

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича
Навчально-науковий інститут фізико - технічних та комп'ютерних наук
Кафедра термоелектрики та медичної фізики

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

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



Петро ШПАТАР

2025 року

РОБОЧА ПРОГРАМА
навчальної дисципліни
Квантова фізика наносистем
(обов'язкова)

Освітньо-наукова програма	<u>Прикладна фізика та наноматеріали</u>
Спеціальність	<u>Е6 Прикладна фізика та наноматеріали</u>
Галузь знань	<u>Е Природничі науки, математика та статистика</u>
Рівень вищої освіти	<u>Третій (освітньо-науковий)</u>
<u>Навчально-науковий інститут фізико-технічних та комп'ютерних наук</u>	
Мова навчання	<u>Українська</u>

Чернівці 2025 рік

Робоча програма навчальної дисципліни ОК 6 «Квантова фізика наносистем» складена відповідно до освітньо-наукової програми «Прикладна фізика та наноматеріали».

Розробник:

Маханець Олександр Михайлович, професор, доктор фізико-математичних наук, професор.

Викладач:

Маханець Олександр Михайлович, професор, доктор фізико-математичних наук, професор.

Погоджено з гарантом ОП

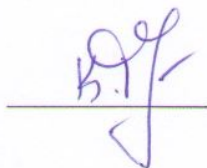


Радіон ЧЕРКЕЗ

Затверджено на засіданні кафедри термоелектрики та медичної фізики ННІФТКН ЧНУ імені Юрія Федьковича

Протокол № 2 від 26 серпня 2025 року

Завідувач кафедри



Роман КОБИЛЯНСЬКИЙ

Схвалено методичною радою ННІФТКН

Протокол № 1 від 27 серпня 2025 року

Голова методичної ради ННІФТКН



Іван КОЗЯРСЬКИЙ

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" аспіранти 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 аспірантів самостійно виконувати розрахунки спектрів квазічастинок у найпростіших наноструктурах.
- Аспіранти 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.

РЕЗУЛЬТАТИ НАВЧАННЯ

Відповідно до освітньо-наукової програми «Прикладна фізика та наноматеріали», вивчення дисципліни «Квантова фізика наносистем» сприяє формуванню у здобувачів третього (освітньо-наукового) 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

Загальні компетентності (ЗК)

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.

Фахові компетентності (ФК)

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

Програмні результати навчання (ПРН)

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 обробляти 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.

ПРН9. Планувати і виконувати експериментальні та/або теоретичні дослідження з прикладної фізики та дотичних міждисциплінарних напрямів 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. Глибоко 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 аспірантам 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 здобувач 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: багат шарові тонка плівка, сферична квантова точка, циліндрична нанотрубка;
- методи теоретичного дослідження спектрів квазічастинок, що взаємодіють з домішкою у багат шарових сферичних квантових точках та циліндричних нанотрубках;
- методи теоретичного дослідження спектрів квазічастинок, що взаємодіють з електричним та магнітним полями у циліндричних нанотрубках та нанокільцях.

Вміти:

- 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 НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ
ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ**

<i>Назва навчальної дисципліни</i> 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 нанокілець 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 нанокілець 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 аспірантів

№	Назва теми
1.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Отримати вираз для хвильових функцій і дисперсійного рівняння для визначення спектра квазічастинки у напівпровідниковій квантовій плівці. 2. Отримати вираз для хвильових функцій і дисперсійного рівняння для визначення спектра квазічастинки у напівпровідниковому квантовому дроті. 3. Отримати вираз для хвильових функцій і дисперсійного рівняння для визначення спектра квазічастинки у сферичній напівпровідниковій квантовій точці.
2.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Отримати залежності енергетичних спектрів електрона від геометричних параметрів багатошарових тонких плівок та сферичних квантових точках на основі напівпровідників GaAs/AlAs/ 2. Отримати залежності енергетичних спектрів дірки від геометричних параметрів багатошарових тонких плівок та сферичних квантових точках. 3. Отримати залежності енергетичних спектрів екситона досліджуваних наноструктур на основі напівпровідників GaAs/AlAs.
3.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Вивести диференційне рівняння, що описуватиме спектр квазічастинки у такій наноструктурі. Відділити змінні. 2. Отримати аналітичний вигляд залежності енергії зв'язку від геометричних параметрів наноструктури. 3. Проаналізувати залежності спектральних характеристик квазічастинок від геометричних параметрів наноструктури.
4.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Одержати гамільтоніан електрона, що взаємодіє з донорною домішкою. 2. Отримати аналітичний вигляд залежності енергії зв'язку від геометричних параметрів наноструктури. 3. Проаналізувати 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.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Отримати гамільтоніан електрона у багатошаровій циліндричній нанотрубіці в магнітному полі.

