

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича
(повне найменування вищого навчального закладу)
Навчально-науковий інститут фізико-технічних та комп'ютерних наук
(назва факультету / інституту)
Кафедра термоелектрики та медичної фізики

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Директор навчально-наукового інституту
фізико-технічних та комп'ютерних наук

_____ Олег АНГЕЛЬСЬКИЙ

“09” серпня 2024 року

РОБОЧА ПРОГРАМА
навчальної дисципліни
Квантова фізика наносистем
(назва навчальної дисципліни)
обов'язкова дисципліна
(вказати: обов'язкова)

Освітньо-наукова програма Прикладна фізика та наноматеріали
(назва програми)

Спеціальність Е6 «Прикладна фізика та наноматеріали»
(вказати: код, назва)

Галузь знань 10 «Природничі науки»
(вказати: шифр, назва)

Рівень вищої освіти: Третій (аспірантський)

Навчально-науковий інститут фізико-технічних та комп'ютерних наук
(назва факультету/інституту, на якому здійснюється підготовка фахівців за вказаною освітньо-професійною програмою)

Мова навчання: українська

Чернівці 2025

Робоча програма навчальної дисципліни

Квантова фізика наносистем

(назва навчальної дисципліни)

складена відповідно до освітньо-наукової програми «Прикладна фізика та наноматеріали» спеціальності Е6 «Прикладна фізика та наноматеріали» галузі знань: 10 «Природничі науки», затвердженої Вченою радою Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича (прот. № 5 від 29.05.2023)

(назва освітньої програми, код та назва спеціальності, галузь знань: шифр та назва)

Розробник:

Маханець О.М. доктор фізико-математичних наук,

проф. каф. термоелектрики та медичної фізики

(вказати авторів, їхні посади, наукові ступені, вчені звання)

Викладач:

Маханець О.М. доктор фізико-математичних наук,

проф. каф. термоелектрики та медичної фізики

Робоча програма погоджена з гарантом ОНП та затверджена на засіданні кафедри термоелектрики та медичної фізики ННІФТКН ЧНУ імені Юрія Федьковича
Протокол № від 2025 року

Завідувач кафедри _____ Кобилянський Р.Р.

Схвалено методичною радою ННІФТКН
Протокол № від 2025 року

Голова методичної ради ННІФТКН _____ Козярський І.П.

Пояснювальна записка

Мета навчальної дисципліни

Розкриття змісту та методів квантової теорії поля для вивчення спектрів та взаємодії квазічастинок між собою, з домішками і зовнішніми полями у наногетероструктурах різної симетрії.

Пререквізити. Для успішного вивчення дисципліни "Квантова фізика наносистем" студенти повинні опанувати такі курси: Математичний аналіз, Аналітична геометрія та лінійна алгебра, Теорія ймовірності і математична статистика, Основи векторного і тензорного аналізу, Диференціальні та інтегральні рівняння, Методи математичної фізики, Теоретична механіка, Електродинаміка, Квантова механіка, Статистична фізика.

Завдання вивчення навчальної дисципліни:

- Засвоєння фундаментальних законів поведінки квазічастинок у наноструктурах пониженої розмірності.
- Навчити студентів самостійно виконувати розрахунки спектрів квазічастинок у найпростіших наноструктурах.
- Студенти повинні засвоїти основні методи квантової механіки та вміти застосовувати їх до теоретичного дослідження наноструктур.
- Опрацювання теоретичних методів дослідження властивостей квазічастинок, що взаємодіють між собою, домішками та зовнішніми електричним та магнітним полями у напівпровідникових наноструктурах.

1. Результати навчання

Відповідно до освітньо-наукової програми «Прикладна фізика та наноматеріали», вивчення дисципліни «Квантова фізика наносистем» сприяє формуванню у здобувачів третього (аспірантського) рівня вищої освіти таких *компетентностей*:

Інтегральна компетентність:

ІК. Здатність розв'язувати комплексні проблеми в галузі професійної та/або дослідницько-інноваційної діяльності, що передбачає глибоке переосмислення наявних та створення нових цілісних знань та/або професійної практики

Загальних:

ЗК1. Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу.

ЗК6. Здатність використання новітніх інформаційних і комунікаційних технологій, спеціалізованого програмного забезпечення у науковій та навчальній діяльності.

ЗК8. Здатність працювати автономно, ініціювати, організовувати та проводити комплексні теоретичні та експериментальні дослідження.

ЗК10. Здатність виявляти, ставити й вирішувати проблеми та проводити дослідження на відповідному рівні, планувати й прогнозувати результати.

Фахових:

ФК1. Дослідницькі здатності та компетентність виконувати оригінальні дослідження у вибраній області прикладної фізики та досягати наукових результатів, які створюють нові знання, із звертанням особливої уваги до актуальних задач та використанням новітніх наукових методів.

ФК4. Технологічні здатності. Компетентність у використанні наукового обладнання та технологій, методів обчислень, що відносяться до вибраної області дослідження.

ФК5. Компетентність аналізувати методологічні проблеми, що виникають при вирішенні дослідницьких і практичних завдань, в тому числі в міждисциплінарних областях.

