

**КІЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

Фізичний факультет
(назва факультету)

Кафедра загальної фізики



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Заступник декана

з навчальної роботи

Момот О.В.

20 травня 2025 р.

РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Наноелектроніка

(повна назва навчальної дисципліни)

для студентів

галузь знань E «Природничі науки, математика та статистика»

(шифр і назва)

спеціальність E5 Фізика та астрономія

(шифр і назва спеціальності)

освітньо-науковий ступінь магістр

(молодший бакалавр, бакалавр, магістр)

освітньо-наукова програма Фізика наносистем

(назва освітньої програми)

спеціалізація

(за наявності)

(назва спеціалізації)

вид дисципліни Обов'язкова

Форма навчання	<u>очна</u>
Навчальний рік	<u>2025/2026</u>
Семестр	<u>1</u>
Кількість кредитів ECTS	<u>3</u>
Мова викладання, навчання та оцінювання	<u>українська</u>
Форма заключного контролю	<u>іспит</u>

Викладачі: професор Оліх Олег Ярославович

(Науково-педагогічні працівники, які забезпечують викладання даної дисципліни у відповідному навчальному році)

Пролонговано: на 20_/_/20_/_ н.р. _____ (_____) «__» 20_/_р.
(підпис, ПІБ, дата)

на 20_/_/20_/_ н.р. _____ (_____) «__» 20_/_р.
(підпис, ПІБ, дата)

на 20_/_/20_/_ н.р. _____ (_____) «__» 20_/_р.
(підпис, ПІБ, дата)

КИЇВ – 2025

Розробники¹:

Оліх Олег Ярославович, доктор фіз.-мат. наук, професор,

завідувач кафедри загальної фізики

(вказати авторів: ПІБ, науковий ступінь, вчене звання, посада, кафедра)

ЗАТВЕРДЖЕНО

Зав. кафедри загальної фізики



(Олег ОЛІХ)

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Протокол № 8 від 22 травня 2025 р.

Схвалено науково-методичною комісією фізичного факультету

Протокол № 10 від 23 травня 2025 р.

Голова науково-методичної комісії


(Олег ОЛІХ)

¹ Розробляється лектором. Робоча програма навчальної дисципліни розглядається на засіданні кафедри (циклової комісії – для коледжів), науково-методичної комісії факультету/інституту (раді навчального закладу - коледжу), підписується завідувачем кафедри (головою циклової комісії), головою науково-методичної комісії факультету/інституту (головою ради) і затверджується заступником декана/директора інституту з навчальної роботи (заступником директора коледжу).

ВСТУП

1. Мета дисципліни – отримання глибоких та систематичних знань щодо принципів роботи та можливих шляхів реалізації електронних пристрій, розміри яких знаходяться у нанометровому діапазоні.

2. Попередні вимоги до опанування або вибору навчальної дисципліни:

1. Знати основи квантової механіки, фізику напівпровідників, загальну фізику (розділи «Електрика та магнетизм», «Атомна фізика»), принципи роботи класичних електронних пристрій, структуру електронних оболонок як ізольованих атомів, так і при їх включені в періодичні структури.
2. Вміти застосовувати попередні знання з курсів математичного аналізу, диференційних та інтегральних рівнянь, квантової механіки для розв'язку рівнянь та для опису систем зниженої розмірності, аналізувати зонні схеми.
3. Володіти елементарними навичками побудови зонної схеми, обчислення коефіцієнта тунелювання, оцінки величини струму.

3. Анотація навчальної дисципліни / референс:

В рамках курсу «Наноелектроніка» розглядаються вплив обмеженої розмірності на процеси перенесення заряду, та шляхи реалізації функції, передбачених в класичних електронних пристроях, за допомогою структур зменшеного розміру. Метою вивчення дисципліни є отримання глибоких та систематичних знань щодо принципів роботи та можливих шляхів реалізації електронних пристрій, розміри яких знаходяться у нанометровому діапазоні. Навчальна задача курсу полягає у засвоєнні принципів роботи одноелектронних, молекулярних, спінових та вуглецевих наноелектронних елементів. Методи викладання: лекції, консультації. Методи оцінювання: опитування в процесі лекції, модульні контрольні роботи, іспит. Підсумкова оцінка виставляється на основі проміжних оцінок (40%) та іспиту (60%).

