

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
Кафедра фізики кристалів

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Декан
фізичного факультету

Руслан БОВК
“ _____ ” _____ 2023 р.

Робоча програма навчальної дисципліни

Загальний курс “ОСНОВИ ФІЗИКИ КОНДЕНСОВАНОГО СТАНУ”

рівень вищої освіти _____ **перший (бакалавр)** _____
галузь знань _____ **10 – природничі науки** _____
(шифр і назва)
спеціальність _____ **104 – фізика та астрономія** _____
(шифр і назва)
освітня програма _____ **фізика** _____
(шифр і назва)
спеціалізація _____
(шифр і назва)
вид дисципліни _____ **обов'язкова** _____
(обов'язкова / за вибором)
факультет _____ **фізичний** _____

2023/2024 навчальний рік

Програму рекомендовано до затвердження Вченою радою фізичного факультету

30 серпня 2023 року, протокол № 6

РОЗРОБНИКИ ПРОГРАМИ: Бойко Ю.І., докт. фіз.- мат. наук, професор кафедри фізики кристалів.

Програму схвалено на засіданні кафедри фізики кристалів

Протокол № 6 від 28 серпня 2023 року

Завідувач кафедри Гриньов Б. В.

(підпис)

Програму погоджено з гарантом освітньої (професійної/наукової) програми (керівником проектної групи) _____

назва освітньої програми

Гарант освітньої (професійної/наукової) програми
(керівник проектної групи)

Лазоренко О.В.

(підпис)

Програму погоджено методичною комісією фізичного факультету

Протокол № 7 від 29 серпня 2023 року

Голова методичної комісії

Макаровський М.О.

(підпис)

ВСТУП

Програма навчальної дисципліни “ОСНОВИ ФІЗИКИ КОНДЕНСОВАНОГО СТАНУ” складена відповідно до освітньо-професійної програми підготовки

_____перший (бакалавр)_____

(назва рівня вищої освіти)

спеціальності (напряму) _____104 – фізика та астрономія _____

спеціалізації _____

1. Опис навчальної дисципліни

1.1. Метою викладання навчальної дисципліни є досконало ознайомити з експериментальними даними та вивчення фізичних законів формування атомної та електронної структури конденсованих середовищ, а також вивчення фізичних властивостей цих середовищ (теплових, електричних, магнітних, механічних, оптичних, тощо)

1.2. Основними завданнями вивчення дисципліни є щотижнева лекційна робота впродовж 6-го семестру, самостійна робота студента, виконання індивідуальних контрольних завдань.

Компетентності, що забезпечуються дисципліною:

- Здатність розв’язувати складні спеціалізовані задачі та практичні проблеми з фізики та/або астрономії у професійній діяльності або у процесі подальшого навчання, що передбачає застосування певних теорій і методів фізики та/або астрономії і характеризується складністю та невизначеністю умов. (ІК)
- Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях. (ЗК 2)
- Навички використання інформаційних і комунікаційних технологій. (ЗК 3)
- Здатність приймати обґрунтовані рішення. (ЗК 5)
- Здатність оцінювати та забезпечувати якість виконуваних робіт. (ЗК 8)
- Визначеність і наполегливість щодо поставлених завдань і взятих обов’язків. (ЗК 9)
- Здатність спілкуватися державною мовою як усно, так і письмово. (ЗК 12)
- Знання і розуміння теоретичного та експериментального базису сучасної фізики та астрономії. (ФК 1)
- Здатність використовувати базові знання з фізики та астрономії для розуміння будови та поведінки природних і штучних об’єктів, законів існування та еволюції Всесвіту. (ФК 7)
- Здатність працювати з джерелами навчальної та наукової інформації. (ФК 9)
- Здатність самостійно навчатися і опановувати нові знання з фізики, астрономії та суміжних галузей. (ФК 10)
- Усвідомлення професійних етичних аспектів фізичних та астрономічних досліджень. (ФК 12)
- Орієнтація на найвищі наукові стандарти – обізнаність щодо фундаментальних відкриттів та теорій, які суттєво вплинули на розвиток фізики, астрономії та інших природничих наук. (ФК 13)

1.3. Кількість кредитів – 4

1.4. Загальна кількість годин – 120

1.5. Характеристика навчальної дисципліни	
нормована	
Денна форма навчання	Заочна (дистанційна) форма

		навчання
Рік підготовки		
3-й		-й
Семестр		
6-й		-й
Лекції		
64 год.		год.
Практичні, семінарські заняття		
	год.	год.
Лабораторні заняття		
	год.	год.
Самостійна робота		
56 год.		год.
Індивідуальні завдання		
1 контрольна робота		

1.6. Згідно з вимогами освітньо-професійної програми студенти повинні досягти таких результатів навчання:

знати: атомну та електронну структуру конденсованих середовищ, фізичну природу її формування та зв'язок структурного стану з різноманітними фізичними властивостями цих середовищ.

вміти: на основі фізичних законів науково прогнозувати формування тієї чи іншої структури різноманітних конденсованих середовищ, складовими яких є довільні хімічні елементи, а також вміти прогнозувати оптимальне використання на практиці конденсовані середовища всіх типів для різноманітних технічних приладів.

