів**.

### 7.3 Шкала відповідності оцінок

<b>Відмінно</b> / Excellent	90-100
<b>Добре</b> / Good	75-89
<b>Задовільно</b> / Satisfactory	60-74
<b>Незадовільно</b> / Fail	0-59
<b>Зараховано</b> / Passed	60-100
<b>Не зараховано</b> / Fail	0-59

**8. Структура навчальної дисципліни. Тематичний план лекцій, практичних і лабораторних занять**

№ п/п	Номер і назва теми*	Кількість годин		
		Лекції	Лабораторн і та практичні заняття	Самостійн а робота
<b><i>Змістовий модуль 1 Електронні властивості матеріалів наноелектроніки</i></b>				
1	<b>Лекція 1.</b> Вступ. Мета та завдання курсу. Основні уявлення та визначення. Розвиток наноелектроніки.	2		5
2	<b>Лекція 2.</b> Класифікація матеріалів наноелектроніки. Електронний спектр та функція густини станів квантових ям. Енергетичний спектр та функції густини станів електрона в нескінченно глибокій потенціальній ямі.	2	2	6
3	<b>Практичне заняття 1.</b> Умови щодо реалізації квантово-розмірних ефектів, оцінка граничних геометричних величин елементів, в яких реалізується ефект розмірного квантування (квантові точки, квантові нитки, квантові ями).		2	5
4	<b>Лекція 3.</b> Енергетичний спектр квантової ями. Поняття про підзони розмірного квантування. Функція густини станів квантової ями.	2	2	6
5	<b>Практичне заняття 2.</b> Частинка в прямокутній потенціальній ямі. Розрахунок енергетичного спектру носіїв заряду в квантовій ямі складної форми. Параболічні та трикутні квантові ями.		2	5
6	<b>Лекція 4.</b> Електронний спектр та функція густини станів квантових дротів та квантових точок. Енергетичний спектр квантових дротів та квантових точок. Низькорозмірні системи з циліндричною та сферичною симетрією. Функція густини станів в квантовому дроті та квантовій точці.	2	2	6
7	<b>Практичне заняття 3.</b> Низькорозмірні багаточарові гетероструктури та надгратки. Гетеропереходи I та II типу. Розмірне квантування в гетероструктурах. Особливості енергетичного спектру подвійної квантової ями. Багаточарові гетероструктури.		2	5
8	<b>Лекція 5.</b> Гетеропереходи з модульованим легуванням. Надгратки. Класифікація напівпровідникових надграток. Енергетичний спектр надграток. Модель надгратки Кроніга-Пенні. Розщеплення зон.	2		6
9	<b>Лекція 6.</b> Статистика електронів та дірок в низькорозмірних напівпровідниках. Рівноважна концентрація носіїв заряду і розміщення рівня Фермі у власному напівпровіднику. Інтеграл Фермі та його наближені вирази. Критерії виродженого і невиродженого електронного газу.	2	2	5
10	<b>Практичне заняття 4.</b> Концентрація вільних носіїв заряду у квантовій ямі, дроті та нитці. Вирази для концентрації електронів в квантовій ямі для граничних випадків сильно виродженого і невиродженого електронного газу.		2	6
11	<b>Лекція 7.</b> Вплив електричного поля на енергетичний спектр квантових ям.	2	2	5

**Змістовий модуль 2 Транспорт в наноструктурах та методи контролю наноструктур**

12	<b>Лекція 8.</b> Тунелювання через квантово-розмірні структури. Резонансне тунелювання крізь двобар'єрну структуру з квантовою ямою. Вольт-амперна характеристика багат шарових структур. Тунелювання через трикутний потенціальний бар'єр.	2	2	6
13	<b>Практичне заняття 5.</b> Методи неруйнівного контролю наноструктур за допомогою скануючого тунельного мікроскопу.		2	5
14	<b>Лекція 9.</b> Методи неруйнівного контролю наноструктур за допомогою атомно-силового мікроскопу. Принцип вимірювання топології поверхні наноструктур за допомогою атомно-силового мікроскопу. Контактний та напівконтактний режими роботи.	2	2	6
15	<b>Лекція 10.</b> Кулонівська блокада. Приклади квантових систем для спостереження кулонівської блокади. Одноелектронний транзистор.	2	2	5
16	<b>Практичне заняття 7.</b> Вимірювання електропровідності наноструктур за допомогою атомно-силового мікроскопа.		2	6
	<b>Практичне заняття 6.</b> Вимірювання електропровідності наноструктур за допомогою атомно-силового мікроскопа.		2	5
17	<b>Лекція 11.</b> Вимірювання електропровідності наноструктур за допомогою атомно-силового мікроскопа. Метод зонда Кельвіна.	2	2	6
18	<b>Практичне заняття 8.</b> Виготовлення наноструктур методом нанолітографії за допомогою атомно-силового мікроскопа.		1	5
19	<b>Лекція 12.</b> Електронна мікроскопія наноструктур.	2	2	6
20	<b>Лекція 13.</b> Магніто-силова мікроскопія.	2		5
21	<b>Лекція 14.</b> Квантовий ефект Холла в двовимірному електронному газі. Тензор електропровідності в магнітному полі.	2	2	6
22	<b>Лекція 15.</b> Ефект Шубнікова-де Гааза. Квантування холівського опору двовимірного електронного газу в магнітному полі.	2		5
<b>ВСЬОГО</b>		<b>30</b>	<b>29</b>	<b>121</b>

**Загальний обсяг 180 год., в тому числі:**

Лекцій – 30 год.

Практичні – 15 год.

Лабораторні роботи – 14 год.

Самостійна робота - 121 год.

## **Перелік лабораторних робіт:**

Лабораторна робота № 1.

Визначення ширини забороненої зони наноструктур

Лабораторна робота № 2.

Вимірювання електропровідності наноструктур.

Лабораторна робота № 3.

Ефект Холла

Лабораторна робота № 4.

Контроль якості поверхні за допомогою атомно-силового мікроскопу.

Лабораторна робота № 5.

Електронна мікроскопія наноструктур.

## **9. Рекомендовані джерела:**

### ***Основна:***

1. Joachim Knoch. Nanoelectronics. From Device Physics and Fabrication Technology to Advanced Transistor Concepts. (2024) Walter de Gruyter GmbH & Co KG
2. Hartmann, G., Siegner, U., & Schmucker, U. (Eds.). (2018). Springer Handbook of Metrology and Testing of Electrical Properties. Springer.
3. Martín-Palma, R. J., Agullo-Rueda, F., & Martínez-Duart, J. (2006). Nanotechnology for Microelectronics and Optoelectronics ([edition unavailable]). Elsevier Science.
4. Ritu Parekh, Rasika Dhavse - Nanoelectronics. Physics, technology and applications-IOP Publishing (2023).
5. С.В. Кондратенко. Фізика напівпровідників. – Київ, ТОВ Інсервіс, 2014. – 240 с.

### ***Додаткова:***

1. Mark Fox. Optical properties of solids / Oxford University Press, 2001. – 281 p.
2. John H. Davies. The physics of low-dimensional semiconductors. An introduction. – Cambridge university press, 1998. – 425 p.
3. Tumanski, S. (2018). Principles of Electrical Measurement. John Wiley & Sons.
4. Л.В. Поперенко, В.А. Покропівний. Фізика наноструктур. Київ, 2008.