

**ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
ФІЗИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ТВЕРДОТІЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ
ТА ІНФОРМАЦІЙНОЇ
БЕЗПЕКИ**



«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Проректор з наукової роботи
/Студеняк І.П./
28 вересня ___2020 року

РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Оптичні методи діагностики твердих тіл та наноструктурованих матеріалів

Рівень вищої освіти	третій (освітньо-науковий)
Галузь знань	10 Природничі науки
Спеціальність	104 Фізика та астрономія
Освітня програма	01.04.07 -Фізика твердого тіла
Статус дисципліни	вибіркова
Мова навчання	українська

Ужгород -2020

Робоча програма навчальної дисципліни «**Оптичні методи діагностики твердих тіл та наноструктурованих матеріалів**» для здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії галузі знань **10 Природничі науки** спеціальності **104 Фізика та астрономія** освітньої програми **Фізика та астрономія**.

Розробник: Міца В.М., професор, доктор-фізико математичних наук

Робочу програму розглянуто та затверджено на засіданні кафедри

твердотільної електроніки та інформаційної безпеки

протокол № 1 від « 10 » вересня 2020 р.

Завідувач кафедри

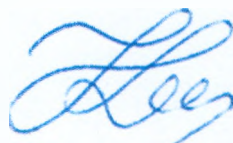


Різак В.М.

Схвалено науково-методичною комісією фізичного факультету

протокол № 1 від « 23 » вересня 2020 р.

Голова науково-методичної комісії



Карбованець М. І.



© Міца В.М. 2020 р.

© ДВНЗ «Ужгородський національний університет», 2020 р.

1. ОПИС НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

2. Оптичні методи діагностики твердих тіл та наноструктурованих матеріалів

Найменування показників	Розподіл годин за навчальним планом	
	Денна форма навчання	Заочна форма навчання
Кількість кредитів ЄКТС – 6	Рік підготовки:	
Загальна кількість годин – 180	1-й	1-й
Кількість модулів – 2	Семестр:	
Тижневих годин для денної форми навчання: аудиторних – 3 самостійної роботи аспіранта – 4	1,2	1,2
	Лекції: 40	
	40	16
	Практичні (семінарські):	
	44	8
Вид підсумкового контролю: залік, екзамен	Лабораторні:	
Форма підсумкового контролю: усна	Самостійна робота:	
	126	186

2. МЕТА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Метою вивчення даного курсу є:

- Вивчення комплексу сучасних методів оптичної діагностики, заснованих на взаємодії фотонних поляризованих і неполяризованих пучків з твердим тілом.
- Ознайомлення з особливостями взаємодії перерахованих пучків з твердим тілом, а також з апаратурою, методичної та методологічною базою сучасної комплексної діагностики, що супроводжує високі технології, в тому числі нанотехнології отримання нових матеріалів і наноструктур на їх основі.
- Придбання знань і навичок, що дозволяють майбутньому молодому фахівцеві легко орієнтуватися в світі сучасних оптичних методів діагностики та вибрати для вирішення поставлених перед ним завдань в галузі фізики твердого тіла, фізичного матеріалознавства, високих технологій і т.д. адекватний діагностичний комплекс.

Завдання курсу «Оптичні методи діагностики твердих тіл та наноструктурованих матеріалів» полягає в ознайомленні з фізичними явищами і теоретичним описом процесів, що відбуваються при взаємодії фотонних пучків з речовиною. Вивчення фононних спектрів, взаємодії поляризованого випромінювання з твердим тілом, що дозволяють проводити практичну діагностику твердих тіл і твердотільних структур та отримувати інформацію лінійні і нелінійні показники заломлення і двохфотонне поглинання, коливний спектр на поверхні і об'ємі твердих тіл, вивчати квантово-розмірний ефект і поліморфні перетворення в нанокристалах і нанокластерах, визначати елементний склад і механічні напруги в нанощарах, безконтактно оцінювати концентрацію носіїв заряду в гетероструктурах, визначати неоднорідності і тип нановключень в плівках і стеклах.

Фокус навчальної дисципліни: зміст та матеріал навчальної дисципліни стосується рішення завдань по інтерпретації та аналізу даних, отриманих оптичними методами діагностики в поєднанні з даними розрахунків коливного спектру, лінійного і нелінійного поглинання світла, оптико-поляризаційних характеристик твердих тіл, наноструктурованих матеріалів та нанорозмірних структур.

