

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»
Фізичний факультет
Кафедра прикладної фізики

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Декан фізичного факультету


«02» березня 2023 року

/Лазур В.Ю./

РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

СИМЕТРІЯ ТА ЕНЕРГЕТИЧНА СТРУКТУРА В КОНДЕНСОВАНОМУ СТАНІ

Рівень вищої освіти
Галузь знань
Спеціальність
Освітня програма
Статус дисципліни
Мова навчання

другий (магістерський)
10 природничі науки
105 Прикладна фізика та наноматеріали
Освітньо – професійна програма
обов'язкова
українська

Ужгород 2023 рік

Робоча програма навчальної дисципліни «Симетрія та енергетична структура в конденсованому стані» для здобувачів вищої освіти галузі знань 10 природничі науки спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали Освітньо – професійна програма

Розробник: Небола І.І. професор, доктор фізико-математичних наук

Робочу програму розглянуто та затверджено на засіданні кафедри прикладної фізики

Протокол № 8 від «23» 02. 2023 року

Завідувач кафедри прикладної фізики  (Небола І.І.)

Схвалено науково-методичною комісією фізичного факультету

Протокол № 7 від «02» 03. 2023 року

Голова науково-методичної комісії  (Карбованець М.І.)

1. ОПИС НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Найменування показників	Розподіл годин за навчальним планом	
	денна форма навчання	заочна форма навчання
Кількість кредитів - 4	Рік підготовки	
Загальна кількість годин – 120	1- й	
Кількість модулів – 2	Семестр	
Тижневих годин для денної форми навчання: аудиторних – 3 самостійної роботи студентів – 4	2- й	
	Лекції	
	24 год.	
	Практичні (семінарські)	
	22 год.	
Вид підсумкового контролю: екзамен	Лабораторні	
	-	
Форма підсумкового контролю: усна	Самостійна робота	
	74 год	

Примітка.

Співвідношення кількості годин аудиторних занять до самостійної індивідуальної роботи становить:

для денної форми навчання – 46 / 74

для заочної форми навчання – відсутня

2. МЕТА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Мета навчальної дисципліни «Симетрія та енергетична структура в конденсованому стані» дати опис та розуміння симетричних аспектів і їх ролі при вивченні енергетичної структури та її опису, виявлення специфічних особливостей, основних методів комп'ютерного моделювання та областей їх застосування, продемонструвати їх особливості в залежності від застосованих основних методів комп'ютерного моделювання.

Відповідно до освітньої програми, вивчення дисципліни сприяє формуванню у здобувачів вищої освіти таких компетентностей:

- **інтегральна компетентність:** здатність самостійно ставити та розв'язувати на інноваційному рівні наукові та науково-технічні задачі в галузі прикладної фізики та наноматеріалів.

- **загальні компетенції (ЗК):**

- здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях (ЗК1);
- знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності (ЗК2);
- здатність спілкуватися державною мовою як усно, так і письмово (ЗК3);
- здатність спілкуватися іноземною мовою (ЗК4);
- навички використання інформаційних і комунікаційних технологій (ЗК5);
- здатність до проведення досліджень на відповідному рівні (ЗК6);
- здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел (ЗК7);
- навички міжособистісної взаємодії (ЗК9);
- здатність працювати автономно (ЗК10);
- здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями (ЗК 11).

- **фахові компетенції (ФК):**

- здатність виконувати аналіз спеціальної літератури, формулювати постановку наукової або науково-технічної задачі, обирати методи та методики, складати програми наукових досліджень та науково-технічних розробок у галузі прикладної фізики та наноматеріалів. (ФК1);

- здатність аналізувати отримані результати, презентувати їх фахівцям у даній галузі, оформлювати наукові статті та науково-технічні звіти (ФК3);

- здатність відповідно до поставленої задачі виконувати науково-технічні розробки в галузі прикладної фізики та наноматеріалів (ФК4);

- здатність до постійного розвитку компетентностей у сфері прикладної фізики, інженерії та комп'ютерних технологій. (ФК8).

- здатність використовувати сучасні теоретичні уявлення в галузі фізики для аналізу фізичних систем (ФК9);

- здатність використовувати методи і засоби теоретичного дослідження та математичного моделювання в професійній діяльності (ФК10).

