



КВАНТОВА МЕХАНІКА

Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	<i>Перший (бакалаврський)</i>
Галузь знань	<i>153 Автоматизація та приладобудування</i>
Спеціальність	<i>153 Мікро- та наносистемна техніка</i>
Освітня програма	<i>Електронні мікро- і наносистеми та технології</i>
Статус дисципліни	<i>Нормативна</i>
Форма навчання	<i>Очна (денна)</i>
Рік підготовки, семестр	<i>2 курс, осінній семестр</i>
Обсяг дисципліни	<i>6 кредитів ЕКТС</i>
Семестровий контроль/ контрольні заходи	<i>Іспит / Модульні контрольні роботи, ДКР</i>
Розклад занять	<i>rozklad.kpi.ua</i>
Мова викладання	<i>Українська</i>
Інформація про керівника курсу / викладачів	Керівник курсу: PhD, ШЕВЛЯКОВА Ганна Вікторівна, g.shevliakova-me@iit.kpi.ua , +38-095-856-39-96 Лекції: к.т.н. ЛУПИНА Борис Іванович, b.lupyna@kpi.ua , b.lupyna-me@iit.kpi.ua , моб.+38 050 949 82 76 Практичні: PhD, ШЕВЛЯКОВА Ганна Вікторівна, g.shevliakova-me@iit.kpi.ua , +38-095-856-39-96
Розміщення курсу	<i>Код Google classroom: 7k4dftt</i>

Програма навчальної дисципліни

1. Опис навчальної дисципліни, її мета, предмет вивчення та результати навчання

Навчальна дисципліна «Квантова механіка», присвячена вивченню принципів квантової механіки та її математичного апарата для розрахунку квантових систем (потенціальна яма, бар'єр, квантовий гармонічний осцилятор тощо).

Майбутньому фахівцю зі спеціальності Мікро- та наносистемної техніки варто вивчати дану дисципліну, оскільки вона дає фундаментальні знання з квантово-механічного опису електрофізичних характеристик сучасних електронних пристроїв та властивостей матеріалів, які використовуються в мікро- та наносистемній техніці.

Дисципліна формує **загальні компетентності**:

ЗК 2. Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності.

Дисципліна формує **фахові компетентності**:

ФК 1. Здатність використовувати знання і розуміння наукових фактів, концепцій, теорій, принципів і методів для проектування та застосування мікро- та наносистемної техніки.

ФК 3. Здатність використовувати математичні принципи і методи для проектування та застосування мікро- та наносистемної техніки.

В результаті успішного засвоєння дисципліни здобувачі вищої освіти досягають таких **програмних результатів навчання**:

ПРН2. Застосовувати знання і розуміння математичних методів для розв'язання теоретичних і прикладних задач мікро- та наносистемної техніки.

ПРН3. Застосовувати знання і розуміння фізики, відповідні теорії, моделі та методи для розв'язання практичних задач синтезу пристроїв мікро- та наносистемної техніки.

ПРН15. Застосовувати розуміння теорії стохастичних процесів, методи статистичної обробки та аналізу даних при розв'язанні професійних завдань.

Вивчення навчальної дисципліни «Квантова механіка» забезпечить студентів наступні **компетентності**: здатність розуміти принципи функціонування та будувати теоретичні моделі сучасних пристроїв мікро- та наносистемної техніки, описувати електро-фізичні властивості сучасних матеріалів електроніки.

Метою навчального модулю «Квантова механіка» є ознайомлення студентів з законами мікросвіту та показати їх відмінність від законів класичної механіки; сприяти у оволодінні навичками по застосуванню теоретичних знань при вирішенні практичних завдань.

Після засвоєння навчального модуля «Квантова механіка» студенти мають продемонструвати такі:

знання: предмет та головні задачі квантової механіки; головні принципи (суперпозиції, причинності, невизначеностей Гейзенберга, відповідності, тотожності частинок, принцип заборони Паулі); основи математичного апарату квантової механіки; квантово-механічний опис та особливості руху мікрочастинок в силових полях; властивості квантових систем, що складені з тотожних частинок; квантово-механічний опис та головні властивості методологічно важливих квантових систем (атом водню, багатоелектронні атоми у періодичній таблиці хімічних елементів Менделєєва).

