



# ФІЗИКА КОНДЕНСОВАНОГО СТАНУ МАТЕРІАЛІВ

## Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

### Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	<i>Перший (бакалаврський)</i>
Галузь знань	13 Механічна інженерія
Спеціальність	132 Матеріалознавство
Освітня програма	Нанотехнології та комп'ютерний дизайн матеріалів
Статус дисципліни	Нормативна
Форма навчання	очна(денна)/дистанційна/змішана
Рік підготовки, семестр	2 курс, весняний семестр
Обсяг дисципліни	6 кредити ECT/180год: 54 год лекцій, 28 год практичних занять, 98 год СРС
Семестровий контроль/ контрольні заходи	екзамен / Модульна контрольна робота
Розклад занять	<a href="http://rozklad.kpi.ua">rozklad.kpi.ua</a>
Мова викладання	Українська
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: д.ф-м.н., проф., Зауличний Ярослав Васильович, <a href="mailto:zaulychnyy@ukr.net">mail:zaulychnyy@ukr.net</a> Практичні заняття: д.ф-м.н., проф., Зауличний Ярослав Васильович
Розміщення курсу	В розділі методичне забезпечення дисципліни в системі Campus <a href="https://campus.kpi.ua/tutor/index.php?mode=mob&amp;ir_own">https://campus.kpi.ua/tutor/index.php?mode=mob&amp;ir_own</a>

### Програма навчальної дисципліни

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

Цей курс є фундаментальною основою для вивчення цілого ряду дисциплін професійної та практичної підготовки матеріалознавців та споріднених спеціалістів. Тобто в процесі вивчення дисципліни «Фізика конденсованого стану» студенти набудуть ґрунтовного розуміння процесів формування і природи фізичних, фізико-хімічних та механічних властивостей матеріалів у конденсованому стані.

**Метою навчальної дисципліни є:** забезпечення досконалості знань та розуміння теоретичних основ фізики рідин і твердих тіл, міжатомної взаємодії, їх структурної будови, ролі дефектів та їх використання для вирішення задач прикладного матеріалознавства; поведінки при здійсненні структурного аналізу, дослідженні фізичних, механічних властивостей матеріалів та обробленні і інтерпретації результатів цих випробувань.

**Предмет навчальної дисципліни** - основні поняття про механізми конденсації, кристалізації, рух і взаємодію електронів з іонами в кристалічній ґратці з трансляційною симетрією та в матеріалах з ближнім порядком, фізичну природу властивостей матеріалів та їх відмінностей в рідкому і твердому станах.

Засвоєння навчального матеріалу повинно дозволити розвивати програмні, загальні та фахові компетентності, зокрема:

**Програмні компетентності:**

**Інтегральна компетентність.** Здатність розв'язувати складні спеціалізовані задачі та проблеми, пов'язані з розробкою, застосуванням, виробництвом та випробуванням металевих, неметалевих та композиційних матеріалів та виробів на їх основі, у професійній діяльності та у процесі навчання, що передбачає застосування фізики, хімії до механічної інженерії яка характеризується комплексністю та невизначеністю умов.

### **Фахові (спеціальні) компетентності (КС)**

- КС 7. Здатність застосовувати знання і розуміння наукових фактів, концепцій, теорій, принципів і методів, необхідних для підтримки діяльності в сфері матеріалознавства.

Після засвоєння навчальної дисципліни студент повинен знати і уміти:

- ПРН 10 Уміти поєднувати теорію і практику для розв'язування завдань матеріалознавств
- ПРН 12 Знати інженерні дисципліни, що лежать в основі спеціальності, на рівні, необхідному для досягнення інших результатів програми, в тому числі мати певну обізнаність в їх останніх досягненнях
- ПРН 13. Розуміти будову металевих, неметалевих, композиційних та функціональних матеріалів та обирати оптимальні методи модифікації їх властивостей. Кваліфіковано вибирати матеріали для виробів різного призначення

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

Вивченню цієї дисципліни повинно передувати глибоке засвоєння матеріалу «загальної фізики», особливо розділів «Молекулярна фізика», що включають теми: закон Больцмана і функція розподілу, кінетична теорія теплоти і закон збереження енергії, перехід речовин в твердий стан, фазові переходи I і II роду, теплові властивості твердих тіл. З «Атомної фізики» необхідні розуміння корпускулярно-хвильового дуалізму де-Бройля фізичної суті квадрату модуля хвильової функції та рівняння Шрьодінгера, а також «Природу і типи хімічних зв'язків» із «Загальної хімії». Для розуміння походження кількісних параметрів фізичних властивостей та їх аналітичних співвідношень потрібно уміти оперувати диференціальним і інтегральним численням та розв'язувати диференціальні рівняння з «Вищої математики». Успішне засвоєння основ фізики конденсованого стану потребує знань про сім сингоній і 14 ґраток Браве з курсу «кристалографія, кристалохімія та мінералогія», а також про «Методи дослідження фізичних властивостей матеріалів».

Знання, отримані під час вивчення курсу, є необхідні для вивчення курсів, «кристалохімія тугоплавких сполук», «основи металознавства», «механічні властивості матеріалів», «матеріалознавство тугоплавких матеріалів», «методи структурного аналізу матеріалів», і для розуміння фізико-хімічних процесів, що протікають в матеріалах під час їх розробки і синтезу тощо.

