

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ І.І.МЕЧНИКОВА
Кафедра фізики та астрономії



“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Проректор з науково-педагогічної роботи
О.В.Запорожченко

Ревченко

2022 р.

РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ
ВБ 5.02 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ НАНОЕЛЕКТРОНІКИ

Рівень вищої освіти

другий (магістерський) рівень

Галузь знань

10 – Природничі науки

Спеціальність

104 – Фізика та астрономія

Освітньо-професійна програма Фізика та астрономія

ОНУ
2022

Робоча програма навчальної дисципліни «Теоретичні основи наноелектроніки».
– Одеса: ОНУ, 2022. – 9с.

Розробники програми:

доктор фізико-математичних наук, професор Адамян В.М., кандидат фізико-математичних наук, доцент Сушко М.Я.

Робоча програма затверджена на засіданні кафедри фізики та астрономії
ФМФІТ

Протокол № 1 від «5» вересня 2022 р.

Завідувач кафедри

Володимир ГОЦУЛЬСЬКИЙ

/ Погоджено із гарантом ОПП «Фізика та астрономія» Вадим АДАМЯН

Схвалено навчально-методичною комісією (НМК) факультету математики,
фізики та інформаційних технологій

Протокол № 1 від «6» вересня 2022 р.

Голова НМК

Наталя МАСЛЕНІКОВА

Переглянуто та затверджено на засіданні кафедри фізики та астрономії

Протокол № ____ від «____» 20 ____ р.

Завідувач кафедри _____ (_____)

Розглянуто та затверджено на засіданні кафедри фізики та астрономії

Протокол № ____ від «____» 20 ____ р.

Завідувач кафедри _____ (_____)

1. Опис навчальної дисципліни

Найменування показників	Галузь знань, Спеціальність, спеціалізація, рівень вищої освіти	Характеристика навчальної дисципліни
		Очна (денна) форма навчання
Загальна кількість кредитів – 3 годин – 90 змістовних модулів - 1	Галузь знань 10 – Природничі науки Спеціальність: 104 – Фізика та астрономія Рівень вищої освіти: <u>Другий (освітньо-професійний)</u>	<p>Вибіркова дисципліна</p> <p>Рік підготовки:</p> <p>1-й</p> <p>Семестр</p> <p>2-й</p> <p>Лекції</p> <p>30год.</p> <p>Практичні, семінарські</p> <p>0 год.</p> <p>Лабораторні</p> <p>0 год.</p> <p>Самостійна робота</p> <p>60год.</p> <p>Форма підсумкового контролю:</p> <p>залік</p>

2. Мета та завдання навчальної дисципліни

Метою викладання навчальної дисципліни є: підготовка фахівців, які здібні розуміти, поєднувати і застосовувати в їх майбутній професійній діяльності ідеї і методи сучасної фізики та електроніки, що вийшли зараз на передній план внаслідок останніх досягнень нанофізики і нанотехнологій.

Завдання:формування у студентів наступної системи компетентностей, що включає:

знання, розуміння, уміння та навички інтерпретації та кількісного опису особливостей явищ та фізичних процесів у проміжних структурах між молекулярними і макроскопічними з'єднаннями та бачення шляхів використання цього досвіду для практичного використання і розвитку новітніх нанотехнологій; здатність розв'язувати складні спеціалізовані задачі нанофізики, що характеризуються комплексністю та невизначеністю умов, зрозумілого і недвозначного донесення власних знань, висновків та аргументації до фахівців;

Процес вивчення дисципліни спрямований на формування елементів наступних компетентностей:

Інтегральна компетентність: Здатність розв'язувати складні спеціалізовані задачі та практичні проблеми з фізики у професійній діяльності або у процесі подальшого навчання, що передбачає застосування чисельних методів розв'язання рівнянь математичної фізики і характеризується комплексністю та невизначеністю умов.

Загальні компетентності:

- ЗК 01. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.
- ЗК 02. Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності.
- ЗК 03. Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел.
- ЗК 04. Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями.
- ЗК 05. Здатність використовувати інформаційні та комунікаційні технології.