3. ПЕРЕДУМОВИ ДЛЯ ВИВЧЕННЯ НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Не потребує.

4. ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ НАВЧАННЯ

Відповідно до освітньої програми вивчення навчальної дисципліни «Симетрія та енергетична структура в конденсованому стані» повинно забезпечити досягнення здобувачами вищої освіти таких програмних результатів навчання (ПРН):

Програмні результати навчання	Шифр ПРН
Використовувати знання в галузі прикладної фізики, математики, електроніки та інформаційних технологій для виконання наукових досліджень та розв'язання виробничих задач.	ПРН01
Знаходити та аналізувати наукову та науково-технічну інформацію в галузі прикладної фізики та наноматеріалів із вітчизняних та зарубіжних джерел, в тому числі з використанням сучасних пошукових систем.	ПРН02
Класифікувати, аналізувати та інтерпретувати науково-технічну інформацію в галузі прикладної фізики.	ПРН03
Обговорювати та знаходити прогресивні та інноваційні рішення проблем і завдань при виконанні науково-технічних та виробничих проєктів.	ПРН04
Застосовувати сучасні математичні методи для побудови й аналізу математичних моделей фізичних процесів.	ПРН08.
Застосовувати фізичні, математичні та комп'ютерні моделі для дослідження фізичних явищ, розробки приладів і наукоємних технологій.	ПРН10
Розуміти закономірності розвитку прикладної фізики, її місце в розвитку техніки, технологій і суспільства, у тому числі в розв'язанні екологічних проблем.	ПРН14

Очікувані результати навчання, які повинні бути досягнуті здобувачами освіти після опанування навчальної дисципліни «Симетрія та енергетична структура в конденсованому стані»:

Очікувані результати навчання з дисципліни	Шифр ПРН
Вміти знаходити та аналізувати наукову та науково-технічну інформацію в галузі прикладної фізики та наноматеріалів із вітчизняних та зарубіжних джерел, в тому числі з використанням сучасних пошукових систем	ПРН02
Знати встановлювати та аргументувати нові залежності між параметрами та характеристиками фізичних систем.	ПРН01
Вміти застосовувати сучасні математичні методи для побудови й аналізу математичних моделей фізичних процесів.	ПРН04
Володіти ефективними технологіями, інструментами та методами експериментального дослідження властивостей речовин і матеріалів, включаючи наноматеріали, при розв'язанні практичних проблем прикладної фізики.	ПРН03
Застосовувати фізичні, математичні та комп'ютерні моделі для дослідження фізичних явищ, розробки приладів і наукоємних технологій.	ПРН08
Знати закономірності розвитку прикладної фізики, її місце в розвитку техніки, технологій і суспільства, у тому числі в розв'язанні екологічних проблем.	ПРН014
Вміти вибирати ефективні методи та інструментальні засоби проведення досліджень у галузі прикладної фізики.	ПРН010

5. ЗАСОБИ ДІАГНОСТИКИ ТА КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАВЧАННЯ

Засоби оцінювання та методи демонстрування результатів навчання

Засобами оцінювання та методами демонстрування результатів навчання з навчальної дисципліни є:

- поточний контроль успішності,
- проміжний модульний контроль,
- підсумковий семестровий контроль.

Форми контролю та критерії оцінювання результатів навчання

Форми поточного контролю:

- вибіркове усне опитування перед початком занять;
- фронтальне стандартизоване усне та/або письмове опитування за основними питаннями теми заняття;
- експрес-опитування;
- тестування;
- реферативні повідомлення та їх обговорення;
- перевірка якості виконання завдань для самостійної роботи, зокрема за конспектами матеріалів;
- оцінювання якості та повноти виконання завдань модульної контрольної роботи.

Форма модульного контролю: виконання модульної контрольної роботи, результати якої оцінюються за 100-бальною шкалою за кожний модуль.

Форма підсумкового семестрового контролю: екзамен. До екзамену допускаються студенти, які відпрацювали пропущені заняття і виконали модульні контрольні роботи.

Оцінювання знань студентів здійснюється на основі результатів:

- поточного контролю знань;
- проміжного модульного контролю знань;
- підсумкового семестрового контролю знань – екзамен.

