М. О. Романюк

КРИСТАЛООПТИКА

ЗМІСТ

Передмова до другого видання 10
Часто вживані позначення 11
Вступ 13

Розділ 1. ФЕНОМЕНОЛОГІЧНИЙ ОПИС ОПТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КРИСТАЛІВ 15
1.1. Рівняння Максвелла для прозорих немагнітних кристалів 15
1.2. Властивості тензора діелектричної проникності 17
1.3. Плоскі електромагнітні хвилі у кристалах 20
1.3.1. Хвильове рівняння у векторній формі 20
1.3.2. Орієнтація векторів електромагнітної хвилі у кристалі 21
1.3.3. Рівняння Френеля для нормальних швидкостей. Поляризація хвиль 22
1.4. Одинарні оптичні поверхні 24
1.4.1. Оптична індикатриса 24
1.4.2. Оптичні осі 28
1.5. Поверхні променевих швидкостей 29
1.5.1. Інверсійний метод у кристалооптиці 29
1.5.2. Подвійні оптичні поверхні 32
1.5.2.1. Поверхні двовісних кристалів 32
1.5.2.2. Зовнішня та внутрішня конічні рефракції 37
1.5.2.3. Поверхні одновісних кристалів 40
1.5.2.4. Інші оптичні вказівні поверхні 42
1.6. Просторова дисперсія світла у кристалах 44
1.6.1. Рівняння зв'язку для ізотропно-асиметричного середовища 44
1.6.2. Плоскі хвилі в ізотропно-асиметричному середовищі при врахуванні просторової дисперсії світла 46
1.7. Плоскі хвилі у некубічних гіротропних кристалах 51
1.7.1. Симетрійні властивості тензора гірації. Вектор гірації 51
1.7.2. Гіраційні поверхні 54
1.7.2.1. Ізотропні кристали 55
1.7.2.2. Одновісні кристали 55
1.7.2.3. Двовісні кристали 56
1.7.3. Еліптичне двопроменезаломлення 57
1.7.3.1. Характеристики еліптично-поляризованих хвиль 57
1.7.3.2. Неортогональність векторів $\vec{D}$ 62
1.7.3.3. Додаткові хвилі в області резонансів 62
1.8. Негіротропні кристали 64
1.8.1. Додаткові хвилі в області резонансів 64

1.8.2. Анізотропія кубічних кристалів 68
1.9. Власне гіротропні середовища 70
1.9.1. Загальні властивості і симетрійні ознаки власне гіротропних середовищ 70
1.9.2. Поляризація хвиль у власне гіротропних кристалах 71
1.9.3. Слабка гіротропія 72
1.9.4. Прояви оптичної неоднорідності поверхні зразка 74
1.10. Прозорі магнітні кристали 75
1.10.1. Загальні властивості прозорих магнітних кристалів 75
1.10.2. Тензори ε та μ магнітних кристалів 77
1.10.3. Ефект Фарадея і магнітний круговий дихроїзм 78
1.10.4. Магнітне лінійне двопроменезаломлення і магнітний лінійний дихроїзм 79
1.10.5. Ефект Фарадея при наявності природного двопроменезаломлення 79
1.11. Поняття про мікроскопічні механізми магнітооптичної активності 81
1.12. Забарвлені кристали 85
1.12.1. Феноменологічний опис оптичних властивостей забарвлених кристалів 85
1.12.2. Висновки з коваріантного опису 89
1.12.3. Хвилі Фогта 91
1.12.4. Зв'язок показників заломлення з фундаментальними характеристиками речовини 92
1.12.5. Вплив ізотопного заміщення елементів структури на показники заломлення кристалів 99
1.12.6. Оптика метаматеріалів 104
Контрольні запитання та завдання 109

Розділ 2. ПАРАМЕТРИЧНІ ЕФЕКТИ У КРИСТАЛООПТИЦІ 111
2.1. Зміна оптичної індикатриси під впливом зовнішніх полів 111
2.2. Електрооптичний ефект 114
2.3. П'єзооптичний ефект 121
2.4. Електрогірація 126
2.5. П'єзогірація 129
2.6. Магнітооптичні ефекти 131
2.7. Невзаємне лінійне двопроменезаломлення 135
2.8. Термодинамічна теорія електрооптичного та пружнооптичного ефектів 136
Контрольні запитання та завдання 144