ФК6. Компетентність створення та налаштування комп'ютерних програм за власноруч розробленими алгоритмами.

ФК7. Здатність вирізняти із накопичених спостережень відтворювані експериментальні факти.

ФК9. Здатність до продукування нових ідей і розв'язання комплексних проблем у вибраній області фізичних досліджень.

ФК10. Здатність організовувати навчальний процес та проводити заняття з фізико-технічних дисциплін у вищих навчальних закладах.

ФК11. Здатність застосовувати знання теорій опису фізичних властивостей низькорозмірних систем різних типів.

ФК12. Здатність створювати та порівнювати між собою фізичні та математичні моделі фізичних об'єктів, процесів та явищ

Програмних результатів навчання:

ПРН1. Здатність аналізувати та обговорювати наукові публікації в межах власної дослідницької проблематики та поза нею.

ПРН2. Здатність здійснити завершене оригінальне дослідження, що ґрунтується на використанні сучасних методів науки.

ПРН3. Уміти сприймати і оцінювати іншомовні наукові тексти з фізики з наукових джерел, що містять новітню фахову інформацію, здійснювати письмовий та анотаційний переклад текстів з фізики.

ПРН4. Здатність розробляти та аргументовано презентувати результати дослідження в науковому і науково-популярному контекстах, усно та письмово, у формі наукових семінарів, конференцій.

ПРН8. Уміти розробляти та досліджувати фізичні, математичні і комп'ютерні моделі процесів і систем, ефективно використовувати їх для отримання нових знань та/або створення інноваційних продуктів у прикладній фізиці та дотичних міждисциплінарних напрямках.

ПРН9. Планувати і виконувати експериментальні та/або теоретичні дослідження з прикладної фізики та дотичних міждисциплінарних напрямків з використанням сучасних наукових методів, критично аналізувати результати власних досліджень і результати інших дослідників у контексті усього комплексу сучасних знань щодо досліджуваної проблеми.

ПРН10. Розробляти та реалізовувати наукові проекти, які дають можливість переосмислити наявне та створити нове цілісне знання і розв'язувати значущі наукові проблеми фізики з дотриманням академічної доброчесності та основ запобігання корупції на рівні, необхідному для формування нетерпимості до корупції та проявів недоброчесної поведінки серед здобувачів освіти.

ПРН11. либоко розуміти загальні принципи і методи природничих наук, а також методологію наукових досліджень, застосувати їх у власних дослідженнях у сфері фізики та у викладацькій діяльності.

Отримані знання та навички дадуть змогу студентам аналізувати та моделювати поведінку квазічастинок у різноманітних напівпровідникових наноструктурах, розв'язувати задачі зі знаходження спектрів та хвильових функцій квазічастинок у найпростіших наноструктурах.

У результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен

знати:

Основні поняття і концепції квантової механіки щодо теоретичного дослідження наноструктур.

Методи теоретичного дослідження спектрів квазічастинок у найпростіших наносистемах: тонка плівка, сферична квантова точка, циліндричний квантовий дріт.

Методи теоретичного дослідження спектрів квазічастинок у складних напівпровідникових наносистемах: багатошарові тонка плівка, сферична квантова точка, циліндрична нанотрубка.

Методи теоретичного дослідження спектрів квазічастинок, що взаємодіють з домішкою у багатошарових сферичних квантових точках та циліндричних нанотрубках.

Методи теоретичного дослідження спектрів квазічастинок, що взаємодіють з електричним та магнітним полями у циліндричних нанотрубках та нанокільцях.

уміти:

Складати стаціонарні рівняння Шредінгера для квазічастинок та розв'язувати їх у різних системах координат.

Використовувати наближені методи розв'язування рівняння Шредінгера у залежності від досліджуваної фізичної проблеми.

Аналізувати розраховані залежності спектральних параметрів квазічастинок від геометричних параметрів наносистем.

Аналізувати розраховані залежності спектральних параметрів квазічастинок від положення домішки та напруженостей електричного та магнітного полів у наносистемах різної симетрії.

**Опис змісту робочої програми навчальної дисципліни
Загальна інформація про розподіл годин**

Назва навчальної дисципліни Квантова фізика наносистем													
Форма навчання	Курс	Семестр	Кількість			Кількість годин						Вид підсумкового контролю	
			кредитів	годин	змістових модулів	лекції	практичні	семінарські	лабораторні	самостійна робота	індивідуальні завдання		
Денна	1	2	4	120	2	20	20				80		екзамен

