

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

Фізичний факультет
(назва факультету)

Кафедра загальної фізики



РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Кристалічна будова твердих тіл
(повна назва навчальної дисципліни)

для студентів

галузь знань 10 Природничі науки
(шифр і назва)
спеціальність 104 Фізика та астрономія
(шифр і назва спеціальності)
освітній рівень бакалавр
(молодший бакалавр, бакалавр, магістр)
освітня програма Фізика
(назва освітньої програми)
спеціалізований вибірковий блок Фізика наноструктур в металах та кераміках
вид дисципліни вибіркова ВЛ4

Форма навчання	<u>очна</u>
Навчальний рік	<u>2021/2022</u>
Семестр	<u>6</u> ✓
Кількість кредитів ECTS	<u>3</u> ✓
Мова викладання, навчання та оцінювання	<u>українська</u>
Форма заключного контролю	<u>іспит</u> ✓

Викладачі: зав.кафедри загальної фізики, професор Боровий М.О.

(Науково-педагогічні працівники, які забезпечують викладання даної дисципліни у відповідному навчальному році)

Пролонговано: на 20__/20__ н.р. _____ (_____) «__» __ 20__ р.
(підпис, ПІБ, дата)

на 20__/20__ н.р. _____ (_____) «__» __ 20__ р.
(підпис, ПІБ, дата)

на 20__/20__ н.р. _____ (_____) «__» __ 20__ р.
(підпис, ПІБ, дата)

КИЇВ – 2021

Розробники²:

Боровий Микола Олександрович, доктор фіз.-мат. наук, професор,
зав. кафедри загальної фізики
(вказати авторів: ПІБ, науковий ступінь, вчене звання, посада, кафедра)

ЗАТВЕРДЖЕНО

Зав. кафедри



(підпис)

(Боровий М.О.)

(прізвище та ініціали)

Протокол № 10 від 18 травня 2021 р.

Схвалено науково-методичною комісією фізичного факультету

протокол №4 від 22 червня 2021 року

Голова науково-методичної комісії



(підпис)

(Оліх О.Я.)

(прізвище та ініціали)

² Розробляється лектором. Робоча програма навчальної дисципліни розглядається на засіданні кафедри (циклової комісії – для коледжів), науково-методичної комісії факультету/інституту (раді навчального закладу - коледжу), підписується завідувачем кафедри (головою циклової комісії), головою науково-методичної комісії факультету/інституту (головою ради) і затверджується заступником декана/директора інституту з навчальної роботи (заступником директора коледжу).

ВСТУП

1. Мета дисципліни – отримання глибоких та систематичних знань щодо атомно-просторової структури кристалів, методів її опису та представлення. Зокрема, засвоєння принципів розгляду структури ідеальних кристалів, побудови точкових і просторових груп симетрії кристалів, а також зумовлених ними фізичних властивостей кристалічних твердих тіл. Ознайомлення з основними типами кристалічних структур. З'ясування особливостей структури реальних кристалів, зумовлених утворенням різних типів структурних дефектів.

2. Попередні вимоги до опанування або вибору навчальної дисципліни:

1. Знати закони класичної електродинаміки, оптики та атомної фізики, а також основи математичного аналізу та теорії функції комплексної змінної.
2. Вміти застосовувати попередні знання з курсів аналітичної геометрії та лінійної алгебри, векторного та тензорного аналізу для опису перетворень координат.