Місце дисципліни в структурі освітньо-наукової програми: спецкурс відноситься до дисциплін наукової спеціалізації варіативної частини, за результатами яких здобувачі здають екзамен та виконують навчальний процес по спеціальності 104 Фізика та астрономія (01.04.07 - "Фізика твердого тіла").

Відповідно до освітньо-наукової програми, вивчення дисципліни «**Оптичні методи діагностики**» сприяє формуванню у здобувачів вищої освіти таких компетентностей:

–**соціально-особистісні компетенції:** креативність, здатність до системного мислення, адаптивність, комунікабельність, здатність до самонавчання, здатність до критичного аналізу та оцінки сучасних наукових досягнень у області оптичної спектроскопії розупорядкованих середовищ (твердих тіл і наноматеріалів); здатність до організації власної науково-дослідницької діяльності; знання змісту процесу цілеспрямованого професійного та особистісного розвитку, його особливості та способи реалізації при вирішенні професійних завдань, виходячи з етапів кар'єрного зростання і вимог ринку праці в сфері обраних наукових досліджень; вміння слідувати нормам, прийнятим в науковому спілкуванні при роботі в українських і міжнародних дослідницьких колективах з метою вирішення наукових і науково-освітніх завдань в обраній області наукових досліджень;

–**загальнонаукові компетенції:** володіння теоретико-методологічними засадами регулювання відносин інтелектуальної власності; розуміння необхідності участі у конкурсах та грантових програмах; володіти навичками аналізу основних світоглядних і

методологічних проблем, в т.ч. міждисциплінарного характеру, що виникають у роботі при вирішенні наукових і науково-освітніх завдань в рамках українських або міжнародних дослідницьких проєктів;

–**інструментальні компетенції**: знання основ методології і практики організації науково-дослідної роботи; індивідуальних досліджень та ефективної командної дослідницької діяльності; здатність до письмової та усної комунікації при роботі в українських та зарубіжних наукових колективах; навик роботи з типовими та спеціалізованими комп'ютерними програмами; вміння вести пошук, підбір та опрацювання наукової інформації по тематиці досліджень;

–**професійні компетенції**: здатність виявляти актуальні наукові проблеми та знаходити оптимальні шляхи їх вирішення, виявляти причинно-наслідкові зв'язки та здійснювати теоретичний аналіз наукової проблеми; пропонувати та обговорювати гіпотези; вільно володіти професійною лексику; подавати результати наукової діяльності в усній і письмовій формі при роботі в українських і міжнародних дослідницьких колективах в обраній області наукових досліджень; усно представляти наукові результати на українських та міжнародних фахових конференціях та в письмовій формі подавати до опублікування в українських та міжнародних фахових виданнях.

3. ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ НАВЧАННЯ

Відповідно до освітньо-наукової програми, вивчення навчальної дисципліни «**Оптичні методи діагностики**» повинно забезпечити досягнення здобувачами вищої освіти таких програмних результатів навчання (ПРН):

Програмні результати навчання	Шифр ПРН
Знати сучасні передові концептуальні та методологічні знання в галузі фізики, прикладної фізики та суміжних галузей знань.	ПРН 1.1.
Знати фундаментальні праці провідних зарубіжних вчених та наукових шкіл у галузі дослідження.	ПРН 1.2.
Вміти формулювати загальну методологічну базу власного наукового дослідження.	ПРН 2.2.
Вміти проводити комплексні дослідження в галузі науково-дослідницької та інноваційної діяльності, які приводять до отримання нових знань.	ПРН 2.3.
Вміти формулювати наукову проблему з огляду на стан її наукової розробки та сучасні наукові тенденції.	ПРН 2.5.
Вміти формулювати робочі гіпотези та моделі досліджуваної проблеми.	ПРН 2.6.
Вміти аналізувати наукові праці в галузі прикладної фізики, виявляючи дискусійні та мало досліджені питання.	ПРН 2.7.

