

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

Інститут монокристалів

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор,

чл.-кор. НАН України

Ігор ПРИТУЛА

«26» вересня 2023р.



РОБОЧА ПРОГРАМА

навчальної дисципліни

Сучасні методи дослідження властивостей матеріалів

132 Матеріалознавство

Затверджено Вченою радою Інституту монокристалів
Національної академії наук України
(протокол №9 від 26.09.2023 р.)

Викладач: Долженкова Олена Федорівна, доктор технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник Інституту монокристалів Національної академії наук України

Харків-2023

ВСТУП

Робоча програма навчальної дисципліни “Сучасні методи дослідження властивостей матеріалів” складена відповідно освітньо-наукової програми підготовки доктора філософії за спеціальності 132 Матеріалознавство

Пререквізити навчальної дисципліни: володіти концептуальними та методологічними знаннями в галузі технічних наук, знати основні поняття матеріалознавства, володіти знаннями про властивості матеріалів, що використовуються у науці та техніці; володіти методами дослідження матеріалів; вміти використовувати сучасні інформаційні джерела національного та міжнародного рівня для оцінки стану вивченості об’єкту досліджень і актуальності наукової проблеми; мати навички роботи з сучасним експериментальним обладнанням при проведенні досліджень з матеріалознавства.

Постреквізити: в результаті вивчення дисципліни будуть отримані знання сучасних методів дослідження властивостей матеріалів передбачає (монокристалічних, керамічних та наноструктурних); уміння проводити дослідження на сучасном експериментальному обладнанні, аналізувати та обробляти експериментальні результати. Отриманні знання будуть використані при виконанні дослідження та захисті його результатів у вигляді дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

1. Опис навчальної дисципліни

1.1. Мета викладання навчальної дисципліни:

Формування у аспірантів цілісних уявлень про сучасні фізико-хімічні методи дослідження матеріалів

1.2. Основні завдання вивчення дисципліни

Ознайомлення аспірантів з основними принципами сучасних методів дослідження властивостей монокристалічних, керамічних та наноструктурних матеріалів передбачає:

- розгляд особливостей застосування атомно-силового мікроскопа, растрового електронного мікроскопа і звичайного світлового металографічного мікроскопа для оцінки структури матеріалів;

- ознайомлення аспірантів з фізичними основами методів і апаратурою для проведення рентгеноструктурного, електронно- і нейтронографічного аналізів, просвічуючої електронної мікроскопії, рентгеноспектрального мікроаналізу, що дозволяють досліджувати хімічний склад і внутрішньої будови матеріалів;

- ознайомлення аспірантів з фізичними основами експериментальних методів, які є базовими в дослідженнях поверхні твердого тіла: рентгенівська фотоелектронна спектроскопія, оже-електронна спектроскопія, спектроскопія розсіювання повільних іонів;

- розгляд механізмів пластичної деформації і руйнування; статичні і динамічні методи механічних випробувань, неруйнівні методи контролю матеріалів.

1.3. Кількість кредитів – 5

1.4. Загальна кількість годин – 150

1.5. Характеристика навчальної дисципліни
Нормативна
Денна форма навчання
Рік підготовки
2-й
Семестр
3-й
Лекції
60
Практичні, семінарські заняття
20
Лабораторні заняття
Самостійна робота
70 год.
Індивідуальні завдання

1.6. Заплановані результати навчання

Згідно з вимогами освітньо-наукової програми аспіранти повинні досягти таких результатів навчання:

RН1. Проявляти наукові погляди та підходи при проведенні експертного аналізу наукових даних, оцінювати вплив технологічних факторів на властивості матеріалів.

RН2. Володіти концептуальними та методологічними знаннями в галузі матеріалознавства та бути здатним застосовувати їх до професійної діяльності на межі предметних галузей.

RН3. Інтегрувати існуючі методики та методи досліджень та адаптувати їх для розв'язання наукових завдань при проведенні дисертаційних досліджень.

RН5. Визначити закономірності та особливості поведінки матеріальних об'єктів.

RН8. Спланувати та реалізувати на практиці оригінальне самостійне наукове дослідження, яке має суттєву новизну, теоретичну і практичну цінність та сприяє розв'язанню соціальних, наукових та інших проблем.

RН12. Демонструвати навички роботи з сучасним обладнанням при проведенні експериментальних досліджень.

