

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Кафедра фізики нетрадиційних енерготехнологій та екології

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Проректор з науково-педагогічної
роботи

_____ Антон ПАНТЕЛЕЙМОНОВ

“ _____ ” _____ 20__ р.

РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Нанофізика та наноматеріали

(назва навчальної дисципліни)

рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____
галузь знань _____ 10. Природничі науки _____
(шифр і назва)
спеціальність _____ 105 Прикладна фізика та наноматеріали _____
(шифр і назва)
освітня програма _____ Прикладна фізика нетрадиційної енергетики _____
(шифр і назва)
спеціалізація _____ Фізика нетрадиційних енерготехнологій та фізичні аспекти екології _____
(шифр і назва)
вид дисципліни _____ за вибором _____
(обов'язкова / за вибором)
факультет _____ ННІ комп'ютерної фізики та енергетики _____

2022 / 2023 навчальний рік

Програму рекомендовано до затвердження вченою радою Навчально-наукового інституту комп'ютерної фізики та енергетики

“ ____ ” _____ 2022 року, протокол № _____

РОЗРОБНИКИ ПРОГРАМИ: Ілля МАРУЩЕНКО, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики нетрадиційних енерготехнологій та екології

Програму схвалено на засіданні кафедри фізики нетрадиційних енерготехнологій та екології

Протокол від “ ____ ” _____ 2022 року, № _____

Завідувач кафедри фізики нетрадиційних енерготехнологій та екології

(підпис) Олександр КУЛИК
(прізвище та ініціали)

Програму погоджено з гарантом освітньої програми (керівником проектної групи)
Прикладна фізика нетрадиційної енергетики
назва освітньої програми

(підпис) Олександр КУЛИК
(прізвище та ініціали)

Програму погоджено методичною комісією Навчально-наукового інституту комп'ютерної фізики та енергетики
назва факультету, для здобувачів вищої освіти якого викладається навчальна дисципліна

Протокол від “ ____ ” _____ 2022 року, № _____

Голова методичної комісії Навчально-наукового інституту комп'ютерної фізики та енергетики

(підпис) Ольга ЛІСІНА
(прізвище та ініціали)

ВСТУП

Програма навчальної дисципліни «Нанофізика та наноматеріали» складена відповідно до освітньо-професійної (освітньо-наукової) програми підготовки

Другий рівень, магістр
(назва рівня вищої освіти)

спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали

спеціалізації Фізика нетрадиційних енерготехнологій та фізичні аспекти екології

1. Опис навчальної дисципліни

1.1. Мета викладання навчальної дисципліни: вивчення фізичних основ нанофізики, зокрема дифузного і балистичного транспорту у нанотранзисторах, і технологій виготовлення наноматеріалів.

1.2. Основні завдання вивчення дисципліни: забезпечити формування у студентів знання сучасного стану досліджень в галузі нанофізики та наноматеріалів і розуміння принципів роботи пристроїв нанофізики, зокрема в галузі поновлюваної енергетики.

1.3. Кількість кредитів - 6

1.4. Загальна кількість годин - 180

1.5. Характеристика навчальної дисципліни	
Обов'язкова	
Денна форма навчання	Заочна (дистанційна) форма навчання
Рік підготовки	
1-й	
Семестр	
2-й	
Лекції	
32 год.	
Практичні, семінарські заняття	
16 год.	
Лабораторні заняття	
Самостійна робота	
132 год.	
у тому числі індивідуальні завдання	

1.6. Заплановані результати навчання.

Студенти мають досягти таких результатів навчання:

ПРН 1. Використовувати знання в галузі прикладної фізики, математики, електроніки та інформаційних технологій для виконання наукових досліджень та розв'язання виробничих задач.

ПРН 2. Знаходити та аналізувати наукову та науково-технічну інформацію в галузі прикладної фізики та наноматеріалів із вітчизняних та зарубіжних джерел, в тому числі з використанням сучасних пошукових систем.

ПРН 3. Обговорювати та знаходити прогресивні та інноваційні рішення проблем і завдань при виконанні науково-технічних та виробничих проектів.

