

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА
ХІМІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра фізичної хімії

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

В.о. заступника декана
з навчальної роботи

Наталія УСЕНКО



« 05 » 2025 року

РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ
Основи теорії електронного газу в твердому тілі

для студентів

| | |
|------------------|---------------------|
| галузь знань | 10 Природничі науки |
| спеціальність | 102 Хімія |
| освітній рівень | бакалавр |
| освітня програма | Хімія |
| вид дисципліни | вибіркова |

| | |
|--|------------|
| Форма навчання | денна |
| Навчальний рік | 2025/2026 |
| Семестр | <u>5</u> |
| Кількість кредитів ECTS | <u>3</u> |
| Мова викладання, навчання та оцінювання | українська |
| Форма заключного контролю | іспит |

Викладач: доцент, Яцимирський А.В.

Пролонговано: на 20__/20__ н. р. _____ (_____) «__» _____ 20__ р.
на 20__/20__ н. р. _____ (_____) «__» _____ 20__ р.

Розробник: Яцимирський Андрій Віталійович, к.х.н., доцент, доцент кафедри фізичної хімії

ЗАТВЕРДЖЕНО

В.о. завідувача кафедри фізичної хімії

 Олександр ПОЇК

Протокол № 10 від «29» квітня 2025 р.

Схвалено науково-методичною комісією хімічного факультету

Протокол від «7» травня 2025 року № 9

Голова науково-методичної комісії  Олександр ПОЇК

« 7 » травня 2025 року

1. Мета дисципліни – засвоєння основних положень теорії електронного газу, опис електропровідності, зонної теорії для кристалів методами статистичної фізики та квантової механіки (хімії). Формування теоретичної бази для розуміння кількісних та якісних методів квантової хімії твердого тіла, теорії функціоналу електронної густини для періодичних структур. Формування практичних навичок при проведенні лабораторних робіт з побудови періодичних структур, підготовки ввідних фалів до їх обрахунків, обробки отриманих результатів.

2. Попередні вимоги до опанування або вибору навчальної дисципліни:

Студенти повинні знати основи фізики та хімії, а також володіти необхідним математичним апаратом, включаючи інтегрування та диференціювання..

3. Анотація навчальної дисципліни: навчальна дисципліна розглядає теоретичний базис, який є необхідним для розуміння фізичного змісту та природи різноманітних явищ та процесів. Поняття моделі електронного газу використовуються в інших спеціальних курсах, які викладаються на кафедрі після цього курсу. Студенти знайомляться із описом на основі статистичної термодинаміки та квантової механіки так званої моделі електронного газу. Детально розглядаються так звані статистичні розподіли. Потім квантово-механічний опис, який виводить на поняття зонної теорії. А також супутні питання як то обернений простір, примітивні комірки тощо. Наприкінці курсу відбувається розгляд теорії Фермі-Дірака, яка є основою для методу ДФТ.

4. Завдання (навчальні цілі): Надати необхідний теоретичний базис для розуміння зонної теорії, моделі електронного газу, електронної густини. Та зв'язку між вище зазначеними характеристиками та хвильовою функцією системи.

Навчальна дисципліна спрямована на досягнення наступних загальних та спеціальних (фахових) компетентностей: ЗК1 та СК1, СК4, СК10.

5. Результати навчання за дисципліною:

| Результати навчання (1 – знати; 2 – вміти; 3 – комунікація) | Форми викладання і навчання | Методи оцінювання | Відсоток у підсумковій оцінці з дисципліни |
|---|---|--|--|
| 1.1 Знати та розуміти формули розподілів Больцмана, Фермі-Дірака | Лекція, самостійне опрацювання рекомендованої літератури. | Контрольна робота (питання з відкритими відповідями); усна доповідь з презентацією; перевірка завдань самостійної роботи, оцінювання реферату. | 15 |
| 1.2. Знати стаціонарне рівняння Шредінгера та його застосування в т.зв. моделі “вільного електрону в ящику” та умову нормування. Атомні одиниці довжини та енергії. | Лекція, самостійне опрацювання рекомендованої літератури. | Контрольна робота (питання з відкритими відповідями); усна доповідь з презентацією; перевірка завдань самостійної роботи, оцінювання реферату. | 15 |
| 1.3. Знати та розуміти визначення енергії Фермі. | Лекція, самостійне опрацювання | Контрольна робота (питання з відкритими відповідями); усна доповідь з | 10 |