Структура змісту навчальної дисципліни

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин					
	усього	у тому числі				
		л	п	лаб	інд	с.р.
1	2	3	4	5	6	7
Змістовий модуль 1	Енергетичні спектри та взаємодія квазічастинок між собою та домішкою у наноструктурах різної симетрії					
Тема 1. Спектри електронів і дірок у найпростіших наносистемах (проста тонка плівка, сферична квантова точка, циліндричний квантовий дріт).	14	2	2			10
Тема 2. Енергетичний спектр та хвильові функції електрона дірки та екситона у багатошарових тонкій плівці та сферичній квантовій точці.	16	3	3			10
Тема 3. Енергетичний спектр та хвильові функції електрона дірки та екситона у багатошаровій циліндричній нанотрубці.	18	3	3			12
Тема 4. Спектр електрона, що взаємодіє з донорною домішкою у багатошарових сферичних квантових точках та циліндричних нанотрубках.	18	3	3			12
Разом за ЗМ 1	66	11	11			44
Змістовий модуль 2	Вплив магнітного та електричного полів на енергетичні спектри квазічастинок у напівпровідникових нанотрубках та нанокільцях					
Тема 5. Вплив магнітного поля на енергетичний спектр електрона у багатошаровій циліндричній нанотрубці.	26	3	3			12
Тема 6. Вплив магнітного поля на енергетичний спектр електрона у подвійних напівпровідникових нанокільцях.	24	3	3			12
Тема 7. Вплив електричного поля на енергетичний спектр електрона у подвійних напівпровідникових нанокільцях.	18	3	3			12
Разом за ЗМ 2	54	9	9			36

Усього годин	120	20	20			80
--------------	-----	----	----	--	--	----

Тематика лекційних занять з переліком питань

Змістовий модуль 1. Енергетичні спектри та взаємодія квазічастинок між собою та домішкою у наноструктурах різної симетрії.

Тема 1. Спектри електронів і дірок у найпростіших наносистемах (проста тонка плівка, сферична квантова точка, циліндричний квантовий дріт). Стационарне рівняння Шредингера. Функції Бесселя цілого та напівцілого порядків. Наближення безмежно-глибокої потенціальної ями. Потенціальна яма скінченної глибини. Типові залежності енергетичних спектрів електрона (дірки) від геометричних параметрів найпростіших наносистем.

Тема 2. Енергетичний спектр та хвильові функції електрона дірки та екситона у багат шарових тонкій плівці та сферичній квантовій точці. Гамільтоніан електрона (дірки) у сферичній системі координат. Хвильові функції. Граничні умови. Дисперсійне рівняння. Гамільтоніан екситона. Теорія збурень. Енергія зв'язку. Залежності енергетичних спектрів електрона, дірки, енергії зв'язку та енергії екситонного збудження від геометричних параметрів багат шарових тонких плівок та сферичних квантових точках на основі напівпровідників CdS/HgS. Порівняння з експериментом.

Тема 3. Енергетичний спектр та хвильові функції електрона дірки та екситона у багат шаровій циліндричній нанотрубці. Гамільтоніан електрона (дірки) у циліндричній системі координат. Хвильові функції. Граничні умови. Дисперсійне рівняння. Гамільтоніан екситона. Модифікований варіаційний метод Бете. Функціонал енергії екситона. Енергія зв'язку. Залежності енергетичних спектрів електрона, дірки, енергії зв'язку та енергії екситонного збудження від геометричних параметрів багат шарових нанотрубок на основі напівпровідників GaAs/AlAs.

Тема 4. Спектр електрона, що взаємодіє з донорною домішкою у багат шарових сферичних квантових точках та циліндричних нанотрубках. Гамільтоніани електрона, що взаємодіє з донорною домішкою у сферичній та циліндричній системах координат. Конфлюентні гіпергеометричні функції. Модифікований варіаційний метод Бете у циліндричних нанотрубках. Залежності енергетичних спектрів електрона, енергії зв'язку електрона з домішкою від геометричних параметрів багат шарових сферичних квантових точок та циліндричних нанотрубок на основі напівпровідників GaAs/AlAs.

Змістовий модуль 2. Вплив магнітного та електричного полів на енергетичні спектри квазічастинок у напівпровідникових нанотрубках та нанокільцях.

Тема 5. Вплив магнітного поля на енергетичний спектр електрона у багат шаровій циліндричній нанотрубці. Гамільтоніан електрона у багат шаровій циліндричній нанотрубці в магнітному полі. Симетрична калібровка. Конфлюентні гіпергеометричні функції. Граничні умови. Дисперсійне рівняння. Залежності енергетичних спектрів електрона від величини індукції магнітного поля та геометричних параметрів багат шарової циліндричної нанотрубки на основі напівпровідників GaAs/AlAs. Рівні Ландау.

Тема 6. Вплив магнітного поля на енергетичний спектр електрона у подвійних напівпровідникових нанокільцях. Гамільтоніан електрона у подвійних напівпровідникових нанокільцях у магнітному полі. Симетрична калібровка. Конфлюентні гіпергеометричні функції. Граничні умови. Дисперсійне рівняння. Залежності енергетичних спектрів та сил осциляторів внутрішньозонних квантових переходів електрона від величини індукції магнітного поля та геометричних параметрів подвійних напівпровідникових нанокільців на основі напівпровідників GaAs/AlAs. Ефект Ааронова-Бома.