Спеціальні (фахові) компетентності:

СК 01. Здатність використовувати закони та принципи фізики та/або астрономії у поєднанні із потрібними математичними інструментами для опису природних явищ.

СК 05. 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.

Заплановані результати навчання: по проходженні курсу студенти будуть

знати: основні положення нерелятивістської квантової теорії та методи розв'язання типових задач; розуміти принципи застосування фундаментальних законів квантової механіки у сучасних технологіях

вміти: застосовувати принципи квантової теорії для пояснення явищ і оцінки основних фізичних характеристик квантових об'єктів.

розуміти: роль квантової теорії у технологічному прогресі людства

що забезпечує **програмні результати навчання згідно ОПП**

РН01. Використовувати концептуальні та спеціалізовані знання і розуміння актуальних проблем і досягнень обраних напрямів сучасної теоретичної і експериментальної фізики та/або астрономії для розв'язання складних задач і практичних проблем.

РН02. 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.

РН03. Обирати і використовувати відповідні методи обробки та аналізу даних фізичних та/або астрономічних досліджень і оцінювання їх достовірності.

РН04. Здійснювати феноменологічний та теоретичний опис досліджуваних фізичних та/або астрономічних явищ, об'єктів і процесів.

РН05. Обирати ефективні математичні методи та інформаційні технології та застосовувати їх для здійснення досліджень та/або інновацій в області фізики та/або астрономії.

РН09. Відшуковувати інформацію і дані, необхідні для розв'язання складних задач фізики та/або астрономії, використовуючи різні джерела, зокрема, наукові видання, наукові бази даних тощо, оцінювати та критично аналізувати отримані інформацію та дані.

Заплановані результати навчання: по закінченню курсу студенти будуть

знати: нові уявлення, поняття і методи, які на протязі останніх двадцяти років тривко вкоренилися у фізиці і зараз становлять фундамент мезо- і нанофізики, квантові ефекти, особливості транспортних явищ і перетворення енергії у нанорозмірних структурах і пристроях;

вміти: застосовувати принципи квантової теорії до дослідження нанооб'єктів, оцінювати квантово-розмірні і інтерференційні ефекти у електронних наносхемах,

знаходити електронні теплові і магнітні характеристики базових елементів наноелектроніки

3.Зміст навчальної дисципліни

Змістовий модуль 1. Транспортні процеси у наноструктурах

Тема 1. Електронні і теплові потоки в низькорозмірних структурах. Електронний перенос у нанопристроях. Рушійні сили. Балістичні і дифузійні режими провідності. Квантові точки і нанопровідники. Квантові інтерференційні ефекти. Квантовий інтерференційні польові транзистори. Вивільнення тепла у наносхемах. Фундаментальні обмеження на ступень інтеграції та швидкодію. Теплопровідність, електропровідність і термоелектричні ефекти у нанопровідниках. Обчислення електричного опору, коефіцієнтів Пелтьє і Зеебека, електронної теплопровідності. Вимірювання транспортних характеристик.

Тема 2. Вуглецеві наноструктури. Графен. Структура і методи отримання. Густина електронних станів і густина носіїв. Розсіяння носіїв. Фононний спектр. Теплопровідність графену. Металеві і напівпровідникові нанотрубки. Електронна структура нанотрубок. Оптичні переходи. Багатостінкові трубки.

Тема 3. Елементи спінtronоніки. Гігантський магніторезистивний ефект у наногетероструктурах. Поняття спінового струму. Спінова дифузія. Інжекція спінів. Спінрушійні сили і моменти сил. Спіновий польовий інтерференційний транзистор.