Розділ 3. СИМЕТРІЙНІ АСПЕКТИ КРИСТАЛООПТИКИ 145
3.1. Елементи симетрії кристалів 145
3.2. Виведення точкових груп симетрії 150
3.2.1. Групи симетрії некубічних кристалів 150

3.2.2. Групи симетрії кубічних кристалів..... 152
3.2.3. Позначення точкових груп. Сингонії..... 153
3.2.4. Про точкові групи "антисиметрії", магнітної та повної симетрії..... 155
3.2.5. Просторові групи симетрії..... 157
3.2.6. Установлення кристалів різних сингоній..... 158
3.3. Поділ кристалів за симетрією оптичної індикатриси..... 160
3.4. Характер погасання кристалів різних сингоній..... 162
3.5. Дисперсія оптичних індикатрис..... 164
3.6. Двійникування сегнетоелектриків..... 166
3.6.1. Загальні зауваження..... 166
3.6.2. Доменна структура типових сегнетоелектриків: титанату барію, дигідрофосфату калію, сегнетової солі та тригліцинсульфату..... 168
3.6.2.1. Титанат барію..... 168
3.6.2.2. Дигідрофосфат калію..... 169
3.6.2.3. Сегнетова сіль..... 170
3.6.2.4. Тригліцинсульфат..... 172
3.7. Симетрія та ідентичність оптичних осей двовісних кристалів..... 176
Контрольні запитання та завдання..... 177

Розділ 4. МЕТОДИКА КРИСТАЛООПТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ..... 178
4.1. Інтерференція світла у кристалічних пластинках..... 178
4.2. Загальний опис поляризованого світла..... 186
4.2.1. Еліпс поляризації..... 186
4.2.2. Матриці та вектор Джонса..... 188
4.2.3. Матриці Мюллера. Вектор Стокса..... 190
4.2.4. Аналіз поляризації світла методом сфери Пуанкаре..... 196
4.3. Поверхні сталої різниці ходу в кристалах..... 201
4.4. Експериментальні методики дослідження оптичної індикатриси кристалів..... 206
4.4.1. Вимоги до підготування поляризаційного мікроскопа..... 206
4.4.2. Фазові компенсатори..... 208
4.4.2.1. Кварцовий клин..... 208
4.4.2.2. Пластинка чутливого фіолетового відтінку..... 208
4.4.2.3. Чвертьхвильова пластинка..... 208
4.4.2.4. Компенсатор Берека..... 208
4.4.2.5. Компенсатор Сенармона..... 209
4.4.2.6. Компенсатор Бабіне..... 211
4.4.2.7. Компенсатор Солейля..... 212
4.4.3. Поляризатори..... 213
4.4.4. Дослідження кристалів у збіжному світлі. Характерні коноскопічні фігури..... 215
4.4.4.1. Одновісні кристали..... 215

4.4.4.2. Двовісні кристали ... 219
4.4.5. Інші особливості коноскопічних фігур та їхнє пояснення ... 221
4.4.5.1. Кристали нижчих сингоній ... 221
4.4.5.2. "Коноскопічні" фігури сферолітів ... 222
4.5. Визначення оптичного знака кристалів ... 222
4.6. Методи визначення двопроменезаломлення кристалів ... 227
4.6.1. Загальні положення ... 227
4.6.2. Малі різниці ходу. Компенсатор Сенармона ... 229
4.6.3. Визначення різниць ходу $\Delta \approx (0,5-4)\lambda$ ... 229
4.6.4. Спектроскопічні методи визначення великих різниць ходу ... 232
4.6.5. Встановлення орієнтації кристалічних зразків ... 234
4.7. Методи визначення показників заломлення ... 235
4.7.1. Імерсійний метод ... 235
4.7.2. Метод призми ... 237
4.7.3. Імерсійний метод Обреїмова ... 238
4.7.4. Фотографічний метод Обреїмова ... 240
4.7.5. Метод рефрактометра ... 242
4.8. Основи методу Федорова та визначення головних кристалооптичних характеристик довільно орієнтованого зразка ... 244
4.9. Визначення компонент тензора гірації ... 250
4.10. Поняття про еліпсометрію ... 257
Контрольні запитання та завдання ... 262