## **3. Зміст навчальної дисципліни** Посилання на літературу Б[...] – базову, Д[...] – додаткову

Дисципліна – «Фізика конденсованого стану» містить один змістовний модуль: «Фізика конденсованого стану» і складається з 9-ти розділів.

### **Розділ 1. Основи термодинаміки конденсованого стану.**

Вступ. Закони термодинаміки і статистичний зміст функцій стану. Рівняння стану.

Термодинамічні параметри, потенціали та їх основні співвідношення.

Термодинамічні та фізичні умови конденсації рідин, аморфізації та кристалізації твердих тіл.

### **Розділ 2. Вступ до фізики рідин.**

Теорія парних потенціалів та класифікація речовин в рідкому стані за типами сил міжатомної взаємодії.

Статистична теорія будови рідини. Функція радіального розподілу атомів і молекул в рідинах. Внутрішня енергія та рівняння стану рідин.

Атомно-структурні моделі будови рідин і їх властивості. Міжмолекулярна взаємодія і явища на межі рідини з іншими тілами (середовищами).

### **Розділ 3. Періодичність структур і властивостей.**

Періодичність властивостей трансляційно-симетричних структур і фізичний зміст оберненої ґратки

Інваріантність рівняння Шрьодінґера відносно трансляцій в кристалічній ґратці. Теорема Блоха.

Зведення  $k$ -станів до зони Бриллюена. Циклічні граничні умови Борна-Кармана. Підрахунок  $k$ -станів.

### **Розділ 4. Взаємодія електронів з атомами кристалічної ґратки. Енергетичний спектр електронів.**

Дифракція електронів на атомах ґратки ідеального кристалу.

Енергетична дисперсія квазівільних електронів поблизу брегівських площин відбивання.

Метод сильного зв'язку для розрахунку зонної структури ковалентних та іонних кристалів.

### **Розділ 5. Статичні властивості твердих тіл.**

Класифікація твердих тіл за структурою зон і типами хімічних зв'язків.

Енергія зв'язку в кристалах.

Правило Юм-Розері та модель жорстких зон.

Статистика Фермі для електронів в твердих тілах та носіїв заряду в напівпровідниках. Енергетичний розподіл та щільність  $k$ -станів.

### **Розділ 6. Коливання ґратки.**

Динаміка тривимірної ґратки. Тензор силових напружень. Система лінійних рівнянь для визначення власних значень зміщень та частот.

Визначення залежності частот від хвильового вектора для о одно- та двоатомних лінійних ґраток.

Питома теплоємність, Модель і температура Дебая.

### **Розділ 7. Кінетичні властивості твердих тіл.**

Стаціонарний стан рухомих частинок. Кінетичне рівняння Больцмана.

Електропровідність та перенос енергії за наявності градієнта температур.

Термоелектричні властивості та вплив магнітного поля на рух електронів в кристалах. Ефект Холла.

### **Розділ 8. Магнетизм матеріалів.**

Діамагнетизм матеріалів з заповненими оболонками атомів і молекул. Правила Хунда.

Парамагнетизм. Закон Кюрі.

Магнітна структура і взаємодія електронів. Упорядкування магнітних моментів і закон Кюрі-Вейса. Феромагнетизм і обмінна взаємодія.

Антиферо- і ферімагнетизм. Доменна структура магнітних матеріалів.

### **Розділ 9. Надпровідність.**

Ефект Мейснера і рівняння Лондонів. Міжелектронна взаємодія і утворення куперівських пар.

Основний стан надпровідника. Енергетична щілина і спектр елементарних збуджень та незгасаючі струми в надпровідниках.

Квантування магнітного потоку та тунельні ефекти в надпровідниках. Надпровідники I і II роду

## **4. Навчальні матеріали та ресурси**

**Базова література:**

1. **Зауличний Я. В.** Фізика конденсованого стану для матеріалознавців : підручник / Я. В. Зауличний, Ю. В. Яворський ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, вид-во “Політехніка”, 2021. – 488 с.
2. **Говорун Т. П.** Фізика конденсованого стану матеріалів : навч. посіб. / Т.П. Говорун, В.О. Пчелінцев, В.М. Радзієвський, Л.В. Носонова. – Суми : СумДУ, 2015. – 236 с.
3. **Поплавко Ю. М.** Фізичне матеріалознавство : навч. посіб. : в 3 ч. / Ю. М. Поплавко, С. О. Воронов, Ю. І. Якименко. – Ч. 3. Провідники та магнетики. – Київ : НТУУ «КПІ», 2011. – 372 с.
4. **Подопригора Н.В.** Фізика твердого тіла : навч. посіб. для студентів фізичних спеціальностей педагогічних університетів / Н. В.Подопригора, М. І. Садовий, О. М. Трифонова. – Кіровоград : ПП «Центр оперативної поліграфії «Авангард», 2014. – 416 с.