RН19. Знайти оригінальне рішення, направлене на розв'язання конкретної науково-технічної проблеми.

2. Тематичний план навчальної дисципліни

Розділ 1. Методи дослідження мікроструктури, які використовуються в сучасному матеріалознавстві.

Тема 1. Методи світлової мікроскопії. Основні типи і конструктивні особливості металографічних мікроскопів. Методи світлової мікроскопії. Метод світлого поля в прохідному світлі. Метод світлого поля у відбитому світлі. Метод темного поля в прохідному світлі. Кількісні аналізатори структури.

Тема 2. Електронна мікроскопія. Трансмісійний електронний мікроскоп: конструкція і принцип роботи. Можливості методу тонкої фольги: мікродифракційний фазовий аналіз; структурні особливості фазових перетворень; вивчення дислокаційної структури; пряме вивчення процесів, що відбуваються в тонкій фользі.

Тема 3. Електронна мікроскопія. Растрова (скануюча) електронна мікроскопія. Принцип роботи і класифікація РЕМ. Область застосування скануючих електронних мікроскопів.

Тема 4. Скануючі зондові мікроскопи. Тунельний мікроскоп. Тунельний ефект. Атомно-силовий мікроскоп. Контактний, безконтактний, напівконтактний режими. Бліжнепольна оптична мікроскопія. Явище проходження світла через субхвильові діафрагми.

Розділ 2. Рентгеноструктурні методи дослідження.

Тема 5. Задачі рентгеноструктурного аналізу в дослідженнях і контролі якості кристалічних матеріалів. Принципи дифракційних методів аналізу і апаратура. Основні визначення і формули структурної кристалографії. Структура кристалів. Геометрія дифракційних картин і зворотна ґратка кристалів. Інтенсивність розсіювання рентгенівського випромінювання кристалом. Техніка отримання і реєстрація дифракційних картин.

Тема 6. Аналіз фазового складу. Фазовий аналіз на основі аналізу дифракційної картини, що реєструється від досліджуваних порошкових зразків. Якісний аналіз. Кількісний аналіз. Метод підмішування. Метод незалежного еталона. Метод гомологічних пар. Метод накладення. Метод зйомки без еталона.

Тема 7. Аналіз структурного стану кристалічних матеріалів. Аналіз текстур. Аналіз напруг. Аналіз субструктури. Аналіз дефектів кристалічної будови за ефектом розширення ліній рентгенограм.

Тема 8. Рентгеноспектральний мікроаналіз. Основа методу рентгенівської спектроскопії. Будова рентгеноспектрального мікроаналізатора. Основні параметри методу. Елементи, що визначаються. Локальність РСМА. Чутливість методу (межа виявлення). Точність кількісного РСМА. Можливості методу. Про поправки при кількісному РСМА. Підготовка зразків і еталонів.

Тема 9. Синхротрон резонансний циклічний прискорювач. Принциповий устрій синхротрону. Випромінювання електронів у циклічних прискорювачах – основний інструмент у дослідженні взаємодії електромагнітного випромінювання з речовиною. Дослідження в оптичному, ультрафіолетовому та рентгенівському діапазонах довжин хвиль. Електронний синхротрон «ELETTA» (Трієст, Італія). Джерело синхротронного випромінювання «СОЛЯРІС» (Польща).

Розділ 3. Фізичні явища і властивості поверхні матеріалів.

Тема 10. Структура і властивості поверхонь. Фізика поверхні - нова галузь науки про будову речовини в конденсованому стані. Структура кристалічних поверхонь. Джерела і стоки точкових дефектів. Процеси адсорбції і сегрегації домішок, поверхнева самодифузія.

Корозійна стійкість кристалічних поверхонь в залежності від кристалографічних особливостей.

Тема 11. Методи дифракції повільних та швидких електронів. Можливості і переваги методів, Взаємодія первинного випромінювання з речовиною і аналіз вторинного випромінювання. **Автоіонна та автоелектронна мікроскопія.** Принципи методів та їх особливості.

Тема 12. Методи електронної спектроскопії. Оже-електронна спектроскопія (метод ОЕС). Метод рентгенівської фотоелектронної спектроскопії (РФЕС). Аналітичні характеристики і порівняння методів: чутливість і точність аналізу, роздільна здатність по глибині і по поверхні.