Розподіл балів, які отримують здобувачі вищої освіти (модуль 1)

Поточне оцінювання та самостійна робота								Модульна контрольна робота	Сума
T1	T2	T3						70	100
10	10	10							

T1, T2, T3 – теми

Розподіл балів, які отримують здобувачі вищої освіти (модуль 2)

Поточне оцінювання та самостійна робота								Модульна контрольна робота	Сума
T1	T2	T3	T4					60	100
10	10	10	10						

T1, T2, T3, T4 – теми

Оцінювання окремих видів навчальної роботи з дисципліни

Вид діяльності здобувача вищої освіти	Модуль 1		Модуль 2	
	Кількість	Максимальна кількість балів (сумарна)	Кількість	Максимальна кількість балів (сумарна)
Практичні (семінарські) заняття	4	20	8	20
Лабораторні заняття (допуск, виконання та захист)	-	-	-	-
Комп'ютерне тестування при тематичному оцінюванні	-	-	-	-
Письмове тестування при тематичному оцінюванні	1	10	1	10
Презентація		-		
Реферат		-		
Есе		-		
...		-		
Модульна контрольна робота	2	70	2	70
Разом	7	100	11	100

Критерії оцінювання модульної контрольної роботи

Модульна контрольна робота здійснюється у письмовій формі шляхом відповідей на питання тестових завдань. Кожна правильна відповідь оцінюється певною кількістю балів. Максимальна кількість балів за кожний модуль становить 100 балів. Мінімальна кількість балів, за якої робота вважається виконаною, становить 60 балів.

Критерії оцінювання підсумкового семестрового контролю

Підсумковий семестровий контроль з дисципліни «Симетрія та енергетична структура в конденсованому стані» здійснюється через екзамен. Екзамен проводиться в усній формі шляхом співбесіди. Результати екзамену оцінюються за чотирибальною шкалою: «відмінно», «добре», «задовільно», «незадовільно».

Оцінка „відмінно” виставляється в тому разі, коли студент бездоганно оволодів всіма розділами програми, дав глибокі, чіткі і вичерпні відповіді на всі основні і додаткові запитання, виявив розуміння суті програмового матеріалу, вільне володіння фактичним матеріалом та відповідним математичним апаратом, кваліфіковано використовувати набуті знання для розв'язання конкретних практичних задач.

Оцінка „добре” виставляється тоді, коли студент виявив повне знання і розуміння програмового матеріалу, добре оволодів програмовим матеріалом курсу, може використовувати набуті знання в практичній діяльності, дав вичерпні відповіді на всі запитання, але під час відповіді допускав окремі нечіткі формулювання і незначні неточності.

Оцінка „задовільно” виставляється в тому разі, коли студент в основному знає і розуміє фактичний матеріал курсу, дав в основному правильні відповіді на запитання, виявив уміння розібратися в окремих питаннях матеріалу дисципліни, вміння використовувати відповідний

математичний апарат, але не може ґрунтовно пояснити окремі положення пройденого курсу, недостатньо вміє застосовувати набуті знання для розв'язання конкретних практичних задач.

Оцінка „незадовільно” виставляється тоді, коли студент не оволодів матеріалом даного курсу, виявив суттєві прогалини в знаннях основного програмового матеріалу, коли він під час відповіді на запитання виявив нерозуміння сутності основних понять та термінів дисципліни, допускає плутанину, не може застосовувати набуті знання для розв'язування конкретних практичних задач, тобто виявив відсутність мінімально необхідної кількості знань з даного курсу.

За бажанням студента результуюча підсумкова оцінка може бути визначена як інтегрована оцінка засвоєння всіх тем дисципліни і кількісно дорівнює середньому арифметичному балів, отриманих за кожний модуль.

Переведення результатів, отриманих за 100-бальною шкалою оцінювання в національну 4-х бальну та шкалу за системою ECTS здійснюється за наступною схемою:

Оцінка за шкалою балів	ECTS	
	Оцінка	Характеристика
90 та вище	A	відмінно
80-89	B	добре
	C	добре
65-79	D	задовільно
55-64	E	задовільно
50-54		
35-49	FX	незадовільно з можливістю перескладання
1-34	F	незадовільно з обов'язковим повторним навчанням

Студент, який отримав за результатами підсумкового контролю оцінку «незадовільно» (1-34 балів, F), зобов'язаний пройти повторний курс вивчення дисципліни (під час додаткового семестру) і скласти залік.