3. Анотація навчальної дисципліни / референс:

У рамках курсу Кристалічна будова твердих тіл розглядаються основні принципи опису атомно-просторової структури кристалічних твердих тіл, а саме, побудова і властивості точкових та просторових груп симетрії кристалів, фізичні властивості кристалів, зумовлені симетрією кристалічної ґратки, а також дефекти атомно-просторової структури реальних кристалів. Навчальна задача курсу полягає в оволодінні методами опису атомно-просторової структури кристалів і принципами їх практичного застосування для розв'язку задач структурного аналізу, пов'язаних з визначенням основних параметрів кристалічної ґратки. Результати навчання полягають в набутті навичок застосування методів опису симетрії кристалів для аналізу фізичних властивостей твердих тіл та визначення атомно-просторової структури реальних кристалів методами нейтроно-, рентгеноструктурного аналізу, електроннографії та EXAFS. Методи викладання: лекції, консультації, іспит. Методи оцінювання: опитування в процесі лекції, контрольні роботи після основних розділів спецкурсу, іспит. Підсумкова оцінка складається з семестрових модульних оцінок (60%) та оцінки підсумкового контролю знань (40%).

4. Завдання (навчальні цілі) – засвоєння сучасних теоретичних підходів до опису атомно-просторової структури кристалів, що базуються та аналізі точкових та просторових груп симетрії, оволодінні методами та принципами як розв'язку задач структурної кристалографії, так і їх застосування в експериментальному структурному аналізі методами рентгенівської, нейтронної та електронної дифракції.

Згідно вимог Стандарту вищої освіти України перший (бакалаврський) рівень вищої освіти, галузь знань 10 «Природничі науки», спеціальність 104 «Фізика та астрономія», ОНП «Фізика» дисципліна забезпечує набуття здобувачами освіти наступних **компетентностей:**

Інтегральних:

Здатність розв'язувати складні спеціалізовані задачі та практичні проблеми з фізики та астрономії у професійній діяльності або у процесі подальшого навчання, що передбачає застосування певних теорій і методів фізики та астрономії і характеризується комплексністю та невизначеністю умов.

Загальних:

ЗК1. Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу.

ЗК2. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.

ЗК3. Навички використання інформаційних і комунікаційних технологій.

ЗК5. Здатність приймати обґрунтовані рішення.

ЗК8. Здатність оцінювати та забезпечувати якість виконуваних робіт.

ЗК12. Здатність спілкуватися державною мовою як усно, так і письмово.

ЗК13. Здатність спілкуватися іноземною мовою.

Фахових:

ФК1. Знання і розуміння теоретичного та експериментального базису сучасної фізики та астрономії.

ФК2. Здатність використовувати на практиці базові знання з математики як математичного апарату фізики і астрономії при вивченні та дослідженні фізичних та астрономічних явищ і процесів.

ФК5. Здатність виконувати обчислювальні експерименти, використовувати чисельні методи для розв'язування фізичних та астрономічних задач і моделювання фізичних систем.

ФК6. Здатність моделювати фізичні системи та астрономічні явища і процеси.

ФК7. Здатність використовувати базові знання з фізики та астрономії для розуміння будови та поведінки природних і штучних об'єктів, законів існування та еволюції Всесвіту.

ФК9. Здатність працювати з джерелами навчальної та наукової інформації.

ФК10. Здатність самостійно навчатися і опановувати нові знання з фізики, астрономії та суміжних галузей.

ФК13. Орієнтація на найвищі наукові стандарти – обізнаність щодо фундаментальних відкриттів та теорій, які суттєво вплинули на розвиток фізики, астрономії та інших природничих наук.

5. Результати навчання за дисципліною: (описуються з детальною достовірністю для розробки заходів оцінювання)

Результат навчання (1. знати; 2. вміти; 3. комунікація*; 4. автономність та відповідальність*)		Методи викладання і навчання	Методи оцінювання	Відсоток у підсумковій оцінці з дисципліни
Код	Результат навчання			
1.1	Знати принципи опису атомно-просторової структури ідеальних кристалів, зокрема, побудову точкових та просторових груп симетрії кристалів, фізичні властивості кристалів, зумовлені симетрією кристалічної ґратки.	Лекції, самостійна робота	Модульна контрольна робота, залік	14
1.2	Виконувати математичне формулювання основних принципів опису симетрії кристалів. Знати і володіти основними методами розв'язку задач структурної кристалографії щодо визначення параметрів та характеристик кристалічної ґратки. Засвоїти методи моделювання кристалічних структур з використанням програмного пакету Vesta-3.	Лекції, самостійна робота	Модульна контрольна робота, залік	16
2.1	Знати принципи формування та фізичні характеристики різних видів міжатомного зв'язку в кристалах і зумовлені ними основні типи кристалічних структур. Вміти	Лекції, самостійна робота	Модульна контрольна робота, залік	14

* заповнюється за необхідністю, наприклад для практик, лабораторних курсів тощо.