3. Структура навчальної дисципліни

Тема	Кількість годин					
	Усього	Лек.	Пр.	Лаб.	Інд.	СР
1	2	3	4	5	6	7
Тема 1. Електронні і теплові потоки в низькорозмірних структурах.	34	10	-	-	-	24
Тема 2. Вуглецеві наноструктури.	26	10	-	-	-	16
Тема 3. Елементи спінtronоніки.	30	10	-	-	-	20
Усього годин:	90	30	-	-	-	60

4. Теми практичних занять

Практичні заняття не передбачені навчальним планом

5. Теми лабораторних занять

Лабораторні заняття не передбачені навчальним планом

6. Теми семінарських занять

Семінарські заняття не передбачені навчальним планом

7. Завдання для самостійної роботи

№	Назва теми	Кількість годин
1	Нанопровідники. Густина станів. Хімічні потенціали	4
2	Балістичні і дифузійні режими провідності. Формула Ландауера і закон Ома.	4
3	Квантові інтерференційні ефекти. Моделі інтерференційних польових транзисторів.	4
4	Вивільнення тепла у наносхемах.	4
5	Електро- і теплопровідність. Співвідношення Айнштайна	4
6	Застосування рівняння Больцмана.	4
7	Зонна структура графену.	4
8	Електро- і теплопровідність графену.	4
9	Напівпровідникові і металеві вуглецеві нанотрубки	4
10	Двохшаровий графен і багатостінкові нанотрубки	4
11	Магнітоопір. Гігантський магніторезистативний ефект.	4
12	Спінова дифузія і спіновий струм. Рівняння Валета-Ферта	6
13	Спінрушівні сили і моменти сил. Спінодинаміка.	6
14	Спіновий польовий транзистор	4
РАЗОМ		60

8. Теми індивідуальних завдань

- Покращення характеристик квантового інтерференційного польового транзистора
- Провідність хиральних вуглецевих нанотрубок
- Перенос у магнітному полі.

9. Методи навчання

При викладанні дисципліни використовуються інтерактивні методи навчання, наочні методи навчання. Базовим методом навчання є поєднання лекції та самостійної роботи студента. Під час проведення лекцій використовуються наступні методи навчання: пояснально-ілюстративний метод або інформаційно-рецептивний; метод проблемного викладу.

Під час самостійної роботи використовуються наступні методи навчання: частково-пошуковий, або евристичний метод; дослідницький метод.

10. Форми контролю та методи оцінювання

Поточний контроль здійснюється за результатами виконання контрольних робіт студентів, та залікового тесту.

Критерії оцінювання виконання самостійної роботи

Критеріями оцінювання є: повнота виконання завдання, структура і якість відповідей та на додаткові запитання викладача.

Критерії оцінювання контрольних робіт

Критеріями оцінювання є правильність та повнота відповіді на тестові питання, обґрунтування правильних та виправлення помилок в результаті особистого захисту роботи. Кількість балів визначається за сумою правильних відповідей з урахуванням логічних зв'язків між завданнями при комп'ютерній обробці результатів тесту. Оцінюється також активність студента в процесі заняття: усне опитування, виконання самостійних робіт; розв'язання задач. Підсумковий семестровий контроль (залік)

При оцінюванні в балах рівня засвоєння матеріалу використовуються загальні критерії оцінювання навчальних досягнень здобувачів вищої освіти згідно положення ОНУ ім І.І. Мечникова. Кінцева оцінка виставляється за сумою балів поточного та підсумкового контролю за шкалою, що наведена нижче.

Шкала оцінювання: національна та ECTS

Сума балів за всі види навчальної діяльності	Оцінка ECTS	Оцінка за національною шкалою	
		для екзамену, курсового проекту (роботи), практики	для заліку
90-100	A	відмінно	зараховано
85-89	B	добре	
75-84	C		
70-74	D	задовільно	
60-69	E		
35-59	FX	незадовільно з можливістю повторного складання	не зараховано з можливістю повторного складання
0-34	F	незадовільно з обов'язковим повторним вивченням дисципліни	не зараховано з обов'язковим повторним вивченням дисципліни

11. Питання для поточного та підсумкового контролю.

Для кожної теми формами контролю навчальних здобутків студентів можуть бути поточний контроль: оцінка активності роботи на лекціях; домашні завдання. Підсумковий семестровий контроль (залік) здійснюється за арифметичною сумою оцінок отриманих за модулі. Питання поточного контролю публікуються у відповідному G-class і можуть варіюватись в залежності від рівня аудиторії.