Розділ 5. ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ДЕЯКИХ СЕГНЕТОЕЛЕКТРИЧНИХ ТА РІДКИХ КРИСТАЛІВ ... 263
5.1. Спектральні залежності показників заломлення анізотропних кристалів груп СС і ТГС ... 263
5.1.1. Кристали групи сегнетової солі ... 263
5.1.2. Кристали групи тригліцинсульфату ... 265
5.1.3. Константи дисперсійної формули та рефракція кристалів груп ТГС і СС ... 269
5.2. Температурні зміни показників заломлення кристалів СС та кристалів групи ТГС ... 271
5.2.1. Кристали сегнетової солі ... 271
5.2.2. Кристали тригліцинсульфату ... 273
5.2.3. Температурні залежності параметрів ефективних осциляторів кристалів групи СС і ТГС ... 275
5.3. Кристали типу A_2BX_4 ... 277
5.3.1. Показники заломлення ... 277
5.3.2. Температурні зміни показників заломлення кристалів групи A_2BX_4 ... 278
5.3.3. Температурні зміни двопроменезаломлення фероїків у несумірній фазі ... 282

5.4. Інверсія знака двопроменезаломлення..... 283
5.4.1. Загальні поняття і характерні приклади..... 283
5.4.2. Феноменологічний опис інверсії знака двопроменезаломлення..... 287
5.4.3. Результати експериментального дослідження інверсії знака двопроменезаломлення..... 289
5.5. Радіаційні зміни показників заломлення..... 296
5.5.1. Кристали сегнетової солі..... 296
5.5.2. Кристали тригліцинсульфату..... 298
5.5.3. П'єзооптичні властивості кристалів СС і ТГС..... 299
5.6. Оптичні властивості рідких кристалів..... 303
5.6.1. Класифікація рідких кристалів..... 303
5.6.2. Оптичні властивості нематиків і смектиків..... 305
5.6.3. Оптика холестериків..... 306
5.6.4. Відбивання світла від холестерика..... 309
5.7. Електрооптичні властивості рідких кристалів..... 310
5.7.1. Нематики..... 310
5.7.2. Холестерики та смектики..... 313
Контрольні запитання та завдання..... 315

Розділ 6. АКУСТООПТИЧНІ ВЗАЄМОДІЇ ТА ЇХНЄ ЗАСТОСУВАННЯ..... 316
6.1. Пружні властивості кристалів..... 316
6.1.1. Механічні напруження та методи їхньої реалізації..... 316
6.1.2. Деформації..... 320
6.1.3. Пружність кристалів..... 322
6.2. П'єзоелектричні властивості кристалів..... 323
6.2.1. П'єзоелектричний ефект..... 323
6.2.2. Просторова залежність п'єзоелектричних коефіцієнтів..... 326
6.2.3. Інші форми запису п'єзоелектричного ефекту..... 327
6.2.4. Граничні умови при вимірюванні п'єзоелектричних характеристик матеріалу..... 328
6.2.5. Характерні п'єзоелектричні матеріали..... 332
6.2.5.1. Загальні положення..... 332
6.2.5.2. П'єзоелектричні властивості сегнетоелектриків..... 333
6.3. Пружні хвилі у кристалах..... 334
6.4. Еквівалентна схема п'єзоелектричного резонатора та її практичне значення..... 339
6.5. Характеристики звукового поля..... 343
6.5.1. Енергетичні характеристики..... 343
6.5.2. Закони заломлення та відбивання звукових хвиль..... 344
6.6. Поверхневі хвилі..... 346
6.6.1. Загальні положення..... 346
6.6.2. Методи збудження поверхневих хвиль..... 350