#### **Додаткова література:**

1. **Марч Н.** Движение атомов жидкости / Н. Марч, М. Тоси. – Москва : Металлургия, 1980. – 296 с.
2. **Egelstaff P.A.** An Introduction to the liquid state / Egelstaff P. A. – New York : Oxford University Press Inc., 1992. – 385 p.
3. **Еланский Г. Н.** Строение и свойства металлических расплавов / Г. Н. Еланский. – Москва : Металлургия, 1991. – 160 с.
4. **Кикоин А. К.** Молекулярная физика / А. К.Кикоин, И. К. Кикоин. – Москва : Наука, 1976. – 480 с.
5. **Займан Дж.** Принципы теории твердого тела / Дж. Займан. – Москва : Мир, 1966. – 416 с.
6. **Киттель Ч.** Введение в физику твердого тела / Ч. Киттель. – Москва : Физматгиз, 1962. – 490 с.
7. **Лахтин Ю. М.** Материаловедение / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – Москва : Машиностроение, 1972. – 511 с.
8. **Шмидт В. В.** Введение в физику сверхпроводников / В. В. Шмидт. – Изд.2-е испр. и доп. – Москва : МЦНМ, 2000. – 402 с.
9. **Ансельм А. Н.** Основы статистической физики и термодинамики / А. Н. Ансельм. – Москва : Наука, 1973. – 423 с.
10. **Ландау Л. Д.** Статистическая физика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – Часть 1. – Москва : Наука, 1976. – 503 с.
11. **Боков В. А.** Физика магнетиков / В. А. Боков. – Санкт-Петербург : Невский диалект, 2002. – 272 с.
12. **Пискунов Н. С.** Дифференциальное и интегральное исчисления : в 2 т. / Н. С. Пискунов. – Москва : Наука, 1978. – Т.1. – 551с.  
Т.2. – 575 с.
13. **Матвеев А. Н.** Квантовая механика и строение атома / А. Н. Матвеев. – Москва : Высшая школа, 1965. – 356 с.
14. **Акширофт Н.** Физика твердого тела : в 2 т. / Н. Акширофт, Н. Мермин. – Москва : Мир, 1979.  
– Т.1. – 399 с.  
Т.2. – 422 с.
15. **Анималу А.** Кантовая теория кристаллических твердых тел / А. Анималу. – Москва : Мир, 1981. – 571 с.
16. **Киттель Ч.** Квантовая теория твердых тел / Ч. Киттель. – Москва : Физматгиз, 1967. – 491 с.

У вивченні даного курсу студентам бажано використовувати, наявний в бібліотеці КПІ та методичному кабінеті кафедри, підручник [1], в якому детально, глибоко і повно висвітлений увесь навчальний матеріал вказаний в силабусі, а також рекомендується студентам ознайомитись зі змістом інших вказаних базових та додаткових джерел, які є в наявності в бібліотеці КПІ. Серед додаткових особливо увагу варто звернути на підручники і посібники [1]-[11], [14] для більш широкого опрацювання, зокрема посилань в тексті підручника [1] та рекомендованих викладачем розділів 2 (тема «Атомно-структурні моделі будови рідин і їх властивості. Міжмолекулярна взаємодія і явища на межі рідини з іншими тілами (середовищами)») [3], [4], 8-магнетизм матеріалів [6], [11], [13], 9-надпровідність [8], що відповідають тематиці лекцій та практичних робіт. У випадку дистанційного навчання студентам надається доступ до електронного варіанту підручника [1].

## Навчальний контент

### 5. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Для полегшення сприйняття природи та механізмів формування властивостей і структури конденсованих матеріалів, лекції супроводжуються демонстрацією зображень та відео-моделей фізичних процесів, що відбуваються в рідких і твердих тілах внаслідок особливостей міжатомної взаємодії в залежності від хімічного складу та термодинамічних умов. Наприклад для: з'ясування фізичної суті і взаємозв'язку хвильового вектора та імпульсу електрона, залежність від їх величини характеру переміщення електронів в кристалічній ґратці; демонстрації походження акустичної і оптичної гілок коливань; пояснення виникнення діамагнітного моменту внаслідок ларморівського прецесійного руху електронів, тощо.

Для усвідомлення студентами суті аналітичних співвідношень між параметрами властивостей проводиться їх математичне обґрунтування шляхом виведення формул.

**Зміст лекційних занять.** Посилання на літературу Б[...] – базову, Д[...] – додаткову .

Тривалість кожної лекції 2 години.

Лекція 1. Вступ. Узагальнені координати. Фазовий простір. Теорема Ліувілля. Канонічний розподіл. Фізичний і статистичний зміст ентропії, внутрішньої і вільної енергії Гельмгольца. Література: [1] (п.п. 1.1-1.3.1), [9,10].

Лекція 2. I і II закони термодинаміки. Термодинамічні параметри: температура, тиск, об'єм та потенціали (теплова функція, вільна енергія Гіббса) і їх основні співвідношення. Необхідні і достатні умови для функцій стану. Рівняння стану. Література: Б. [1] (п.п. 1.3.4-1.8.1), Д. [9,10].

Лекція 3. Класифікація речовин в рідкому стані на основі типів сил міжатомної взаємодії. Теорія парних потенціалів. взаємодії, між електро-нейтральними, дипольними, молекулами в асоційованих рідинах, та рідких металах. Література: Б.[1] (п.п. 2.2, 2.4), Д. [1-3].

Лекція 4. Статистична теорія будови рідини. Функція радіального розподілу атомів і молекул в рідинах. Теорема віріала та внутрішня енергія і рівняння стану рідин. Література: Б.[1] (п.п. 2.5-2.6.2), Д. [3].