уміння: статистично інтерпретувати вектори стану (хвильові функції); аналізувати розв'язок простих модельних задач квантової механіки (наприклад, проходження потенціальних бар'єрів); пояснювати явища мікросвіту із застосуванням ідей квантової механіки (наприклад, тунельний ефект, існування періодичної системи хімічних елементів); формулювати та аналізувати головні принципи квантової механіки; знаходити комутатори простих операторів, власні значення та власні функції простих квантових операторів.

досвід: розуміння предмету, головних задач, принципів, основних положень і меж застосування квантової механіки, фізичний зміст квадрата модулю хвильової функції; співвідношення невизначеностей; квантово-механічний опис та особливості руху мікрочастинок у силових полях; аксіоматику квантової механіки; властивості квантових систем, що складаються з тотожних частинок.

2. Пререквізити та постреквізити дисципліни (місце в структурно-логічній схемі навчання за відповідною освітньою програмою)

Для успішного вивчення даної дисципліни студенти мають засвоїти наступні дисципліни (**пререквізити дисципліни**): бакалаврські курси: «Загальна фізика», «Математичний аналіз», «Імовірнісні основи обробки даних».

Результати навчання даної дисципліни використовуються для вивчення наступних дисциплін (**постреквізити дисципліни**): бакалаврські курси: «Фізика твердого тіла» «Твердотільна електроніка», «Фізико-технологічні основи наноелектроніки»; переддипломна практика та дипломне проектування.

3. Зміст навчальної дисципліни

1. Основні експериментальні результати, що ініціювали виникнення квантової механіки.
2. Основи квантово-механічної теорії, її головні принципи (суперпозиції, причинності, невизначеностей Гейзенберга, відповідності, тотожності частинок, принцип заборони Паулі).
3. Основи математичного апарату квантової механіки; Операторна форма квантової механіки.

4. Рівняння Шредінгера.
5. Найпростіші задачі квантової механіки (гармонічний осцилятор, частинка в потенціальній ямі, проходження частинки крізь потенціальний бар'єр, тощо).
6. Квантово-механічний опис та особливості руху мікрочастинок в силових полях. Рух частинки в центрально-симетричному полі.
7. Власні механічний та магнітний моменти електрону. Повний момент кількості руху електрона. Спін-орбітальна взаємодія.
8. Властивості електрона в зовнішніх полях.
9. Властивості квантових систем, що складені з тотожних частинок; квантово-механічний опис та головні властивості методологічно важливих квантових систем (атом водню, багатоелектронні атоми у періодичній таблиці Менделєєва).
10. Наближені методи квантової механіки. Багатоелектронні атоми та утворення молекул.
11. Теорія квантових переходів. Квантова система в збудженому стані. Квантова теорія випромінювання. Процеси поглинання і емісії фотонів атомами. Правила відбору.
12. Основи квантової електроніки. Спонтанне та вимушене випромінювання. Квантові генератори. Мазери, лазери. Розсіяння випромінювання на квазічастинках, спектроскопія.

4. Навчальні матеріали та ресурси

Базова література:

1. ВАКАРЧУК І. О. Квантова механіка: Підручник./ І. О. Вакарчук. 4-те видання, доповнене. Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2012. 872 с.: 78 іл. ISBN 978-966-613-921-7
2. Юхновський І. Р. Основи квантової механіки: Навчальний посібник. / І. Р. Юхновський. — 2-ге вид., перероб і доп. — К.: Либідь, 2002. 392 с.
3. Висоцький В.І. Квантова механіка та її використання у прикладній фізиці: підручник/ В.І. Висоцький. - К.: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2008. - 367 с. ISBN 978-966-439-127-3.
4. Давидов О.С. Квантова механіка: підручник. Електронне видання, 2013. - 708 с. : іл.
5. Статистична фізика: Практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В. М. Коваль. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,88 МБ). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 82 с.
6. Висоцький М. В. Атомна, ядерна фізика та елементи квантової механіки: текст лекцій / М.В. Висоцький; Міністерство освіти і науки України, Київський національний університет імені Тараса Шевченка. - Київ: ВПЦ "Київський університет", 2020. - 189 с.
7. Висоцький В. І. Збірник задач із квантової механіки: навчальний посібник / В.І. Висоцький, М.В. Максютя, І.О. Ястремська; Міністерство освіти і науки України, Київський національний університет імені Тараса Шевченка. - Київ: ВПЦ "Київський університет", 2019. - 287 с.

Додаткова

1. Молчанов В. І. Квантова механіка: навч. посіб. / В. І. Молчанов. – К. : НТУУ «КПІ», 2013.-156 с. Кобушкін О.П. Квантова механіка Навчальний посібник. – 253 стор. Київ, 2016.
2. «Моделювання приладів мікро- і наноелектроніки»: [Електронний ресурс]: підручник для аспірантів спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка», та освітньо-наукової програми «Мікро- та наносистемна техніка» / В.О. Москалюк, В.І.Тимофєєв; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 22,9 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. –164 с.
3. Елементи та пристрої квантової електроніки. Навчальний посібник/ Ю.І. Колесник, А.В. Кіпенський. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – 318.

4. *Наноелектроніка. Квантово-механічні засади, структури, фізичні властивості: навч. посіб. / Д. М. Заячук, Ю. І. Якименко, В. М. Співак, О. В. Богдан, А. Т. Орлов, В. М. Коваль. — К.: Кафедра, 2013. — 428 с.*

5. *Венгер Є.Ф., Грибань В.М., Мельничук О.В. Основи статистичної фізики і термодинаміки: Навчальний посібник. — К: Вища школа, 2004. — 255 с.*

6. *Венгер Є.Ф., Грибань В.М., Мельничук О.В. Збірник задач з квантової механіки: Навч. посіб. — К.: Вища шк., 2003. — 230 с.*

Зазначену літературу можна знайти в бібліотеці КПІ ім. Ігоря Сікорського, на сайті кафедри мікроелектроніки (<http://me.kpi.ua/index.php?id=61>) або в інтернеті.

Навчальний контент

5. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Методика вивчення дисципліни полягає у викладенні теоретичної частини матеріалу на лекційних заняттях та ознайомлення студентів на практичних заняттях з конкретними прикладами застосування основних законів та постулатів квантової теорії.

В лекційному матеріалі головний акцент зроблено на постановку фізичної задачі, формування у студентів фізичних уявлень, а також на виведення основних формул.

Застосовуються стратегії активного і колективного навчання, які визначаються наступними методами і технологіями:

1) метод проблемного викладу (лекції);

2) особистісно-орієнтовані (розвиваючі) технології, засновані на методах «мозкового штурму» та «аналізу ситуацій» (практичні заняття);

3) доповнення традиційних навчальних занять засобами взаємодії на основі мережевих комунікаційних можливостей (технологія Google Classroom та електронні презентації для лекційних і практичних занять).

Лекції:

Лекція 1. Історична довідка. Основні експерименти на початок 20-го століття, які не знаходили пояснення в рамках класичної механіки. Зв'язок дисципліни «Основи квантової теорії» зі спеціальністю «153 Мікро- та наносистемна техніка».

Лекції 2-3. Дифракція мікрочастинок. Гіпотеза де Бройля. Корпускулярно-хвильовий дуалізм. Групова та фазова швидкості. Досліди Д. Франка і Г. Герца, Е. Резерфорда, К. Девіссона – Л. Джермера.

Лекція 4. Стаціонарні орбіти електрона в атомі, теорія і постулати Бора, правило квантування Бора-Зоммерфельда, стала Рідберга, формула Бальмера, комбінаційний принцип Рітца.