Очікувані результати навчання, які повинні бути досягнуті здобувачами освіти після опанування навчальної дисципліни «**Оптичні методи діагностики.**»:

Очікувані результати навчання з дисципліни	Шифр ПРН
Знати основні поняття і методи опису коливань кристалічних решіток, типи коливань решітки, електронну зонну структуру, фізичні механізми електрон-коливної (фононої) взаємодії та методи практичного застосування коливної спектроскопії для різних функціональних матеріалів.	ПРН 1.1.
Знати методи практичного застосування коливної спектроскопії для	ПРН 1.1

різних функціональних матеріалів.	
Знати мікроскопічні моделі оптичних процесів у твердих тілах і наноматеріалах з різним ступенем розупорядкування.	ПРН 1.2
Знати особливості прояву оптичних процесів у твердих тілах і наноматеріалах на температурних, частотних та інших залежностях їх фізичних параметрів.	ПРН 1.2
Вміти творчо використовувати методи оптичної коливної спектроскопії для дослідження фізичних характеристик та контролю параметрів функціональних матеріалів, які визначають якість матеріалів і надійність приладів, самостійно вивчати і використовувати навчальну і наукову літературу з даної дисципліни, виконувати якісні і кількісні оцінки параметрів, які характеризують вивчені коливні властивості твердих тіл , включаючи наноструктури.	ПРН 2.2
Вміти розраховувати параметри оптичних процесів на основі отриманих спектральних, температурних, баричних, часових та інших залежностей оптичних параметрів упорядкованих та розупорядкованих середовищ.	ПРН 2.3
Володіти методами побудови моделей, що описують оптичні явища у упорядкованих та розупорядкованих середовищах.	ПРН 2.5
Вміти генерувати нові ідеї при вирішенні дослідницьких і практичних задач в області оптичних методів діагностики.	ПРН 2.6
Вміти застосовувати фізичні теорії для опису та інтерпретації оптичних процесів у різних матеріалах.	ПРН 2.6
Вміти аналізувати наукову літературу по оптичним явищам у розупорядкованих середовищах та їх моделюванню;	ПРН 2.7

4. 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,
- модульний контроль,
- підсумковий контроль.

Форми контролю та критерії оцінювання результатів навчання

Форми поточного контролю:

- вибіркоче усне опитування;
- 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: залік, екзамен. До заліку або екзамену допускаються аспіранти, які відпрацювали пропущені заняття і виконали модульні контрольні роботи.

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

Поточне оцінювання та самостійна робота									Модульна контрольна робота	Сума
T1	T2	T3	T4	...	...	...	...	...	70	100
5	10	10	5							

T1, T2, T3, T4 – теми

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

Поточне оцінювання та самостійна робота									Модульна контрольна робота	Сума
T1	T2	T3	T4	...	...	...	...	...	70	100
10	10	5	5							

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	7	30	8	30
Лабораторні заняття (допуск, виконання та захист)		-		
Комп'ютерне тестування при тематичному оцінюванні		-		
Письмове тестування при тематичному оцінюванні				
Презентація		-		

Реферат	1	-	1	
Есе		-		
...		-		
Модульна контрольна робота	1	70	1	70
Разом	9	100	10	100

Критерії оцінювання модульної контрольної роботи

Модульна контрольна робота здійснюється у письмовій формі шляхом відповідей на питання тестових завдань та екзамену. 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 «Презентація наукових результатів» здійснюється у формі заліку та екзамену.

Залік проводиться в усній формі шляхом співбесіди. Результати заліку оцінюються за двобальною шкалою: „зараховано, „незараховано”.

Підсумкова оцінка " зараховано"/"не зараховано" визначається наступними критеріями:

- " зараховано" - якщо аспірант достатньо чітко і грамотно відповідає на питання в межах матеріалу викладеного у рамках лекційних занять, може показати та обґрунтувати взаємозв'язок різних частин матеріалу, пройденого у межах матеріалу навчальної дисципліни; демонструє здатність до мислення, при відповіді на питання розмірковує, спираючись на отримані у рамках курсу знання, не допускає істотних неточностей у відповіді, правильно вибудовує логіку вирішення типових завдань;

- "не зараховано" - якщо аспірант викладає основні питання недостатньо чітко або допускає істотні помилки при їх викладі, не може пояснити зв'язків у рамках викладеного матеріалу, аспірант не знає значної частини програмного матеріалу, не може дати точних визначень понять, пройдених у рамках курсу, дає розпливчаті формулювання і не володіє в належній мірі термінологією, плутається при відповіді на додаткові питання, не володіє прийомами вирішення типових завдань.

Екзамен проводиться в усній формі шляхом співбесіди. Результати екзамену оцінюються за чотирибальною шкалою: „відмінно”, „добре”, „задовільно”, „незадовільно”.