Лекція 5. Періодичність властивостей кристалів і походження координат векторів оберненої ґратки. Фізичний зміст орієнтацій та модулів цих векторів. Еквівалентність координат векторів оберненої ґратки та індексів Міллера. Література: Б.[1] (п.п. 3.3-3.4.4), Д. [5, 6, 14, 15].

Лекція 6. Інваріантність рівняння Шрьодінгера відносно трансляцій в кристалічній ґратці. Теорема Блоха.  $k$ -простір і належність до нього векторів оберненої ґратки. Фізичний зміст  $k$ -векторів і квазіімпульси. Література: Б.[1] (п.п. 3.5), Д. [5].

Лекція 7. Зведення  $k$ -станів до зони Бриллюена. Циклічні граничні умови Борна-Кармана. Підрахунок  $k$ -станів. Література: Б. [1] (п.п. 3.6), Д. [5].

Лекція 8. Матричний елемент імовірності переходу електронів із станів  $k$  в  $k'$  при їх взаємодії з періодичним потенціалом. Дифракція електронів на атомах ґратки та їх рух в ідеальному кристалі. Література: Б.[1] (п.п. 4.1, 4.2), Д. [5].

Лекція 9. Енергетична дисперсія електронів. Розв'язок рівняння Шрьодінгера методом розкладання хвильових функцій квазівільних електронів по векторах оберненої ґратки у вигляді системи рівнянь для визначення коефіцієнтів розкладу та власних значень енергії  $E(k)$ . Література: Б.[1] (п.п, 4.3), Д. [5, 14].

Лекція 10. Визначення енергетичної дисперсії  $E(k)$  та хвильових функцій електронів поблизу Брегівських площин відбивання  $k=1/2G$  і енергетична щільність. Література: Б.[1] (п.п, 3.5), Д. [5, 14].

Лекція 11. Визначення енергетичної дисперсії  $E(k)$  та хвильових функцій локалізованих електронів методом сильного зв'язку. Література: Б.[1] (п.п, 4.4-4.4.2), Д. [14].

Лекція 12. Класифікація твердих тіл за структурою зон та типами зв'язків. Енергія зв'язку в іонних, іонно-ковалентних та металічних кристалах. Література: Б.[1] (п.п, 5.1-5.3), Д. [5].

Лекція 13. Енергія зв'язку в іонних, іонно-ковалентних та металічних кристалах. Правило Юм-Розері та модель жорстких зон. Щільність електронних станів. Література: Б.[1] (п.п, 5.3, 5.4), Д. [5].

Лекція 14. Статистика Фермі для електронів в твердих тілах носіїв заряду в напівпровідниках. Енергетичний розподіл та щільність  $k$ -станів. Електронна теплоємність. Література: Б.[1] (п.п, 5.5 – 5.7), Д. [5].

Лекція 15. Динамічна теорія і рівняння руху ґратки. Силовий тензор та система рівнянь для визначення компонент атомних зміщень і частот коливань. Література: Б.[1] (п.п, 6.1), Д. [5].

Лекція 16. Хвильовий вектор коливань ґратки. Спектри акустичних і оптичних віток коливань одномірних одноатомних та двоатомних ланцюжків. Література: Б.[1] (п.п, 6.2) Д. [5].

Лекція 17. Фонони. Питома теплоємність. Модель Дебая. Закон Дюлонга і Пті та низькотемпературний кубічний закон теплоємності ( $T^3$ ). Література: Б.[1] (п.п, 6.3), Д. [5].

Лекція 18. Зміна функції розподілу частинок при їх стаціонарному русі. Кінетичне рівняння Больцмана. Література: Б.[1] (п.п. 7. 1, 7.1.2 ), Д. [5].

Лекція 19. Електропровідність. Кінетичні коефіцієнти та теплопровідність. Закон Відемана – Фрапнца. Література: Б.[1] (п.п, 7.2, 7.3), Д. [5].

Лекція 20. Термоелектричні властивості та вплив магнітного поля на рух електронів в кристалах. Ефект Холла. Література: Б.[1] (п.п, 7.4, 7.5), Д. [5].

Лекція 21. Діамагнетизм матеріалів з заповненими оболонками атомів і молекул. Правила Хунда. Література: Б.[1] (розділ 8, п.п, 8.1, 8.2), Д. [5, 13-15].

Лекція 22. Парамагнетизм. Закон Кюрі. Спіновий парамагнетизм. Література: Б.[1] (розділ 8, п.п, 8.3), Д. [5, 13-15].

Лекція 23. Упорядкування магнітних моментів. Теорія молекулярного поля і закон Кюрі-Вейса. Феромагнетизм і обмінна взаємодія. Література: Б.[1] (розділ 8, п.п, 8.4 – 8.4.3), Д. [5, 13-15].

Лекція 24. Антиферо- і ферімагнетизм. Доменна структура магнітних матеріалів. Література: Б.[1] (розділ 8, п.п, 8.4.4 – 8.4.7), Д. [5, 13-15].

Лекція 25. Ефект Мейснера і рівняння Лондонів. Міжелектронна взаємодія і утворення куперівських пар. Література: Б.[1] (розділ 9, п.п, 9.3 - 9.5), Д. [5, 8, 14, 15].