Лекція 5. Хвильова функція. Ймовірність місцезнаходження мікрочастинки. Інтерпретація хвильової функції М. Борна. Статистичне тлумачення хвиль де Бройля. Статистичний характер явищ мікросвіту.

Лекція 6. Оператори в квантовій теорії. Математичні дії над операторами. Лінійні та самоспряжені оператори. Оператор комутатор. Співвідношення невизначеності Гейзенберга. Середні значення фізичних величин.

Лекція 7- 8. Квантові статистичні ансамблі. Вимірювальний процес в квантовій механіці та вплив вимірювального пристрою. Оператори фізичних величин. Обчислення середніх значень фізичних величин в квантовій теорії (оператори координати, імпульсу, енергії).

Лекція 9. Гамільтоніан - оператор енергії в квантовій теорії. Хвильове рівняння Шредінгера. Стаціонарне рівняння Шредінгера. Рівняння неперервності.

Лекція 10. Одновимірний прямокутний потенціальний бар'єр. Загальний розв'язок. Використання умов на межах та умови нормування. Багатовимірний потенціальний бар'єр.

Лекції 11-12. Поняття про потенціальний бар'єр. Прямокутний потенціальний бар'єр. Постановка задачі подолання бар'єру. Рівняння Шредінгера для трьох областей. Тунельний ефект.

Лекція 13. Потенціальний бар'єр довільної форми.

Лекції 14-15. Квантовомеханічна теорія гармонічного осцилятора. Порівняння з класичним осцилятором. Розв'язок рівняння Шредінгера для гармонічного осцилятора, аналіз розв'язку. Діаграма розподілу щільності ймовірності координати мікрочастинки.

Лекція 16. Атом водню. Рівняння Шредінгера для воднеподібного атому.

Лекція 17. Квантові числа та хвильові функції електрона в атомі водню. Енергетичний спектр і хвильові функції атома водню.

Лекція 18. Магнітний момент атома водню. Магнетрон Бора. Струми в атомі.

Лекція 19. Спін електрона. Спінкові функції. Спінкові оператори. Матриці Паулі. Експериментальний доказ існування спіна електрона.

Лекція 20-21. Рівняння Шредінгера для системи однакових мікрочастинок. Принцип тожності мікрочастинок. Симетричні та антисиметричні хвильові функції. Оператор перестановок.

Лекція 22. Функції розподілу Фермі-Дірака та Бозе-Ейнштейна

Лекція 23. Хвильові функції для систем бозонів та ферміонів. Принцип Паулі.

Лекція 24. Атом гелію. Парагелій та ортогелій. Обмінна енергія.

Лекція 25. Квантова система в основному та збудженому станах. Принцип суперпозиції станів. Рівняння Шредінгера для твердого тіла.

Лекція 26. Молекула водню. Природа хімічних зав'язків. Сили Ван дер Ваальса.

Лекція 27. Оптичні квантові генератори.

Тематика практичних занять

1. Вхідний контроль – перевірка залишкових знань студентів.
2. Випромінення абсолютно чорного тіла: Закони Г. Кірхгофа, Д.В. Релея – Д.Г. Джинса, В. Віна, Й. Стефана – Л. Больцмана. Формула М. Планка, її аналіз у короткохвильовій та довгохвильовій областях, отримання «класичних» законів теплового випромінювання із формули М. Планка.
3. Хвиля де Бройля. Співвідношення Гейзенберга. Хвильові властивості мікрочастинок. Фазовий простір. Фазовий об'єм.
4. Оператори у квантовій механіці. Хвильова функція.
5. Рівняння Шредінгера. Одновимірний рух. Частинка в нескінченно глибокій потенціальній ямі. Прямокутний потенціальний бар'єр.
6. Потенціальний бар'єр різної форми.
7. Квантовий гармонічний осцилятор.
8. Спін електрона.
9. Основи квантової оптоелектроніки.