Тема 7. Вплив електричного поля на енергетичний спектр електрона у подвійних напівпровідникових нанокільцях. Гамільтоніан електрона у подвійних напівпровідникових нанокільцях в електричному полі. Хвильові функції електрона у наносистемі без поля. Розклад хвильової функції електрона за повною системою циліндрично-симетричних функцій. Матричні елементи. Секулярне рівняння. Залежності енергетичних спектрів та сил осциляторів внутрішньозонних квантових переходів електрона від величини напруженості електричного поля у подвійних напівпровідникових нанокільців на основі напівпровідників GaAs/AlAs.

Тематика практичних занять з переліком питань

№	Назва теми (завдання)
1.	Побудова та аналіз графіків залежності енергетичного спектра електрона від геометричних параметрів простих наносистем на основі напівпровідників GaAs/AlAs.
2.	Побудова та аналіз графіків залежності енергетичного спектра електрона, дірки й екситона від геометричних параметрів багатошарових тонких плівок та сферичних квантових точках на основі напівпровідників CdS/HgS.
3.	Побудова та аналіз графіків залежності енергетичних спектрів електрона, дірки, енергії зв'язку та енергії екситонного збудження від геометричних параметрів багатошарових нанотрубок на основі напівпровідників GaAs/AlAs.
4.	Побудова та аналіз графіків залежності енергетичних спектрів електрона, енергії зв'язку електрона з домішкою від геометричних параметрів багатошарових сферичних квантових точок та циліндричних нанотрубок на основі напівпровідників GaAs/AlAs.
5.	Побудова та аналіз графіків залежності енергетичних спектрів електрона від величини індукції магнітного поля та геометричних параметрів багатошарової циліндричної нанотрубки на основі напівпровідників GaAs/AlAs.
6.	Побудова та аналіз графіків залежності енергетичних спектрів та сил осциляторів внутрішньозонних квантових переходів електрона від величини індукції магнітного поля та геометричних параметрів подвійних напівпровідникових нанокілець на основі напівпровідників GaAs/AlAs.
7.	Побудова та аналіз графіків залежності енергетичних спектрів та сил осциляторів внутрішньозонних квантових переходів електрона від величини напруженості електричного поля у подвійних напівпровідникових нанокілець на основі напівпровідників GaAs/AlAs.

Завдання для самостійної роботи студентів

№	Назва теми
1.	Енергетичний спектр та хвильові функції електрона у напівсферичних квантових точках.
2.	Енергетичний спектр та хвильові функції дірки у напівсферичних квантових точках.
3.	Енергетичний спектр та хвильові функції екситона у напівсферичних квантових точках.
4.	Вплив обмежених фононів на спектральні параметри електрона та дірки у наносистемах.
5.	Вплив інтерфейсних фононів на спектральні параметри електрона та дірки у наносистемах.

Контроль виконання завдань, винесених на самостійне опрацювання проводиться в рамках модульного контролю. Бали за цю роботу входять у загальну кількість балів за конкретний модуль.

Методи навчання

Методи навчання:

лекції: проблемний виклад, частково-пошукові та дослідницькі методи, презентації, бесіди і дискусії;

практичні заняття: репродуктивний метод, дослідницький метод;

лабораторні заняття: метод проблемного підходу, дослідницький метод.

Самостійна робота студентів передбачає: конспектування лекційного матеріалу; вивчення теоретичного матеріалу лекційних занять та опрацювання літературних джерел, рекомендованих цією програмою; проведення розрахунків та підготовку звітів з практичних та лабораторних робіт.

Інтерактивні методи навчання: застосуванням електронних мультимедійних комплексів навчальних дисциплін та ресурсів, а також платформи для дистанційного навчання Moodle (<https://moodle.chnu.edu.ua>).

Форми навчальних занять: лекції, лабораторні заняття, практичні заняття, консультації.

Система контролю та оцінювання

Методи контролю

У процесі оцінювання навчальних досягнень застосовуються методи усного і письмового контролю, зокрема такі **засоби оцінювання** та демонстрування результатів навчання:

- *засоби усного контролю:* індивідуальне опитування, фронтальне опитування, презентації

результатів виконаних завдань;

- *засоби письмового контролю*: контрольні роботи, тестування, самостійні роботи, виконання та захист лабораторних;

- *засоби самоконтролю*: уміння самостійно оцінювати свої знання, самоаналіз.

У разі проведення навчального процесу та оцінювання у дистанційній формі використовуються засоби Moodle (у тому числі тестування; <https://moodle.chnu.edu.ua> <https://www.classtime.com/>).

Система оцінювання знань є накопичувальною (складається із суми балів за різними видами здійсненого контролю).

Форми контролю

Основними формами поточного контролю є:

- усні відповіді студентів;
- виконання тестових завдань з метою перевірки рівня засвоєння теоретичного матеріалу за навчальними темами;
- усна відповідь студента при здачі лабораторної роботи;
- виконання модульної контрольної роботи (тестування та розв'язання навчально-професійних задач).

Зазначені форми контролю на лекційних, практичних та лабораторних заняттях є обов'язковими для всіх студентів.

Форма підсумкового контролю – екзамен.