Лекція 26. Основний стан надпровідника. Енергетична щільність і спектр елементарних збуджень та незгасаючі струми в надпровідниках. Література: Б.[1] (розділ 9, п.п, 9.6), Д. [5, 8, 14, 15].

Лекція 27. Квантування магнітного потоку та тунельні ефекти в надпровідниках. Надпровідники I і II роду. Література: Б.[1] (розділ 9, п.п, 9.7, 9.9), Д. [5, 14, 15].

Для ефективного засвоєння навчального матеріалу тем лекційних занять необхідно детально опрацювати зміст кожної з прочитаних лекцій, висвітлених в базовій літературі, зокрема в [1], уявляючи описані явища і фізичні процеси. Для усвідомлення фізичного змісту математичних співвідношень між фізичними величинами, студентам слід повторювати виведення формул, використовуючи базову та іншу літературу.

## **Тематика практичних занять**

Тривалість кожного практичного заняття 2 години.

Практична робота 1. Знаходження мінімуму потенціалів парної взаємодії для інертних рідин і рідких металів та визначення в них функції радіального розподілу атомів за інтенсивністю розсіяних рентгенівських променів

Практична робота 2. Знаходження внутрішньою енергії і отримання рівняння стану рідин на основі функцій розподілу і парного потенціалу взаємодії молекул.

Практична робота 3. Визначення трійки базисних векторів, побудова оберненої ґратки та знаходження індексів Міллера, відповідних векторам оберненої ґратки в ОЦК, ГЦК і ГК кристалічних структурах.

Практична робота 4. Отримання системи рівнянь для визначення власних значень енергій квазівільних електронів та побудова їх енергетичної дисперсії в зведеній зоні Бріллюена.

Практична робота 5. Отримання системи рівнянь для визначення власних значень енергій локалізованих електронів методом сильного зв'язку.

Практична робота 6. Енергія зв'язку в іонних, іонно-ковалентних та металічних кристалах. Правило Юм-Розері

Практична робота 7. Статистика Фермі для електронів в твердих тілах та носіїв заряду в напівпровідниках. Енергетичний розподіл та щільність  $k$ -станів. Електронна теплоємність.

Практична робота 8. Спектри акустичних і оптичних віток коливань одномірних одно- та двоатомних ланцюжків. Фонони. Питома теплоємність. Модель Дебая. Закон Дюлонга і Пті та низько-температурний кубічний закон теплоємності ( $T^3$ ).

Практична робота 9. Визначення електропровідності, довжина вільного пробігу електрона та часу релаксації в твердих тілах на основі кінетичного рівняння.

Практична робота 10. Визначення параметрів діа- та парамагнітних властивостей твердих тіл. Закон Кюрі.

Практична робота 11. Молекулярне поле Вейса, обмінна взаємодія феро-, антиферо- та фері магнетизм. Доменна структура областей намагніченості.

Практична робота 12. Ефект Мейснера і рівняння Лондонів. Міжелектронна взаємодія і утворення куперівських пар. Довжина когерентності. Енергетична щільність і спектр елементарних збуджень та незгасаючі струми в надпровідниках.

Практична робота 13. Квантування магнітного потоку та тунельні ефекти Джозефсона в надпровідниках. Надпровідники I і II роду.

Практична робота 14. Модульна контрольна робота

## **6. Самостійна робота студента**

Самостійна робота студентів (загальна тривалість 98 годин) з дисципліни полягає в:

- самостійному опрацюванні матеріалу за темами при підготовці до кожної лекції – 24 годин;
- самостійному опрацюванні додаткових літературних джерел для розширення розуміння лекційних тем та аналізу взаємного зв'язку між властивостями матеріалів – 4 години;
- підготовці до виконання практичних робіт – 28 годин;
- підготовці до модульної контрольної роботи – 12 годин;
- підготовці до підсумкової атестації – екзамену – 30 годин.

## **Політика та контроль**

### **7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)**

Система вимог, які ставляться перед студентом:

- Опрацювання матеріалу по всіх темах лекційних та практичних занять є обов'язковою.

- Під час усіх видів аудиторних занять забороняється використання мобільних телефонів у звуковому режимі, дозволяється обмежене використання для виконання завдань або пошуку додаткової інформації.
- Результати виконаних практичних робіт оформлюються у вигляді звітів, написаних рід руки. Звіт супроводжується формулами, графіками – елементами, які підтверджують виконання завдань та одержані результати. За дистанційної форми навчання звіт може виконуватися як «від руки», так і в будь-якому текстовому редакторі і на перевірку надається у роздрукованому вигляді. Безпосередній захист відбувається у формі співбесіди, запитань-відповідей.
- Заохочувальні бали можуть бути призначені за особливі успіхи у навчанні – переважно використання методик оптимального вибору для розв'язання реальних завдань. Сумарна кількість заохочувальних балів може складати від 1 до 10 балів.
- Політикою дедлайнів передбачається необхідність своєчасного виконання завдань. Усі письмові документи мають бути захищені до закінчення теоретичного навчання в семестрі.
- Усі учасники освітнього процесу: викладачі і студенти в процесі роботи вивчення дисципліни мають керуватись принципами академічної доброчесності, передбаченими «Кодексом честі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»» <https://kpi.ua/code>.