Розділ 4. Методи вивчення пластичності матеріалів.

Тема 13. Макротвердість. Устаткування. Методи визначення твердості по Брінеллю. Визначення твердості по Роквеллу. Методи вимірювання твердості по Віккерсу. Анізотропія твердості по Кнупу. Розрахунок значень твердості. Методика вимірювання твердості монокристалів при великих навантаженнях на індентор ($\sim 10 \text{ kg / s}$).

Мікротвердість. Обладнання. Метод вдавлення індентора і метод склерометрії. Особливості випробування тонких плівок. Природа «розмірного ефекту» і «зворотнього розмірного ефекту».

Тема 14. Метод кінетичної твердості і його можливості. Твердість по Мейєру. Аналіз діаграми навантаження індентора за методом Олівера і Фарра. Визначення невідновленої твердості і модуля пружності. Прилади для наноіндентування. Специфіка пружно-пластичного переходу в монокристалічних і керамічних матеріалах. Дослідження механізмів пластичної деформації при випробуванні на нанотвердість. Вивчення фазових перетворень під дією високого тиску під індентором. Співвідношення Холла-Петч в нано- та мікрокристалічних матеріалах. Надпластичність.

Тема 15. Методи обробки результатів вимірювання. Класифікація похибок вимірювання. Подання результатів вимірювання фізичних величин.

Розділ 5. Методи виявлення дислокацій в кристалах.

Тема 16. Основні типи дислокацій та їх рух. Невідповідність між міцністю, що спостерігається і теоретичною міцністю. Крайова дислокація. Гвинтова дислокація. Ковзання гвинтової дислокації. Змішані дислокації і їх рух. Вектор Бюргерса. Енергія дислокації. Виникнення дислокацій. Механізм розмноження дислокацій (джерело Франка-Ріда). **Механізм пластичної деформації.** Ковзання як процес руху дислокацій. Деформаційне зміцнення. Взаємодія дислокацій з атомами домішок. Високотемпературне індентування.

Тема 17. Методи виявлення дислокацій в кристалах. Виявлення дислокацій поляризаційно-оптичним методом. Метод хімічного травлення. Зв'язок спостережуваних ямок травлення з кристалографією досліджуваної грані. Спостереження ліній декорованих дислокацій в світловому мікроскопі. Виявлення дислокацій методом дифракції рентгенівського випромінювання. Просвічуюча електронна мікроскопія. Термічне виявлення дислокацій. Зв'язок макроскопічних неоднорідностей з дислокаціями і точковими дефектами.

Розділ 6. Конструкційна міцність матеріалів.

Тема 18. Механізм руйнування. Природа напруженого стану матеріалу. Зародження мікротріщин і їх розвиток. Енергетичний критерій Гріффіта. Загальні відомості про опір руйнуванню і методах його оцінки. Методи інтегральної оцінки опору руйнуванню.

Тема 19. Методи випробування механічних властивостей. Випробування при статичному розтягуванні та стиску.. Випробування на згин. Триточковий згин. Чотирьохточковий згин. Динамічні випробування. Випробування на знос.

Тема 20. Вимірювання тріщиностійкості матеріалів. Поняття про тріщиностійкість кристалів. Геометрія руйнування при пружно-пластичному зосередженому навантаженні. Система радіально-медіанних і бокових тріщин. Визначення критичного коефіцієнта інтенсивності напружень в умовах плоского напруженого стану. Ефективна енергія руйнування. Випробування кераміки на тріщиностійкість EF-методом (edge-fracture method). Тріщиностійкість монокристалів, вирощених методами Чохральського, Кіропулоса, Степанова, Вернейля. Прогнозування міцності кристалічних матеріалів методом мікроіндентування. Тріщиностійкість кристалів на поверхні сколотих граней і на механічно обробленої поверхні.

Розділ 7. Дослідження якості кристалів поляризаційно-оптичним методом.

Тема 21. Кристалооптичні властивості. Ізотропні і анізотропні середовища. Подвійне променезаломлення. Інтерференція світла в кристалічних пластинках. Поляризоване світло. Поляризаційна мікроскопія. Орієнтування кристалів. Визначення внутрішніх напружень в кристалах поляризаційно-оптичним методом. Вивчення блокової структури, двійників, малокутових меж.