Результати підсумкового контролю знань із навчальних дисциплін, з яких передбачено екзамен, заносяться до залікової відомості.

6. ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

6.1. Зміст навчальної дисципліни

Модуль 1. Симетрія та методи теорії груп у фізиці.

Тема 1. Основи теорії груп.

Групи перетворень. Елементи симетрії. Добуток елементів симетрії. Елементи симетрії їх матричне представлення. Точкові групи. Клас елементів, генератор групи, матричне представлення перетворення і характери перетворень. Ізоморфізм. Підгрупи, Індекс підгрупи, суміжні класи. Нормальний дільник (інваріантна підгрупа). Спряжені елементи, класи спряжених елементів. Гомоморфізм. фактор група. Розширення групи.

Тема 2. Точкові і просторові групи симетрії.

Неперервні групи і принципи симетрії. Граничні групи симетрії. Розподіл елементів по клас. Просторові групи симетрії, елементи просторових груп, добуток елементів просторових груп. Фактор група. 230 просторових груп. Сингонії. Позиції атомів, орбіти, сукупність атомів в елементарній комірці. Елементарна комірка, ґратка Браве. Об'єм елементарної комірки. Сорт атомів їх виродження. Поняття узагальненої симетрії. Концепція над просторової симетрії. Опис структури елементарної комірки ґратковою

моделлю. Обернена ґратка. Зона Бриллюєна, високо симетричні напрямки ЗБ і їх групи симетрії. Зміна симетрії при зовнішніх фізичних збуреннях.

Тема 3. Теорія зображень групи та її використання.

Незвідні зображення точкових і просторових груп. Таблиці характеристик незвідних зображень. Співвідношення ортогональності незвідних зображень. Група трансляцій. Теорема Блоха. Зірки хвильового вектора ЗБ, групи симетрії, умови сумісності. Прямий кронекеровський добуток незвідних зображень. Тензори їх симетрія. Матричний вигляд. Принцип Неймана. Вплив симетрії на число незалежних компонент тензора.

Модуль 2. Енергетична структура одночастинкових збурень в конденсованому стані.

Тема 1 Адіабатичне наближення. Фононні спектри.

Енергетичні характеристики системи ядер. Гармонічне наближення. Коливання одномірної моно атомної ґратки. Рівняння руху для одноатомної ґратки з мотивом. Акустичні та оптичні вітки коливань. Динаміка ґратки в концепції над просторовою симетрією. Рівняння руху для одномірних ґраток, вектори модуляції узагальнена динамічна матриця, еквідистантне і нееквідистантне наближення для силового поля. Нормальні моди для трьох мірних ґраток. Рівняння руху ядер (атомів) для простих та складних кристалів. Фононні залежності для високо симетричних напрямків ЗБ, умови сумісності. повне коливне зображення для коливних віток та розклад його по незвідним зображенням групи симетрії кристалу. Квантово-механічний розгляд задачі про малі коливання кристалу. Поняття фононів. Ідентифікація фононних віток по симетрії. Статистика фононів. Густина фононних рівнів. Загальні риси ангармонічних теорій. Експериментальні методи визначення фононних мод. Розсіювання та поглинання фононних мод. Правила відбору. Нейтронні та рентгенівські вимірювання.

Тема 2. Енергетика електронів.

Енергетичні зони і класифікація кристалів по характеру зонного спектру. Основне наближення – одно електронне рівняння і теорема Блоха, граничні умови Борна-Кармана. Поверхня Фермі, побудова Харісона. Густина станів.

Тема 3. Методи розрахунку зонної структури.

Наближення пустої ґратки. Метод слабого періодичного потенціалу Метод сильного зв'язку гібридизація хвильових функцій, роль симетрії. Поверхня фермі, побудова Харісона. Густина станів. Метод Вігнера-Зейтца та метод комірок. Метод приєднаних плоских хвиль. Побудова симетризованих комбінацій плоских хвиль. Метод функції Гріна. Метод ортогоналізованих плоских хвиль (ОПХ). Модифіковані методи ОПХ. Повно-потенціальні схеми розрахунку зонного спектра.

Тема 4 Теорія функціонала електронної густини.