	2. Отримати дисперсійне рівняння. 3. Проаналізувати залежності енергетичних спектрів електрона від величини індукції магнітного поля та геометричних параметрів багатощарової циліндричної нанотрубки на основі напівпровідників GaAs/AlAs.
6.	1. Одержати гамільтоніан електрона у подвійних напівпровідникових нанокільцях у магнітному полі. 2. Проаналізувати залежності енергетичних спектрів та сил осциляторів внутрішньозонних квантових переходів електрона від величини індукції магнітного поля та геометричних параметрів подвійних напівпровідникових нанокільць на основі напівпровідників GaAs/AlAs.
7.	1. Отримати хвильові функції електрона у наносистемі без поля. 2. Одержати залежності енергетичних спектрів та сил осциляторів внутрішньозонних квантових переходів електрона від величини напруженості електричного поля у подвійних напівпровідникових нанокільцях на основі напівпровідників GaAs/AlAs.
8.	1. Проаналізувати явища тепло- та електро- переносу в термоелектричних наноматеріалах на основі Bi-Te, Mg-Si, Pb-Te.

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.

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

- *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 аспірантів;

- виконання тестових завдань з метою перевірки рівня засвоєння теоретичного матеріалу за навчальними темами;

- усна відповідь аспіранта при здачі лабораторної роботи;

- виконання модульної контрольної роботи (тестування та розв'язання навчально-професійних задач).

Зазначені форми контролю на лекційних та практичних заняттях є обов'язковими для всіх аспірантів.

Форма підсумкового контролю – екзамен.

КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ поточного та підсумкового контролю навчальних досягнень

Критерії оцінювання навчальних досягнень аспірантів за результатами поточного контролю

Критеріями оцінювання навчальних досягнень аспірантів 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 аспіранти за модулі

Поточне оцінювання (аудиторна, самостійна робота та модульний контроль)		Кількість балів (екзамен)	Сумарна к-ть балів
Змістовий модуль №1	Змістовий модуль №2		
Т1,Т2, Т3,Т4	Т5,Т6,Т7		
30	30	40	100

Т1, Т2, Т3, Т4, Т5, Т6, Т7, Т8 – теми змістових модулів.

Критерії підсумкового оцінювання результатів навчання аспірантів з навчальної дисципліни

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

На екзамен виносяться питання теоретичних знань і практичних навиків аспірантів 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 аспірантом дані правильні вичерпні відповіді на всі поставлені запитання.
- ◆ **9-12 балів:** коли аспірантом 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 аспіранта 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

Оцінка за національною шкалою	Оцінка за шкалою ЄКТС	
	Оцінка (бали)	Пояснення за розширеною шкалою
Відмінно	A (90-100)	відмінно
Добре	B (80-89)	дуже добре
	C (70-79)	добре
Задовільно	D (60-69)	задовільно
	E (50-59)	достатньо
Незадовільно	FX (35-49)	(незадовільно) з можливістю повторного складання
	F (1-34)	(незадовільно) з обов'язковим самостійним опрацюванням освітнього компоненту до перескладання

Критерії підсумкової оцінки як показника результатів вивчення навчальної дисципліни

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

Таким чином знання аспірантів оцінюються як з теоретичної, так і з практичної підготовки за такими критеріями:

«А» 90-100 балів ставиться у разі, якщо аспірант:	<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.
«В» 80-89 балів ставиться у разі, якщо аспірант:	<ul style="list-style-type: none">– розкривав згідно з програмою дисципліни зміст питань;– робив узагальнення та висновки з окремих питань;– 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 аспірант:	<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,	<ul style="list-style-type: none">– відповідав на окремі питання, які обговорювалися;– формулював висновки з окремих питань;– виконував завдання для самостійної роботи;

якщо аспірант:	<ul style="list-style-type: none"> – 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 аспірант:	<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.
«Fx» 35-49 балів ставиться у разі, якщо аспірант:	<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 аспірант:	<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 вміє відтворити зміст окремих питань, передбачених програмою дисципліни; – не виконав завдання модульного контролю.