Оцінка „відмінно” (А; 90-100) виставляється в тому разі, коли аспірант бездоганно оволодів всіма розділами програми, дав глибокі, чіткі і вичерпні відповіді на всі основні і додаткові запитання, виявив розуміння фізичної суті програмового матеріалу, вільне володіння фактичним матеріалом та відповідним математичним апаратом, вміння грамотно обробляти результати експериментальних вимірювань з метою отримання заданої точності отриманих даних, кваліфіковано використовувати набуті знання для розв'язання конкретних практичних задач.

Оцінка „добре” (В, С; 74-89) виставляється тоді, коли аспірант виявив повне знання і розуміння програмового матеріалу, добре оволодів математичним апаратом 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” (D, E; 60-73) виставляється в тому разі, коли аспірант в основному знає і розуміє фактичний матеріал курсу, дав в основному правильні відповіді на запитання, виявив уміння розібратися в усьому матеріалі курсу, вміння використовувати відповідний математичний апарат, але не може ґрунтовно пояснити окремі положення пройденого курсу, допускає неточності при використанні математичного апарату, недостатньо вміє застосовувати набуті знання для розв’язання конкретних практичних задач.

Оцінка „незадовільно” (FX, F; 1-59) виставляється тоді, коли аспірант не оволодів матеріалом даного курсу, виявив суттєві прогалини в знаннях основного програмового матеріалу, коли він під час відповіді на запитання виявив нерозуміння фізичної сутності основних понять та термінів навчальної дисципліни, допускає плутанину, слабо володіє математичним апаратом, не може застосовувати набуті знання для розв’язування конкретних практичних задач, тобто виявив відсутність мінімально необхідної кількості знань з даного курсу.

За бажанням аспіранта 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	Залік	ECTS	
		Оцінка	Характеристика
90 та вище	зараховано	A	відмінно
82-89 74-81	зараховано	B	добре
	зараховано	C	добре
64-73 60-64	зараховано	D	задовільно
	зараховано	E	задовільно
35-59	незараховано	FX	незадовільно з можливістю перескладання
	незараховано	F	незадовільно з обов'язковим повторним навчанням

Аспірант, який отримав за результатами підсумкового контролю оцінку «незараховано» або «незадовільно з обов'язковим повторним навчанням» (1-34 балів, F), зобов'язаний пройти повторний курс вивчення дисципліни (під час додаткового семестру) і скласти залік або екзамен.

Результати підсумкового контролю знань заносяться до залікової відомості.

6. ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

6.1. Зміст навчальної дисципліни

Змістовий модуль 1

Оптична діагностика упорядкованих та розупорядкованих матеріалів методами коливної спектроскопії. Симетрія кристалічної решітки і фонони.

ТЕМА 1. Теоретичні основи діагностики твердотільних функціональних матеріалів методами коливної спектроскопії .

(4 год.)

Коливні спектри кристалів. Класичний і квантовомеханічний підхід для опису коливних спектрів. Коливання кристалічної решітки. Коливання і хвилі в лінійному одномірному періодичному ланцюжку з атомами одного типу. Закон дисперсії для коливаних одномірного періодичного ланцюжка з атомами двох типів. Коливання атомів тривимірної решітки. Нормальні координати кристалічної решітки. Кінетична і потенціальна енергія коливаних атомів. Фонони. Історія відкриття фонона. Фонони в кубічних кристалах. Кубічна структура. Іонний зв'язок в полярних кристалах. Решітки Браве. Параметри Вейса. Індeksi Мюллера. Елементи симетрії кристалічних структур. Коливання полярних кубічних кристалах. Фонони в кристалах з вюрцитною кристалічною ґраткою. Модель Лоудона для одноосних кристалів і її застосування до нітридів АЗВ5 групи.

ТЕМА 2. Оптична діагностика матеріалів методами коливної спектроскопії *(4 год.)*

Фізичні основи комбінаційного розсіяння світла (КРС). Макроскопічна (класична) та мікроскопічна теорія КРС. Спектроскопія КРС – ефективний засіб вивчення взаємодії випромінювання з речовиною. Фізичні основи вимушеного і когерентного антистоксового комбінаційного розсіяння світла (ВКР і КАРС). ВКР – лазери. Сучасні досягнення КАРС-спектроскопії в дослідженні розподілу молекул по коливально-обертальним рівням. Застосування ВКР і КАРС в біології і медичній діагностиці. Розсіяння на акустичних фононах (Мандельштама-Бріллюена). Фр'юлівська електрон-фононна взаємодія в полярних кристалах. Правила відбору. Приклади. Алмаз, кремній і германій. Сучасні КРС-спектрометри. Макро і конфокальна КРС-спектроскопія. Основні компоненти і технічні характеристики КРС-спектрометрів. Роздільна здатність; дисперсія; світлосила. Джерела світла. Детектори. Техніка експерименту. Конфігурація експерименту КРС. Поляризаційні вимірювання. Позначення Порто. Приклади спектрів КРС. Інфрачервона спектроскопія: спектри поглинання (Фононні процеси). Зона структура. Механізми поглинання світла в напівпровідниках. Край поглинання у прямозонних і непрямозонних напівпровідниках. Край