Програмні результати навчання, що забезпечуються дисципліною:

- Знати, розуміти та вміти застосовувати на базовому рівні основні положення загальної та теоретичної фізики, зокрема, класичної, релятивістської та квантової механіки, молекулярної фізики та термодинаміки, електромагнетизму, хвильової та квантової оптики, фізики атома та атомного ядра для встановлення, аналізу, тлумачення, пояснення й класифікації суті та механізмів різноманітних фізичних явищ і процесів для розв'язування складних спеціалізованих задач та практичних проблем з фізики та/або астрономії. (ПРН 1)
- Знати і розуміти фізичні основи астрономічних явищ: аналізувати, тлумачити, пояснювати і класифікувати будову та еволюцію астрономічних об'єктів Всесвіту (планет, зір, планетних систем, галактик тощо), а також основні фізичні процеси, які відбуваються в них. (ПРН 2)
- Знати і розуміти експериментальні основи фізики: аналізувати, описувати, тлумачити та пояснювати основні експериментальні підтвердження існуючих фізичних теорій. (ПРН 3)
- Знати основні актуальні проблеми сучасної фізики та астрономії. (ПРН 5)
- Оцінювати вплив новітніх відкриттів на розвиток сучасної фізики та астрономії. (ПРН 6)
- Розуміти, аналізувати і пояснювати нові наукові результати, одержані у ході проведення фізичних та астрономічних досліджень відповідно до спеціалізації. (ПРН 7)
- Мати базові навички самостійного навчання: вміти відшукувати потрібну інформацію в друкованих та електронних джерелах, аналізувати, систематизувати, розуміти, тлумачити та використовувати її для вирішення наукових і прикладних завдань. (ПРН 8)
- Вміти упорядковувати, тлумачити та узагальнювати одержані наукові та практичні результати, робити висновки. (ПРН 11)
- Розуміти зв'язок фізики та/або астрономії з іншими природничими та інженерними науками, бути обізнаним з окремими (відповідно до спеціалізації) основними поняттями прикладної

фізики, матеріалознавства, інженерії, хімії, біології тощо, а також з окремими об'єктами (технологічними процесами) та природними явищами, що є предметом дослідження інших наук і, водночас, можуть бути предметами фізичних або астрономічних досліджень. (ПРН 13)

- Знати і розуміти роль і місце фізики, астрономії та інших природничих наук у загальній системі знань про природу та суспільство, у розвитку техніки й технологій та у формуванні сучасного наукового світогляду. (ПРН 17)
- Розуміти значення фізичних досліджень для забезпечення сталого розвитку суспільства. (ПРН 22)
- Розуміти історію та закономірності розвитку фізики та астрономії. (ПРН 23)
- Розуміти місце фізики та астрономії у загальній системі знань про природу і суспільство та у розвитку суспільства, техніки і технологій. (ПРН 24)

2. Тематичний план навчальної дисципліни

Розділ 1. Атомна та електронна структура конденсованих середовищ. Фізична природа сил зв'язку та енергія взаємодії між атомами. Роль електронної підсистеми при формуванні конденсованого середовища.

Тема 1. Структура конденсованих середовищ. Аморфна та кристалічна структура. Рідкі кристали. Енергетичні критерії та ознаки різних конденсованих структур.

Тема 2. Експериментальні методи дослідження структури конденсованих середовищ. Рентгенографія. Закон Вульфа – Брега для кристалічної структури. Електронна мікроскопія. Нейтронографія. Оптичні методи.

Тема 3. Типи енергії зв'язку твердих кристалічних структур: молекулярна, іонна, металева, ковалентна. Загальні характеристики. Характерні фізичні властивості, які притаманні для кожного типу зв'язку.

Тема 4. Квантово – механічний підхід при описанні молекулярних кристалів. Квантовий осцилятор. Нулева енергія квантової частки. Обчислювання енергії зв'язку між молекулами за Ван –дер – Ваальсом.

Тема 5. Іоний зв'язок. Фізична природа сил притягання та відторгнення. Константа Маделунга. Потенціал Борна. Ізотермічна стисливість. Об'ємний модуль пружності. Обчислювання енергії зв'язку між іонами з протилежними електричними зарядами по емпіричному методу Борна.

Тема 6. Ковалентний зв'язок. Постулати Бора та обчислювання енергії зв'язку ковалентних кристалів з врахуванням об'єднання електронів на кожному парі атомів. Врахування кінетичної та потенціальної енергії електронів.

Тема 7. Колективна взаємодія між атомами та електронами в металах. Оцінка середньої енергії віртуальних локалізованих електронів та об'єднаних електронів в металічних кристалах. Обчислювання тиску електронного «газу» в металах. Енергія зв'язку атомів в металі.

Розділ 2. Теплові та електричні властивості твердих тіл.

Тема 1. Теплоємність твердого тіла. Теплоємність діелектриків при підвищених температурах. Експериментальні дані. Статистика Максвелла – Больцмана. Закон Дюлонга – Пті.

Тема 2. Теплоємність твердих тіл при низьких температурах. Квантова теорія теплоємності атомів (теорії Ейнштейна та Дебая). Фонони в кристалах та їх взаємодія. Характеристична температура Дебая.

Тема 3. Теплоємність металів. Роль електронів. Статистика Фермі – Дірака. Енергія Фермі. Критична температура, при якій зрівнюються електронна та атомна складові теплоємності в металах.

Тема 4. Теплове розширення твердого кристалічного тіла. Анггармонізм коливання атомів. Зв'язок коефіцієнту теплового розширення з іншими константами твердого тіла.

Тема 5. Теплопровідність твердих кристалічних тіл. Теплопровідність діелектричних кристалів. Експериментальні дані. Класична теорія теплопровідності. Фонон – фононна взаємодія та розсіювання фононів при підвищених температурах. Теплоємність кристалів при низьких температурах.

Тема 6. Теплопровідність металів. Довжина пробігу електрона. Взаємодія електронів та фононів. Розсіювання електронів на фононах при підвищених температурах. Розсіювання електронів на атомах сторонніх елементів при низьких температурах.

Тема 7. Електропровідність металів. Закон Ома. Класична теорія. Правило Матіссена. Закон Відемана – Франца. Врахування квантових властивостей електронів для пояснення температурної залежності електропровідності в металах.

Тема 8. Загальна інформація про електричну провідність іонних кристалів. Експериментальні дані. Температурна залежність коефіцієнту електропровідності іонних кристалів. Елементарний заряд носія електричного току. Роль сторонніх атомів.

Тема 9. Дифузія в кристалах. Точкові дефекти. Енергія активації дифузії. Співвідношення Ареніуса. Закони Фіка. Експериментальні методи вивчення дифузії в кристалічних тілах.