- Вивід формули Ландауера
- Природа квантового ціличисельного ефекта Холла. Фізична природа різниці між квантом провідності Холла та Клітцинга

Використовуючи історичні дані (див Wiki) по розмірах транзисторних елементів відтворіть закон Мура та знайдіть екtrapоляцію на 2024 рік

	Moore's law - Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Moore%27s_law		Semiconductor device fabri... https://en.wikipedia.org/wiki/Semiconductor_device_fabrication
		Moore's law: The number of ... https://ourworldindata.org/grapher/moores-law-number-of-transistors	

1. В рамках простої моделі характерного часу τ вільного пробігу рівняння руху частинки із зарядом q у стаціонарному електричному і магнітному полях $\mathbf{E} \perp \mathbf{B}$ має вигляд:

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\frac{1}{\tau} \mathbf{v} + \frac{q}{m} \left(\mathbf{E} + \frac{1}{c} \mathbf{v} \times \mathbf{B} \right)$$

Розглядаючи стаціонарний стан, отримайте тензор провідності для 2D геометрії:

$$\mathbf{j} = \hat{\sigma} \mathbf{E}, \quad \hat{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} \end{pmatrix}$$

і встановіть значення компонент у границі $\omega_0 \tau \gg 1$, $\omega_0 = \frac{|q| B}{mc}$

2. У задачі про рівні Ландау обчисліть характерний радіус r_0 площині яка відповідає кванту потоку магнітного поля $\Phi_0 = \frac{hc}{e}$.

3. Дайте інтерпретацію кратності виродження рівнів Ландау для ідеального 2D газу з т.з. кількості квантів магнітного потоку у площині.

- Аналіз залежності опору квантового інтерференційного польового транзистора від параметрів системи
- Низькотемпературна залежність хімічного потенціалу та теплоємності провідника
- Співвідношення Айнштейна між провідністю і коеф. дифузії
- В чому полягає фізична природа гігантського магнітоопіру?
- Принцип роботи електро-спінового модулятора

12. Схема нарахування балів

Поточний контроль, самостійна робота, індивідуальні заняття				Підсумковий бал
Розділ 1	Розділ 2	Розділ 3	Індивідуальні завдання	
30	30	30	10	100

Підсумкові бали для оцінки знань студентів за розділ розраховуються таким чином:

№	Вид роботи	Форма контролю	Максимальне число балів
1	Аудиторна активність студента		5
2	Виконання домашніх завдань, самостійної роботи	Письмові розв'язки, письмові та усні відповіді	5
3	Сума		10

13. Методичне забезпечення

Навчально-методичне забезпечення: робоча програма навчальної дисципліни; силабус, конспекти лекцій; презентації; посібники, контрольні питання і завдання до тем, роздаткові матеріали до лекцій [Google-class](#)

14. Рекомендована література (<http://theorphys.onu.edu.ua/uk/textbooks>)

Основна

1. Suprio Datta. Lesson from Nanoelectronics. A New Perspective on Transport, Lessons from Nanoscience: A Lecture Notes Series, Vol. 1, Lessons from Nanoscience: A Lecture Notes Series, Vol. 2, World Scientific Publishing, 2013, 2012, 492 pp.
2. Mark Lundstrom, Changwook Jeong. Near Equilibrium transport. Fundamentals and Applications, Lessons from Nanoscience: A Lecture Notes

Series, Vol. 2, World Scientific Publishing, 2013, 252 pp.
<https://doi.org/10.1063/5.0133335>

3. В.М. Адамян, В.В. Завальнюк, В.М. Адамян, В.В. Завальнюк, Теоретичні основи наноелектроніки (конспект лекцій), Одеса 2019, с. 60
4. I.O. Вакарчук. Квантова механіка, 3-те видання, Львів: ЛНУ ім. Івана Франка, 2007, 848 стр.

Додаткова

1. Ashcroft, Neil W.; Mermin, N. David, Solid state physics. New York: 1976
2. J. Fang et al., Recent advances in low-dimensional semiconductor nanomaterials and their applications in high-performance photodetectors, InfoMat **2** (2019), p. 291-317

15. Інформаційні ресурси

1. A resource for nanoscience and nanotechnology: <http://nanohub.org>
2. <http://theorphys.onu.edu.ua/uk>