Урбаха. Ефект Бурштейна-Мосса для невироджених напівпровідників. Однофононне поглинання у полярних напівпровідниках. LO-TO розщеплення. Метод Берремана. Фононні спектри змішаних напівпровідників. Локальні коливання домішок. ІЧ спектроскопія молекулярних коливань. Типи молекулярних коливань.

ТЕМА 3. Симетрія кристалічної решітки і фоони. Ангармонізм. (4 год.)

Тензор комбінаційне розсіяння світла і правила відбору. Тензор розсіяння. Правила відбору. Затухання фоонів (ангармонізм). Алмаз. Графіт. Фоони структури типу цинкової обманки (GaAs). Деформаційний потенціал. Фр'оліхівська взаємодія в полярних кристалах. Фононний спектр вюртцитної структури (w-GaN). Фононні спектри КРС твердих розчинів напівпровідників. Одно-, двох і трьохмодовий тип перебудови фононного спектру. Політипи карбїду кремнію і їх фононні спектри.

Змістовий модуль 2. Оптична діагностика наноструктур. Комбінаційне розсіяння світла. Коливні властивості наноструктур. Мікроспектроскопія.

ТЕМА 4. Резонансне і електронне комбінаційне розсіяння світла (4 год.)

Резонансне комбінаційне розсіяння світла в кристалах. Вхідний, вихідний резонанс. Багатофононне резонансне КРС і електрон-фононна взаємодія. Комбінаційне розсіяння на змішаних LO фонон-плазмових збудженнях. Механізми розсіяння: деформаційний потенціал і електронно-оптичний механізм, механізм флуктуації зарядової густини та незбереження хвильового вектора. Вільні носії заряду і домішки. Електронне КРС. КРС на магнонах.

ТЕМА 5. Коливні властивості наноструктур. (4 год.)

Розмірно-обмежені 3D, 2D, 1D, 0D кристалічні середовища. Дискретність хвильового вектора. Квантово-розмірні ефекти - квантування енергії електронів, фоонів. Двовірна квантова яма, одновірна квантова нитка і нульвірна квантова точка. Надгратки. Фоони в надгратках. Наближення пружного континуума. Раманівське розсіяння на складених (folding phonons) акустичних фононах. Конфаймент фоонів. Раманівське розсіяння на квантованих конфайментних оптичних фононах (Confinement modes). Раманівське розсіяння на інтерфейсних модах (Interface modes). Фоони в нанокристалах. Модель пружного континуума. Низькочастотна "дихаюча" мода - Лембовська мода. Модель механічного континуума (модель Рїхтера). Конфайментні оптичні моди. Модель діелектричного континуума. Інтерфейсні (поверхневі) оптичні моди. Розрахунки коливних спектрів нанокристалів. Коливні властивості вуглецевих наноструктур. Структурні форми елементарного вуглецю з різним координаційним числом і дальністю впорядкування. Фононні спектри алмазу, графіту, графену, фуллеренів, вуглецевих нанотрубок, аморфного вуглецю, склоподібний графіту, сажі.

ТЕМА 6. Раманівська мікроспектроскопія (6 год.)

Субмікронна спектроскопія мікро-КРС. Конфокальна спектроскопія і спектроскопія ближнього поля. Мікрокартографування деформацій в полікристалічних алмазних плівках. Підсилена поверхнею спектроскопія КРС (SERS). TERS-спектроскопія. Застосування. Досягнення і перспективи сучасних КРС-спектрометрів.

ТЕМА 7. Лінійні і нелінійні показники заломлення і двохфотонне поглинання в упорядкованих і неупорядкованих твердих тілах (2 год.)

Лінійні і нелінійні показники заломлення і двохфотонне поглинання. Обладнання і методика досліджень.