Тема 10. Спінання кристалічного порошку. Керамічні матеріали. Механізми транспорту речовини при спінанні. Лапласовський тиск. Кінетичні закономірності спінання. Макроскопічні дефекти (пори) в керамічному середовищі та їх видалення.

Тема 11. Теорія Нернста – Ейнштейна для електропровідності іонних кристалів. Зв'язок між коефіцієнтом дифузії атомів та коефіцієнтом електропровідності в іонних кристалах. Вплив сторонніх атомів з іншою валентністю

Розділ 3. Дефекти в кристалах. Механічні властивості твердих тіл.

Тема 1. Точкові дефекти в кристалах. Вакансії Шотки та пари Френкеля. Рівноважна концентрація точкових дефектів. Методи експериментального визначення енергії формування точкового дефекту та їх концентрації.

Тема 2. Механічні властивості кристалічних тіл при високих температурах. Дифузійна повзучість кристалів. Формула Набарро – Херінга для монокристалів.

Тема 3. Лінійні дефекти в кристалічних тілах. Дислокації. Вектор Бюргерса. Бар'єр Пайерлса. Механізми переміщення дислокацій (ковзання, переповзання). Зв'язок швидкості пластичної деформації з густиною дислокацій.

Тема 4. Поле напруження дислокації. Сила, яка діє на дислокацію в зовнішньому полі напруження.

Тема 5. Енергія дислокації. Взаємодія дислокацій. Сила зеркального притягання дислокації поблизу поверхні кристалу.

Тема 6. Швидкість пластичної деформації кристалічного тіла механізмом ковзання та механізмом дифузійного переповзання дислокацій. Механізм надпластичності кристалів та роль границь зерен (двомірних дефектів кристалів) у цьому процесі (механізм Ешбі – Феррала).

Тема 7. Натяг дислокаційної лінії. Розмноження дислокацій. Джерело Франка –Ріда. Зміцнення кристалічних тіл. Роль сторонніх атомів. Зона Котрела.

Тема 8. Руйнування кристалів. Механізми гальмування дислокацій. Механізми руйнування кристалів: механізми Стро, Котрела та інші.

Розділ 4. Зонна теорія кристалічного тіла. Напівпровідники. Магнітні властивості твердого тіла.

Тема 1. Приближення сильного зв'язку між електронами та атомами в конденсованому середовищі. Модель квазі – вільних електронів. Походження енергетичної щільності. Електронні хвилі у періодичному потенціальному полі. Кількість енергетичних зон в енергетичному спектрі та енергетичних рівнів в енергетичній зоні.

Тема 2. Переміщення електрона в потенційному полі атомів. Ефективна маса електрона. Поняття дірки як носія електричного заряду. Заповнення енергетичних зон електронами: провідники, напівпровідники, ізолятори.

Тема 3. Напівпровідники. Діркові та електронні напівпровідники. Донорні та акцепторні рівні. Концентрація носіїв заряду та їх рухливість. Розподіл електронів за енергією. Температурна залежність коефіцієнту електричної провідності в напівпровідниках.

Тема 4. Фотопровідність напівпровідників. Червона межа фотопровідності. Ексітони. Люмінесценція. Технічні застосування напівпровідників.

Тема 5. Магнітні властивості твердого тіла. Парамагнетизм та діамагнетизм атомів. Теорії Лормора, Ланжевена. Закон Кюри.

Тема 6. Парамагнетизм електронів в металах по теорії Паулі. Діамагнетизм електронного «газу» в металах по теорії Ландау.

Тема 7. Фізика ферромагнетизму. Формальна теорія Ланжевена – Вейса. Закон Кюри – Вейса. Квантова теорія ферромагнетизму Френкеля. Феррімагнетики. Антиферромагнетики

3. Структура навчальної дисципліни

Назви розділів і тем	Кількість годин					
	Денна форма					
	Усього	у тому числі				
л		пл	ін.	с.р.		
1	2	3	4	5	6	7

Розділ 1. Атомна та електронна структура конденсованих середовищ. Фізична природа сил зв'язку та енергія взаємодії між атомами. Роль електронної підсистеми при формуванні конденсованого середовища.						
1. Структура конденсованих середовищ. Аморфна та кристалічна структура. Рідкі кристали. Енергетичні критерії та ознаки різних конденсованих структур.	3	2				1
2. Експериментальні методи дослідження структури конденсованих середовищ. Рентгенографія. Закон Вульфа – Брега для кристалічної структури. Електронна мікроскопія. Нейтронографія. Оптичні методи.	3	2				1
3. Типи енергії зв'язку твердих кристалічних структур: молекулярна, іонна, металева, ковалентна. Загальні характеристики. Характерні фізичні властивості, які притаманні для кожного типу зв'язку.	3	2				1
4. Квантово – механічний підхід при описанні молекулярних кристалів. Квантовий осцилятор. Нулева енергія квантової частки. Обчислювання енергії зв'язку між молекулами за Ван – дер – Ваальсом	4	2				2
5. Іоний зв'язок. Фізична природа сил притягання та відторгнення. Константа Маделунга. Потенціал Борна. Ізотермічна стисливість. Об'ємний модуль пружності. Обчислювання енергії зв'язку між іонами з протилежними електричними зарядами по емпіричному методу Борна	4	2				2
6. Ковалентний зв'язок. Постулати Бора та обчислювання енергії зв'язку ковалентних кристалів з врахуванням об'єднання електронів на кожному парі атомів. Врахування кінетичної та потенціальної енергії електронів	4	2				2
7. Колективна взаємодія між атомами та електронами в металах. Оцінка середньої енергії віртуальних локалізованих електронів та об'єднаних електронів в металічних кристалах. Обчислювання тиску електронного «газу» в металах. Енергія зв'язку атомів в металі	4	2				2
Разом за розділом 1	25	14				11
Розділ 2. Теплові та електричні властивості твердих тіл						
8. Теплоємність твердого тіла. Теплоємність діелектриків при підвищених температурах. Експериментальні дані. Статистика Максвелла – Больцмана. Закон Дюлонга – Пті.	3	2				1
9. Теплоємність твердих тіл при низьких температурах. Квантова теорія теплоємності атомів (теорії Ейнштейна та Дебая). Фонони в кристалах та їх взаємодія. Характеристична температура Дебая.	3	2				1
10. Теплоємність металів. Роль електронів. Статистика Фермі – Дірака. Енергія Фермі. Критична температура, при якій зрівнюються електронна та атомна складові теплоємності в металах.	3	2				1
11. Теплове розширення твердого кристалічного тіла. Ангармонізм коливання атомів. Зв'язок коефіцієнту теплового розширення з іншими константами твердого тіла.	3	1				2
12. Теплопровідність твердих кристалічних тіл. Теплопровідність діелектричних кристалів. Експериментальні дані. Класична теорія теплопровідності. Фонон – фононна взаємодія та розсіювання фононів при підвищених температурах. Теплоємність кристалів при низьких температурах	4	2				2
13. Теплопровідність металів. Довжина пробігу електрона. Взаємодія електронів та фононів. Розсіювання електронів на фононах при підвищених температурах. Розсіювання електронів на атомах сторонніх елементів при низьких температурах	4	2				2
14. Електропровідність металів. Закон Ома. Класична теорія. Правило Матіссена. Закон Відемана – Франца. Врахування квантових	4	2				2