	<i>визначати основні кристалографічні параметри, що характеризують різні структурні типи. Розуміти принципи експериментального визначення параметрів кристалічної структури методами рентгеноструктурного аналізу.</i>			
2.2	<i>Знати фізичні механізми утворення різних типів дефектів кристалічної структури. Знати і володіти основними методами розв'язку задач щодо визначення фізичних умов генерації дефектів у твердих тілах та фізичних характеристик дефектів у кристалах різних структурних типів.</i>	<i>Лекції, самостійна робота</i>	<i>Модульна контрольна робота, залік</i>	16

6. Співвідношення результатів навчання дисципліни із програмними результатами навчання (необов'язково для вибіркових дисциплін)

Результати навчання дисципліни	1.1	1.2	2.1	2.2
Програмні результати навчання				
ПРН1. Знати, розуміти та вміти застосовувати 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 8 фізичних явищ і процесів для розв'язування складних спеціалізованих задач та практичних проблем з фізики та астрономії.	+		+	
ПРН4. Вміти застосовувати базові математичні знання, які використовуються у фізиці та астрономії: з аналітичної геометрії, лінійної алгебри, математичного аналізу, диференціальних та інтегральних рівнянь, теорії ймовірностей та математичної статистики, теорії груп, методів математичної фізики, теорії функцій комплексної змінної, математичного моделювання.		+		+
ПРН7. Розуміти, аналізувати і пояснювати нові наукові результати, одержані у ході проведення фізичних та астрономічних досліджень відповідно до спеціалізації.		+		+
ПРН8. 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.	+		+	
ПРН10. Вміти планувати дослідження, обирати оптимальні методи та засоби досягнення мети дослідження, знаходити шляхи розв'язання наукових завдань та вдосконалення застосованих методів.		+		+
ПРН11. Вміти упорядковувати, тлумачити та узагальнювати одержані наукові та практичні результати, робити висновки.	+		+	

ПРН12. Розуміти зв'язок фізики та 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.	+		+	
ПРН16. Мати навички роботи із сучасною обчислювальною технікою, вміти використовувати стандартні пакети прикладних програм і програмувати на рівні, достатньому для реалізації чисельних методів розв'язування фізичних задач, комп'ютерного моделювання фізичних та астрономічних явищ і процесів, виконання обчислювальних експериментів.		+		+
ПРН18. Володіти державною та іноземною мовами на рівні, достатньому для усного і письмового професійного спілкування та презентації результатів власних досліджень.	+		+	
ПРН22. Розуміти значення фізичних досліджень для забезпечення сталого розвитку суспільства.	+		+	
ПРН24. Розуміти місце фізики та астрономії у загальній системі знань про природу і суспільство та у розвитку суспільства, техніки і технологій.	+		+	

Структура курсу

Курс складається з 2-х змістових модулів: 1.) «Основи структурної кристалографії», який містить 7 лекцій; 2.) «Основні типи кристалічних структур та особливості кристалічної будови реальних кристалів», який складається з 8 лекцій

7. Схема формування оцінки:

7.1. Форми оцінювання студентів: (азначається перелік видів робіт та форм їх контролю / оцінювання із зазначенням Min. – рубіжної та Max. кількості балів чи відсотків)

- семестрове оцінювання:

1. Модульна контрольна робота 1 (10 балів – 18 балів).
2. Захист лабораторних робіт 1 – 3 (8 балів – 12 балів). П. 1 та п2. Формують загальну оцінку першого змістового модулю.
3. Модульна контрольна робота 2 (10 балів – 18 балів).
4. Захист лабораторних робіт 4,5 (8 балів – 12 балів). П. 1 та п2. Формують загальну оцінку другого змістового модулю.

