

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

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Проректор з науково-педагогічної
роботи ХНУ імені В.Н.Каразіна

“ _____ ” _____ 2020 р.

Робоча програма навчальної дисципліни
Загальний курс “КРИСТАЛОГРАФІЯ І КРИСТАЛОФІЗИКА”

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 _____

2020/2021 навчальний рік

Програму рекомендовано до затвердження Вченою радою фізичного факультету

21 червня 2020 року, протокол № 6

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

Програму схвалено на засіданні кафедри фізики кристалів

Протокол № 7 від 20 червня 2020 року

Завідувач кафедри Гриньов Б. В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Програму погоджено методичною комісією фізичного факультету

Протокол № 6 від 20 червня 2019 року

Голова методичної комісії

(підпис)

(прізвище та ініціали)

ВСТУП

Програма навчальної дисципліни “Кристалографія і кристалофізика” складена відповідно до освітньо-професійної програми підготовки

_____перший (бакалавр)_____

(назва рівня вищої освіти)

спеціальності (напряму) _____ 104 – фізика та астрономія _____

1. Опис навчальної дисципліни

1.1. Метою викладання навчальної дисципліни є

вивчити фізичні властивості кристалічних тіл з врахуванням їх анізотропії на основі застосування тензорного аналізу

1.2. Основними завданнями вивчення дисципліни є

щотижнева лекційна робота впродовж 6-го семестру, самостійна робота студента, виконання індивідуальних контрольних завдань.

1.3. Кількість кредитів – 4

1.4. Загальна кількість годин – 120

1.5. Характеристика навчальної дисципліни	
нормативна	
Денна форма навчання	Заочна (дистанційна) форма навчання
Рік підготовки	
3-й	-й
Семестр	
5-й	-й
Лекції	
64 год.	год.
Практичні, семінарські заняття	
год.	год.
Лабораторні заняття	
год.	год.
Самостійна робота	
56 год.	год.
Індивідуальні завдання	
2 контрольні роботи	

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

знати: основні поняття геометричної кристалографії, елементи тензорного аналізу, який використовують в кристалофізиці для описання фізичних властивостей кристалів з врахуванням

їх анізотропії. Різноманітні фізичні властивості, які описуються за допомогою тензорів від 1 до 4 рангів.

вміти: використовувати формули структурної кристалографії і метод тензорного аналізу при вирішуванні різноманітних задач кристалографії і кристалофізики з врахуванням анізотропії фізичних властивостей.

2. Тематичний план навчальної дисципліни

Розділ 1. Основні поняття геометричної кристалографії

Тема:

- 1.1. Анізотропія та симетрія властивостей кристалів
- 1.2. Основні (прості) елементи симетрії
- 1.3. Складні (складені) елементи симетрії
- 1.4. Елементарна комірка та просторова ґратка
- 1.5. Кристалографічні системи та категорії
- 1.6. Класи (точкові групи) елементів симетрії
- 1.7. Значення класів симетрії
- 1.8. Кристалографічні проєкції

Розділ 2. Просторові ґратки

Тема:

- 2.1. Аналітичний опис геометричних елементів ґратки
- 2.2. Обернена ґратка
- 2.3. Основні формули структурної кристалографії
- 2.4. Ґратки Браве
- 2.5. Особливості гексагональної та ромбоедричної сингоній
- 2.6. Елементи симетрії дисконтинууму
- 2.7. Просторові (федорівські) групи
- 2.8. Поняття про антисиметрію

Розділ 3. Структура кристалів

Тема:

- 3.1. Сили зв'язку в кристалах
- 3.2. Атомні й іонні радіуси
- 3.3. Кульові пакування як моделі кристалічних структур
- 3.4. Кристалічні структури

Розділ 4. Математичні основи кристалофізики.

Тема:

- 4.1. Скаляри, вектори, тензори 1 – 4 рангу. Запис з індексами підсумовування.
- 4.2. Матриця перетворювання. Закони перетворювання: координат точки, компонент вектора, компонент тензора довільного рангу.
- 4.3. Характеристична поверхня 2 го порядку для тензора другого рангу. Головна система координат. Графічний метод Мора. Кристалофізична система координат. Спрощення системи рівнянь для тензора 2 –го рангу.
- 4.4. Геометричні властивості характеристичної поверхні для тензора 2 –рангу. Зв'язок значення фізичної величини та радіуса – вектора характеристичної поверхні. Визначення напрямку вектору, який описує вивчаєму властивість.
- 4.5. Вплив симетрії кристалів на анізотропію фізичних властивостей. Елементи симетрії. Точкові групи симетрії. Принцип Неймана.
- 4.6. Фізичні властивості, які описуються тензором першого рангу. Піроелектрики. Електрокалоричний ефект. Приклади.