ПРН 5. Ефективно працювати як індивідуально, так і в складі команди, оцінювати та забезпечувати якість виконуваних робіт у галузі прикладної фізики та наноматеріалів.

ПРН 6. Коректно формулювати професійні висновки, апробувати їх та доносити до аудиторії різного фахового рівня, використовуючи сучасні методики наукової та технічної комунікації українською та іноземними мовами.

ПРН 7. Володіти теоретичними основами матеріалознавства та відповідних розділів фізики твердого тіла, необхідних для розробки перспективних конструкційних матеріалів нетрадиційної енергетики та технологій їх створення.

ПРН 9. Знати основи та перспективи розвитку нетрадиційної енергетики.

ПРН 10. Вміти проаналізувати та оцінити можливості нетрадиційної енергетики порівняно з традиційними джерелами енергії.

2. Тематичний план навчальної дисципліни

Розділ 1. Фізичні основи нанoeлектроніки

Тема 1. Дифузний і балістичний транспорт

1.1 Зміна парадигми: Загальна модель транзистора. Транспорт в нанорозмірних структурах. Балістичний та дифузний транспорт. Закон Ома та балістичний провідник.

1.2 Дві ключові концепції: Концепція щільності станів. Експериментальні техніки визначення щільності станів. Концепція електро-хімічного потенціалу. Функція Фермі.

1.3 Рівновага, функція Фермі і електро-хімічний потенціал. Струм електронів. Наближення малої напруги. Функція провідності.

1.4 Узагальнений закон Ома: Функція провідності для балістичного і дифузного транспорту. Закон Ома для дифузних електронів. Узагальнення закону Ома на балістичні провідники.

1.5 Дифузний та балістичний провідності: Функція провідності великих (дифузних) провідників. Формула Друде. Функція провідності нанорозмірних (балістичних) провідників.

1.6 Контактний опір: Струм електронів і джоулево тепло. Опір балістичного провідника. Модель упругого резистора. Контактний опір.

Тема 2. Квант провідності

2.1 Дві концепції: $N(E)$, $D(E)$: Проста модель для щільності станів. Концепція $N(E)$ – кількості станів з енергією, що не перевищує задану E . Концепція $D(E)$ – щільності станів.

2.2 Довжина хвилі Де Бройля: Хвильова природа електрона і квантування імпульса. Підрахунок кількості станів. Аналогія з механічною струною.

2.3 Формули провідності: Порівняння точної формули для питомої провідності з формулою Друде: у яких випадках і чому формула Друде добре працює.

2.4 Графен: Графен як двовимірний провідник. Рухливість електрона. Питома провідність електрона в графені. Фактор виродження в графені.

2.5 Концепція числа мод, $M(E)$: Балістична провідність – загальна формула. Балістична провідність і число мод. Фізичний зміст концепції числа мод.

2.6 Квантування провідності: Квант провідності. Експериментальні свідчення квантування провідності. Чому квантування провідності неможливо спостерігати у великих провідниках.

Тема 3. Нанотранзистор за межами лінійного відгуку

3.1 Чому струм насичується: Модель нанотранзистора. Вольт-амперна характеристика нанотранзистора. Чому струм насичується? Позитивний зворотній зв'язок в нанотранзисторі.

3.2 Роль електростатики: Потенціальна енергія каналу. Електростатичний вплив контактів на енергію каналу. Модифіковане рівняння струму електронів.

3.3 Самоузгоджена модель: Електростатичний вплив у каналі. Одноелектронна енергія зарядки. Самоузгоджена модель розрахунку струму електронів в транзисторі.

3.4 Розширена модель каналу: Диференційна модель транзистора з довгим каналом. Квазі-фермієвські рівні. Питома провідність в розширеній моделі каналу. Роль електростатики: дрейф та дифузія.

3.5 Нові граничні умови: Закон Ома в розширеній моделі каналу. Моделювання контактного опору накладанням граничних умов на рівняння для струму електронів. Балістичний і дифузний транспорт у розширеній моделі каналу.