- підсумкове оцінювання у формі екзамену

7.2. Підсумкове оцінювання у формі екзамену¹: (обов'язкове проведення екзаменаційного оцінювання в письмовій формі)

	ЗМ1/Частина 1 (за наявності)	ЗМ2/Частина 2 (за наявності)	Екзамен	Підсумкова оцінка
Мінімум	<u>18</u>	<u>18</u>	<u>24</u>	<u>60</u>
Максимум	<u>30</u>	<u>30</u>	<u>40</u>	<u>100</u>

у випадку комплексного екзамену слід вказати питому вагу складових

Студент не допускається до заліку, якщо під час семестру набрав менше 36 балів.

¹ Семестрову кількість балів формують бали, отримані студентом у процесі теоретичного засвоєння матеріалу з усіх розділів дисципліни, семінарських занять, виконання практичних, лабораторних, індивідуальних, підсумкових контрольних робіт, творчих робіт впродовж семестру, передбачених робочою навчальною програмою (100 балів - для залікових дисциплін, у випадку, якщо дисципліна завершується екзаменом, то розподіл здійснюється за таким алгоритмом: 60 балів (60%) – семестровий контроль і 40 балів (40%) – екзамен).

(слід чітко прописати умови, які висуваються викладачами даної дисципліни).

Оцінка за іспит не може бути меншою **24 балів** для отримання загальної позитивної оцінки за курс.

7.3. Організація оцінювання: (обов'язково зазначається порядок організації передбачених робочою навчальною програмою форм оцінювання із зазначенням, у тому числі, результатів навчання, опанування яких перевіряється конкретним оцінюванням).

Шкала відповідності

Відмінно / Excellent	90-100
Добре / Good	75-89
Задовільно / Satisfactory	60-74
Незадовільно з можливістю повторного складання / Fail	35-59
Незадовільно з обов'язковим повторним вивченням дисципліни / Fail	0-34
Зараховано / Passed	60-100
Не зараховано / Fail	0-59

8. СТРУКТУРА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН ЛЕКЦІЙ

№ п/п	Назва теми	Кількість годин		
		лекції	лабораторні	Самостійна робота
<i>Частина 1.</i>				
<i>Змістовий модуль 1. Основи структурної кристалографії</i>				
1	Тема 1. Структура твердих тіл. Кристал як континуум та дисконтинуум. Кристалічний многогранник та просторова гратка. Елементарна комірка. Індеси вузлів, прямих та площин. Кристалографічна зона. Параметри Вейсса та індеси Міллера. Прямий і обернений кристалографічний комплекс. Проекційні зображення кристалів Сферична стереографічна, гномічна та гномостереографічна проекції. Сітка Вульфа.	2	-	3
2	Тема 2. Прості елементи симетрії. Площина симетрії. Вісь симетрії. Порядок осі. Центр інверсії. Складні елементи симетрії. Інверсійна та дзеркально-поворотна осі. Матричне зображення операцій симетрії. Поєднання елементів симетрії. Кристалографічні категорії. Кристалографічні системи координат. Сингонії. Класи симетрії.	2	-	3
3	Тема 3. Поняття математичної групи. Абелеві та циклічні групи. Представлення груп. Базис та розмірність представлення груп. Незвідні представлення. Характери.	2	-	3
4	Тема 4. Точкові групи. Побудова точкових груп. Символіка точкових груп. Розподіл основних типів природних кристалів по точковим групам.	2	-	3
5	Тема 5. Трансляційна симетрія у кристалах. Гратка Браве. Вибір елементарної комірки Браве. Типи	2	-	3