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

Рейтинг з дисципліни (РД) враховує роботу студента протягом семестру та рівень знань і навичок, виявлених ним на екзамені.

Рейтинг з дисципліни формується як сума балів, нарахованих студенту за:

- результатами виконання завдань на практичних заняттях,
- виконанням модульної контрольної роботи (МКР),
- виконання завдань отриманих на екзамені.

Рейтинг з дисципліни розраховується за формулою рейтингова оцінка ( $RD$ ) з кредитного модуля формується як сума балів поточної успішності навчання – стартового рейтингу ( $r_C$ ) та балів отриманих на екзамені ( $r_I$ ):

$$RD = r_C + r_I.$$

$r_C$  – стартовий рейтинг,  $r_I$  – екзаменаційний рейтинг.

Стартовий рейтинг є сумарною оцінкою за виконання студентом завдань під час **поточного контролю**, а саме

$$r_C = \sum_k r_{II} + r_M$$

$r_{II}$  – бал отриманий на практичних заняттях,  $r_M$  – бал отриманий на модульній контрольній роботі. Максимальна кількість балів, яку може отримати студент під час поточного контролю складає 50 балів.

Максимальна кількість балів отримана на практичних заняттях складає:

$$\sum r_{II} = 3 \text{ бали} \times 13 \text{ занятть} = 39 \text{ балів}$$

Критерії оцінювання результатів роботи на практичних заняттях таблиці 1.



**Табл. 1.** Критерії оцінювання та кількість балів за роботу на практичних заняттях.

<b>Критерії</b>	<b>Кількість балів</b>
повна відповідь ( відмінно)	3
неповна відповідь (добре)	2,5
неповна відповідь (задовільно)	2
незадовільна відповідь	1 і менше.

Максимальна кількість балів, яку може отримати студент за МКР складає 11 балів. Критерії оцінювання результатів написання МКР представлені в таблиці 2.

**Табл. 2.** Критерії оцінювання та кількість балів за МКР.

<b>Критерії</b>	<b>Кількість балів</b>
повна відповідь ( відмінно)	9-11
неповна відповідь (добре)	6-8
неповна відповідь (задовільно)	3-5
незадовільна відповідь	менше 3

**Календарний контроль:** проводиться двічі на семестр як моніторинг поточного стану виконання вимог силлабусу. Для успішного проходження першої семестрової атестації рейтинговий бал студента за роботу на практичних заняттях має становити не нижче 15 балів, для другої – 25 балів разом з оцінкою за модульну контрольну роботу.

**Семестровий контроль** –екзамен  $r_1$  студент отримує в результаті складання екзамену у письмовій, усній або змішаній формі. Критерії оцінювання на екзамені представлені в таблиці 3.

**Табл. 3.** Критерії оцінювання та кількість балів на іспиті.

<b>Критерії</b>	<b>Кількість балів</b>
студент демонструє повні і глибокі знання навчального матеріалу, вміє правильно використовувати знання	45-50
студент демонструє хороші знання навчального матеріалу, вміє правильно використовувати знання	44-35
студент демонструє хороші знання навчального матеріалу, але допускає деякі неточності, щодо використання отриманих знань	25-34
студент демонструє задовільні знання навчального матеріалу, але допускає суттєві неточності, щодо використання отриманих знань	15-24
студент демонструє задовільні засвоїв теоретичний матеріал, але допускає суттєві помилки, щодо використання отриманих знань	10-14
незадовільне знання теорії та відсутність вміння та навичок у вирішенні поставлених завдань	1-9

**Умови допуску до семестрового контролю:** семестровий рейтинг більше 25 балів.

Сумарний рейтингова оцінка оцінюється за університетською шкалою, таблиці оцінки знань за якою представлена на таблиці 4.

За умови карантину екзамен проводиться у дистанційному режимі на платформі **meet.google**, а за відсутності карантину він відбувається в призначених аудиторіях. При цьому:

- студентам видаються білети, в яких наведено 3 питання із списку Додатку А.
- протягом однієї години студенти письмово надають відповіді на поставлені питання і по закінченню відведеного на підготовку часу студенти здають свої роботи.
- кожен студент пояснює викладені ним відповіді для з'ясування розуміння предмету.
- при виникненні недостатнього розуміння або при бажанні студента підняти бал оцінки студенту задаються додаткові питання, які фіксуються на письмовій відповіді.

В дистанційному режимі:

- викладач виставляє по черзі презентацію довільно названих студентами білетів, з яких вони роблять скріншоти і готуються.

- після закінчення відведеного на підготовку студентам часу, вони висилають файли фотокопій своїх відповідей на мою електронну пошту

- в режимі онлайн спілкування студенти дають пояснення своїх відповідей аналогічно як в аудиторному режимі.

**Табл. 4.** Таблиця відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою.

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

## **9. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)**

**Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):**

**Складено** професором каф. Високотемпературних матеріалів та порошкової металургії, д.ф.м.н., професор, Зауличний Ярослав Васильович

**Ухвалено** кафедрою Високотемпературних матеріалів та порошкової металургії  
(протокол № 21 від 8 липня 2022 р.)

**Погоджено** Методичною комісією Інституту матеріалознавства та зварювання ім. Є.О.Патона  
(протокол № 10/22 від 10 липня 2022 р.)