Роль ab-initio моделювання. Основні положення. Наближення Борна-Опенгеймера. Базисні набори хвильових функцій. Псевдопотенціали. Рівняння Кона-Шема. Наближення локальної електронної густини (LDA), узагальнене градієнтне наближення (GGA), гібридний функціонал (hybrid). Розв'язок рівняння Кона-Шена. Метод самоузгодженого поля (self consisted field). Модель локального відштовхування Хабарда (LSDA+U), гібридний функціонал (HSE0, PBE0,...). Квaziчастинки. Оптичне поглинання. Роль симетрії, правила відбору.

6.2. Структура навчальної дисципліни

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин - 120					
	Форма навчання: денна					
	у тому числі					
	Усього	Лекції 24	практичні (семінарські) 22	лабораторні	індивідуальна робота	самостійна робота 74
1-й семестр						
Модуль I. Симетрія та методи теорії груп у фізиці.						
Тема 1. Основи теорії груп.	14	2				12
Тема 2. Точкові і просторові групи симетрії.	14	2	4			8
Тема 3. Теорія зображень групи та її використання.	16	4	4			8
Модульна контрольна робота	2	2				
Разом за модуль	46	10	8			28
1-й семестр						
Модуль 2. Енергетична структура одночастинкових збуджень в конденсованому стані.						
Тема 1. Адіабатичне наближення. Фононні спектри.	20	4	6			10
Тема 2. Енергетика електронів.	16	2	4			10
Тема 3. Методи розрахунку зонної структури.	20	4	4			12
Тема 4. Теорія функціонала електронної густини.	16	2				14
Модульна контрольна робота	2	2				
Разом за модуль	74	14	14			46
Разом за семестр	120	24	22			74

6.3. Теми практичних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин	
		денна	заочна
1.	Моделювання і аналіз кристалічної структури складних сполук з використанням оболочки CaRine.	4	
2.	Знаходження повного коливного зображення і його розклад по незвідним зображенням.	4	
3.	. Розрахунок дисперсії фононного спектру в середовищі MAPLE	4	
4.	Розрахунок дисперсії фононного спектру в середовищі MAPLE в концепції над просторової симетрії.	2	
5.	Розрахунок електронного спектру в наближенні пустої ґратки.	4	
6.	Розрахунок енергетичної структури германію в методі електронної щільності. Моделювання псевдо потенціалів.	4	
Разом		22	

6.4. Самостійна робота

№ з/п	Назва теми	Кількість годин	
		денна	заочна
1.	Моделювання і аналіз кристалічної структури з використанням оболочки CaRine.	4	
2.	Знаходження позицій атомів, орбіт і їх виродження об'єкту дослідження з використанням оболочки CaRine.	4	
3.	Одновимірна потенціальна яма. Стани з дискретним спектром.	4	
4.	Стани з неперервним спектром. Віртуальні рівні енергії.	4	
5.	Група симетрії прямокутника. Клас елементів, генератор групи, матричне представлення перетворення і характери перетворень. Ізоморфізм. Індекс підгрупи, суміжні класи. Нормальний дільник (інваріантна підгрупа). Спряжені елементи, класи спряжених елементів. Гомоморфізм. фактор група. Розширення групи.	4	
6.	Позиції атомів, орбіти, сукупність атомів в елементарній комірці. Елементарна комірка, ґратка Браве. Об'єм елементарної комірки. Сорт атомів їх виродження.	4	
7.	Розрахунок дисперсії фононного спектру складних кристалів в середовищі MAPLE.	4	
8.	Співвідношення ортогональності незвідних зображень. Група трансляцій. Теорема Блоха. Зірки хвильового вектора ЗБ, групи симетрії, умови сумісності.	4	
9.	Розрахунок електронного спектру в наближенні пустої ґратки.	4	
10.	Фононні залежності для високо симетричних напрямків ЗБ, умови сумісності. повне коливне зображення для коливних віток та розклад його по незвідним зображенням групи симетрії кристалу.	4	
11.	Розрахунок енергетичної структури германію в методі електронної щільності.	4	
12.	Моделювання псевдо потенціалів.	4	
13.	Розсіювання та поглинання фононних мод. Правила відбору. Нейтронні та рентгенівські вимірювання..	4	
14.	Моделювання резонансних явищ у квантово-розмірних системах.	4	
15.	Поверхня фермі, побудова Харісона. Густина станів.	4	
16.	Метод Вігнера-Зейтца та метод комірок. Метод приєднаних плоских хвиль. Побудова симетризованих комбінацій плоских хвиль.	4	
17.	Повно-потенціальні схеми розрахунку зонного спектра.	6	
18.	Енергетичні властивості атома в кристалічному полі. Гібридизація хвильових функцій та розщеплення енергетичних рівнів.	4	
	Разом	74	

7. ІНСТРУМЕНТИ, ОБЛАДНАННЯ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, ВИКОРИСТАННЯ ЯКИХ ПЕРЕДБАЧАЄ НАВЧАЛЬНА ДИСЦИПЛІНА

Технічні засоби: Мультимедійний проєктор.