4.7. Оптичні властивості кристалів. Анізотропія показника заломлення світла. Ефект двопріміневого заломлення світла. Оптична індикатриса. Вплив симетрії кристалів на оптичні властивості. Приклади.

Розділ 5. Фізичні властивості кристалів, які описуються тензорами другого, третього та четвертого рангу.

Тема:

- 5.1. Магнітні властивості кристалів. Сили та моменти сил, які діють на кристал в однородному та неоднородному магнітному полі.
- 5.2. Електрична поляризація кристалів. Відмінність тензорного описання електричної поляризації кристалів від описання намагніченості.
- 5.3 Тензор механічного напруження. Типи напруженого стану. Однорідне та неоднорідне напруження. Нормальні та тангенціальні компоненти тензора напруження. Конкретні приклади. Обчислювання максимальних, мінімальних та середніх значень напруження.
- 5.4. Тензор деформацій. Вплив симетрії кристалу. Узагальнення для неоднорідної деформації. Тензор теплового розширення. Конус нулевого теплового розширення для кристалу кальцита.
- 5.5. Пьезоелектрики. Тензор третього рангу. Використання матричного описання. Зменшення числа пьезомодулів з врахуванням симетрії кристалу. Метод прямої перевірки. Приклади для різних елементів симетрії.
- 5.6. Пружність. Тензори четвертого рангу. Матричне описання. Зменшення числа пружних модулів у зв'язку з врахуванням симетрії кристалу. Закон Гука. Приклади.
- 5.7. Процеси переносу. Теплопровідність. Тензори теплопровідності та теплового супротиву. Окремі види стаціонарного теплового потоку. Загальна задача стаціонарного теплового потоку. Тепловий потік від точкового джерела.

3. Структура навчальної дисципліни

Назви розділів і тем	Кількість годин					
	Денна форма					
	Усього	у тому числі				
	л	п	л.	ін.	с.р.	
1	2	3	4	5	6	7
Розділ 1. Основні поняття геометричної кристалографії.						
1. Анізотропія та симетрія властивостей кристалів .	4	2				2
2. Основні (прості) елементи симетрії.	4	2				2
3. Складні (складені) елементи симетрії.	4	2				2
4. Елементарна комірка та просторова ґратка.	4	2				2
5. Кристалографічні системи та категорії.	4	2				2
6. Класи (точкові групи) елементів симетрії.	4	2				2
7. Значення класів симетрії. Кристалографічні проєкції.	4	2				2
Разом за розділом 1	14	14				14
Розділ 2. Просторові ґратки.						
1. Аналітичний опис геометричних елементів ґратки. Обернена ґратка	4	2				2
2. Основні формули структурної кристалографії.	4	2				2
3. Ґратки Браве.	4	2				2
224. Особливості гексагональної та ромбоєдричної сингоній.	4	2				2
6. Просторові (федорівські) групи.4	4	2				2
5. Елементи симетрії дисконтинууму.	4	2				2
7. Поняття про антисиметрію.	4	2				2
Разом за розділом 2	28	14				14