4. Завдання (навчальні цілі) – засвоєння студентами основних особливостей квантового перенесення заряду, особливостей скейлінгу, механізмів молекулярної провідності, принципів роботи спінtronних пристрій.

Згідно з вимогами Стандарту вищої освіти України (другий (магістерський) рівень вищої освіти, галузь знань Е «Природничі науки, математика та статистика», спеціальність Е5 «Фізика та астрономія», ОНП «Фізика наносистем» дисципліна забезпечує набуття здобувачами освіти наступних **компетентностей**:

Інтегральних:

Здатність розв'язувати складні задачі і проблеми дослідницького та інноваційного характеру у фізиці та астрономії.

Загальних:

- знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності (ЗК 2);
- здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями (ЗК 4);

Спеціальних:

- здатність використовувати закони та принципи фізики у поєднанні із потрібними математичними інструментами для опису природних явищ (ФК 1);
- 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 астрономії й дотичних до них міждисциплінарних областях (ФК 5);

- здатність застосовувати теорії опису фізичних властивостей наносистем різних типів (ФК 11)

5. Результати навчання за дисципліною: (описуються з детальною достовірністю для розробки заходів оцінювання)

Результат навчання (1. знати; 2. вміти; 3. комунікація*; 4. автономність та відповідальність*)		Методи викладання і навчання	Методи оцінювання	Відсоток у підсумковій оцінці з дисципліни
Код	Результат навчання			
1.1	знати механізми перенесення заряду в структурах з обмеженою розмірністю	лекції	модульна контрольна робота, усне опитування	15
1.2	знати розмірні ефекти, які виникають при виготовленні напівпровідникових електронних пристройів	лекції	модульна контрольна робота, усне опитування	10
1.3	знати фізичні принципи, на яких ґрунтуються робота приладів молекулярної наноелектроніки	лекції	модульна контрольна робота, усне опитування	15
1.4	знати особливості перенесення заряду у низькорозмірних органічних структурах	лекції	модульна контрольна робота, усне опитування	10
2.1	вміти оцінити максимальну швидкодію та енергоспоживання низькорозмірних транзисторів	лекції	модульна контрольна робота, усне опитування	10
2.2	вміти розраховувати коефіцієнти заломлення електронних лінз при балістичному перенесенні заряду	лекції	модульна контрольна робота, усне опитування	10
2.3	вміти оцінити висоту внутрішніх бар'єрів за вольт-амперною характеристикою двобар'єрних одноелектронних структур	лекції	модульна контрольна робота, усне опитування	10
2.4	вміти визначати гібридизацію та характер зв'язків у вуглецевих структурах	лекції	модульна контрольна робота, усне опитування	10
4.1	знаходити інформацію щодо новітніх вуглецевих електронних пристройів	лекції	модульна контрольна робота, усне опитування	5
4.2	аналізувати взаємозв'язок технологій виробництва транзисторів з їх максимальною швидкодією	лекції	модульна контрольна робота, усне опитування	5

* заповнюється за необхідністю, наприклад для практик, лабораторних курсів тощо.

6. Співвідношення результатів навчання дисципліни із програмними результатами навчання (необов'язково для вибіркових дисциплін)

Результати навчання дисципліни	1.1	1.2	1.3	1.4	2.1	2.2	2.3	2.4	4.1	4.2
Програмні результати навчання										
ПРН05. Здійснювати феноменологічний та теоретичний опис досліджуваних фізичних явищ, об'єктів і процесів.	+			+	+	+	+	+		
ПРН10. Відшуковувати інформацію і дані, необхідні для розв'язання складних задач фізики, використовуючи різні джерела, зокрема, наукові видання, наукові бази даних тощо, оцінювати та критично аналізувати отримані інформацію та дані.			+					+	+	+
ПРН16. Брати продуктивну участь у виконанні експериментальних та теоретичних досліджень в області фізики та астрономії.			+			+			+	
ПРН20. Знати механізми формування електротранспортних та магнітних властивостей нанокарбонових систем різної мірності та структурної досконалості.	+	+	+	+	+					
ПРН23. Вміти розраховувати перерозподіл заряду, потенціалу і поля на поверхні і границях розділу фаз, оцінювати ступінь локалізації електронів і визначати роботу виходу електронів.			+						+	
ПРН24. Вміти експериментально визначати структуру та фазовий склад нанокарбонових систем.				+					+	
ПРН25. Знати методи отримання та особливості структури наносистем, а також вміти встановлювати причинно-наслідковий зв'язок між особливостями їхнього складу та властивостей.		+		+	+			+		+