властивостей електронів для пояснення температурної залежності електропровідності в металах					
15. Загальна інформація про електричну провідність іонних кристалів. Експериментальні дані. Температурна залежність коефіцієнту електропровідності іонних кристалів. Елементарний заряд носія електричного току. Роль сторонніх атомів	4	2			2
16. Дифузія в кристалах. Точкові дефекти. Енергія активації дифузії. Співвідношення Ареніуса. Закони Фіка. Експериментальні методи вивчення дифузії в кристалічних тілах	4	2			2
17. Спінання кристалічного порошку. Керамічні матеріали. Механізми транспорту речовини при спіканні. Лапласовський тиск. Кінетичні закономірності спікання. Макроскопічні дефекти (пори) в керамічному середовищі та їх видалення	4	2			2
18. Теорія Нернста – Ейнштейна для електропровідності іонних кристалів. Зв'язок між коефіцієнтом дифузії атомів та коефіцієнтом електропровідності в іонних кристалах. Вплив сторонніх атомів з іншою валентністю	4	2			2
Разом за розділом 2	40	21			19
Розділ 3. Дефекти в кристалах. Механічні властивості твердих тіл					
19. Точкові дефекти в кристалах. Вакансії Шотки та пари Френкеля. Рівноважна концентрація точкових дефектів. Методи експериментального визначення енергії формування точкового дефекту та їх концентрації.	3	1			2
20. Механічні властивості кристалічних тіл при високих температурах. Дифузійна повзучість кристалів. Формула Набарро – Херінга для монокристалів.	3	2			1
21. Лінійні дефекти в кристалічних тілах. Дислокації. Вектор Бюргерса. Бар'єр Пайерлса. Механізми переміщення дислокацій (ковзання, переповзання). Зв'язок швидкості пластичної деформації з густиною дислокацій	4	2			2
22. Поле напруження дислокації. Сила, яка діє на дислокацію в зовнішньому полі напруження	4	2			2
23. Енергія дислокації. Взаємодія дислокацій. Сила зеркального притягання дислокації поблизу поверхні кристалу	3	2			1
24. Швидкість пластичної деформації кристалічного тіла механізмом ковзання та механізмом дифузійного переповзання дислокацій. Механізм надпластичності кристалів та роль границь зерен (двомірних дефектів кристалів) у цьому процесі (механізм Ешбі – Феррала)	4	2			2
25. Натяг дислокаційної лінії. Розмноження дислокацій. Джерело Франка –Ріда. Зміцнення кристалічних тіл. Роль сторонніх атомів. Зона Котрела	4	2			2
26. Руйнування кристалів. Механізми гальмування дислокацій. Механізми руйнування кристалів: механізми Стро, Котрела та інші	4	2			2
Разом за розділом 3	29	15			14
Розділ 4. Зонна теорія кристалічного тіла. Напівпровідники. Магнітні властивості твердого тіла					
27. Приближення сильного зв'язку між електронами та атомами в конденсованому середовищі. Модель квазі – вільних електронів. Походження енергетичної щільності. Електронні хвилі у періодичному потенціальному полі. Кількість енергетичних зон в енергетичному спектрі та енергетичних рівнів в енергетичній зоні.	3	2			1

28. Переміщення електрона в потенційному полі атомів. Ефективна маса електрона. Поняття дірки як носія електричного заряду. Заповнення енергетичних зон електронами: провідники, напівпровідники, ізолятор.	3	2			1
29. Напівпровідники. Діркові та електронні напівпровідники. Донорні та акцепторні рівні. Концентрація носіїв заряду та їх рухливість. Розподіл електронів за енергією. Температурна залежність коефіцієнту електричної провідності в напівпровідниках.	4	2			2
30. Фотопровідність напівпровідників. Червона межа фотопровідності. Екситони. Люмінесценція. Технічні застосування напівпровідників.	4	2			2
31. Магнітні властивості твердого тіла. Парамагнетизм та діамагнетизм атомів. Теорії Лормора, Ланжевена. Закон Кюри	4	2			2
32. Парамагнетизм електронів в металах по теорії Паулі. Діамагнетизм електронного «газу» в металах по теорії Ландау	4	2			2
33. Фізика ферромагнетизму. Формальна теорія Ланжевена – Вейса. Закон Кюри – Вейса. Квантова теорія ферромагнетизму Френкеля. Феррімагнетики. Антиферромагнетики	4	2			1
Разом за розділом 4	26	14			11
контрольна робота					
Усього годин	120	64			56