3.6 Рівняння Больцмана: Виведення лівої частини рівняння Больцмана із рівнянь Ньютона. Рівняння Больцмана як область перетину класичної механіки і термодинаміки.

Розділ 2. Новітні технології для “зеленого” світу

Тема 4. Спінтроніка і магноніка

4.1 Спіновий клапан: Транзистор із магнітними контактами. Залежність опору транзистора від намагніченості контактів. Модель Джульєра. Поляризація і магнітоопір.

4.2 Рівняння Валета-Фера: Квазіфермієвські рівні всередині каналу. Основні рівняння для струму електронів. Процеси спінового перегортання всередині каналу. Врахування процесів спінового перевороту в рівнянні для струму електронів. Довжина спінового перегортання. Рівняння Валета-Фера.

4.3 Спінові потенціали: Дифузія електронів з урахуванням спіну. Повний і спіновий струм. Нелокальні спінові потенціали. Експерименти з вимірювання спінових потенціалів.

4.4 Спіни і магніти: Який зв'язок між опором транзистора і орієнтацією його магнітних контактів? Експеримент Штерна-Герлаха і магнітні властивості електрона. Магнетизм атомів. Наномагніти.

4.5 Спіновий струм і магنونіка: Ефект перегортання вектору намагніченості. Використання спінового струму для запису інформації. Властивості магніту і гістерезис. Динаміка вектора магніченості. Рівняння Ландау-Ліфшица-Гілберта.

4.6 Електрони і магніти: Концептуальні проблеми спінової магنونіки. Перевертання вектора намагніченості: аналогія з поляризацією світла. Ефект Ханле. Ідея спінового транзистора. Концепція кубіта.

Тема 5. Термоелектрика

5.1 Струм, що викликаний температурою: Функція Фермі як функція температури. Струм, що викликаний температурою: фізична картина. Напівпровідники n-типу і p-типу: температурний метод визначення. Використання різниці температур контактів для заряджання батареї.

5.2 Коефіцієнт Зеебека: Формула провідності для струму, що викликаний температурою. Коефіцієнт Зеебека.

5.3 Потік тепла: Ефект Пельтьє. Потік тепла і ще дві функції провідності. Коефіцієнт Пельтьє. Зв'язок між коефіцієнтами Пельтьє і Зеебека.

5.4 Однорівневі пристрої: Коефіцієнти Зеебека для однорівневого пристрою. Коефіцієнт Пельтьє. Коефіцієнт G_K . Параметр ZT як міра придатності термоелектрика для технологічного використання. Фононий внесок у перенесення тепла.

5.5 Потік тепла, що викликаний фононами: Потік тепла, що переноситься фононами. Режим лінійного відгуку. Питома теплоємність. Функція розподіла Бозе-Ейнштейна. Проблема ZT .

5.6 Концепція “знизу-вгору”: Педагогічні переваги і недоліки концепції “знизу-вгору” для розуміння фізики нанорозмірних електронних пристроїв. Нове розуміння старої концепції струму електронів.

Тема 6. Фундаментальні обмеження

6.1 Другий початок термодинаміки: Процеси, керовані ентропією. Другий закон термодинаміки. Система у великому канонічному ансамблі.

6.2 Ентропія: Система із двох станів у контакті з резервуаром. Ентропія Больцмана. Принцип максимуму ентропії. Вільна енергія.

6.3 Рівновага: Система двох станів у канонічному ансамблі. Довільна квантова система. Середнє число заповнення.

6.4 Ентропія Шеннона: Виведення формули Гіббса для ентропії. Ентропія Шеннона та інформація. Використання ентропії для виконання роботи.

6.5 Цінність інформації як палива: як можна використовувати зміну ентропії системи для вилучення енергії.

6.6 Інфо-батареї: Ідея пристрою, що отримує енергію від “спалювання” ентропії і перетворює її на корисну роботу.