	комірок Браве. Елементи симетрії при наявності трансляції. Площина ковзаючого відбивання. Гвинтові осі. Поєднання елементів симетрії дисконтинуума.			
6	Тема 6. Просторові групи. Правильні системи точок. Значність та кратність. Методи побудови правильних систем точок для деяких просторових груп. Символіка просторових груп. Міжнародні таблиці з кристалографії. Лабораторна робота 1. Побудова правильних систем точок для деяких точкових груп моноклінної, гексагональної та кубічної сингоній з використанням «International tables for crystallography 2005»	2	4	3
8	Тема 7. Означення елементарних трансляцій оберненої ґратки. Основні властивості оберненої ґратки. Використання оберненої ґратки у кристалографії та фізиці твердого тіла. Комірка Вігнера-Зейца. Поняття про зони Бриллюена. Лабораторна робота 2. 3D-модельювання структури Si та SiO ₂ з використанням програмного пакету Vesta-3.	2	3	3
<i>Підсумкова модульна контрольна робота 1</i>				
Частина 2.				
Змістовий модуль 2. Основні типи кристалічних структур та особливості кристалічної будови реальних кристалів				
9	Тема 8. Реальні розміри атомів у твердому тілі. Атомні та іонні радіуси. Координаційне число та координаційний многогранник. Типи атомного зв'язку у кристалах. Стійкість кристалічної ґратки. Критерії стійкості для кубічної, тетраедричної та октаедричної координації атомів.	2	-	3
10	Тема 9. Щільні упаковки у кристалах. Коефіцієнт компактності. Тетраедричні та октаедричні порожнини. Гексагональна щільна упаковка. Багаточарові структури. Політипія. Основні структурні типи. Структура чистих елементів - металів (A1, A2, A3).	2	-	3
11	Тема 10. Характеристика структури діаманту (A4). Особливості структури графіту (A9). Типи структур бінарних сполук - кам'яної солі (B1), CsCl, флюориту, сфалериту (B3) та вюрциту (B4). Структурний тип перовскиту (E2 ₁). Характеристика структури корунду(D5) та шпінелі (H1 ₁).	2	-	3
12	Тема 11. Типи структурних дефектів у кристалах. Точкові дефекти. Вакансії та атоми у міжвузловині. Дефекти за Френкелем та за Шоткі. Конфігураційна ентропія кристалів. Рівноважна концентрація дефектів за Френкелем та за Шоткі. Механізми генерації точкових дефектів.	2	-	3

13	<p>Тема 12. Іонна провідність кристалів. Механізми іонної провідності. Суперіонні провідники. Центри забарвлення у іонних кристалах. Лінійні дефекти. Дислокації. Крайова та гвинтова дислокації. Вектор Бюргерса. Позначення дислокацій. Потужність дислокацій. Основні типи дислокацій у кубічних кристалах.</p> <p>Лабораторна робота 3. Моделювання рентгенівських дифрактограм кремнію та 3d-металів з використанням програмного пакету Vesta-3.</p>	2	3	3
14	<p>Тема 13. Рух дислокацій: консервативний та переповзання. Механізми утворення дислокацій. Джерело Франка-Ріда. Струнна модель дислокації. Енергія краювої та гвинтової дислокації. Взаємодія дислокацій. Методи експериментального дослідження дислокацій.</p>	2	-	3
15	<p>Тема 14. Двовимірні дефекти. Дефекти упаковки та їх типи. Двійникування. Вирощування кристалів, методи вирощування. Механічні властивості кристалів. Напруги та деформації в кристалах. Пластична деформація. Спайність, твердість. Теплове розширення кристалів.</p>	2	-	3
	<p>Тема 15. Симетрія та діелектричні властивості. Магнітні властивості. Сегнетоелектричні властивості. Теплопровідність. Подвійне променезаломлення та поляризація світла у кристалах. Застосування поляризованого світла для вивчення властивостей кристалів. П'єзоелектричний ефект. Електрооптичний ефект. П'єзооптичний ефект.</p> <p>Лабораторна робота 4. Ознайомлення з методом рентгеноструктурного аналізу на основі рентгенівського дифрактометра ДРОН-4.</p>	2	4	4
	Підсумкова модульна контрольна робота			
	ВСЬОГО	30	14	46

Примітка: слід зазначити теми, винесені на самостійне вивчення

Загальний обсяг 3 кредити = 90 годин год.², в тому числі:

Лекцій – **30** год.