Тема 22. Дослідження кристалів в паралельному поляризованому світлі. Спостереження кристалів в схрещених поляризаторах. Інтерференційне забарвлення кристалів в схрещених і паралельних поляризаторах. Компенсація подвійного променезаломлення, кварцовий клин. Вимірювання подвійного променезаломлення кристалів.

Тема 23. Дослідження кристалів у коноскопичному поляризованому світлі. Коноскопичні фігури. Способи спостереження коноскопичних фігур. Коноскопичні фігури різноорієнтованих кристалів. Вимірювання кута оптичних осей. Визначення оптичного знаку кристала. Дисперсія оптичних осей. Вплив поглинання світла на коноскопичну фігуру.

Розділ 8. Методи оптичної спектроскопії.

Тема 24. Основні закономірності люмінесценції. Поняття про квантову природу світла (видимий діапазон довжин хвиль, ультрафіолетовий та інфрачервоний діапазони). Використання спектральних методів для вивчення складу і властивостей твердих тіл. Взаємодія атомів і молекул, об'єднаних в конденсовані речовини з електромагнітним випромінюванням. Розподіл оптичної спектроскопії по досліджуваним об'єктам: атомним і молекулярним. Поняття спектра. Модель конфігураційних кривих. Правило Стокса. Квантовий вихід люмінесценції. Рекомбінаційні процеси світіння. Спектри поглинання і

випромінювання екситона. Оптичні переходи з участю локальних рівнів. Перенесення енергії. Сенсibilізація. Концентраційне гасіння.

Тема 25. Взаємозв'язок характеристик електромагнітного випромінювання і методів оптичної спектроскопії. Класифікація видів люмінесценції за способом їх збудження. Фотолюмінесценція. Катодолюмінесценція. Електролюмінесценція. Тріболюмінесценція. Хемолюмінесценція. Біолюмінесценція.

Тема 26. Фосфоресценція. Термолюмінесценція. Про механізми світіння кристалофосфорів. Визначення пасток. Гасіння люмінесценції. Метод кривих термовисвечівання. Термічна і оптична активація пасток. Безвипромінювальне захоплення на домішкових пастках.

Тема 27. Фізика і принципи роботи лазерів. Посилення світла за допомогою індукованого випромінювання. Типи і конструкції лазерів

Тема 28. ІЧ-спектроскопія. Якісний аналіз: визначення функціональних груп сполук. Кількісний аналіз сумішей речовин. Дослідження межмолекулярної взаємодії.

Розділ 9. Фазові діаграми. Методи термічного аналізу.

Тема 29. Загальні уявлення про діаграми стану. Правило фаз. Правило відрізків. Фазові рівноваги в одно-, дво-, трьох- та чотириккомпонентних системах. Системи з необмеженою та обмеженою розчинністю у твердому стані. Діаграми стану систем, що утворюють хімічні сполуки.

Тема 30. Термографічні методи аналізу. Експериментальна побудова діаграм. Оцінка термічної стійкості аналізованого матеріалу диференціальними методами. Особливості методу термогравіметричного аналізу. Пристрій дериватографу.

3. Структура навчальної дисципліни

Назви розділів і тем	Кількість годин					
	денна форма					
	усього	у тому числі				
		л	п	лаб.	інд.	с. р.
1	2	3	4	5	6	7
Розділ 1. Методи дослідження мікроструктури, які використовуються в сучасному матеріалознавстві.						
Тема 1. Методи світлової мікроскопії.		2				2
Тема 2. Електронна мікроскопія. Трансмісійний електронний мікроскоп		2				2

Тема 3. Електронна мікроскопія. Растрова (скануюча) електронна мікроскопія.		2	2			2
Тема 4. Скануючі зондові мікроскопи. Тунельний мікроскоп. Атомно-силовий мікроскоп. Бліжнепольна оптична мікроскопія.		2				2
Разом за розділом 1	22	8	2			8
Розділ 2. Рентгеноструктурні методи дослідження.						
Тема 5. Задачі рентгено-структурного аналізу в дослідженнях і контролі якості кристалічних матеріалів.		2	3			2
Тема 6. Аналіз фазового складу.		2				2
Тема 7. Аналіз структурного стану кристалічних матеріалів.		2				2
Тема 8. Рентгеноспектральний мікроаналіз.		2				2
Тема 9. Синхротрон - резонансний циклічний прискорювач.		2				2
Разом за розділом 2	18	10	3			10
Розділ 3. Фізичні явища і властивості поверхні матеріалів.						
Тема 10. Структура і властивості поверхонь.		2				2
Тема 11. Метод дифракції повільних електронів. Метод дифракції швидких електронів. Автоіонна мікроскопія. Автоелектронна мікроскопія.		2				2
Тема 12. Методи дослідження поверхонь. Оже-електронна спектроскопія (метод ОЕС). Метод рентгенівській фотоелектронної спектроскопії (РФЕС).		2				3