Критерії оцінювання поточного та підсумкового контролю навчальних досягнень

Критерії оцінювання навчальних досягнень студентів за результатами поточного контролю

Критеріями оцінювання навчальних досягнень студентів за результатами поточного контролю є:

- Знання теоретичного матеріалу
- Практичні навички
- Самостійність і критичне мислення
- Якість виконання завдань
- Активність на заняттях
- Дотримання термінів виконання завдань
- Академічна доброчесність

Розподіл балів, які отримують студенти за модулі

Поточне оцінювання (аудиторна, самостійна робота та модульний контроль)		Кількість балів (екзамен)	Сумарна к-ть балів
Змістовий модуль №1	Змістовий модуль №2		
T1, T2, T3, T4	T5, T6, T7		
30	30	40	100

T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8 – теми змістових модулів.

Критерії підсумкового оцінювання результатів навчання студентів з навчальної дисципліни

Критерієм підсумкового оцінювання є досягнення студентом певних знань передбаченим результатом навчання, коли студент опанував теоретичними та практичними знаннями навчальної дисципліни.

На екзамен виносяться питання теоретичних знань і практичних навиків студентів з навчальної дисципліни. Екзаменаційні білети містять два теоретичних питання і одну практичну задачу.

Теоретичні питання (пункт 1 і 2 білетів) оцінюються максимальною кількістю балів рівною 15 за наступними критеріями:

- ◆ **13-15 балів:** коли студентом дані правильні вичерпні відповіді на всі поставлені запитання.
- ◆ **9-12 балів:** коли студентом дані правильні відповіді на всі поставлені запитання, але відповіді не зовсім повні, в окремих випадках допущені незначні неточності у формулюванні, окремі моменти не дістали належного з'ясування.
- ◆ **6-8 балів:** коли відповідь студента правильна і становить більше половини матеріалу, що містять питання згідно програми, але присутні істотні помилки.
- ◆ **0-5 балів:** коли не дано правильні відповіді на поставлені запитання, або відповіді надто поверхові, непослідовні і неточні.

Практичне завдання (пункт 3 білетів) оцінюються максимальною кількістю балів рівною 10 за наступними критеріями:

- ◆ **10 балів** – Завдання виконано повністю правильно, обґрунтовано, оформлено логічно й структуровано.
- ◆ **8-9 балів** – Загалом правильно, але є незначні неточності.
- ◆ **6-7 балів** – Основна ідея правильна, але є кілька помітних помилок.
- ◆ **4-5 балів** – Присутня спроба виконання завдання, але є серйозні.
- ◆ **2-3 бали** – Невірний підхід або значні помилки при виконанні завдання.
- ◆ **1 бал** – Слабка спроба виконання завдання без логічного пояснення.
- ◆ **0 балів** – Завдання не виконане і спроб виконання не було.

Шкала оцінювання: національна та ЄКТС

Рейтингова оцінка з дисципліни	Оцінка за шкалою ЄКТС	Екзаменаційна оцінка за національною шкалою	Залік за національною шкалою
90-100	A	5 (відмінно)	Зараховано
80-89	B	4 (добре)	
70-79	C	4 (добре)	
60-69	D	3 (задовільно)	
50-59	E	3 (задовільно)	
35-49	Fx	2 (незадовільно) з можливістю повторного складання	Не зараховано
1-34	F	2 (незадовільно) з повторним опрацюванням освітнього компонента	

Критерії підсумкової оцінки як показника результатів вивчення навчальної дисципліни

Згідно шкали ЄКТС загальна кількість балів, яку студент може отримати у процесі вивчення дисципліни, становить 100 балів, з яких 60 балів студент набирає при поточних видах контролю і 40 балів – у процесі підсумкового контролю (екзамен).

Таким чином знання студентів оцінюється як з теоретичної, так і з практичної підготовки за такими критеріями:

<p>«А» 90-100 балів ставиться у разі, якщо студент:</p>	<ul style="list-style-type: none"> – постійно готувався до занять згідно з програмою дисципліни; – глибоко та всебічно розкривав зміст питань; – показав уміння формулювати висновки, узагальнювати та аналізувати навчальний матеріал; – показав уміння вільно виконувати завдання; – переконливо та логічно викладав матеріал, проявляв творчий підхід до виконання практичних завдань та підготовки до лабораторних робіт; – належним чином виконував завдання для самостійної роботи; – виконав завдання модульного контролю або допускав при усних відповідях та тестуванні окремі незначні неточності.
<p>«В» 80-89 балів</p>	<ul style="list-style-type: none"> – розкривав згідно з програмою дисципліни зміст питань; – робив узагальнення та висновки з окремих питань;