## Додаток А.

### Перелік питань до екзамену з дисципліни «Фізика конденсованого стану матеріалів»

1. Предмет фізики конденсованого стану. I і II закони термодинаміки.
2. Фізичний та статистичний зміст ентропії і внутрішньої енергії.
3. Вільні енергії Гельмгольца та Гіббса.
4. Класифікація речовин в рідкому стані на основі типів сил міжатомної взаємодії.
5. Теорія парних потенціалів. взаємодії, між електронейтральними молекулами.
6. Парний потенціал Ленарда-Джонса.
7. Парний потенціал Марча в рідких металах.
8. Статистична теорія будови рідини.
9. Функція радіального розподілу атомів і молекул в рідинах.
10. Вивести формулу внутрішньої енергії рідин.
11. Фізична суть віріала, довести теорему віріала і показати, що вона визначає.
12. Грунтуючись на теоремі віріала вивести рівняння стану рідин.
13. Упорядкування атомів і молекул в симетричні ґратки
14. Типи твердих тіл і трансляційна симетрія кристалів. Вектор трансляції.
15. Елементарна і примітивна комірки в кристалах.
16. Рівняння Шрьодінгера для кристалів. Фізична суть хвильового вектора і його зв'язок з імпульсом та енергією електронів.
17. Періодичність властивостей кристалів і походження координат векторів оберненої ґратки внаслідок розкладання цих функцій в ряд Фур'є.
18. Визначте скалярний добуток векторів трансляції та оберненої ґратки.
19. Визначте найменші вектори оберненої ґратки, вкажіть базис оберненої ґратки і запишіть в цьому базисі довільний вектор оберненої ґратки.
20. Визначте базисні вектори  $b_1, b_2, b_3$  через вектори прямої ґратки  $a_1, a_2, a_3$ .
21. З'ясуйте, що визначають орієнтації векторів оберненої ґратки.
22. З'ясуйте, що визначають абсолютні величини векторів оберненої ґратки.
23. Покажіть зв'язок векторів оберненої ґратки з індексами Міллера.
24. Інваріантність рівняння Шрьодінгера відносно трансляцій в кристалічній ґратці. Теорема Блоха.
25.  $k$ -простір і належність до нього векторів оберненої ґратки. Фізичний зміст  $k$ -векторів і квазіімпульси.
26. Зведення  $k$ -станів до зони Бріллюена.
27. Циклічні граничні умови Борна-Кармана. Підрахунок  $k$ -станів.
28. Визначте об'єм елементарної комірки оберненої ґратки та кількість  $k$ -векторів яка припадає на одиницю цього об'єму.
29. Визначте умову дифракції електронів на атомах ґратки з матричного елемента імовірності переходу електронів із станів  $k$  в  $k'$  при їх взаємодії з періодичним потенціалом.
30. Отримайте рівняння Брегга і з'ясуйте напрями дифракції електронів при різних співвідношеннях модулів  $|k|$  та  $|g|$  та характер їх руху в кристалі.
31. Отримайте систему рівнянь для визначення залежності від  $k$  власних значень енергії  $\mathcal{E}(k)$  та  $\alpha_{k-g}$  коефіцієнтів розкладання власних хвильових функцій квазівільних електронів.

32. Знайти розв'язок системи рівнянь для визначення залежності від  $k$  власних значень енергії  $\epsilon(k)$  та  $\alpha k$ - $g$ - коефіцієнтів розкладання власних хвильових функцій квазівільних електронів для лінійної оберненої ґратки  $G=g+g'$ , коли  $G=0+g'$  і  $G=g+0$ .
33. Провести аналіз залежності  $\epsilon(k)$  при  $k$  близькому до 0 та при  $k=(1/2)G$ .
34. Визначити  $\alpha(1/2)G$ - $g$ - коефіцієнти розкладання власних хвильових функцій квазівільних електронів знайти їх аналітичний вигляд.
35. Умови застосування методу сильного зв'язку.
36. Визначення енергетичної дисперсії  $\epsilon(k)$  та хвильових функцій локалізованих електронів методом сильного зв'язку.
37. Структурно-зонна класифікація твердих тіл.
38. Кристали з ковалентними зв'язками.
39. Ковалентно-іонні тверді тіла.
40. Іонно-ковалентні та іонні сполуки.
41. Енергія зв'язку в іонних та іонно-ковалентних кристалах. Стала Маделунга.
42. Енергія зв'язку в металах.
43. Правило Юм-Розері та модель жорстких зон.
44. Енергетичний розподіл та щільність  $k$ -станів.
45. Статистика Фермі для електронів в твердих тілах
46. Статистика носіїв заряду в напівпровідниках.
47. Електронна теплоємність.
48. Динамічна теорія і рівняння руху ґратки. Хвильовий вектор коливань ґратки.
49. Силовий тензор та система рівнянь для визначення компонент атомних зміщень і частот коливань.
50. Спектри акустичних віток коливань одномірних одноатомних ланцюжків.
51. Спектри акустичних і оптичних віток коливань одномірних двоатомних ланцюжків.
52. Фонони. Питома теплоємність.
53. Модель Дебая. Закон Дюлонга і Пті та низько-температурний кубічний закон теплоємності ( $T^3$ ).
54. Зміна функції розподілу частинок при їх стаціонарному русі.
55. Кінетичне рівняння Больцмана.
56. Електропровідність.
57. Зміщення поверхні та розподілу Фермі під дією напруженості електричного поля.
58. Перенос енергії при наявності температурного градієнта. Кінетичні коефіцієнти.
59. Теплопровідність. Закон Відемана – Фрапнца.
60. Термоелектричні властивості кристалів.
61. Вплив магнітного поля на рух електронів в кристалах.
62. Ефект Холла.
63. Отримайте співвідношення між магнітним та механічним моментами орбітального руху електрона.
64. Діамагнетизм матеріалів з заповненими оболонками атомів і молекул. Вектор індукції магнітного поля перпендикулярний до площини орбіти електрона.
65. Діамагнетизм матеріалів з заповненими оболонками атомів і молекул. Прецесійний ларморівський рух електронів в магнітному полі.
66. Заповнення електронних рівнів атомів. Правила Хунда.
67. Парамагнітна сприйнятливість.