Разом за розділом 3	22	6				7
Розділ 4. Методи вивчення пластичності кристалів.						
Тема 13. Макротвердість. Мікротвердість.		2				2
Тема 14. Метод кінетичної твердості і його можливості.		2	2			2
Тема 15. Методи обробки результатів вимірювання.		2				2
Разом за розділом 4	14	6	2			6
Розділ 5. Методи виявлення дислокацій в кристалах.						
Тема 16. Основні типи дислокацій та їх рух. Механізм пластичної деформації.		2				3
Тема 17. Методи виявлення дислокацій в кристалах.		2	2			2
Разом за розділом 5	16	4	2			5
Розділ 6. Конструкційна міцність матеріалів.						
Тема 18. Фізична природа міцності.		2				3
Тема 19. Методи випробування механічних властивостей.		2				2
Тема 20. Вимірювання тріщиностійкості матеріалів		2	4			4
Разом за розділом 6	19	6	4			9
Розділ 7. Дослідження якості кристалів поляризаційно-оптичним методом.						
Тема 21. Кристалооптичні властивості. Ізотропні і анізотропні середовища. Поляризоване світло.		2				3
Тема 22. Дослідження кристалів в паралельному поляризованому світлі.		2				2
Тема 23. Дослідження кристалів у коноскопичному поляризованому світлі.		2	3			5
Разом за розділом 7	18	6	3			10
Розділ 8. Методи оптичної спектроскопії.						
Тема 24. Основні закономір- ності люмінесценції.		2				2
Тема 25. Взаємозв'язок характеристик електро- магнітного випромінювання і методів оптичної спектроскопії.		2	2			2

Тема 26. Фосфоресценція.		2				2
Тема 27. Фізика і принципи роботи лазерів.		2				2
Тема 28. ІЧ-спектроскопія.		2	2			2
Разом за розділом 8	21	10	4			10
Розділ 9. Фазові діаграми. Методи термічного аналізу.						
Тема 29. Загальні уявлення про діаграми стану.		2				3
Тема 30. Термографічні методи аналізу.		2				2
Разом за розділом 9		4				5
Усього годин	150	60	20			70

4. Теми практичних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Виявлення дислокаційної структури монокристалічних зразків методом хімічного травлення	2
3	Вивчення механічних характеристик (мікротвердості і трещиностійкості) монокристалічних та керамічних зразків методом зосередженого навантаження. Обробка результатів вимірювання.	4
4	Вивчення механічних характеристик монокристалічних та керамічних зразків методом кінетичної твердості	2
5	Кількісні вимірювання внутрішніх напружень в одновісних кристалах із застосуванням поляризаційного мікроскопа при коноскопічному ході світла	3
6	Освоєння техніки вимірювання спектрів поглинання монокристалічних та керамічних зразків на спектрофотометрі	2
7	Ідентифікація органічних сполук по інфрачервоним спектрами	2
8	Дослідження мікроструктури керамічних зразків за допомогою скануючого електронного мікроскопа	2
9	Орієнтація монокристалічних зразків за допомогою рентгено-структурного методу	3
	Разом	20

5. Завдання для самостійної роботи

№ з/п	Види, зміст самостійної роботи	Кількість годин
1	Методи дослідження мікроструктури, які використовуються в сучасному матеріалознавстві (оптична, електронна та атомна силова мікроскопія)	5
2	Рентгеноструктурні методи дослідження	5
3	Фізичні явища і властивості поверхні матеріалів	5

4	Методи вивчення пластичності матеріалів	5
5	Методи виявлення дислокацій в кристалах	5
6	Контроль в'язкості руйнування матеріалів	5
7	Дослідження якості кристалів поляризаційно-оптичним методом	5
8	Методи оптичної спектроскопії	5
9	Підготовка до іспиту	30
	Разом	70

6. Методи контролю

Засвоєння матеріалу по дисципліні забезпечується циклом лекцій, проведенням практичних робіт, а також самостійною роботою. Рекомендована форма звітності – екзамен.