ставиться у разі, якщо студент:	<ul style="list-style-type: none"> – виконав усі лабораторні роботи; – виконував завдання для самостійної роботи; – виконав завдання модульного контролю, але недостатньо використовував додаткову літературу; – при усних відповідях не досить повно і аргументовано викладав матеріал, а при тестуванні мали місце окремі неточності; – не проявив творчий підхід до виконання індивідуальних завдань та наукових повідомлень.
«С» 70-79 балів ставиться у разі, якщо студент:	<ul style="list-style-type: none"> – розкривав згідно з програмою дисципліни зміст питань; – формулював висновки з окремих питань практичних занять; – брав участь у виконанні практичних завдань; – виконував завдання для самостійної роботи; – виконав завдання модульного контролю, але допускав окремі неточності при усних відповідях, тестуванні; – не проявляв належної активності на лекційних та лабораторних заняттях, недостатньо використовував додаткову літературу; неохайно виконував завдання лабораторних робіт.
«D» 60-69 ставиться у разі, якщо студент:	<ul style="list-style-type: none"> – відповідав на окремі питання, які обговорювалися; – формулював висновки з окремих питань; – виконував завдання для самостійної роботи; – виконав завдання модульного контролю, але допускав окремі неточності; – не проявляв належної активності на лабораторних заняттях та старанності при виконанні завдань для самостійної роботи; – недостатньо використовував додаткову літературу, не належним чином виконав практичні завдання; – виконав не всі завдання для самостійної роботи
«E» 50-59 балів ставиться у разі, якщо студент:	<ul style="list-style-type: none"> – відповідав на окремі питання, які обговорювалися; – виконував окремі завдання для самостійної роботи; – виконав завдання модульного контролю, але допускав неточності при усних відповідях (будуючи свою відповідь на звичайному повторенні навчального матеріалу без його осмислення), тестуванні; – не проявляв належної активності на практичних заняттях, старанності при виконанні завдань для самостійної роботи; – недостатньо використовував основну та додаткову літературу; – не належним чином виконував індивідуальні завдання.
«Fх» 35-49 балів ставиться у разі, якщо студент:	<ul style="list-style-type: none"> – поверхнево розкривав зміст питань, які розглядалися; – допускав суттєві помилки при усних та письмових відповідях; – поверхнево ознайомився з рекомендованою літературою; – частково виконав завдання для самостійної роботи; – не проявляв активності на практичних заняттях; – допускав принципові помилки під час виконання завдань; – не виконав завдання модульного контролю.
«F» 1-34 балів ставиться у разі, якщо студент:	<ul style="list-style-type: none"> – поверхнево розкривав зміст питань, які розглядалися; – допускав суттєві помилки при усних та письмових відповідях; – поверхнево ознайомився з рекомендованою літературою; – не виконав завдання для самостійної роботи; – не виконав практичне завдання; – на підсумковому занятті не вмів відтворити зміст окремих питань, передбачених програмою дисципліни; – не виконав завдання модульного контролю.

Питання для поточного контролю

Змістовний модуль 1-2.

- Що таке стаціонарне рівняння Шредінгера?
- Які основні властивості функцій Бесселя цілого та напівцілого порядків?
- У чому полягає наближення безмежно-глибокої потенціальної ями?
- Чим відрізняється потенціальна яма скінченної глибини від безмежної?
- Як змінюється енергетичний спектр електрона (дірки) залежно від геометричних параметрів тонкої плівки, квантової точки та квантового дроту?
- Який вигляд має гамільтоніан електрона у сферичній системі координат?
- Які граничні умови враховуються для хвильових функцій у багатошаровій тонкій плівці та сферичній квантовій точці?
- Що таке дисперсійне рівняння і як воно використовується?
- Що описує гамільтоніан екситона?
- Як застосовується теорія збурень для розрахунку енергії зв'язку екситона?
- Який вигляд має гамільтоніан електрона у циліндричній системі координат?
- Які граничні умови накладаються на хвильові функції у нанотрубці?
- У чому суть модифікованого варіаційного методу Бете?
- Який фізичний зміст має функціонал енергії екситона?
- Які особливості гамільтоніана електрона з донорною домішкою у сферичних квантових точках?
- Які функції описують хвильові рішення у такій системі?
- Як застосовується модифікований варіаційний метод Бете у циліндричних нанотрубках?
- Як змінюється енергія зв'язку електрона з домішкою залежно від геометрії системи?
- Як виглядає гамільтоніан електрона у багатошаровій циліндричній нанотрубці в магнітному полі?
- Що таке симетрична калібровка?
- Яку роль відіграють конфлюентні гіпергеометричні функції?
- Як змінюються рівні Ландау у залежності від індукції магнітного поля?
- Які особливості гамільтоніана електрона у подвійних нанокільцях у магнітному полі?
- Які граничні умови застосовуються?
- Який фізичний зміст має ефект Ааронова-Бома?
- Як змінюються сили осциляторів внутрішньозонних переходів у магнітному полі?
- Який вигляд має гамільтоніан електрона у подвійних нанокільцях в електричному полі?
- Як виглядає хвильова функція електрона у наносистемі без поля?
- Який зміст має розклад хвильової функції за циліндрично-симетричними функціями?
- Що таке секулярне рівняння?

Питання для підсумкового контролю

- Поясніть фізичний зміст енергетичних спектрів електронів і дірок у простих наносистемах та їх залежність від геометрії.
- Порівняйте особливості квантових станів у тонкій плівці, квантовій точці та квантовому дроті.
- Розкрийте роль граничних умов у визначенні хвильових функцій у багатошарових наносистемах.
- Поясніть відмінність між гамільтоніаном електрона та екситона.
- Охарактеризуйте методи наближень (теорія збурень, варіаційний метод Бете) при розрахунках у наносистемах.
- Розкрийте вплив геометричних параметрів на енергію зв'язку екситонів у багатошарових наносистемах.
- Поясніть фізичний зміст рівнів Ландау та їх прояв у спектрі електронів у магнітному полі.
- Проаналізуйте особливості впливу магнітного поля на електронні стани у нанотрубках та нанокільцях.
- Розкрийте фізичну сутність ефекту Ааронова-Бома в наноструктурах.