Семінари – **0** год.

Практичні заняття – **0** год.

Лабораторні заняття – **14** год.

Тренінги – **0** год.

Консультації - **1** год.

Самостійна робота - **46** год.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТІВ:

1. Кристалічний многогранник та просторова ґратка. Елементарна комірка. Індекси вузлів, прямих та площин.
2. Кристаліграфічна зона. Параметри Вейсса та індекси Міллера.

² Загальна кількість годин, відведених на дану дисципліну згідно навчального плану.

3. Прямий і обернений кристалографічний комплекс. Сферична стереографічна, гномомічна та гномостереографічна проєкції. Сітка Вульфа.
4. Прості елементи симетрії. Площина симетрії. Вісь симетрії. Порядок осі. Центр інверсії.
5. Складні елементи симетрії. Інверсійна та дзеркально-поворотна осі.
6. Матричне зображення операцій симетрії.
7. Теореми про сполучення точкових елементів симетрії.
8. Кристалографічні категорії. Кристалографічні системи координат. Сингонії. Класи симетрії.
9. Поняття математичної групи. Абелеві та циклічні групи. Представлення груп. Базис та розмірність представлення груп. Незвідні представлення. Характери.
10. Точкові групи. Побудова точкових груп. Символіка точкових груп.
11. Розподіл основних типів природних кристалів по точковим групам.
12. Трансляційна симетрія у кристалах. Гратка Браве. Вибір елементарної комірки Браве. Типи комірок Браве.
13. Елементи симетрії при наявності трансляції. Площина ковзаючого відбивання. Гвинтові осі.
14. Теореми про сполучення елементів симетрії дисконтинуума.
15. Просторові групи. Правильні системи точок. Значність та кратність.
16. Методи побудови правильних систем точок для деяких просторових груп.
17. Символіка просторових груп. Міжнародні таблиці з кристалографії.
18. Означення елементарних трансляцій оберненої ґратки. Основні властивості оберненої ґратки.
19. Використання оберненої ґратки у кристалографії та фізиці твердого тіла. Комірка Вігнера-Зейца. Поняття про зони Бриллюена.
20. Реальні розміри атомів у твердому тілі. Атомні та іонні радіуси. Координаційне число та координаційний многогранник.
21. Типи атомного зв'язку у кристалах. Стійкість кристалічної ґратки. Критерії стійкості для кубічної, тетраедричної та октаедричної координації атомів.
22. Щільні упаковки у кристалах. Коефіцієнт компактності. Тетраедричні та октаедричні порожнини.
23. Гексагональна щільна упаковка.
24. Багатошарові структури. Політипія.
25. Основні структурні типи. Структура чистих елементів - металів (A1, A2, A3).
26. Характеристика структури діаманту (A4).
27. Особливості структури графіту (A9).
28. Типи структур бінарних сполук - кам'яної солі (B1), CsCl, флюориту, сфалериту (B3) та вюрциту (B4).
29. Структурний тип перовскиту (E2₁).
30. Характеристика структури корунду (D5) та шпінелі (H1₁).
31. Типи структурних дефектів у кристалах. Точкові дефекти. Вакансії та атоми у міжвузловині. Дефекти за Френкелем та за Шоткі.
32. Конфігураційна ентропія кристалів. Рівноважна концентрація дефектів за Френкелем та за Шоткі. Механізми генерації точкових дефектів.
33. Іонна провідність кристалів. Механізми іонної провідності. Суперіонні провідники.
34. Центри забарвлення у іонних кристалах.
35. Лінійні дефекти. Дислокації. Крайова та гвинтова дислокації. Вектор Бюргерса. Позначення дислокацій.
36. Потужність дислокації. Основні типи дислокацій у кубічних кристалах.
37. Рух дислокацій: консервативний та переповзання.
38. Механізми утворення дислокацій. Джерело Франка-Ріда. Струнна модель дислокації.
39. Енергія краєвої та гвинтової дислокації.