7. Схема нарахування балів

Поточний контроль, практичні завдання, самостійна робота									Разом	Екзамен	Сума
Розділ 1	Розділ 2	Розділ 3	Розділ 4	Розділ 5	Розділ 6	Розділ 7	Розділ 8	Розділ 9			
8	8	4	8	8	8	4	8	4	60	40	100

8. Шкала оцінювання

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

9. Питання до іспиту

1. Методи світлової мікроскопії.
2. Принципи дифракційних методів аналізу і апаратура.
3. Використання спектральних методів для вивчення складу і властивостей твердих тіл.
4. Трансмісійний електронний мікроскоп: конструкція і принцип роботи.
5. Фазовий аналіз на основі аналізу дифракційної картини.
6. Класифікація видів люмінесценції за способом їх збудження.
7. Скануюча зондова мікроскопія.
8. Аналіз структурного стану кристалічних матеріалів.
9. Механізми світіння кристалофосфорів.
10. Растрова (скануюча) електронна мікроскопія.
11. Методи виявлення дислокацій в кристалах.

12. Метод кінетичної твердості і його можливості.
13. Основи методу рентгенівської спектроскопії.
14. Високотемпературне індентування.
15. Фізика і принципи роботи лазерів.
16. Автоіонна та автоелектронна мікроскопія.
17. Визначення внутрішніх напружень в кристалах поляризаційно-оптичним методом.
18. Методи визначення твердості.
19. Дослідження кристалів в паралельному поляризованому світлі.
20. Випробування при статичному розтягуванні.
21. Методи дослідження поверхонь матеріалів.
22. Методи вивчення пластичності матеріалів.
23. Вимірювання тріщиностійкості кристалічних матеріалів.
24. Характеристики і порівняння методів дослідження поверхонь матеріалів.
25. Принципи дифракційних методів аналізу і апаратура.
26. Використання спектральних методів для вивчення складу і властивостей твердих тіл.
27. Характеристики механічних властивостей кристалів.
28. Рентгеноспектральний мікроаналіз. Можливості, основні параметри та чутливість методу.
29. Вимірювання подвійного променезаломлення кристалів.
30. Призначення динамічних випробувань матеріалів.

10. Рекомендована література

Основна література

1. О.В. Афанасьєва. Матеріалознавство та конструкційні матеріали. Навч. посібник. — Харків: ХНУРЕ, 2016. — 188 с.
2. Білий М. У., Охріменко Б. А. Атомна фізика. — К. : Знання, 2009. — 559 с.
3. R.F. Egerton. Physical principles of electron microscopy (An Introduction to TEM, SEM, and AEM). Springer, 2016. - 196 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-39877-8>
4. G. Binnig, C. F. Quate, Ch. Gerber. Atomic Force Microscope / Physical Review Letters. 1986. V 56, No 9. p. 930–933.
5. Voigtländer Bert, Scanning Tunneling Spectroscopy (STS) / *Scanning Probe Microscopy: Atomic Force Microscopy and Scanning Tunneling Microscopy, NanoScience and Technology, Berlin, Heidelberg: Springer, 2015, p. 309–334.*
6. Chunli Bai. Scanning tunneling microscopy and its application.- Berlin: Springer, 2000. - 370 p. ISBN978-3-540-65715-6. Series ISSN 0931-5195
7. С.І. Сидоренко, Р.І. Барабаш. Сучасний рентгеноструктурний аналіз реальних кристалів. - К.: Наукова думка, 1997. - 367 с.
8. Peter Luger. Rentgenografia strukturalna monokryształów. Wydawnictwo Naukowe PWN 1989. - 323 s.
9. A.H. Compton, S.K. Allison, *X-ray in Theory and Experiment*, Second ed., Publisher: D.van Nostrand Company, Inc., New York, 1967.
10. Andrew Zangwill. Physics at Surfaces. Cambridge University Press, 1988. - 464 p. Online ISBN: 9780511622564. Hardback ISBN: 9780521321471.
11. E. Dobrovinskaya, L. Lytvynov, V. Pischik. Sapphire in Science and Engineering. Kharkiv: STC "Institute for Single Crystals" National Academy of Science of Ukraine, 2007. - 480 p.
12. J.C.H. Spence, High-Resolution Electron Microscopy (4th edn), Oxford University Press, 2013. - 432 p.