5. Завдання для самостійної роботи

№	З використанням літературних джерел із списку рекомендованої літератури проробка питань, поставлених викладачем на лекції з теми:	Кількість годин
1	Структура конденсованих середовищ. Аморфна та кристалічна структура. Рідкі кристали. Енергетичні критерії та ознаки різних конденсованих структур.	1
2	Експериментальні методи дослідження структури конденсованих середовищ. Рентгенографія. Закон Вульфа – Брега для кристалічної структури. Електронна мікроскопія. Нейтронографія. Оптичні методи.	1
3	Типи енергії зв'язку твердих кристалічних структур: молекулярна, іонна, металева, ковалентна. Загальні характеристики. Характерні фізичні властивості, які притаманні для кожного типу зв'язку.	1
4	Квантово – механічний підхід при описанні молекулярних кристалів. Квантовий осцилятор. Нулева енергія квантової частки. Обчислювання енергії зв'язку між молекулами за Ван – дер – Ваальсом	2
5	Іоний зв'язок. Фізична природа сил притягання та відторгнення. Константа Маделунга. Потенціал Борна. Ізотермічна стисливість. Об'ємний модуль пружності. Обчислювання енергії зв'язку між іонами з протилежними електричними зарядами по емпіричному методу Борна	2
6	Ковалентний зв'язок. Постулати Бора та обчислювання енергії зв'язку ковалентних кристалів з врахуванням об'єднання електронів на кожен пару атомів. Врахування кінетичної та потенціальної енергії електронів	2

7	Колективна взаємодія між атомами та електронами в металах. Оцінка середньої енергії віртуальних локалізованих електронів та об'єднаних електронів в металічних кристалах. Обчислювання тиску електронного «газу» в металах. Енергія зв'язку атомів в металі	2
8	Теплоємність твердого тіла. Теплоємність діелектриків при підвищених температурах. Експериментальні дані. Статистика Максвелла – Больцмана. Закон Дюлонга – Пті.	1
9	Теплоємність твердих тіл при низьких температурах. Квантові теорія теплоємності атомів (теорії Ейнштейна та Дебая). Фонони в кристалах та їх взаємодія. Характеристична температура Дебая.	1
10	Теплоємність металів. Роль електронів. Статистика Фермі – Дірака. Енергія Фермі. Критична температура, при якій зрівнюються електронна та атомна складові теплоємності в металах.	1
11	Теплове розширення твердого кристалічного тіла. Анггармонізм коливання атомів. Зв'язок коефіцієнту теплового розширення з іншими константами твердого тіла.	2
12	Теплопровідність твердих кристалічних тіл. Теплопровідність діелектричних кристалів. Експериментальні дані. Класична теорія теплопрвідності. Фонон – фононна взаємодія та розсіювання фононів при підвищених температурах. Теплоємність кристалів при низьких температурах	2
13	Теплопровідність металів. Довжина пробігу електрона. Взаємодія електронів та фононів. Розсіювання електронів на фононах при підвищених температурах. Розсіювання електронів на атомах сторонніх елементів при низьких температурах	2
14	Електропровідність металів. Закон Ома. Класична теорія. Правило Матіссена. Закон Відемана – Франца. Врахування квантових властивостей електронів для пояснення температурної залежності електропровідності в металах	2
15	Загальна інформація про електричну провідність іоних кристалів. Еспериментальні дані. Температурна залежність коефіцієнту електропровідності іоних кристалів.. Елементарний заряд носія електричного току. Роль сторонніх атомів	2
16	Дифузія в кристалах. Точкові дефекти. Енергія активації дифузії. Співвідношення Ареніуса. Закони Фіка. Експериментальні методи вивчення дифузії в кристалічних тілах	2
17	Співідношення Ареніуса. Закони Фіка. Експериментальні методи вивчення дифузії в кристалічних тілах	2
18	Співідношення Ареніуса. Закони Фіка. Експериментальні методи вивчення дифузії в кристалічних тілах	2
19	Співідношення Ареніуса. Закони Фіка. Експериментальні методи вивчення дифузії в кристалічних тілах	2
20	Співідношення Ареніуса. Закони Фіка. Експериментальні методи вивчення дифузії в кристалічних тілах	1

	монокристалів.	
21	Лінійні дефекти в кристалічних тілах. Дислокації. Вектор Бюргерса. Бар'єр Пайерлса. Механізми переміщення дислокацій (ковзання, переповзання). Зв'язок швидкості пластичної деформації з густиною 5дислокацій	2
22	Поле напруження дислокації. Сила, яка діє на дислокацію в зовнішньому полі напруження	2
23	Енергія дислокації. Взаємодія дислокацій. Сила зеркального притягання дислокації поблизу поверхні кристалу	1
24	Швидкість пластичної деформації кристалічного тіла механізмом ковзання та механізмом дифузійного переповзання дислокацій. Механізм надпластичності кристалів та роль границь зерен (двовірних дефектів кристалів) у цьому процесі (механізм Ешбі – Феррала)	2
25	Натяг дислокаційної лінії. Розмноження дислокацій. Джерело Франка –Ріда. Зміцнення кристалічних тіл. Роль сторонніх атомів. Зона Котрела	2
26	Руйнування кристалів. Механізми гальмування дислокацій. Механізми руйнування кристалів: механізми Стро, Котрела та інші	2
27	Приближення сильного зв'язку між електронами та атомами в конденсованому середовищі. Модель квазі – вільних електронів. Походження енергетичної щілини. Електронні хвилі у періодичному потенціальному полі. Кількість енергетичних зон в енергетичному спектрі та енергетичних рівнів в енергетичній зоні.	1
28	Переміщення електрона в потенційному полі атомів. Ефективна маса електрона. Поняття дірки як носія електричного заряду. Заповнення енергетичних зон електронами: провідники, напівпровідники, ізолятор.	1
29	Напівпрвідники. Діркові та електронні напівпровідники. Донорні та акцепторні рівні. Концентрація носіїв заряду та їх рухливість. Розподіл електронів за енергією. Температурна залежність коефіцієнту електричної провідності в напівпровідниках.	2
30	Фотопровідність напівпровідників. Червона межа фотопровідності. Екситони. Люмінесценція. Технічні застосування напівпровідників.	2
31	Магнітні властивості твердого тіла. Парамагнетизм та діамагнетизм атомів. Теорії Лормора, Ланжевена. Закон Кюри	2
32	Парамагнетизм електронів в металах по теорії Паулі. Діамагнетизм електронного «газу» в металах по теорії Ландау	2
33	Фізика ферромагнетизму. Формальна теорія Ланжевена – Вейса. Закон Кюри – Вейса. Квантова теорія ферромагнетизму Френкеля. Феррімагнетики. Антиферромагнетики	1
	Контрольна робота	1
	Разом	56

6. Індивідуальні завдання

Завдання 1.