6.2. СТРУКТУРА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН ЛЕКЦІЙ І СЕМІНАРСЬКИХ ЗАНЯТЬ

(денне форма навчання)

№ п/п	Назва лекції	Кількість годин			
		лекції	семінари/ лаборат., практичні	С/Р	Інші форм и контр
Змістовий модуль 1					
<i>Методи коливної спектроскопії. Симетрія кристалічної решітки і фонони.</i>					
1	Тема 1 Теоретичні основи коливної спектроскопії <i>твердотільних функціональних матеріалів.</i>	6	6	10	
2	Тема 2. Методи коливної спектроскопії	6	6	20	
3	Тема 3. Симетрія кристалічної решітки і фонони. <i>Ангармонізм.</i>	6	6	20	
	Модульна контрольна робота				1
Змістовий модуль 1					

Комбінаційне розсіяння світла. Коливні властивості наноструктур.

Мікроспектроскопія.

4	Тема 4. Резонансне і електронне комбінаційне розсіяння світла	6	6	12	
5	Тема 5. Коливні властивості наноструктур.	6	8	30	
6	Тема 6. Раманівська мікроспектроскопія	6	6	20	
7	Тема 7. Лінійні і нелінійні показники заломлення і двофотонне поглинання в упорядкованих і неупорядкованих твердих тілах	4	4	14	
	Підсумкова модульна контрольна робота				1
	ВСЬОГО	40	44	126	2

Загальний обсяг **210 год.**, в тому числі:

Лекцій – **40 год**

Практичні -**44 год.**

Самостійна робота - **126 год.**

Заочна форма навчання

№ п/п	Назва лекції	Кількість годин			
		лекції	семінари/ лаборат., практичні	С/Р	Інші форм и контр
Змістовий модуль 1					
<i>Методи коливної спектроскопії. Симетрія кристалічної решітки і фонони.</i>					
1	Тема 1 Теоретичні основи коливної спектроскопії твердотільних функціональних матеріалів.	1		20	
2	Тема 2. Методи коливної спектроскопії	2	2	60	

3	Тема 3. Симетрія кристалічної решітки і фонони. <i>Ангармонізм.</i>	1		12	
	Модульна контрольна робота				1
Змістовий модуль 1 <i>Комбінаційне розсіяння світла. Коливні властивості наноструктур.</i> <i>Мікроспектроскопія.</i>					
4	Тема 4. Резонансне і електронне комбінаційне розсіяння світла	2	2	22	
5	Тема 5. Коливні властивості наноструктур.	4	2	42	
6	Тема 6. Раманівська мікроспектроскопія	4	2	40	
7	Тема 7. Лінійні і нелінійні показники заломлення і двохфотонне поглинання в упорядкованих і неупорядкованих твердих тілах	2			
	Підсумкова модульна контрольна робота				1
	ВСЬОГО	16	8	186	2

Загальний обсяг **212 год.**, в тому числі:

Лекцій – **16 год**

Практичні -**8 год.**

Самостійна робота - **186 год.**

6.3. Теми практичних (семінарських, лабораторних) занять

1.	Коливання полярних кубічних кристалах. Фонони в кристалах з вюрцитною кристалічною ґраткою. Модель Лоудона для одноосних кристалів і її застосування до нітридів АЗВ5 групи.	2	2
2.	Сучасні КРС-спектрометри. Макро і конфокальна КРС-спектроскопія. Основні компоненти і технічні характеристики КРС-спектрометрів. Роздільна здатність; дисперсія; світлосила. Джерела світла. Детектори. Техніка експерименту. Конфігурація експерименту КРС. Поляризаційні вимірювання.	2	

	Позначення Порто. Приклади спектрів КРС.		
3.	Фононні спектри КРС твердих розчинів напівпровідників. Одно-, двох і трьохмодовий тип перебудови фононного спектру. Політипи карбиду кремнію і їх фононні спектри.	4	2
4.	Комбінаційне розсіяння на змішаних LO фонон-плазмових збудженнях.	4	
5.	Розрахунки коливних спектрів нанокристалів.	2	
6.	Фононні спектри алмазу, графіту, графену, фуллеренів, вуглецевих нанотрубок, аморфного вуглецю, склоподібний графіту, сажі.	4	2
7.	Фононний спектр вюртцитної структури (w-GaN). Фононні спектри КРС твердих розчинів напівпровідників. Одно-, двох і трьохмодовий тип перебудови фононного спектру. Політипи карбиду кремнію і їх фононні спектри.	4	
8.	Підсилена поверхнею спектроскопія КРС (SERS).	2	
9.	Обладнання і методика досліджень двохфотонного поглинання в твердих тілах.	2	
10.	Низькочастотне Раман розсіювання в некристалічних матеріалах.	2	2
11.	Терагерцова спектроскопія.	2	
12.	Мікрокартографування деформацій в полікристалічних алмазних плівках.	2	
13.	Власне та індукване структурне розупорядкування в напівпровідниках.	2	
14.	Локальні коливання домішок. ІЧ спектроскопія молекулярних коливань. Типи молекулярних коливань.	4	
15.	Застосування ВКР і КАРС в біології і медичній діагностиці.	2	
		40	8

ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 1

Методи коливної спектроскопії. Симетрія кристалічної решітки і фонони.

Тема 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ КОЛИВНОЇ СПЕКТРОСКОПІЇ ТВЕРДОТІЛЬНИХ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ (6 год.)

Лекція 1. Коливні спектри кристалів. Класичний і квантовомеханічний підхід для опису коливних спектрів. Коливання кристалічної решітки. Коливання

і хвилі в лінійному одномірному періодичному ланцюжку з атомами одного типу. Закон дисперсії для коливань одномірного періодичного ланцюжка з атомами двох типів.

Лекція 2. Коливання атомів тривимірної решітки. Нормальні координати кристалічної решітки. Кінетична і потенціальна енергія коливань атомів. Фонони. Історія відкриття фонона.

Література [1,9,10,12]

Лекція 3. Фонони в кубічних кристалах. Кубічна структура. Іонний зв'язок в полярних кристалах. Решітки Браве. Параметри Вейса. Індeksi Мюллера. Елементи симетрії кристалічних структур. Коливання в полярних кубічних кристалах. Фонони в кристалах з вюрцитною кристалічною ґраткою. Модель Лоудона для одноосних кристалів і її застосування до нітридів АЗВ5 групи.

Література [1,9,10]

Завдання для самостійної роботи

(6 год.)

1. Вивчення матеріалу лекцій.
2. Опрацювання матеріалу по темі:
 - а) Класифікація кристалічних решіток. *Література [1,9,10,12]*
 - б) Історія відкриття фонона (Нариси з історії природознавства і техніки.

Вип.46 (2011) 13.

Тема 2. МЕТОДИ КОЛИВНОЇ СПЕКТРОСКОПІЇ (4 год.)

Лекція 4. Фізичні основи комбінаційного розсіяння світла (КРС). Макроскопічна (класична) та мікроскопічна теорія КРС. Спектроскопія КРС – ефективний засіб вивчення взаємодії випромінювання з речовиною. Фр'юлівська електрон-фононна взаємодія в полярних кристалах. Правила відбору. Приклади. Алмаз, кремній і германій. Фізичні основи вимушеного і когерентного антистоксового комбінаційного розсіяння світла (ВКР і КАРС). ВКР – лазери. Сучасні досягнення КАРС-спектроскопії в дослідженні розподілу молекул по коливально-обертальним рівням. Застосування ВКР і КАРС в біології і медичній діагностиці. Розсіяння на акустичних фононах (Мандельштама-Бріллоена).

Література [1,6,7,8]

Лекція 5. Сучасні КРС-спектрометри. Макро і конфокальна КРС-спектроскопія. Основні компоненти і технічні характеристики КРС-спектрометрів. Роздільна здатність; дисперсія; світлосила. Джерела світла.

Детектори. Техніка експерименту. Конфігурація експерименту КРС.

Поляризаційні вимірювання. Позначення Порто. Приклади спектрів КРС.

Література [5,6,8]

Лекція 6. Інфрачервона спектроскопія: спектри поглинання (Фононні процеси). Зона структура. Механізми поглинання світла в напівпровідниках. Край поглинання у прямозонних і непрямозонних напівпровідниках. Край Урбаха. Ефект Бурштейна-Мосса для невироджених напівпровідників. Однофононне поглинання у полярних напівпровідниках. LO-TO розчеплення. Метод Берремана. Фононні спектри змішаних напівпровідників. Локальні коливання домішок. ІЧ спектроскопія молекулярних коливань. Типи молекулярних коливань.

Завдання для самостійної роботи

(6 год.)

1. Вивчення матеріалу лекцій.
Опрацювання матеріалу по темі:

а) Фабелинский И.Л. Комбинационному рассеянию света – 70 лет (Из

истории физики) Успехи физических наук, 1998, т.168, №12, с.1342-1360.