		4				
Розділ 3. Структура кристалів.						
221. Сили зв'язку в кристалах.						
2. Атомні й іонні радіуси.						
3. Кульові пакування як моделі кристалічних структур.22	2	2				
4. Кристалічні структури.	2	2				
Разом за розділом 3						
8 8						
Розділ 4. Математичні основи кристалофізики.						
1. Скаляри, вектори, тензори 1 – 4 рангу. Запис з індексами підсумовування.	4	2				2
22. Матриця перетворювання. Закони перетворювання: координат точки, компонент вектора, компонент тензора довільного рангу.						
3. Характеристична поверхня 2 го порядку для тензора другого рангу. Головна система координат.Графічний метод Мора. Кристалофізична система координат.Спрощення системи рівнянь для тензора 2 –го рангу.42	4	2				2
4. Геометричні властивості характеристичної поверхні для тензора 2 – рангу. Зв'язок значення фізичної величини та радіуса – вектора характеристичної поверхні. Визначення напрямку вектору, який описує вивчаєму властивість.	4	2				2
5. Вплив симетрії кристалів на анізотропію фізичних властивостей. Елементи симетрії. Точкові групи симетрії. Принцип Неймана.	4	2				2
6. Фізичні властивості, які описуються тензором першого рангу. Піроелектрики. Електрокалоричний ефект. Приклади.	4	2				2
7. Оптичні властивості кристалів. Анізотропія показника заломлення світла. Ефект двопроміневого заломлення світла. Оптична індикатриса. Вплив симетрії кристалів на оптичні властивості. Приклади.	4	2				2
Разом за розділом 4						
28 1 4 14						
Розділ 5. Фізичні властивості кристалів, які описуються тензорами другого, третього та четвертого рангу						
1. Магнітні властивості кристалів.Сили та моменти сил, які діють на кристал в однородному та неоднородному магнітному полі.	4	2				2
22. Електрична поляризація кристалів. Відмінність тензорного описання електричної поляризації кристалів від описання намагніченості.						
3. Тензор механічного напруження. Типи напруженого стану. Однорідне та неоднорідне напруження. Нормальні та тангенціальні компоненти тензора напруження. Конкретні приклади. Обчислювання максимальних, мінімальних та середніх значень напруження.42	4	2				2
4. Тензор деформацій. Вплив симетрії кристалу. Узагальнення для неоднорідної деформації. Тензор теплового розширення. Конус нулевого теплового розширення для кристалу кальцита	4	2				2
5. Пьезоелектрики. Тензор третього рангу. Використання матричного описання. Зменшення числа пьезомодулів з врахуванням симетрії кристалу. Метод прямої перевірки. Приклади для різних елементів симетрії	4	2				2
6. Пружність. Тензори четвертого рангу. Матричне описання. Зменшення числа пружних модулів у зв'язку з врахуванням симетрії кристалу. Закон Гука. Приклади.	4	2				1
7. Процеси переносу. Теплопровідність. Тензори теплопровідності та теплового супротиву. Окремі види стаціонарного теплового потіку. Загальна задача стаціонарного теплового потіку. Тепловий потік від точкового джерела.	4	2				1

Разом за розділом 5	28	1			12
Контрольна робота		4			2
Усього годин	120	6		2	54
		4			

4. Теми семінарських (практичних, лабораторних) занять

з	Назва теми	Кількість
1		
2		
	Разом	

5. Завдання для самостійної роботи

№	З використанням літературних джерел із списку рекомендованої літератури проробка питань, поставлених викладачем на лекції з теми:	Кількість годин
1	Анізотропія та симетрія властивостей кристалів .	2
2	Основні (прості) елементи симетрії.	2
3	Складні (складені) елементи симетрії.	2
4	Елементарна комірка та просторова ґратка.	2
5	Кристалографічні системи та категорії.	2
6	Класи (точкові групи) елементів симетрії.	2
7	Значення класів симетрії. Кристалографічні проекції.	2
8	Аналітичний опис геометричних елементів ґратки. Обернена ґратка	2
9	Основні формули структурної кристалографії.	2
10	Ґратки Браве.	2
11	Особливості гексагональної та ромбоєдричної сингоній.	2
12	Елементи симетрії дисконтинууму.	2
13	Просторові (федорівські) групи.	2
14	Поняття про антисиметрію.	2
15	Скаляри, вектори, тензори 1 – 4 рангу. Запис з індексами підсумовування.	2
16	Матриця перетворювання. Закони перетворювання: координат точки, компонент вектора, компонент тензора довільного рангу.	2
17	Характеристична поверхня 2 го порядку для тензора другого рангу. Головна система координат. Графічний метод Мора. Кристалофізична система координат. Спрощення системи рівнянь для тензора 2 –го рангу.	2
18	Геометричні властивості характеристичної поверхні для тензора 2 –рангу. Зв'язок значення фізичної величини та радіуса – вектора характеристичної поверхні. Визначення напрямку вектору, який описує вивчаєму властивість.	2
19	Вплив симетрії кристалів на анізотропію фізичних властивостей. Елементи симетрії. Точкові групи симетрії. Принцип Неймана.	2
20	Фізичні властивості, які описуються тензором першого рангу. Піроелектрики. Електрокалоричний ефект. Приклади.	2
21	Оптичні властивості кристалів. Анізотропія показника заломлення світла. Ефект двопріменного заломлення світла. Оптична	2