3. Структура навчальної дисципліни

Назви розділів і тем	Кількість годин											
	денна форма						заочна форма					
	усь ого	у тому числі					усь ого	у тому числі				
		л	п	ла б.	інд .	с. р.		л	п	ла б.	інд .	с. р.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Розділ 1. Фізичні основи нанoeлектроніки												
Тема 1. Дифузний і балістичний транспорт	35	6	4			25						
Тема 2. Квант провідності	35	6	4			25						
Тема 3. Нанотранзистор за межами лінійного відгуку	28	6	2			20						
Разом за розділом 1	98	18	10			70						
Розділ 2. Новітні технології для “зеленого світу”												
Тема 4. Спінтроніка і магноніка	32	6	2			24						
Тема 5. Термоелектрика	27	6	2			19						
Тема 6. Фундаментальні обмеження	23	2	2			19						
Разом за розділом 2	82	14	6			62						
Усього годин	180	32	16			132						

4. Теми практичних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Дифузний і балістичний транспорт	4
2	Квант провідності	4
3	Нанотранзистор за межами лінійного відгуку	2
4	Спінтроніка і магноніка	2
5	Термоелектрика	2
6	Фундаментальні обмеження	2
	Разом	16

5. Завдання для самостійної роботи

№ з/п	Види, зміст самостійної роботи	Кількість годин
1	Опрацювати тему “Дифузний і балістичний транспорт”	25
2	Опрацювати тему “Квант провідності”	25
3	Опрацювати тему “Нанотранзистор за межами лінійного відгуку”	20
4	Опрацювати тему “Спінтроніка і магноніка”	24
5	Опрацювати тему “Термоелектрика”	19
6	Опрацювати тему “Фундаментальні обмеження”	19
	Разом	132

6. Індивідуальні завдання

Індивідуальні завдання включають реферати за тематикою курсу:

1. Квантовий комп'ютер: фізичні засади і перспективи використання.
2. Тунельний мікроскоп як інструмент нанотехнологій.
3. Молекулярно – променева епітаксія в нанотехнологіях.
4. OLED - органічний світлодіод. Фізичні принципи роботи.
5. Магніторезистивна оперативна пам'ять: фізичні принципи.
6. Гігантський магнетоопір і прорив у комп'ютерних технологіях.
7. Одноелектронні пристрої та їх використання в сучасних технологіях.
8. Вуглецеві нанотрубки і графен для редагування даних.
9. Електронна бумага: фізичні принципи технології та її обмеження.
10. Використання нанотехнологій у термоелектричній енергетиці.

Рекомендований обсяг роботи – 10 стор. машинописного тексту. До обсягу роботи включаються сторінки від титульного аркуша до останньої сторінки висновків. Список джерел і літератури, додатки до цього обсягу не включаються, але підлягають загальній нумерації. Мова – українська. Роботу набирають на комп'ютері з одного боку аркуша білого паперу формату А4 через 1,5 інтервалу (28–30 рядків на сторінці) 14-м кеглем шрифту Times New Roman. Текст друкують, залишаючи поля таких розмірів: ліве – 30 мм, праве – 10 мм, верхнє – 20 мм, нижнє – 20 мм. Заголовки структурних частин "ЗМІСТ", "ВСТУП", "РОЗДІЛ", "ВИСНОВКИ", "СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ" друкують великими літерами.

Загальні вимоги до цитування:

- а) текст цитати починається і закінчується лапками, наводиться саме так, як він поданий у джерелі, зі збереженням особливостей авторського написання;
- б) цитування повинно бути повним, без довільного скорочення авторського тексту і без перекручень думок автора. Пропуск слів, речень, абзаців допускається без зміни авторського тексту і позначається трьома крапками. Вони ставляться у будь-якому місці цитати (на початку, всередині, в кінці). Якщо перед пропущеним текстом або за ним стояв розділовий знак, то він не зберігається;
- в) кожна цитата обов'язково супроводжується посиланням на джерело;
- г) під час непрямого цитування (переказ, виклад думок інших авторів своїми словами) слід бути максимально точним у викладі думок автора, коректним щодо оцінювання його результатів, робити відповідні посилання на джерело;
- д) цитування не повинно бути надмірним, бо це створює враження компілятивності праці.