68. *Спіновий парамагнетизм Паулі.*
69. *Парамагнетизм матеріалів, щомістять іони з частково заповненою оболонкою. Закон Кюрі.*
70. *Упорядкування магнітних моментів. Теорія молекулярного поля і закон Кюрі-Вейса. Феромагнетизм.*
71. *Електронно-структурна природа феромагнетизму. Обмінна взаємодія.*
72. *Ферімагнетизм і антиферомагнетизм.*
73. *Доменна структура магнітних матеріалів.*
74. *Надпровідність. Ефект Мейснера і рівняння Лондонів.*
75. *Міжелектронна взаємодія і утворення куперівських пар в надпровідному стані.*
76. *Основний стан надпровідника.*
77. *Енергетична щілина і спектр елементарних збуджень в надпровіднику.*
78. *Незгасаючі струми в надпровідниках.*
79. *Квантування магнітного потоку в надпровідниках.*
80. *Тунельні ефекти в надпровідниках.*
81. *Надпровідники I і II роду.*

## Додаток Б.

### Перелік питань до модульної контрольної роботи з дисципліни фізика конденсованого стану матеріалів.

1. Поясніть фізичний та статистичний зміст ентропії і вільної енергії.
2. Класифікуйте речовини в рідкому стані на основі типів сил міжатомної взаємодії.
3. До яких рідин застосовують парний потенціал Ленарда-Джонс, а до яких парний потенціал Марча.
4. Довести теорему віріала показати її суть та ґрунтуючись на ній вивести рівняння стану рідин.
5. Покажіть фізичну суть хвильового вектора і його зв'язок з імпульсом та енергією електронів.
6. З'ясуйте походження координат векторів оберненої ґратки.
7. Визначте базисні вектори  $b_1, b_2, b_3$  через вектори прямої ґратки  $a_1, a_2, a_3$ .
8. З'ясуйте, що визначають орієнтації та абсолютні величини векторів оберненої ґратки..
9. Доведіть теорему Блоха та розкрийте фізичний зміст  $k$ -векторів і квазіімпульсів.
10. Застосуйте циклічні граничні умови Борна-Кармана до підрахунку  $k$ -станів
11. Отримайте рівняння Брегга і з'ясуйте напрями дифракції електронів при різних співвідношеннях модулів  $|k|$  та  $|g|$  та характер їх руху в кристалі.
12. Проведіть аналіз залежності  $\mathcal{E}(k)$  при  $k$  близькому до 0 та при  $k=(1/2)G$ .
13. Дайте структурно-зонну класифікація твердих тіл.
14. Класифікуйте кристали за типами зв'язку.
15. Розкрийте суть енергії зв'язку в металах, в іонних та іонно-ковалентних кристалах та сталюї Маделунга.
16. Покажіть, що таке енергетичний розподіл та виведіть формулу для щільності  $k$ -станів.
17. Розкрийте суть статистики Фермі для електронів в твердих тілах і носіїв заряду в напівпровідниках.
18. Отримайте спектри акустичних і оптичних віток коливань одномірних двоатомних ланцюжків.
19. Отримайте формулу для об'ємної теплоємності в моделі Дебая і її температурну залежність поблизу абсолютного нуля.
20. Розкрийте рушійні сили зміни функції розподілу частинок при їх стаціонарному русі.
21. Доведіть тензорний арактер електропровідності.
22. Розкрийте природу термоелектричних властивостей кристалів.
23. Отримайте діамагнітний момент матеріалів з заповненими оболонками атомів і молекул при прецесійному ларморівському русі електронів в магнітному полі.
24. Розкрийте суть парамагнетизму матеріалів, щомістять іони з частково заповненою оболонкою. І закону Кюрі.
25. З'ясуйте суть теорії молекулярного поля і закон Кюрі-Вейса для феромагнетизму.
26. Розкрийте електронно-структурну природу феромагнетизму і суть обмінної взаємодії.
27. Поясніть природу ферімагнетизму і антиферомагнетизму
28. Поясніть будову доменної структури магнітних матеріалів.

29. Розкрийте явище надпровідності, ефекту Мейснера і рівняння Лондонів.
30. Розкрийте механізм і утворення куперівських пар в надпровідному стані.
31. З'ясуйте природу квантування магнітного потоку в надпровідниках.
32. Опишіть відмінність між надпровідниками I і II роду.