6. Самостійна робота студента

Теми для самостійного опрацювання:

1. Власні функції та власні значення операторів - 4 години.
2. Повний момент кількості руху електрона. Спін-орбітальна взаємодія.- 2 години.
3. Матрична форма квантової механіки – 4 години.
4. Особливості квантових систем ферміонів та бозонів та їх відмінність – 4 години.
5. Рівняння Шредінгера для електрона в електромагнітному полі. – 6 годин.
6. Ефект Штарка. Ефект Зеємана. – 4 години.
7. Виконання ДКР – $2 \times 15 = 30$ годин.
8. Підготовка до МКР – $2 \times 7 = 14$ годин.
9. Підготовка до іспиту – 24 години.

Політика та контроль

7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Система вимог, які ставляться перед студентом:

Академічна доброчесність. Дотримання академічної доброчесності студентами 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);
- посилання на джерела інформації у разі використання ідей, розробок, тверджень, відомостей;

- дотримання норм законодавства про авторське право і суміжні права;
- надання достовірної інформації про результати власної навчальної (наукової, творчої) 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;
- самоплагіат - оприлюднення (частково або повністю) власних раніше опублікованих наукових результатів як нових наукових результатів.

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

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

Політика запізнення. За несвоєчасно виконані завдання буде накладено штраф 10 відсотків від загальної кількості балів за це завдання. Примітка. Виключення можуть бути зроблені до невчасно зданих завдань з поважних причин.

Політика щодо відвідування. Відвідування занять є обов'язковим. За об'єктивних причин (наприклад, пандемія, хвороба, міжнародне стажування) навчання може відбуватися в онлайн формі за погодженням із керівником курсу.

Лекційні та практичні заняття проводяться згідно до діючого положення КПІ ім. Ігоря Сікорського. Відвідування занять є обов'язковим.

Звіти з практичних робіт виконуються відповідно до ДСТУ 3008 (або повністю від руки, або повністю на комп'ютері) та здаються PDF форматі в гугл-клас. Звіти мають здаватися до початку наступної пари.

8. Види контролю та рейтингова система оцінювання результатів навчання (PCO)

Для одержання іспиту "автоматом" потрібно набрати більше 60 балів, які можна одержати за виконання обов'язкових завдань (виконання ДКР, практичних робіт та написання модульної контрольної роботи) та систематично відвідавши лекційні заняття (пройшовши експрес-тест за матеріалами лекцій).

Поточний контроль: експрес-опитування (тест).

Бали за роботу під час лекції нараховуються на основі експрес-опитування. Кожний тест містить 2 запитання до матеріалу лекційного заняття, правильна відповідь на які дасть змогу отримати 4 бали.

Бали на практичних заняттях нараховуються за виконані практичні роботи: Кожного практичного заняття задається завдання, яке студент має виконати письмово та впродовж 2 тижнів здати у вигляді звіту.

Календарний контроль: проводиться двічі на семестр для контролю .

Модульна контрольна робота (МКР) проводиться письмово. Кожне завдання на контрольній роботі містить 2 теоретичних питання та 1 задачу, правильні відповіді на які дають змогу одержати 3 бали за кожне теоретичне та 4 бали за практичне, всього 10 балів за МКР.

Індивідуальне завдання (ДКР) – це розв'язання домашніх контрольних задач протягом семестру. Виконується письмово у години самостійної роботи.

Семестровий контроль: екзамен

Умови допуску до семестрового контролю: мінімальний рейтинговий бал 40, виконання ДКР та мінімум 4 практичних робіт.

Екзамен є письмовим. Білет на іспиті складається з 3-х завдань (2 теоретичних питання та 1 задача) по тематиці змістовних тем, що виносяться на аудиторні заняття, та окремих питань, які виносяться на самостійне опрацювання.