	індикатриса. Вплив симетрії кристалів на оптичні властивості. Приклади.	
22	Магнітні властивості кристалів. Сили та моменти сил, які діють на кристал в однородному та неоднородному магнітному полі.	2
23	Електрична поляризація кристалів. Відмінність тензорного описання електричної поляризації кристалів від описання намагніченості.	2
24	Тензор механічного напруження. Типи напруженого стану. Однорідне та неоднорідне напруження. Нормальні та тангенціальні компоненти тензора напруження. Конкретні приклади. Обчислювання максимальних, мінімальних та середніх значень напруження.	2
25	Тензор деформацій. Вплив симетрії кристалу. Узагальнення для неоднорідної деформації. Тензор теплового розширення. Конус нулевого теплового розширення для кристалу кальцита	2
26	Пьезоелектрики. Тензор третього рангу. Використання матричного описання. Зменшення числа пьезомодулів з врахуванням симетрії кристалу. Метод прямої перевірки. Приклади для різних елементів симетрії	2
27	Пружність. Тензори четвертого рангу. Матричне описання. Зменшення числа пружних модулів у зв'язку з врахуванням симетрії кристалу. Закон Гука. Приклади.	1
28	Процеси переносу. Теплопровідність. Тензори теплопровідності та теплового супротиву. Окремі види стаціонарного теплового потіку. Загальна задача стаціонарного теплового потіку. Тепловий потік від точкового джерела.	1
	Контрольна робота	2
	Разом	56

6. Індивідуальні завдання

7. Методи контролю

контр. роб., залік.

Питання до контролю:

Завдання 1. Яку зміну температури можна вимірити, використовуючи піроелектричний приймач, що складається з турмалінової пластинки товщиною 1 мм і мілівольтметра чутливістю 10^{-3} В/поділлка? Як краще вирізувати пластинку для цих цілей? Якою величиною можна охарактеризувати чутливість такого піроелектричного приймача? У скільки разів збільшилася б чутливість приймача, якби замість турмалінової пластинки використовувалася пластинка сульфату літію тієї ж товщини, вирізана перпендикулярно полярній осі.

Завдання 2. В інтервалі кімнатних температур ($22 - 24^{\circ}\text{C}$) потрібно проконтролювати точність підтримки сталою температуру або вимірити малу зміну її. Який кристал – турмалін чи сегнетову сіль – слід застосувати для цього? Яким приладом скористатися: балістичним гальванометром чи мілівольтметром?

Завдання 3. Чи витримає пластинка з кристала тригліцинсульфата (ТГС) різке зниження температури від точки Кюрі 49°C до 39°C ? Електрична міцність досліджуваного кристала дорівнює 40 кВ/см .

Завдання 4. Знайти величину і напрямок вектора густини струму (у координатній системі X_1, X_2, X_3), що виникає в кристалічній пластинці площею S і товщиною d ($\sqrt{S} \gg d$) під дією

зовнішнього поля $E = 150$ В/см, яке прикладене в напрямку $(\sqrt{2}/2, \sqrt{2}/2, 0)$, якщо тензор питомої електропровідності кристала в цій координатній системі має вигляд:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} 9 & -2 & 8 \\ -2 & 16 & 0 \\ 8 & 0 & 25 \end{bmatrix} \cdot 10^{-7} \text{ 1/ом см.}$$

Завдання 5. Тензором якого виду описується лінійне розширення кристала сульфату літію в ортогональній системі координат X_1, X_2, X_3 , якщо: а) вісь симетрії $-2 \parallel X_3$; б) вісь симетрії $2 \parallel X_2$?

Завдання 6. Тензор питомої електричної провідності кристала, виражений у 10^{-7} 1/ом·см, має вигляд:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} 25 & 0 & 0 \\ 0 & 7 & -3/\sqrt{3} \\ 0 & -3/\sqrt{3} & 13 \end{bmatrix}.$$

У яких напрямках щодо системи координат, у якій тензор σ_{ij} має приведений у задачі вигляд, напрямок вектора густини струму буде збігатися з напрямком прикладеного електричного поля?

Завдання 7 Вимірювання коефіцієнтів теплового розширення триклинного кристала проводилися на зразку, що має форму куба. При цьому виміри цих коефіцієнтів було виконано уздовж ребер куба і трьох його об'ємних діагоналей. Показати, як за даними вимірів можуть бути обчислені компоненти тензора теплового розширення.