13. Dong ZhiLi, Fundamentals of Crystallography, Powder X-ray Diffraction, and Transmission Electron Microscopy for Materials Scientists, CRC Press, 2022. - 272 pp.
14. D.B. Sirdeshmukh, L. Sirdeshmukh, K.G. Subhadra Micro- and Macro-Properties of Solids. Thermal, Mechanical and Dielectric Properties. Springer, 2006. - 405 pp.
15. Yang Leng; Materials Characterization: Introduction to Microscopic and Spectroscopic Methods (Second Edition); Publisher John Wiley & Sons, 2013. - p 392.
16. W.C. Oliver, G.M. Pharr. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // J. of Materials Research. 1992. V7, P. 1564-1583.
17. A.G. Evans, E.A. Charles. Fracture toughness determinations by indentations // J. Amer. Ceram. Soc. 1976, V.59, P. 371-373.
18. G.A. Gogotsi. Fracture toughness testing of materials by the EF method // Inorg. Mater. 2006. V42, P.567-572.
19. Sangwal Keshra. Etching of Crystals: Theory, Experiment, and Application. North-Holland, 1987. 497 p.
20. A.M. Fox, Optical Properties of Solids, Oxford University Press, 2001. - 305 pp.
21. Malzbender, J (2003). "Comment on hardness definitions". Journal of the European Ceramic Society. V 23, No.9. P.1355-1259.
22. Лазерні технології: навч. посіб. Ч. 1-2 / Я. В. Бобицький, Г. Л. Матвіїшин Міністерство освіти і науки України, Національний університет "Львівська політехніка". Видавництво Львівської політехніки, 2015-2020 ISBN: 978-617-607-789-3; 978-966-941-471-7.
23. Barbara H. Stuart. Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications. — Wiley, 2004. — 248 p.

Допоміжна література

1. G.M. Sheldrick, SHELX97. Program Package for Solving and Refinement of Crystal Structures (Pre-Release Version), Univ. of Göttingen, Germany, 1997.
2. Annual Book of ASTM Standarts, 1974, E-436-74, Part 10, p. 425-457.
3. Sundararajan, G., & Roy, M. (2001). Hardness Testing. Elsevier, Encyclopedia of Materials: Science and Technology, 3728–3736. doi:10.1016/b0-08-043152-6/00665-3
4. Stephen G. Lipson; Henry Lipson, David Stefan Tannhauser. Optical Physics. Cambridge University Press. 3d ed., 1995. - 436 p. ISBN 978-0-521-43631-1.
5. Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry / ed by Lindon John — 2nd Ed. — Elsevier, Academic Press, 2010. — 312 p.
6. Chunli Bai. Scanning tunneling microscopy and its application. Berlin: Springer, 2000.-370 p. ISBN 978-3-540-65715-6. Series ISSN 0931-5195
7. K. Sangwal, Micromorphology of as-grown surfaces of crystals / Prog. Crystal Growth and Charact. 19, 189-245 (1989). [https://doi.org/10.1016/0146-3535\(89\)90005-1](https://doi.org/10.1016/0146-3535(89)90005-1)
8. V.N. Rozhanskii, M.P. Nazarova, I.L. Svetlov, L.K. Kalashnikova. Dislocation and Crowdion Plasticity of Corundum at Room Temperature // Phys. Stat. Sol., 1970, V.41, P.579-590.

Посилання на інформаційні ресурси в Інтернеті, відео-лекції, інше методичне забезпечення

1. <https://svitppt.com.ua/fizika/optichna-spektroskopiya-molekul-ta-kristaliv.html>
2. <https://sites.google.com/site/prophiziku/lekcie/modul-v/lekcia-no-37>
3. https://kc.pnu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/11/2018/04/Lecture_7.pdf
4. https://kc.pnu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/11/2018/04/Lecture_6.pdf
5. https://physics.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/rsa_materialozn.pdf
6. <https://studfile.net/preview/8993528/page:87/>, /page:88/, /page:89/, /page:90/, /page:91/
7. <https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/5/28/5-28-kl55.pdf>
8. <https://studfile.net/preview/7256591/page:5/>