1. Система отримання рейтингової оцінки за видами занять за кожний модуль:

№ п/п	Заняття, що підлягають рейтинговій оцінці	Загальна кількість завдань	Максимальний бал за 1 завдання	Кількість балів на "відмінно"
1.	Лекції: експрес-опитування (тест)	5	4	20
2.	Модульна контрольна робота (МКР)	2	10	20
3.	Домашня контрольна робота (ДКР)	2	12	24
4.	Практичні роботи	6-8	4-6	36
Семестрові рейтингові бали:				100

2. Таблиця відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою:

Кількість балів	Оцінка
100-95	Відмінно
94-85	Дуже добре
84-75	Добре
74-65	Задовільно
64-60	Достатньо
Менше 60	Незадовільно
Не виконані умови допуску	Не допущено

9. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)

Перелік питань, які виносяться на семестровий контроль (екзамен):

1. Основні експерименти початку 20-го століття, які не знаходять пояснення в рамках класичної механіки.
2. Хвилі де Бройля, їх фазова та групова швидкість. Дифракція мікрочастинок.
3. Статистичне тлумачення хвиль де Бройля.
4. Хвильова функція. Імовірність місцезнаходження мікрочастинок.
5. Принцип суперпозиції станів. Квантові статистичні ансамблі.
6. Співвідношення невизначеності Гейзенберга.
7. Оператори (визначення; дії над операторами: сума, добуток, квадрат; властивості: лінійність), оператор - комутатор.
8. Власні значення та власні функції операторів, їх фізичний зміст. Умови імовірності вимірювання одночасно різних механічних величин.
9. Оператори координати і імпульсу. Оператор моменту імпульсу (проекції, квадрат, оператор Лапласа).
10. Оператор енергії (кінетичної, повної, Гамільтоніан). Рівняння Шредінгера.
11. Рівняння неперервності (щільність потоку). Стаціонарне рівняння Шредінгера.
12. Падіння частинки на потенціальний бар'єр.
13. Падіння частинки на потенціальний бар'єр кінцевої ширини. Тунельний ефект.
14. Гамільтоніан квантового гармонічного осцилятора (КГО).
15. Рівняння Шредінгера для КГО. Значення енергії та хвильової функції.
16. Енергетичний спектр КГО (порівняти з класичним осцилятором). Тривимірний КГО.
17. Власні значення і власні функції оператора проекції моменту імпульсу та оператора квадрата моменту імпульсу.
18. Рівняння Шредінгера для воднеподібного атома.
19. Пошук хвильової функції для воднеподібного атома (основні моменти). Поліном Лагера
20. Енергія електрона для воднеподібного атома. Квантові числа та хвильові функції електрона для воднеподібного атома.
21. Енергетичний спектр для воднеподібного атома (стала Рідберга-Рітца)
22. Спін електрона, експериментальні докази його існування. Оператор спіну електрона.
23. Спінові функції. Повний момент кількості руху електрона.
24. Рівняння Шредінгера для системи багатьох мікрочастинок. Принцип тотожності мікрочастинок.
25. Симетричні та антисиметричні стани. Принцип Паулі. Хвильові функції для систем бозонів і ферміонів.
26. Атом гелію. Обмінна енергія.
27. Квантова механіка та періодична таблиця Менделєєва

28. Молекула водню. Природа хімічних сил. Міжмолекулярні дисперсійні сили.
29. Рівняння Шредінгера для твердого тіла. Рух електрона в періодичному полі.
30. Ефект Штарка. Ефект Зеємана.
31. Випромінювання електромагнітної енергії. Основний та збуджені стани квантової системи.
32. Квантова електроніка. Спонтанне та вимушене випромінювання.

Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):

Складено:

асист. каф. МЕ, PhD, ШЕВЛЯКОВА Ганна Вікторівна,

ст.викл. каф. МЕ к.т.н. ЛУПИНА Борис Іванович

Ухвалено кафедрою мікроелектроніки ФЕЛ (протокол № 19 від 15.06.2022 р.)

Погоджено Методичною комісією факультету електроніки (протокол № 06/22-1 від 30.06.2022 р.)