Завдання 8. Як слід орієнтувати пластинку кальциту, щоб при нагріванні вона не змінювала своєї товщини?

Завдання 10. До кристалічної платівці L- зрізу кристала ADP доклали одновісне механічне напруження стиснення в напрямку нормалі до її робочих гранів. Як буде виглядати тензор напружень в кристалофізичній системі координат?

Завдання 11. Напружений стан кристала кварцу в кристалофізичній системі координат задається у такий спосіб: $\sigma_{11} = 1$ Кг/см², $\sigma_{22} = 2$ Кг/см², $\sigma_{33} = 3$ Кг/см², $\sigma_{12} = -0,5$ Кг/см². Визначити величини максимальних і мінімальних нормальних напружень, що діють у кристалі.

Завдання 12. При пружній деформації кристалічного зразка, що має форму куба розміром $1 \times 1 \times 1$ см³, його точки зазнають наступних зміщень, см:

$$u_1 = (4X_1 + 3X_2 - 5X_3) \cdot 10^{-4}; \quad u_2 = (7X_1 - 13X_2 + 4X_3) \cdot 10^{-4}; \quad u_3 = (9X_1 - 2X_2 + 4X_3) \cdot 10^{-4}.$$

Знайти зміну кутів між ребрами куба та зміну його об'єму при деформації.

Завдання 13. Стан пружної деформації кристала задається тензорами деформації:

$$\text{а) } \begin{bmatrix} 0,001 & 0 & 0 \\ 0 & -0,004 & 0 \\ 0 & 0 & 0,008 \end{bmatrix}; \quad \text{б) } \begin{bmatrix} 0,0001 & 0 & 0 \\ 0 & 0,001 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Визначити вигляд характеристичної поверхні деформації, а також поверхні, до якої переходить сфера одиничного радіуса після деформацій, обумовлених цими тензорами.

Завдання 14. Параметри комірки кристала арагонита задаються наступними значеннями: $a : b : c = 0,6224 : 1 : 0,7206$. При нагріванні від 0 до 100°C угол φ між гранями (100) и (110) зменшується на $1,14'$, а угол γ між гранями (001) и (011) росте на $2,84'$. Коефіцієнт об'ємного розширення цього кристала дорівнює $62 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Обчислити три головні коефіцієнти теплового розширення.

Завдання 15. Знайти вигляд матриці п'єзоелектричних модулів кристала сегнетової солі, якщо відомо, що його кристалографічна симетрія характеризується наявністю трьох взаємно перпендикулярних осей симетрії другого порядку.

Завдання 16. Для визначення п'єзомодулів поляризованої кераміки титанату барію з неї виготовили зразок у вигляді куба і подіяли напруженнями стиску σ в напрямку осі поляризації кераміки. Потім на цей зразок подіяли гідростатичним стиском P . На яких гранях куба при таких випробуваннях виникають електричні заряди? Які п'єзомодулі кераміки титанату барію можуть бути визначені за результатами цих випробувань?

Завдання 17. Визначити вигляд матриці пружних коефіцієнтів S_{ij} класу симетрії 222 , до якого відносяться кристали сегнетової солі.

Завдання 18. Кристал кварцу піддали одноосному стиску σ а) уздовж напрямку $[\bar{2}110]$, б) уздовж напрямку $[0001]$. Знайти характер пружних деформацій, випробовуваних кристалом.

Завдання 19. Які з пружних коефіцієнтів кубічних кристалів можуть бути визначені за результатами вимірів величини подовжньої деформації, а також величини об'ємного стиску $\Delta V/V$ кристалічних зразків, що зазнають дію напружень одноосного стискання σ в напрямку типу $[100]$?

Завдання 20. Довести, що величина об'ємного стиснення кристалів кубічного класу симетрії не залежить від напрямку дії одноосного механічного напруги.

8. Схема нарахування балів

Поточний контроль, контрольна робота, залік				
Поточне тестування за темами	Поточне тестування за темами	Контрольна робота, передбачена навчальним	Залік	Сума
T1-T7	T8-T14			100
14	14	32	40	

T1, T2 ... – теми розділів.

Поточне тестування з кожної теми складається з двох тестових завдань. Відповідь на кожне завдання оцінюється в 1 бал.

Контрольна робота складається з 4-ох завдань, відповідь на кожне оцінюється у 8 балів.