- Охарактеризуйте вплив електричного поля на спектр і хвильові функції електрона в подвійних нанокільцях.
- Поясніть значення теоретичних моделей у порівнянні з експериментальними даними для напівпровідникових наносистем.
- Обґрунтуйте застосування функцій Бесселя та гіпергеометричних функцій у розв'язках рівняння Шредінгера для наносистем.
- Проаналізуйте особливості спектра електронів, що взаємодіють з донорними домішками у квантових точках та нанотрубках.
- Розкрийте вплив домішкових станів на енергетичні спектри наносистем.
- Охарактеризуйте фізичний зміст функціоналу енергії екситона у варіаційному методі.
- Поясніть принципи формування дисперсійного рівняння та його значення для визначення спектра.
- Порівняйте вплив магнітного та електричного полів на квантові переходи у наносистемах.
- Обґрунтуйте роль симетричної калібровки при описі електрона у зовнішньому полі.
- Охарактеризуйте методи теоретичного опису внутрішньозонних квантових переходів у наносистемах.
- Визначте ключові напрямки використання моделей квантових точок, дротів і нанокільць у сучасній нанофізиці.
- Поясніть фізичну різницю між безмежно-глибокою та скінченною потенціальними ямами і їх роль у моделюванні наносистем.
- Проаналізуйте, як зміна товщини плівки чи радіуса квантової точки впливає на положення енергетичних рівнів.
- Поясніть, як геометрія наносистеми впливає на розділення змінних у рівнянні Шредінгера.
- Проаналізуйте різницю у спектрах екситонів у сферичних квантових точках і циліндричних нанотрубках.
- Розкрийте фізичний зміст секулярного рівняння та його роль у визначенні енергетичних рівнів.
- Обґрунтуйте використання багатопарових структур (CdS/HgS, GaAs/AlAs) у моделюванні наносистем.
- Поясніть вплив зовнішнього електричного поля на сили осциляторів внутрішньозонних переходів.
- Охарактеризуйте роль домішкових центрів у формуванні локалізованих станів у наносистемах.
- Проаналізуйте співвідношення між теоретичними передбаченнями та експериментальними результатами у вивченні наносистем.
- Поясніть фізичний зміст квантового обмеження та його прояв у спектрі електронів і дірок.
- Охарактеризуйте особливості побудови хвильових функцій у циліндричній та сферичній геометрії.
- Порівняйте методи наближених розрахунків у наносистемах (збурення, варіаційний метод, аналітичні функції).

Зарахування результатів неформальної освіти

Відповідно до «Положення про взаємодію формальної та неформальної освіти, визнання результатів навчання (здобутих шляхом неформальної та/або інформальної освіти, в системі формальної освіти) у Чернівецькому національному університеті імені Юрія Федьковича (протокол № 109 від 28 березня 2022 року) (<https://www.chnu.edu.ua/media/3aykf41y/polozhennia-pro-vzaiemodiiu-formalnoi-ta-neformalnoi-osvity.pdf>) у процесі вивчення дисципліни здобувачу освіти може бути зараховано до 25% балів, отриманих за результатами неформальної та/ або інформальної освіти з проблем, що відповідають тематиці курсу.

Рекомендована література

Основна література

1. Ткач М. В. Квазічастинки у наногетеросистемах. Квантові точки та дроти / Ткач М. В. – Чернівці: Рута, 2003. – 312 с.
2. Ткач М. В. Квазічастинки у наносистемах. Квантові точки, дроти і плівки / Ткач М. В., Сеті Ю.О.,

Войцехівська О.М – Чернівці: Книги - XXI, 2015. – 386 с.