| | | | |
|---|--|--|----|
| | рекомендовано ї літератури. | презентацією; перевірка завдань самостійної роботи, оцінювання реферату. | |
| 1.4. Знати енергетичну густину розподілу станів електронів в твердому тілі. Поняття енергетичної зони та зонної моделі. | Лекція, самостійне опрацювання рекомендовано ї літератури. | Контрольна робота (питання з відкритими відповідями); усна доповідь з презентацією; перевірка завдань самостійної роботи, оцінювання реферату. | 10 |
| 2.1. Вміти вивести формули розподілів Больцмана, Фермі-Дірака. | Лекція, самостійне опрацювання рекомендовано ї літератури. | Контрольна робота (питання з відкритими відповідями); усна доповідь з презентацією; перевірка завдань самостійної роботи, оцінювання реферату. | 10 |
| 2.2. Вміти визначити межі застосування класичної (квазікласичної) статистики (статистичної термодинаміки). | Лекція, самостійне опрацювання рекомендовано ї літератури. | Контрольна робота (питання з відкритими відповідями); усна доповідь з презентацією; перевірка завдань самостійної роботи, оцінювання реферату. | 10 |
| 2.3. Вміти вивести формулу для кількості енергетичних станів (енергетичної густини розподілу станів) для електронів в металі та вміти визначити за графіком розподілу зон провідності тип твердого тіла: метал, ізолятори та напівпровідники. | Лекція, самостійне опрацювання рекомендовано ї літератури. | Контрольна робота (питання з відкритими відповідями); усна доповідь з презентацією; перевірка завдань самостійної роботи, оцінювання реферату. | 10 |
| 2.4. Вміти обрахувати енергію Фермі для метала | Лекція, самостійне опрацювання рекомендовано ї літератури. | Контрольна робота (питання з відкритими відповідями); усна доповідь з презентацією; перевірка завдань самостійної роботи, оцінювання реферату. | 10 |
| 3.1. Здатність обговорювати з викладачем та колегами питання, що виникають в ході виконання лабораторних робіт. | Лабораторні роботи. | Захист лабораторних робіт. | 10 |

6. Співвідношення результатів навчання дисципліни із програмними результатами навчання

| Результати навчання дисципліни | 1.1 | 1.2 | 1.3 | 1.4 | 2.1 | 2.2 | 2.3 | 2.4 | 3.1 |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Програмні результати навчання | | | | | | | | | |
| P.01. Розуміти ключові хімічні поняття, основні факти, концепції, принципи і теорії, що стосуються природничих наук та наук про життя і землю, а також хімічних технологій на рівні, достатньому для їх застосування у професійній діяльності та для забезпечення можливості в подальшому глибоко розуміти спеціалізовані області хімії. | + | + | + | + | + | + | | + | |
| P02. Розуміти основи математики на рівні, достатньому для досягнення інших результатів навчання, передбачених цим стандартом та освітньою програмою. | + | + | | | + | + | | | |
| P.05. Розуміти зв'язок між будовою та властивостями речовин. | | + | | + | | + | + | | |
| P06. Розуміти періодичний закон та періодичну систему елементів, описувати, пояснювати та передбачати властивості хімічних елементів та сполук на їх основі. | | | + | + | | | | | |
| P07. Застосовувати основні принципи квантової механіки для опису будови атома, молекул та хімічного зв'язку. | | + | | + | | + | | | |
| P15. Спроможність використовувати набуті знання та вміння для розрахунків, відображення та моделювання хімічних систем та процесів, обробки експериментальних даних. | | + | + | + | | | | | + |
| P16. Виконувати комп'ютерні обчислення, що мають відношення до хімічних проблем, використовуючи стандартне та спеціальне програмне забезпечення, навички аналізу та відображення результатів. | | | | | | | | | + |

7. Схема формування оцінки

7.1. Форми оцінювання студентів:

Семестрове оцінювання:

Максимальна/мінімальна кількість балів, які можуть бути отримані студентом: **60 балів /36 балів**, а саме:

1. Контрольна робота №1: РН 1.1, РН 1.3, РН 1.4, РН 2.1-2.4 – **35/21 балів**.
2. Контрольна робота №2: РН 1.2, РН 2.2 – **10/6 балів**.
3. Лабораторні роботи № 1–3: РН 1.2, РН 3.1 – **15/9 балів**.