7. Методи навчання

Лекційні заняття проводяться методом лекції та розповіді-дискусії і передбачають можливість використання електронних засобів навчання (презентації або відеозв'язок в системі Zoom). Практичні заняття проводяться методами обговорення теоретичних положень курсу та розв'язання задач, що пояснюють та доповнюють лекційний матеріал. Основною метою практичних занять є закріплення теоретичного матеріалу для забезпечення розуміння фізичних і технологічних принципів новітніх пристроїв нанофізики та перспектив їх застосування в енергетичній галузі.

8. Методи контролю

1. Експрес-контроль (загальний ваговий бал - 20) проводиться з метою перевірки якості роботи студента на практичних заняттях в аудиторії. Він може бути як усним, так і письмовим. Тривалість експрес-контролю 5-10 хвилин. Кожен експрес-контроль включає 1 питання. За кожну правильну відповідь студент отримує 2 бали, за частково правильну – 1 бал. Відсутність студента на занятті або невиконання експрес-контролю приносить студенту 0 балів.

2. Робота на практичних заняттях (загальний ваговий бал - 10) проводиться з метою опанування студентом математичних методів і передбачає розв'язання задач у дошки. За кожну правильну відповідь студент отримує 2 бали, за частково правильну – 1 бал. Відсутність студента на занятті або невиконання експрес-контролю приносить студенту 0 балів.

3. Поточний контроль (загальний ваговий бал - 15) проводиться у вигляді контрольної роботи тривалістю 2 академічні години. КР складається із одного теоретичного питання, що оцінюється в 10 балів, та однієї задачі, що оцінюється у 5 балів. Максимальна кількість балів - 15.

Критерії оцінювання відповідей на теоретичні питання:

- (а) студент міцно засвоїв теоретичний матеріал, глибоко і всебічно знає зміст навчальної дисципліни, логічно мислить і будує відповідь, висловлює своє ставлення до тих чи інших проблем – 10 балів;
- (b) студент добре засвоїв теоретичний матеріал, аргументовано викладає його, але припускається певних неточностей і похибок у логіці викладу теоретичного змісту – 8 балів;
- (c) студент переважно опанував теоретичними знаннями навчальної дисципліни, але непереконливо відповідає, плутає поняття, додаткові питання викликають невпевненість або відсутність стабільних знань – 6 балів;
- (d) студент демонструє лише часткове знайомство з теоретичними знаннями навчальної дисципліни, непереконливо відповідає, плутає поняття, додаткові питання викликають невпевненість або відсутність стабільних знань – 4 бали;
- (e) студент майже не опанував навчальний матеріал дисципліни, не знає наукових фактів, визначень, відсутнє наукове мислення, практичні навички майже не сформовані – 2 бали;
- (f) знання як з теоретичної, так і з практичної підготовки за даним завданням виявити не вдається, або відповідь взагалі відсутня – 0 балів.

Критерії оцінювання розв'язання задач:

- (а) правильно і повністю виконане завдання оцінюється у 5 балів;
- (b) завдання, виконане з несуттєвими помилками, оцінюється у 4 бали;
- (c) завдання, виконане частково, але без помилок, оцінюється у 3 бали;
- (d) неправильне виконання завдання (грубі помилки в розрахунках, але правильно обрана логіка рішення) оцінюється у 2 бали;
- (e) завдання з відсутніми розрахунками, але правильно обраною логікою рішення, оцінюється в 1 бал;
- (f) відсутнє виконання завдання оцінюється в 0 балів.

Якщо студент отримав оцінку менше 5 балів за КР, він зобов'язаний переписати цю роботу, але не більше одного разу.

4. Реферат оцінюється у 15 балів. Частково виконаний - до 10 балів.

5. Екзаменаційна робота (ваговий бал - 40). Необхідною умовою допуску студента до екзамену з дисципліни є позитивний рейтинг з контрольної роботи та наявність реферату, загалом не менше 10 балів. Екзаменаційний білет містить два теоретичних питання і одну задачу.