Перелік питань для самоконтролю та контролю навчальних досягнень аспірантів з навчальної дисципліни

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 багаточаровій 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 нанокілець 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 багат шарових 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 «Порядку визнання у Чернівецькому національному університеті імені Юрія Федьковича результатів навчання, здобутих шляхом неформальної та/або інформальної освіти» (протокол №16 від 25 листопада 2024 року) (<https://www.chnu.edu.ua/universytet/normatyvni-dokumenty/poriadok-vyznannia-u-chernivetskomu-natsionalnomu-universyteti-imeni-yurii-fedkovycha-rezultativ-navchannia-zdobutykh-shliakhom-neformalnoi-taabo-informalnoi-osvity/>) 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

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 багат шаровій циліндричній напівпровідниковій нанотрубці 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).

10. I.A. Konstantynovych, R.V. Kuz, O.M. Makhanets, R.G. Cherkez SECTIONAL GENERATOR THERMOELEMENTS IN A MAGNETIC FIELD // Journal of Thermoelectricity, № 1, 2023 ISSN 1607-8829, P.75-81. <http://jte.ite.cv.ua/index.php/jt/article/view/8/168>.
11. I.S. Hnidko, O.M. Makhanets, I.A. Konstantynovych Features of renormalization of the electronic spectrum by confined phonons in a semiconductor nanostructure quantum dot-quantum ring // Journal of Thermoelectricity, № 1-2, 2024, P.9-23. <http://jte.ite.cv.ua/index.php/jt/article/view/152>

ДОПОМІЖНА

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.
6. Anatyshuk, L., & Korop, M. (2023). Application of machine learning to predict the properties of Bi₂Te₃ -based thermoelectric materials. *Journal of Thermoelectricity*, (2), 59–71. <https://doi.org/10.63527/1607-8829-2023-2-59-71>
7. Nikolaenko, G., Vodoriz, O., Rogacheva, O., Tavrina, T., & Lisachuk, G. (2020). Thermal conductivity of PbSe_{1-x}Te_x (x = 0 – 0.04) solid solutions. *Journal of Thermoelectricity*, (4), 5–13. Retrieved from <http://jte.ite.cv.ua/index.php/jt/article/view/42>
8. Lysko, V., & Nitsovich, O. (2023). Computer simulation of the process of manufacturing flat ingots of thermoelectric materials based on Bi₂Te₃ by vertical zone melting method. *Journal of Thermoelectricity*, (3), 19–26. <https://doi.org/10.63527/1607-8829-2023-3-19-26>

ІНФОРМАЦІЙНІ РЕСУРСИ

1. https://drive.google.com/file/d/1wSgvVrYRxxmPx8OBX2E0jPaqnr3VS1_/view?usp=sharing
2. https://drive.google.com/file/d/1J5re6KW3MrFC_d-cUgMgOerq1UhEgq63/view?usp=sharing
3. <https://drive.google.com/file/d/1ze2NegpgxrxYayJbMSOvVzqqbBS3D0WZ/view?usp=sharing>
4. <https://drive.google.com/file/d/1de-yhJP7grr-cJZPyDsZMyobViA2udM3/view?usp=sharing>
5. <https://drive.google.com/file/d/1aBmSDkJdDXvOAGqMVmFM7CYcN4EIgdVW/view?usp=sharing>

ПОЛІТИКА 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/jxdbs0zb/etychnyi-kodeks-chernivetsko-ho-natsionalno-ho-universytetu.pdf>

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

<https://www.chnu.edu.ua/media/hkzbr1b2/polozhennia-pro-vyavlennia-ta-zapobihannia-akademichnomu-plahiatu-u-chnu-2025.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);

- посилення 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.