Підсумкове оцінювання (у формі екзамену):

Максимальна/мінімальна кількість балів, які можуть бути отримані студентом: **40 балів /24 бали**.

Результати навчання які будуть оцінюватись: РН 1.1-1.4, РН 2.1-2.4.

Форма проведення: письмова робота.

Види завдань: два теоретичних питання на 20 балів.

Для отримання загальної позитивної оцінки з дисципліни оцінка за екзамен не може бути меншою 24 балів.

Студент допускається до іспиту, якщо протягом семестру він:
набрав не менше, ніж **36 балів** та виконав і вчасно виконав та здав всі лабораторні роботи.

7.2. Організація оцінювання:

Терміни проведення оцінювання:

Контрольна робота №1: не раніше **6 тижня** семестру;

Контрольна робота №2: не раніше **10 тижня** семестру;

Лабораторна робота № 1: виконується до **6 тижня** семестру;

Лабораторна робота № 2: виконується впродовж **7–8 тижня** семестру;

Лабораторна робота № 3: виконується впродовж **8–9 тижня** семестру;

Оцінювання самостійної роботи: впродовж семестру.

7.3. Шкала відповідності оцінок

| Оцінка (за національною шкалою) / National grade | Рівень досягнень / Marks |
|--|--------------------------|
| Відмінно / Excellent | 90-100 |
| Добре / Good | 75-89 |
| Задовільно / Satisfactory | 60-74 |
| Незадовільно / Fail | 0-59 |

8. Структура навчальної дисципліни. Тематичний план лекцій і лабораторних занять

| № п/п | Назва лекції | Кількість годин | | |
|--|--|-----------------|----------|-----|
| | | лекції | Лаб.роб. | С/Р |
| <i>Квантово механічне моделювання твердого тіла</i> | | | | |
| | ТЕМА 1. СТАТИСТИЧНИЙ ОПИС ІДЕАЛЬНОГО ГАЗУ з частинок, що описуються КВАНТОВОЮ МЕХАНІКОЮ. (КВАНТОВА СТАТИСТИКА ІДЕАЛЬНОГО ГАЗУ) | | | |
| | Лекція 1. Ідеальний газ з частинок, що описуються квантовою механікою. Класифікація частинок: Ферміони та Бозони. Число можливих енергетичних станів. Загальне число станів. Термодинамічна імовірність для ферміонів, бозонів та квазікласичних частинок. Термодинамічні співвідношення для виводу розподілів Больцмана, Фермі-Дірака та Бозе-Енштейна. | 3 | | 4 |
| | Лекція 2. Вивід розподілу Больцмана. Вивід розподілу Фермі-Дірака. Межі застосування класичної (квазікласичної) статистики (статистичної термодинаміки). Поняття фазового простору. Фазовий простір ідеального газу. | 3 | | 4 |
| | ТЕМА 2. МОДЕЛЬ ВІЛЬНИХ ЕЛЕКТРОНІВ В МЕТАЛІ АБО МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОННОГО ГАЗУ В МЕТАЛІ | | | |
| | Лекція 3. Основні рівняння квантової механіки. Модель “вільного електрону в ящику”: 1 вимір та 3 виміри. Умова нормування. | 2 | | 4 |
| | Лекція 4. Модель вільних електронів в металі або модель електронного газу в металі — постановка задачі. Вивід формули для кількості енергетичних станів (енергетичної густини розподілу станів) для електронів в металі. Графіки залежності розподілу Фермі-Дірака та кількості енергетичних станів при 0 К та при $T > 0$ від енергії. Визначення енергії Фермі. | 3 | | 4 |
| | Лекція 5. Енергетична густина розподілу станів електронів в твердому тілі. Метали, ізолятори та напівпровідники. Поняття енергетичної зони та зонної моделі. | 1 | | 2 |
| | Лекція 6. Статистична термодинаміка електронного газу в металі (Статистика електронного газу в металі). Обрахунок енергії Фермі для міді. Уточнення графіків залежності розподілу Фермі-Дірака та кількості енергетичних станів при $T > 0$ від енергії. | 2 | | 4 |