40. Взаємодія дислокацій.. Методи експериментального дослідження дислокацій.
41. Двовимірні дефекти. Дефекти упаковки та їх типи. Двійникування.
42. Вирощування кристалів, методи вирощування.
43. Механічні властивості кристалів. Напруги та деформації в кристалах. Пластична деформація. Спайність, твердість.
44. Теплове розширення кристалів.
45. Симетрія та діелектричні властивості. Сегнетоелектричні властивості.
46. Магнітні властивості.
47. Теплопровідність.
48. Подвійне променезаломлення та поляризація світла у кристалах.
49. Застосування поляризованого світла для вивчення властивостей кристалів.
50. П'єзоелектричний ефект. Електрооптичний ефект. П'єзооптичний ефект.

9. РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА³:

Основна: (базова)

1. Л.О. Бірюкович. Кристалографія, кристалохімія та мінералогія. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018.
2. Н.О. Словотенко, І.Т. Бакуменко. Геометрична кристалографія. Львів, ЛНУ ім. Івана Франка, Ч1 – Ч3, 2012.
3. І.М. Фодчук, О.О. Ткач. Основи кристалографії. Чернівці, ЧНУ ім. Юрія Федьковича, 2006.
4. М.П. Шаскольская. Кристаллография, М. «Высшая школа», 1984, 378с.
5. В.И. Новиков, К.М. Козик. Кристаллография и дефекты кристаллической решетки. М., «Металлургия». 1990, 336с.
6. В.Н. Вигдорович, Г.Ф. Ухлинов. Структура идеальных и реальных кристаллов. М.,1980.

Додаткова:

1. Штрайтвольф Г. Теория групп в физике твердого тела. М., «Мир», 1971.
2. Современная кристаллография (в четырех томах):
3. Б.К.Вайнштейн .Симметрия кристаллов Методы структурной кристаллографии.. М.: Наука, 1979.
4. Б.К.Вайнштейн, В.М.Фридкин, В.Л.Инденбом. Структура кристаллов.. М.: Наука 1979.
5. А.А.Чернов, Е.И.Гиваргизов, Х.С.Багдасаров, В.А.Кузнецов, Л.Н.Демьянец, А.Н.Лобачев. М Образование кристаллов.М.: Наука, 1980.
6. Л.А.Шувалов, А.А.Урусовская, И.С.Желудев. Физические свойства кристаллов. М.: Наука, 1981.
7. Ю.К. Егоров-Тисменко. Кристаллография и кристаллохимия. М., КДУ, 2005, 592с.
8. В.А.Залесский, и др. М.: “Наука”, 1981. Васильев Д.М., Физическая кристаллография, М.: Metallurgia, 1981г. 248с.
9. Н.В. Белов. Очерки по структурной кристаллографии. М., 1986.
10. Сонин А.С. Курс макроскопической кристаллофизики: Учебное пособие для вузов. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 256 с.
11. А.А.Чернов, Е.И.Гиваргизов, Х.С.Багдасаров, В.А.Кузнецов, Л.Н.Демьянец, А.Н.Лобачев. Т3. Образование кристаллов. М.: “Наука”, 1980.
12. Л.А.Шувалов, А.А.Урусовская, И.С.Желудев, В.А.Залесский, и др. Т4. Физические свойства кристаллов. М.: “Наука”, 1981.

³ В тому числі Інтернет ресурси