Взаємодія двох атомів, розділених відстанню r , задається потенціалом: $\phi(r) = -\beta/r^m + \lambda/r^n$.

а). Показати, що для встановлення стійкого зв'язку має виконуватися нерівність $n > m$.

б). Визначити рівноважну відстань між атомами (r_0), а також показати, що відношення величини енергії притягання о енергії відштовкування в умовах рівноваги дорівнює n/m .

Завдання 2.

Отримати формулу, що описує коефіцієнт лінійного теплового розширення кристала α , виразивши його через пружний модуль E і рівноважну міжатомну відстань a_0 . Зробити числову оцінку величини α .

Завдання 3.

Визначити енергію ансамблю N квантових незасмодіючих осциляторів. Знайти високотемпературну і низькотемпературну асимптотики.

Завдання 4.

Показати, що в області температур вище дебаєвських (Θ) фононний теплопровідність кристалів змінюється за законом $\chi \sim T^{-1}$, а в області температур $T < \Theta$, $\chi \sim T^3$.

Завдання 5.

Порівняти величину решіткової теплоємності кристала, обчисленої по теорії Дебая для низьких температур ($T < \Theta$), з значенням, що дається законом Дюлонга - Пті. Зробити кількісну оцінку.

Завдання 6

Знайти зв'язок між температурою Дебая Θ , швидкістю звуку V_z і величиною міжатомної відстані a . Зробити кількісну оцінку величини Θ вважаючи, що $V_z = 3,5 \cdot 10^5$ см/с, а $a = 3,6 \cdot 10^{-8}$ см.

Завдання 7.

Показати, що теплоємність електронного газу в металах з температурою змінюється за лінійним законом.

Завдання 8 .

При відомих значеннях температури Дебая Θ і енергії Фермі W_F знайти ту температуру T^* , до якої електронна теплоємність перевершує граткову, вважаючи, що число електронів та іонів однаково.

Завдання 9.

Знайти ефективний тиск електронного газу, який утримує іони в металевому кристалі. Зробити кількісну оцінку цього тиску при значеннях констант $e = 4,8 \cdot 10^{-10}$ од СГСЕ, $a = 3 \cdot 10^{-8}$ см.

Завдання 10.

Обчислити коефіцієнт електропровідності металу σ_e , виразивши його через характерний час вільного пробігу електрона.

Завдання 11.

Знайти зв'язок між питомим провідникові металу ρ_e , його температурою і пружним модулем E . Для опису коливання атомів використовувати гармонійне наближення.

Завдання 12.

Показати, що відношення коефіцієнта теплопровідності χ до коефіцієнта електропровідності σ металу збільшується з температурою за лінійним законом (закон Видемана - Франца).

Завдання 13.

Показати, що зі збільшенням густини електронного газу ступінь його ідеальності збільшується (парадокс «густини»).

Завдання 14.

Показати, що функція розподілу Фермі для вільних електронів в металі в області високих температур вироджується в експонентну функцію.

Завдання 15.

Знайти зв'язок між тепловою енергією W_T ансамблю з N_e електронів в металі, температурою і величиною енергії Фермі W_F .

Завдання 16.

З'ясувати, як енергія Фермі W_F електронного газу залежить від його густини n_e .

Завдання 17.

Знайти зв'язок між температурою виродження електронного газу T^* і його густиною n_e .

Завдання 18.

Знайти зв'язок між коефіцієнтом питомої електропровідності іонних кристалів $\sigma_{и}$ і коефіцієнтом дифузії $D_{и}$ (співвідношення Нернста - Ейнштейна).

Завдання 19.

Як зміниться характер температурної залежності електропровідності σ_e іонного кристала типу NaCl, якщо в решітці є двовалентне домішка катіонів, концентрація якої $c_{и}$.

Завдання 20.

Яким чином, скориставшись законом Кюри - Вейса, можна експериментально визначити температуру Кюри ферромагнітного перетворення.

Завдання 21.

Показати, що характерний лінійний розмір домена l_d в ферромагнетике зв'язана з розміром зразка L_0 залежністю

$$l_d \sim L_0^{1/2}.$$

Завдання 22.

Отримати співвідношення для коефіцієнта парамагнітної сприйнятливості електронного газу в металах (по Паулі).

Завдання 23.

Встановити зв'язок між рівноважною концентрацією вакансій c_{v_0} в решітці однокомпонентного кристала, температурою і енергією утворення вакансій u_v .

Завдання 24.

Знайти залежність радіуса пори від часу, спонтанно заліковувати в дифузійному режимі в кристалі. Обчислити час повного заліковування. пори радіуса R_0 .

Завдання 25.

Висловити теоретичну міцність бездефектного кристала через відоме значення його питомої поверхневої енергії (γ) і міжатомну відстань (a).

Завдання 26.

Оцінити енергію W_d , пов'язану з крайовою дислокацією в кристалі в розрахунку на один атом уздовж лінії дислокації. Порівняти її з енергією утворення вакансії u_v .

Завдання 27.

Пояснити, чому крайові дислокації, розташовані в одній площині ковзання, будуть відштовхуватися при паралельній орієнтації векторів Бюргерса і притягатися при антипаралельній орієнтації.