На заліку студент має відповісти на два питання білету. Правильна відповідь на кожне питання оцінюється в 20 балів.

Шкала оцінювання

Сума балів за всі види навчальної діяльності протягом семестру	Оцінка за національною шкалою	
	для екзамену	для заліку
90 – 100	відмінно	

70-89	добре	зараховано
не зараховано 50-69	задовільно	
незадовільно 1-49		

9. Рекомендована література

Основна література

1. Бойко Ю.І., Методичний посібник до вивчення курсу “Кристаллофізика”, Харків, 1990, 62 стор.
2. Глосковська Н.К., Основи кристаллофізики (методичний посібник), Київ, 1992, 78 стор.
3. Переломова Н.В., Тагієва М.М., Задачник по кристаллофізиці, Москва, «Наука», 1972, 189 стр.
4. Най Дж., Физические свойства кристаллов, Москва, “Мир”, 1967, 376 стр..
5. Сиротин Ю.И., Шаскольская М.П., Основы кристаллофізики, Москва, “Наука”, 1970, 800 стр.

Допоміжна

3. Шубников А.В., Флинт Е.Е., Бокий Г.Б. Основы кристаллографии, Москва, “Наука” 1961, 302 стр.

15. Інформаційні ресурси

Екзаменаційні білети до курсу

Билет №1.

1. Перетворення координат точки.
2. Тензор деформацій і теплове розширення.

Билет №2.

1. Закон перетворення тензора другого рангу..
2. Тензори коефіцієнтів теплопровідності і теплового опору.

Билет №3.

1. Вплив симетрії кристалів на їх фізичні властивості. принцип Неймана.
2. Загальний випадок стаціонарного теплового потоку в анізотропних кристалах.

Билет №4.

1. Характеристична поверхня для тензора другого рангу.
2. П'єзоелектрика.

Билет №5.

1. Головні осі координат. Спрощення рівнянь, що описують властивості кристалів.
2. Зворотний п'єзоелектричний ефект.

Билет №6.

1. Величина, що характеризує фізичні властивості кристала в заданому напрямку.

2. Частинні випадки стаціонарного теплового потоку в кристалах: тонка пластинка і тонкий довгий стрижень.

Билет №7.

1. Геометричні властивості характеристичної поверхні.
2. Метод Фумі зменшення числа п'єзоелектричних модулів.

Билет №8.

1. Закон перетворення компонент тензора другого рангу.
2. Магнітна сприйнятливість анізотропних кристалів.

Билет №9.

1. Загальне визначення тензора будь-якого рангу в кристалофізиці.
2. Тензор напружений.

Билет №10.

1. Матриця і закон перетворення тензора будь-якого рангу.
2. Електрична поляризація анізотропних кристалів.

Билет №11.

1. Принцип Неймана в кристалофізиці.
2. Момент сил, що діє на анізотропний кристал в однорідному магнітному полі.

Билет №12.

1. Геометричні властивості характеристичної поверхні.
2. Тензор четвертого рангу. Пружні властивості кристалів.

Билет №13.

1. Сила, що діє на кристал в неоднорідному магнітному полі.
2. Конус теплового розширення в кальциті.

Билет №14.

1. Магнітна сприйнятливість магнітного анізотропного кристалічного порошку.
2. Зворотний п'єзоелектричний ефект в анізотропних кристалах.

Билет №15.

1. Оптична індикатриса. Приклади для різних класів симетрії.
2. Електрокалоричний ефект в кристалах.

Билет №16.

1. Тензор деформацій.
2. Тепловий потік через анізотропну кристалічну платівку.

Билет №17.

1. Графічний метод визначення головних значень тензора другого рангу.
2. Тепловий потік від точкового джерела тепла в анізотропному середовищі.

Билет №18

1. Тензор коефіцієнтів теплопровідності в анізотропних кристалах.
2. Прямий п'єзоелектричний ефект в кристалах.

Билет №19.

1. Піроелектричний ефект в кристалах.
2. Електрооптичний ефект Погкельса в кристалах.

Билет №20.

1. Квадратичний електрооптичний ефект в кристалах (ефект Керра).
2. Визначення напрямку результуючого вектора при використанні властивостей характеристичної поверхні.

Билет №21.

1. Пружні властивості кристалів кубічного класу симетрії.
2. П'єзооптичні властивості кристала кварцу.