3. O. Makhanets Exciton spectrum in multi-shell hexagonal semiconductor nanotube / O. Makhanets, N.Tsiupak, V.Gutsul, O.Voitsekhivska // Condensed Matter Physics. – 2012. – V. 15, № 3. – P. 33704:1-9.
4. Маханець О.М. Спектральні параметри електрона в багатошаровій циліндричній напівпровідниковій нанотрубі з донорною домішкою на аксіальній осі / О.М.Маханець, А.І.Кучак, В.І.Гуцул // УФЖ. – 2014. – Т. 59, №8. – С. 818 – 824.
5. Маханець О.М. Енергетичний спектр електрона та сили осциляторів внутрішньозонних квантових переходів у подвійних напівпровідникових нанокільцях у магнітному полі / О.М. Маханець, В.І. Гуцул, А.І. Кучак // Журнал нано- та електронної фізики. – 2017. – Т. 9, № 6. – P. 06015: 1 – 6.
6. Маханець О.М. Енергетичний спектр електрона та сили осциляторів внутрішньозонних квантових переходів у подвійних напівпровідникових нанокільцях у магнітному полі / О.М. Маханець, В.І. Гуцул, А.І. Кучак // Журнал нано- та електронної фізики. – 2017. – Т. 9, № 6. – P. 06015: 1 – 6.
7. O.M. Makhanets V.I. Gutsul, I.P. Koziarskyi, A.I. Kuchak Spectral Parameters of an Exciton in Double Semiconductor Quantum Rings in an Electric Field // Journal of Nano- and Electronic Physics. – 2021. – V.13, №2. – 02024(6pp). ISSN: 2077-6772.
8. I.S. Hnidko, V.I. Gutsul, I.P. Koziarskyi, O.M. Makhanets, The exciton spectrum of the cylindrical quantum dot-quantum ring semiconductor nanostructure in an electric field // PHYSICS AND CHEMISTRY OF SOLID STATE, V. 23, No. 4 (2022) P.793-800
9. Hnidko I. S., Makhanets O. M., Gutsul V. I., Koziarskyi I. P. Impurity effect on the spectral parameters of an electron in a quantum dot-quantum ring semiconductor nanostructure. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 2023. Vol. 752. No 1. P. 42-50. (Web of Science, Scopus).

Допоміжна література

1. Davies J.H. The physics of low-dimensional semiconductors: an introduction / Davies J.H. – New York : Cambridge University Press, 1998. –438 p.
2. Fontcuberta i Morral A. Prismatic Quantum Heterostructures Synthesized on Molecular-Beam Epitaxy GaAs Nanowires / A. Fontcuberta i Morral, D. Spirkoska, J. Arbiol [et al.] // Small. – 2008. – V.4, №. 7. – P. 899–903.
3. Heigoldt M. Long range epitaxial growth of prismatic heterostructures on the facets of catalyst-free GaAs nanowires / M. Heigoldt, J. Arbiol, D. Spirkoska [et al.] // J. Mater. Chem. – 2009. – V. 19, № 9. – P. 840–848.
4. Mano T. Nanometer-scale GaAs ring structure grown by droplet epitaxy / T. Mano, N. Koguchi // J. Cryst. Growth. – 2005. – V. 278 (1). – P. 108 – 112.
5. Photoluminescence of GaAs/AlGaAs quantum ring arrays / Yu. D. Sibirmovskii, I. S. Vasil'evskii, A. N. Vinichenko [et al] // Semiconductors. – 2015. – 49(5). – P. 638 – 643.

Інформаційні ресурси

1. https://drive.google.com/file/d/1wSgvVrYRxxmPx8OBX2E0jPaqnr3VS1_/view?usp=sharing
2. https://drive.google.com/file/d/1J5re6KW3MrFC_d-cUgMgOerq1UhEgg63/view?usp=sharing
3. <https://drive.google.com/file/d/1ze2NegpgxrxYavJbMSOvVzggqBS3D0WZ/view?usp=sharing>
4. <https://drive.google.com/file/d/1de-yhJP7grr-cJZPyDsZMyobViA2udM3/view?usp=sharing>
5. <https://drive.google.com/file/d/1aBmSDkJdDXvOAGqMVmFM7CYcN4ElgdVW/view?usp=sharing>

Політика щодо академічної доброчесності

Дотримання політики щодо академічної доброчесності учасниками освітнього процесу при вивченні навчальної дисципліни регламентовано такими документами:

- «Етичний кодекс Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича»

<https://www.chnu.edu.ua/media/jxdfs0zb/etychnyi-kodeks-chernivetskoho-natsionalnoho-universytetu.pdf>

- «Положення про виявлення та запобігання академічного плагіату у Чернівецькому національному університету імені Юрія Федьковича»

https://www.chnu.edu.ua/media/f5leobm/polozhennya-pro-zapobihannia-plahiatu_2024.pdf

Дотримання академічної доброчесності передбачає:

- самостійне виконання навчальних завдань, завдань поточного та підсумкового контролю результатів навчання (для осіб з особливими освітніми потребами ця вимога застосовується з урахуванням їхніх індивідуальних потреб і можливостей);
- посилаючись на джерела інформації у разі використання не авторських ідей, розробок, тверджень, відомостей і т.п.;
- дотримання норм законодавства про авторське право і суміжні права;
- надання достовірної інформації про результати власної наукової діяльності, використані методики досліджень і джерела інформації.

Порушенням академічної доброчесності вважається:

- академічний плагіат – оприлюднення (частково або повністю) наукових (творчих) результатів, отриманих іншими особами, як результатів власного дослідження (творчості) та/або відтворення опублікованих текстів (оприлюднених творів мистецтва) інших авторів без зазначення авторства;
- фабрикація – вигадкування даних чи фактів, що використовуються в наукових дослідженнях;
- фальсифікація – свідомо зміна чи модифікація вже наявних даних, що стосуються наукових досліджень.

За порушення академічної доброчесності здобувачі освіти можуть бути притягнені до такої академічної відповідальності:

- повторне проходження оцінювання (модульний контроль, іспит, залік тощо);
- повторне проходження відповідного освітнього компонента освітньої програми.