6.6.3. Збудження об'ємних хвиль..... 354
6.7. Акустооптичні взаємодії..... 355
6.7.1. Рівняння Рамана-Ната..... 355
6.7.2. Можливі значення порядку дифракції світла на УЗ хвилі..... 356
6.7.3. Синусоїдальні ґратки..... 358
6.7.4. Розв'язки рівняння Рамана-Ната. Критерії режимів АО взаємодій..... 360
6.7.5. Векторні діаграми дифракції світла на ультразвуку..... 362
6.7.6. Коефіцієнт акустооптичної якості матеріалів..... 364
6.7.7. Акустооптичні матеріали..... 366
6.8. Застосування АО взаємодій..... 371
6.8.1. Акустооптичні модулятори..... 371
6.8.2. Гранична смуга модулюючих частот..... 377
6.8.3. Конструкція і характеристики АО модулятора..... 378
6.8.4. Теплові спотворення у модуляторах..... 379
6.8.5. Акустооптичні дефлектори..... 380
6.8.6. Будова і характеристики АОД..... 383
6.8.7. АО дефлектори на анізотропній дифракції..... 385
6.8.8. Ультразвукові рефракційні дефлектори..... 388
6.8.9. АО фільтри..... 388
6.9. Поверхневі оптичні хвилі..... 390
6.9.1. Модова структура світлових пучків у плоских хвилеводах..... 390
6.9.2. Колінеарна взаємодія поверхневих світлових та акустичних хвиль. Зв'язані моди..... 394
6.9.3. Дифракція Брегга поверхневих світлових хвиль на поверхневих акустичних хвилях..... 398
6.10. Приклади АО взаємодій у хвилеводних структурах..... 400
6.10.1. Колінеарна взаємодія..... 400
6.10.2. Дифракція Брегга на акустичних поверхневих хвилях..... 401
6.10.3. Деякі робочі характеристики АО елементів на поверхневих хвилях... 402
Контрольні запитання та завдання..... 404

Розділ 7. ЗАСТОСУВАННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ В ОБЛАСТІ ЇХНЬОЇ ПРОЗОРОСТІ..... 405
7.1. Застосування прозорих кристалів в оптичному приладобудуванні..... 406
7.1.1. Спектральні прилади..... 406
7.1.2. Модулятори світлових пучків..... 406
7.1.3. Запис інформації..... 407
7.1.4. Зчитування інформації..... 408
7.1.5. Відображення інформації..... 408
7.1.6. Оптичний діод..... 409
7.2. Нові застосування слабозабарвлених кристалів..... 410

7.2.1. Активні елементи ОКГ.....410
7.2.2. Фоторефракційні матеріали.....409
7.3. Прозорі кристали у метрології: вимірювання температури, тиску та дози жорсткої радіації.....411
7.3.1. Вимірювання температури на основі двопроменезаломлення.....412
7.3.2. Вимірювання температури на основі повертання осей оптичної індикатриси.....414
7.3.3. Вимірювання температури на основі спектрального положення точки інверсії знака двопроменезаломлення.....415
7.3.4. Чутливість оптичних методик вимірювання температури.....416
7.3.5. Реперні точки температури.....419
7.3.5.1. Точки, пов'язані з виникненням доменів у фероїках.....419
7.3.5.2. Реперні точки температури на базі інверсії знака двопроменезаломлення.....419
7.3.6. Вимірювання тиску і дози жорсткої радіації.....420
7.3.7. Інші практично важливі властивості анізотропних кристалів.....420
7.4. Приклади використання законів класичної кристалооптики у нелінійній оптиці та в АО взаємодіях.....421
7.4.1. Реалізація умов синхронізму при генеруванні нових оптичних частот.....421
7.4.2. Реалізація умов синхронізму при АО взаємодіях.....426
7.4.2.1. Одновісні кристали.....426
7.4.2.2. Двовісні кристали.....431
7.5. Встановлення ступеня однорідності зразка.....435
Післямова.....439
Контрольні запитання та завдання.....440
Післямова до другого видання.....441

Список літератури.....441
Загальної.....441
Спеціальної, допоміжної, технічної.....443
Довідкової.....448

Предметний покажчик.....449