Критерії оцінювання відповідей на теоретичні питання:

- (а) студент міцно засвоїв теоретичний матеріал, глибоко і всебічно знає зміст навчальної дисципліни, логічно мислить і будує відповідь, висловлює своє ставлення до тих чи інших проблем – 15 балів;
- (б) студент добре засвоїв теоретичний матеріал, аргументовано викладає його, але припускається певних неточностей і похибок у логіці викладу теоретичного змісту – 12 балів;
- (с) студент переважно опанував теоретичними знаннями навчальної дисципліни, але непереконливо відповідає, плутає поняття, додаткові питання викликають невпевненість або відсутність стабільних знань – 9 балів;
- (д) студент демонструє лише часткове знайомство з теоретичними знаннями навчальної дисципліни, непереконливо відповідає, плутає поняття, додаткові питання викликають невпевненість або відсутність стабільних знань – 6 балів;
- (е) студент майже не опанував навчальний матеріал дисципліни, не знає наукових фактів, визначень, відсутнє наукове мислення, практичні навички майже не сформовані – 3 бали;
- (ф) знання як з теоретичної, так і з практичної підготовки за даним завданням виявити не вдається, або відповідь взагалі відсутня – 0 балів.

Критерії оцінювання розв'язання задач:

- (а) правильно і повністю виконане завдання оцінюється у 10 балів;
- (б) завдання, виконане з несуттєвими помилками, оцінюється у 8 балів;
- (с) завдання, виконане частково, але без помилок, оцінюється у 6 балів;
- (д) неправильне виконання завдання (грубі помилки в розрахунках, але правильно обрана логіка рішення) оцінюється у 4 бали;
- (е) завдання з відсутніми розрахунками, але правильно обраною логікою рішення, оцінюється в 2 бали;
- (ф) відсутнє виконання завдання оцінюється в 0 балів.

За бажанням студента можуть нараховуватися до 10-ти заохочувальних балів за коментар підсумкової роботи в усній формі та відповіді на додаткові запитання, але загальний бал за екзаменаційну роботу не може перевищувати 40 балів.

9. Схема нарахування балів

Поточний контроль, самостійна робота, контрольні роботи					Іспит робота	Сума
Розділ 1	Розділ 2	Контрольна робота	Реферат	Разом		
T1-T3	T4-T6					
15	15	15	15	60	40	100

Передбачаються бали за:

- відповіді на теоретичні питання – 60;
- розв'язання задач – 25;
- реферат – 15.

Критерії оцінювання навчальних досягнень

Шкала оцінювання

Сума балів за всі види навчальної діяльності протягом семестру	Оцінка
	для дворівневої шкали оцінювання
90 – 100	зараховано
70-89	
50-69	
1-49	не зараховано

10. Рекомендована література

Основна література

1. S. Datta. Lessons from Nanoelectronics: A New Perspective on Transport. World Scientific, 2012.
2. Adrian P. Sutton. Electronic Structure of Materials. Oxford University Press, 1993.
3. R. Waser (ed.). Nanoelectronics and Information Technology. Wiley-VCH, 2012.

Допоміжна література

4. 40th IFF Springschool 2009. Spintronics. From GMR to Quantum Information. Lecture Notes. Jülich Forschungszentrum.
5. S. Datta. Electronic Transport in Mesoscopic Systems. Cambridge University Press, 1997.
6. S. Datta. Quantum Transport: Atom to Transistor. Cambridge University Press, 2005.

Додаток до робочої програми навчальної дисципліни
Нанофізика та наноматеріали
(назва дисципліни)

Заступник директора ННІ комп'ютерної фізики та енергетики з навчальної роботи

(підпис) Ольга ЛІСІНА
(прізвище, ініціали)

« ____ » _____ 20 ____ р.

Голова методичної комісії ННІ комп'ютерної фізики та енергетики

(підпис) Ірина ГАРЯЧЕВСЬКА
(прізвище, ініціали)

« ____ » _____ 20 ____ р.