| | | | | |
|--|---|-----------|----------|-----------|
| | ТЕМА 3. КВАНТОВОМЕХАНІЧНИЙ ОПИС ТВЕРДОГО ТІЛА (МЕТАЛА). ЗОННА ТЕОРІЯ. | | | |
| | Лекція 7. Дельта-функція Дірака (довідково). Власні значення оператора на прикладі імпульсу. Власні значення оператора імпульсу для а) відсутність граничних умов; б) в нормованому об'ємі; в) з періодичними умовами. | 2 | | 4 |
| | Лекція 8. Нескінчений кристал. Електрон в періодичному полі. Рівняння Шредінгера для кристала. Обернений простір — довідка. Зона Брилюена. | 2 | | 4 |
| | Лекція 9. Сильний зв'язок електрона з атомом в кристалі і пояснення виникнення енергетичної зони. Слабкий зв'язок електрона з атомом в кристалі (майже вільні електрони) і пояснення виникнення енергетичної зони. Графічне зображення енергетичних зон в залежності від хвильового вектора. | 4 | | 6 |
| | Лекція 10. Атомні одиниці довжини та енергії. Енергія Фермі та середнє значення кінетичної енергії електронного газу в атомних одиницях енергії. Введення в теорію функціонала густини. Теорія Томаса-Фермі-Дірака. | 4 | | 6 |
| | | | | |
| | Лабораторна робота № 1 | | 5 | 2 |
| | Лабораторна робота № 2 | | 5 | 2 |
| | Лабораторна робота № 3 | | 4 | 2 |
| | | | | |
| | ВСЬОГО | 28 | 0 | 48 |

Загальний обсяг **90 год.**, в тому числі:

Лекцій – **28 год.**

Лабораторних робіт – **14 год.**

Самостійна робота - **48 год.**

9. Рекомендована література.

Основна: (Базова)

1. **Kittel, Charles.** Introduction to solid state physics.—8th ed. New-York: J.Wiley&Sons, 2005.- 680 p. (ISBN 0-471-41526-X).
2. **Chang L. Tien, John H. Lienhard.** Statistical thermodynamics. Hemisphere Publishing Company, 1979.-397 p. – ISBN 0-89116-048-5.
3. **Забуга В.Я.** Статистична термодинаміка ідеальних газів : Навчальний посібник для студ. хім-го фа-ту / В.Я. Забуга; КУ ім.Т.Шевченка. – Київ : Київський університет, 1999. – 51с. – ISBN 966-594-094-5
4. **Яцимирський В.К., Яцимирський А.В.** Квантова хімія. – К.: Видавничо-поліграфічний центр “Київський університет”, 2009.-479 с.
5. **Яцимирський В.К.** Фізична хімія : підручник для вищих навчальних закладів / Віталій Яцимирський. – Київ ; Ірпінь : Перун, 2010. – 511, [1] с. : іл., табл. – Додатки: с. 509-511. – Бібліогр.: с. 5. – ISBN 978-966-569-224-9.
6. **John C. Slater** Quantum Theory of Molecules and Solids. Volume 1, Electronic Structure of Molecules New York: McGraw-Hill Book Co., Inc., 1963. - 485 pp.

Додаткова:

7. **Усенко Н.І.** Статистична термодинаміка ідеального газу : теорія і задачі: навчальний посібник для студентів хімічного факультету / Н. І. Усенко, О.С. Роїк; КНУТШ. – Київ : Київський університет, 2007. – 51с. – ISBN 978-966-581-861-8.
8. **Федорченко А.М.** Теоретична фізика : підручник / А.М. Федорченко. – Київ : Вища школа. – ISBN 5-11003761-2. Т. 2 : Квантова механіка, термодинаміка і статистична фізика. – 1993. – 415 с.

В тому числі й інтернет ресурси