7. Схема формування оцінки:

7.1 Форми оцінювання студентів: (зазначається перелік видів робіт та форм їх контролю / оцінювання із зазначенням Min. – рубіжної та Max. кількості балів чи відсотків)

- семестрове оцінювання:

1. Опитування під час першого змістового модуля – 10 балів/ 6 балів
2. Модульна контрольна робота 1 – 20 балів/ 12 балів
3. Опитування під час другого змістового модуля – 10 балів/ 6 балів
4. Модульна контрольна робота 2 – 20 балів/ 12 балів

Модуль 1: оцінка за відповіді при усному опитуванні та за модульну контрольну роботу з теми «Перенесення заряду в структурах з обмеженою розмірністю» – 30 балів (рубіжна оцінка 18 балів).

Модуль 2: оцінка за відповіді при усному опитуванні та за модульну контрольну роботу з теми «Молекулярна та вуглецева електроніка» – 30 балів (рубіжна оцінка 18 балів).

Для студентів, які упродовж семестру не досягли мінімального рубіжного рівня оцінки (60% від максимально можливої кількості балів) проводиться заключна семестрова контрольна робота, максимальна оцінка за яку не може перевищувати 20% підсумкової оцінки (до 20 балів за 100-бальною шкалою).

- підсумкове оцінювання у формі іспиту, максимальна оцінка 40 балів (рубіжна оцінка 24 бали). Підсумкова кількість балів з дисципліни (максимум 100 балів), яка визначається як сума балів за систематичну роботу впродовж семестру та за результатами проведення іспиту. *Результатами навчання, які оцінюються під час іспиту, є РН 1.1. - 4.2.*

При простому розрахунку отримаємо:

	ЗМ1	ЗМ2	іспит	Підсумкова оцінка
Мінімум	18	18	24	60
Максимум	30	30	40	100

Студент не допускається до іспиту, якщо під час семестру набрав менше 36 балів. Для допуску до екзамену студент обов'язково має написати передбачені програмою контрольні роботи або написати заключну семестрову контрольну роботу. Оцінка за іспит не може бути меншою 24 балів для отримання загальної позитивної оцінки за курс.

Умовою отримання позитивної результатуючої оцінки з дисципліни є досягнення не менш як 60% від максимально можливої кількості балів.

7.2 Організація оцінювання: (обов'язково зазначається порядок організації передбачених робочою навчальною програмою форм оцінювання із зазначенням, у тому числі, результатів навчання, опанування яких перевіряється конкретним оцінюванням).

Рівень досягнення запланованих результатів навчання визначається за результатами написання та захисту письмових контрольних робіт, відповідей при усному опитуванні.

Питома вага результатів навчання у підсумковій оцінці за умови її опанування на належному рівні:

- результати навчання 1.1. – 1.4 (знання) – до 50% ;
- результати навчання 2.1. – 2.4 (вміння) – до 40% ;
- результати навчання 4.1. – 4.2 (автономність і відповідальність) – до 10% .

У курсі передбачено 2 змістові модулі. Після завершення відповідних тем проводяться модульні контрольні роботи. Передбачено також усне опитування під час лекцій.