Завдання 28.

Отримати формулу, яка описує швидкість сходження дислокації під впливом напруги σ .

Завдання 29.

Яка напруга σ має бути прикладена в площині ковзання, щоб закріплена ділянка дислокаційної лінії l почала діяти як джерело Франка - Ріда.

Завдання 30.

Обчислити максимальну можливу швидкість руху дислокації в режимі сходження v_c і в режимі ковзання V_k . Порівняти ці швидкості.

7. Методи контролю екзамен.

Питання до контролю:

Завдання 1.

Взаємодія двох атомів, розділених відстанню r , задається потенціалом: $\varphi(r) = -\beta/r^m + \lambda/r^n$.

а). Показати, що для встановлення стійкого зв'язку має виконуватися нерівність $n > m$.

б). Визначити рівноважну відстань між атомами (r_0), а також показати, що відношення величини енергії притягання до енергії відштовкування в умовах рівноваги дорівнює n/m .

Завдання 2.

Отримати формулу, що описує коефіцієнт лінійного теплового розширення кристала α , виразивши його через пружний модуль E і рівноважну міжатомну відстань a_0 . Зробити числову оцінку величини α .

Завдання 3.

Визначити енергію ансамблю N квантових незв'язаних осциляторів. Знайти високотемпературну і низькотемпературну асимптотики.

Завдання 4.

Показати, що в області температур вище дебаєвських (Θ) фононний теплопровідність кристалів змінюється за законом $\chi \sim T^{-1}$, а в області температур $T < \Theta$, $\chi \sim T^3$.

Завдання 5.

Порівняти величину решіткової теплоємності кристала, обчисленої по теорії Дебая для низьких температур ($T < \Theta$), з значенням, що дається законом Дюлонга - Пті. Зробити кількісну оцінку.

Завдання 6

Знайти зв'язок між температурою Дебая Θ , швидкістю звуку V_3 і величиною міжатомної відстані a . Зробити кількісну оцінку величини Θ вважаючи, що $V_3 = 3,5 \cdot 10^5$ см/с, а $a = 3,6 \cdot 10^{-8}$ см.

Завдання 7.

Показати, що теплоємність електронного газу в металах з температурою змінюється за лінійним законом.

Завдання 8.

При відомих значеннях температури Дебая Θ і енергії Фермі W_F знайти ту температуру T^* , до якої електронна теплоємність перевершує граткову, вважаючи, що число електронів та іонів однаково.

Завдання 9.

Знайти ефективний тиск електронного газу, який утримує іони в металевому кристалі. Зробити кількісну оцінку цього тиску при значеннях констант $e = 4,8 \cdot 10^{-10}$ од СГСЕ, $a = 3 \cdot 10^{-8}$ см.

Завдання 10.

Обчислити коефіцієнт електропровідності металу σ_e , виразивши його через характерний час вільного пробігу електрона.

Завдання 11.

Знайти зв'язок між питомим провідникові металу ρ_e , його температурою і пружним модулем E . Для опису коливання атомів використовувати гармонійне наближення.

Завдання 12.

Показати, що відношення коефіцієнта теплопровідності χ до коефіцієнта електропровідності σ металу збільшується з температурою за лінійним законом (закон Видемана - Франца).

Завдання 13.

Показати, що зі збільшенням густини електронного газу ступінь його ідеальності збільшується (парадокс «густини»).

Завдання 14.

Показати, що функція розподілу Фермі для вільних електронів в металі в області високих температур вироджується в експонентну функцію.

Завдання 15.

Знайти зв'язок між тепловою енергією W_T ансамблю з N_e електронів в металі, температурою і величиною енергії Фермі W_F .

Завдання 16.

З'ясувати, як енергія Фермі W_F електронного газу залежить від його густини n_e .

Завдання 17.

Знайти зв'язок між температурою виродження електронного газу T^* і його густиною n_e .

Завдання 18.

Знайти зв'язок між коефіцієнтом питомої електропровідності іонних кристалів $\sigma_{и}$ і коефіцієнтом дифузії $D_{и}$ (співвідношення Нернста - Ейнштейна).

Завдання 19.

Як зміниться характер температурної залежності електропровідності σ_e іонного кристала типу NaCl, якщо в решітці є двовалентне домішка катіонів, концентрація якої $c_{и}$.

Завдання 20.

Яким чином, скориставшись законом Кюрі - Вейса, можна експериментально визначити температуру Кюрі ферромагнітного перетворення.

Завдання 21.

Показати, що характерний лінійний розмір домена l_d в ферромагнетике зв'язана з розміром зразка L_0 залежністю

$$l_d \sim L_0^{1/2}.$$

Завдання 22.

Отримати співвідношення для коефіцієнта парамагнітної сприйнятливості електронного газу в металах (по Паулі).

Завдання 23.

Встановити зв'язок між рівноважної концентрацією вакансій c_{v_0} в решітці однокомпонентного кристала, температурою і енергією утворення вакансій u_v .

Завдання 24.

Знайти залежність радіуса пори від часу, спонтанно заліковувати в дифузійному режимі в кристалі. Обчислити час повного заліковування. пори радіуса R_0 .

Завдання 25.

Висловити теоретичну міцність бездефектного кристала через відоме значення його питомої поверхневої енергії (γ) і міжатомну відстань (a).

Завдання 26.

Оцінити енергію W_d , пов'язану з крайовою дислокацією в кристалі в розрахунку на один атом уздовж лінії дислокації. Порівняти її з енергією утворення вакансії u_v .

Завдання 27.

Пояснити, чому крайові дислокації, розташовані в одній площині ковзання, будуть відштовхуватися при паралельній орієнтації векторів Бюргерса і притягатися при антипаралельної орієнтації.

Завдання 28.

Отримати формулу, яка описує швидкість сходження дислокації під впливом напруги σ .

Завдання 29.

Яка напруга σ має бути прикладена в площині ковзання, щоб закріплена ділянка дислокаційної лінії l почала діяти як джерело Франка - Ріда.