Обладнання: персональні комп'ютери, ноутбуки.

Програмне забезпечення Windows 10, Microsoft Power Point.

8. РЕКОМЕНДОВАНІ ДЖЕРЕЛА ІНФОРМАЦІЇ

Основна література

1. 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.
2. Поплавко Ю. М. Фізика діелектриків: підручник / за заг. ред. акад. НАН України Ю. І. Якименка. – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – 572 с
3. Бірюкович Л.О. Кристалографія, кристалохімія та мінералогія. Підручник. - Київ: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2018. - 234 с.
4. Сіренко А.Ф. Основи фізичного матеріалознавства: Навчальний посібник. – Х.: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2005. – 288 с.
5. Зиман З.З. Основи структурної кристалографії: Навчальний посібник. – Х.: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2008. – 212 с.
6. Кшнякин В.С. Основи фізичного матеріалознавства: навч. посіб. / В.С. Кшнякин, А.С. Опанасюк, К.О. Дядюра. – Суми: СумДУ, 2015. – 466 с.
7. Бойко Ю.І. Фізика конденсованого стану в задачах і вправах: навч. посіб. для студ. вищих навч. закладів / Ю.І. Бойко, В.В. Богданов. – Харків: ХНУ ім.В.Н. Каразіна, 2015. – 188 с.
8. Зиман З.З.. Основи структурної кристалографії: Навчальний посібник. – Х.: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2008. – 212 с.
9. Мазуренко Д.М. Електронна теорія речовини / Мазуренко Д.М. – К.: Вища школа, 1969. – 174 с.
10. Конспект лекцій з дисципліни «Фізика конденсованого стану матеріалів» / Упоряд.: С.О. Колінько., Т.І. Бутенко, Ващенко В.А. – Черкаси: ЧДТУ, 2021. – 175 с.
11. Поплавко Ю. М. Фізика твердого тіла : підручник. В 2-х томах. / Ю. М. Поплавко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017. – Том 1: Структура, квазічастинки, метали, магнетики. – 415 с.
12. А.П. Шпак, Ю.А. Куницький, В.Є. Федоров. Електронна структура та фізичні властивості твердих тіл. Київ.- КНУ.-2004.-92 с.

Допоміжна література

1. Подопрігора Н.В. М.І. Садовий, О.М. Трифонова. Фізика твердого тіла: навчальний посібник для студентів фізичних спеціальностей педагогічних університетів, – Кіровоград: ПП «Центр оперативної поліграфії «Авангард», 2014. – 416 с
2. Р.Yu, М.Cardona. Fundamentals of Semiconductors (Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2001). – 333 p.
3. Черняков Е.І. Оптоелектроніка : навч. посіб./ Е.І. Черняков, Ю.П.Мачехін, М.П.Кухтін. – Харків: ХНУРЕ.2015. – 396 с.
4. Бібік В.В. Фізика твердого тіла: навч. посібник/ В.В. Бібік,Т.М. Гричановська, Л.В. Олгодворець, Н.І. Шумакова. – Суми: Вид-во СумДУ, 2010. – 200 с.

5. Основи матеріалознавства. Частина 1. Властивості матеріалів та методи дослідження. Конспект лекцій. / Укладачі: Юрченко О.М., Кормош Ж.О., Парасюк О.В. – Луцьк: Вежа-друк. – 44 с.

6. Строїтелева Н.І., Кісельов Є.М. Фізика твердого тіла. Навчальний посібник – ЗДІА, Запоріжжя, 2018. – 145 с.

7. Ziegler, J. F. The Stopping and Range of Ions in Solids / J. F. Ziegler, J. P. Biersack and U. Littmark. Pergamon Press, New York, 1985.