7.3 Шкала відповідності

Відмінно / Excellent	90-100
Добре / Good	75-89
Задовільно / Satisfactory	60-74
Незадовільно з можливістю повторного складання / Fail	35-59
Незадовільно з обов'язковим повторним вивченням дисципліни / Fail	0-34
Зараховано / Passed	60-100
Не зараховано / Fail	0-59

8. СТРУКТУРА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН ЛЕКІЙ

№ п/п	Назва теми	Кількість годин		
		лекції	лабораторні	Самостійна робота
Частина 1. Перенесення заряду в структурах з обмеженою розмірністю				
1	Тема 1. Вступ. Етапи розвитку електроніки. Скейлінг. Залежність швидкодії та енергоспоживання транзистора від розміру. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Еволюція величини проектної норми. Закони Мура	2		4
2	Тема 2. Причини та наслідки появи паразитної ємності в низькорозмірних транзисторах. Кvantове обмеження: умови спостереження, наслідки. Типи та шляхи створення низькорозмірних структур. Особливості дисперсійних співвідношень у квантових ямах. Домішкові рівні. Надгратки. Струми втрат в нанорозмірних транзисторах.	2		4
3	Тема 3. Особливості дисперсійних співвідношень у квантових точках та дротах. Наноелектронні діоди: принцип роботи, особливості будови. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Особливості розсіяння носіїв заряду уnanoструктурах.	2		4
4	Тема 4. Модуляційно леговані структури. Принцип роботи та будова НЕМТ-транзистора. Селективне легування квантової ями та δ-легування. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Побудова зонної діаграми структури широкозонний напівпровідник-вузькозонний напівпровідник на прикладі системи AlGaAs-GaAs.	2		4
5	Тема 5. Балістичний транспорт, квантова інтерференція: умови спостереження. Квант опору. Вольт-амперні характеристики низько розмірних структур. Від'ємний опір вигину. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Особливості 4-х зондового методу при його застосуванні до балістичних структур.	2		4
6	Тема 6. Принцип роботи заломлюючого транзистора, транзистора на відбитих електронах та балістичного випрямляча. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Квантові інтерференційні транзистори.	2		4
7	Тема 7. Надбар'єрне відбивання носіїв заряду. Тунелювання носіїв заряду через один та декілька потенційних бар'єрів. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Особливості надбар'єрного руху дірок.	2		4
8	Тема 8. Резонансно-тунельний діод. Резонансно-тунельний транзистор. Транзистори на гарячих електронах. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. RHET-транзистор.	2		4
<i>Модульна контрольна робота I</i>				2
Частина 2. Молекулярна та вуглецева електроніка				
9	Тема 9. Явище кулонівської блокади. Умови спостереження одноелектронних процесів. Кулонівська блокада у двобар'єрних структурах. Загальний вигляд вольт-амперної характеристики. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Со-тунелювання.	2		4

10	Тема 10. Принцип роботи одноелектронного транзистора. Поняття «кулонівські алмази». с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Вплив дискретизації енергетичного спектру квантової точки на ВАХ двобар'єрної структури.	2		4
11	Тема 11 Шляхи реалізації одноелектронних приладів. Одноелектронні насос, турнікет, генератор накачки, пастка. Одноелектронні інвертор, логічний елемент «XOR», елемент пам'яті. Переваги та недоліки одноелектроніки. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Квантово-клітинні автомати.	2		4
12	Тема 12. Гібридизація атомів вуглецю. σ та π зв'язки. Зв'язуючі та антизв'язуючі орбіталі. Механізми молекулярної провідності. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Солітони	2		4
13	Тема 13. Легування органічних напівпровідників. Макромолекулярна електроніка: полімерні транзистори, органічні світлодіоди та сонячні елементи. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Методи створення контактів до окремих молекул..	2		4
14	Тема 14. Випрямляючий молекулярний діод. Резонансний молекулярний діод. Молекулярний транзистор. Молекулярні тригери. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Молекулярні логічні елементи.	2		2
15	Тема 15. Вуглецеві нанотрубки: класифікація, параметри, механізм провідності. Методи легування вуглецевих нанотрубок. Вуглецеві нанотрубки як нанопровідники. Діоди на основі вуглецевих нанотрубок. Використання вуглецевих нанотрубок у транзисторах та елементах пам'яті. с.р.с. Вивчення матеріалу лекції. Графен: структура, закон дисперсії.	2		2
	<i>Модульна контрольна робота 2</i>			2
	ВСЬОГО	30	0	60

Примітка: слід зазначити теми, внесені на самостійне вивчення

Загальний обсяг 90 год.², в тому числі:

Лекцій – **30** год.

Семінари – **0** год.

Практичні заняття – 0 год.

Лабораторні заняття – 0 год.

Тренінги – **0** год.

Консультації – **1** год.