Завдання 30.

Обчислити максимальну можливу швидкість руху дислокації в режимі сходження v_c і в режимі ковзання V_k . Порівняти ці швидкості.

8. Схема нарахування балів

Поточний контроль, контрольна робота, індивідуальні завдання					
Поточне тестування за темами	Контр. робота	Поточне тестування за темами	Контр. робота	Екзамен	Всього
T1-T16		T17-T33			
8	12	8	12	60	100

Поточне тестування з кожної теми складається з одного тестового завдання. Відповідь на кожне завдання оцінюється в 0,5 бала.

Контрольна робота складається з 4-ох питань, відповідь на кожне оцінюється в 3 бали.

Екзаменаційний білет містить два пункти. Відповідь на кожний пункт 30 балів.

Шкала оцінювання

Сума балів за всі види навчальної діяльності протягом семестру	Оцінка за національною шкалою	
	для екзамену	для заліку
90 – 100	відмінно	зараховано
70-89	добре	
50-69	задовільно	
1-49	незадовільно	не зараховано

9. Рекомендована література

Основна література

1. Ch. Kittel, Introduction to Solid State Physics, Wiley, 1996.
2. C.A. Wert and R.M. Thomson, Physics of solids, McGraw-Hill Book Company, 1970,
3. P. M. Anderson, J. P. Hirth, J. Lothe, Theory of Dislocations, Cambridge University Press, 2017
4. Shewmon P. G. Diffusion in Solids, New York: McGraw-Hill, 1963

Допоміжна література

1. Гегузин Я.О. Живий кристал, Київ, Наукова думка 1981
2. R. E. Peierls, Quantum Theory of Solids, Oxford University Press, 1996

Екзаменаційні білети до курсу лекцій:

«ОСНОВИ ФІЗИКИ КОНДЕНСОВАНОГО СТАНУ»

Білет № 1.

1. Природа сил зв'язку атомів у кристалах.
2. Дислокації в кристалах. Енергія дислокацій та їхня взаємодія.

Білет № 2.

- 1 Теорія йонного зв'язку в кристалах.
- 2 Сили, що діють на дислокації. Поле напруг дислокацій.

Білет № 3.

1. Металевий зв'язок.
2. Рух дислокацій в кристалах (консервативний і неконсервативний).

Білет № 4.

1. Теорія ковалентного зв'язку в кристалах.
2. Размножение дислокаций. Источник Франка – Рида.

Білет № 5.

1. Молекулярная связь. Сила Ван - Дер - Ваальса.
2. Дислокационный механизм пластической деформации в кристаллах.

Білет № 6.

1. Классическая теория теплоемкости кристаллов. Закон Дюлонга - Пти.
2. Диамагнетизм атомов и молекул в кристаллах. Теория Ланжевена.

Білет № 7.

1. Квантовая теория теплоемкости кристаллов (теория Эйнштейна).
2. Диамагнетизм электронного газа в металлах.

Білет № 8.

1. Теория теплоемкости кристаллов по Дебаю. Характеристическая температура.
2. Парамагнетизм кристаллов.

Білет № 9.

1. Тепловое расширение кристаллов. Правило Грюнайзена.
2. Парамагнетизм электронного газа в металлах по Паули.

Білет № 10.

1. Теплопроводность кристаллов (решеточная и электронная).
2. Теплоемкость электронного газа в металлах.

Білет № 11.

1. Классическая теория электронов в металлах. Законы Ома и Видемана – Франца.
2. Механизмы разрушения кристаллов (формирование трещин при скоплении дислокаций).

Білет № 12.

1. Провалы классической теории электронов в металлах. Основы квантовой теории свободных электронов. Функция распределения Ферми – Дирака.
2. Механизмы упрочнения кристаллов (формирование «облаков» Котрелла вокруг ядра дислокаций, наклеп и др.).

Білет № 13.

1. Квантовые свойства свободных электронов в металлах (проводимость, теплоемкость, магнитные свойства и др.).
2. Дислокационный механизм пластической деформации в кристаллах.

Білет № 14.

1. Механизмы рассеяния электронов в металлах при прохождении электрического тока. Правило Матиссена. Остаточное сопротивление и его температурная зависимость.
2. Высокотемпературная деформация кристаллов (ползучесть). Механизм Набарро – Херринга.

Білет № 15.

1. Ферромагнетизм кристаллов. Феноменологическая теория Вейса.

2. Спекание кристаллических порошков (движущая сила и механизмы переноса вещества).

Білет № 16.

1. Энергетические зоны в кристаллах. Проводники, полупроводники и изоляторы.
2. Антиферромагнетики и ферромагнетики.

Білет № 17.

1. Электрическая проводимость полупроводниковых кристаллов.
2. Точечные дефекты в кристаллах. Равновесная концентрация вакансий и межузельных атомов..

Білет № 18.

1. Фотопроводимость полупроводников.
2. Диффузия в кристаллах. Температурная зависимость коэффициента диффузии. Законы Фика.

Білет № 19.

1. Электрическая проводимость ионных кристаллов. Соотношение Нернста – Эйнштейна.
3. Движение электрона в периодическом поле решетки кристалла. Зависимость энергии электрона от волнового вектора. Эффективная масса электрона.

Білет № 20.

1. Электрическая поляризация диэлектриков. Формула Клаузиуса – Моссоли для диэлектрической проницаемости.
2. Упругие свойства кристаллов. Закон Гука.

Білет №21.

1. Физическая природа сил связи в кристаллах.
2. Антиферромагнетизм.

Білет №22.

1. Основные признаки кристаллического состояния вещества.
2. Движущая сила и механизмы спекания кристаллических порошков.

Білет 23.

1. Электрическая проводимость полупроводников. Роль примесей.
2. Дислокационный механизм спекания кристаллических порошков.

Білет 24.

1. Молекулярная связь в кристаллах.
2. Дислокационная пластическая деформация кристаллов. Формула Пича – Келлера.