Самостійна робота – **60** год.

² Загальна кількість годин, відведених на дану дисципліну згідно навчального плану.

9. РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА³:

Основна: (Базова)

1. Багдасарян А. А. Основи наноелектроніки: навчальний посібник, Суми, СДУ, 2019. – 133 с. (https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/75082/1/Bahdasarian_nanoelektroniky.pdf)
2. Осадчук В. С., Осадчук О. В. Основи наноелектроніки : Навчальний посібник, Вінниця, ВНТУ, 2016, 199 с. (<http://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/13522/Основи%20наноелектроніки100.pdf>)
3. Жовнір М.Ф., Іващук А.В., Папроцька О.А., Кущевська Н.Ф., Малишев В.В. Основи наноелектроніки, К., Університет «Україна», 2018, 149 с. (<https://www.yakaboo.ua/ua/osnovi-nanoelektroniki.html>)
4. Заячук Д.М., Якименко Ю.І., Співак В. М., Орлов А.Т., Богдан О. В., Коваль В.М. Основи наноелектроніки: у 2 кн. Кн.2 «Матеріали і наноелектронні технології : Підручник», К, НТУУ «КПІ», 2016, 350 с. (https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/18294/1/MTiFP_nanoelektronika.pdf)
5. Поплавко Ю.М., Борисов О.В., Ільченко В.І., Якименко Ю.І. Мікроелектроніка та наноелектроніка. Вступ до спеціальності. Київ, НТУУ «КПІ», 2010, 160 с. (https://me.kpi.ua/downloads/Poplavko_Vstup_do_spec.pdf)
6. Готра З., Григорчак І., Лукіянець Б., Махній В., Павлов С., Політанський Л., Потенські Е. Субмікронні та нанорозмірні структури електроніки, Чернівці, «Технологічний центр», 2014, 839 с. (https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjeqP3emIj6AhUolosKHW6VAsQFnoECAoQAQ&url=http%3A%2F%2Fpdf.lib.vntu.edu.ua%2Fbooks%2F2018%2FGotra_Nanoelektron_2014_839.pdf&usg=AOvVaw0ZrMaOg3EZOpzTvuq1_vTr)
7. Назаров О.М., Нищенко М.М. Наноструктури та нанотехнології: Навчальний посібник. К.: НАУ, 2012. - 248с. (http://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2021/Nazarov_2012_248.pdf)

Додаткова:

1. Поплавко Ю.М., Борисов О.В., Якименко Ю.І. Нанофізика, наноматеріали, наноелектроніка. Київ, НТУУ «КПІ», 2012, 300 с. (https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiYzfSsnIj6AhUkiYsKHBaBjgQFnoECAgQAQ&url=https%3A%2F%2Fme.kpi.ua%2Fdownloads%2FPoplavko_Nanophysics_2012.pdf&usg=AOvVaw3kfqVwvCVxwM-Yw743Peph)
2. Заячук Д.М. Нанотехнології та наноструктури: Навч. посібник, Львів, видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2009, 580 с. (https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj_1qajnoj6AhVDIYsKHaWLAm0QFnoECAcQAQ&url=http%3A%2F%2Fpdf.lib.vntu.edu.ua%2Fbooks%2F2021%2FZayachuk_2009_581.pdf&usg=AOvVaw3Vm14QimxcGSD_V_dZxhp)
3. Погосов В.В., Корніч Г.В., Васютін Є.В., Пугіна К.В., Кіпріч В.І. Основи нанофізики та нанотехнологій, Запорізький національний технічний університет, електронний підручник, 2008, 630 с (https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjsps6S6n4j6AhVkwosKHDH6DbIQFnoECAwQAQ&url=http%3A%2F%2Feir.zntu.edu.ua%2Fbitstream%2F123456789%2F314%2F1%2Fprinciples_nanophysics_nanotechnologies.pdf&usg=AOvVaw1s9sDIDUj89CSY8JSZHzxR)
4. Шишкін Г.Г., Агеев И.М. Наноелектроника. Элементы, приборы, устройства. М.: «Бином, Лаборатория знаний», 2012, 408 с. (<https://ua1lib.org/dl/3310167/2a3a00>)

³ В тому числі Інтернет ресурси