б) Багатофононне поглинання в твердих тілах. *Література [7,8,11,12]*

с) Фізичні основи вимушеного і когерентного антистоксового комбінаційного розсіяння світла (ВКР і КАРС). ВКР – лазери. Сучасні досягнення КАРС-спектроскопії в дослідженні розподілу молекул по коливально-обертальним рівням. Застосування ВКР і КАРС в біології і медичній діагностиці (A.Fadini, F.-M.Shnepel. *Vibrational Spectroscopy: Methods and Applications*. Ellis Horwood Ltd, Chichester, 1989).

Тема 3. СИМЕТРІЯ КРИСТАЛІЧНОЇ РЕШІТКИ І ФОНОНИ. АНГАРМОНІЗМ

(2 год.)

Лекція 7-8. Тензор комбінаційне розсіяння світла і правила відбору. Тензор розсіяння. Правила відбору. Затухання фононів (ангармонізм). Алмаз. Графіт. Фонони структури типу цинкової обманки (GaAs). Деформаційний потенціал. Фр'юліхівська взаємодія в полярних кристалах. Фононний спектр вюртцитної структури (w-GaN)

Література [1,6,7,10,12]

Лекція 9. Фононні спектри КРС твердих розчинів напівпровідників. Одно-, двох і трьохмодовий тип перебудови фононного спектру. Політипи карбіду кремнію і їх фононні спектри.

Література [1,8]

Завдання для самостійної роботи

(6 год.)

1. Вивчення матеріалу лекцій.
2. Опрацювання матеріалу по темі: Політипи карбіду кремнію і їх фононні спектри.*Література [1, 7]*

Контрольні запитання до змістового модуля 1

1. Як будується комірка Вігнера-Зейтца і зона Бріллюена ?
2. Фонони.
3. Наближення гармонічного осцилятора.
4. Нормальні коливання.
5. Дисперсія коливань в трьохмірній решітці. Кількість віток.
6. Акустичні і оптичні коливання.
7. Повздовжні і поперечні оптичні (акустичні) хвилі.
8. Співвідношення Ліддана-Сакса-Теллера.
9. В чому принципові відмінності між акустичними і оптичними коливаннями решітки ?
10. Які властивості твердих тіл неможливо пояснити в рамках гармонічного опису коливань решітки ?
11. Спектральні параметри фононої смуги
12. Закон збереження енергії і імпульсу в процесі КРС
13. Чому в спектрі КРС кристалів реєструються дуже вузькі смуги випромінювання (фононні лінії) ?
14. Чому в процесі комбінаційного розсіяння світла в кристалах приймають участь лише довгохвильові фонони, хвильовий вектор яких є менше 10^{-4} \AA^{-1} ?
15. Розсіяння на акустичних фононах (Мандельштама-Бріллюена)
16. Затухання фононів (ангармонізм).
17. Параметр Грюнайзена. Яким основним фактором обумовлена температурна залежність параметра Грюнайзена ?
18. Взаємодія електронів з акустичними фононами. Деформаційний потенціал.
19. Взаємодія електронів з оптичними фононами. Фр'юліхівський механізм.
20. Полярони
21. Переваги лазерних джерел збудження спектрів КРС
22. Геометрії експерименту КРС

23. Поляризація. Позначення Порто.
24. КРС першого та другого порядку порядку в моноатомних кристаллах з алмазною кристалічною граткою. Алмаз, кремній, германій. Селен.
25. Фононні спектри кристалів з одномодовим типом перебудови спектрів ($\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{F}_2$, $\text{Sr}_{1-x}\text{Ba}_x\text{F}_2$)
26. Фононні спектри кристалів з двохмодовим типом перебудови спектрів ($\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$, $\text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}$)
27. Фононні спектри різних політипів карбіду кремнію.

ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 2

Комбінаційне розсіяння світла. Коливні властивості наноструктур.

Мікроспектроскопія.

Тема 4. РЕЗОНАНСНЕ І ЕЛЕКТРОННЕ КОМБІНАЦІЙНЕ РОЗСІЯННЯ

СВІТЛА

(4 год.)

Лекція 10. Резонансне комбінаційне розсіяння світла в кристалах. Вхідний, вихідний резонанс. Багатофононне резонансне КРС і електрон-фононна взаємодія. *Література [1,2,6,7,8]*

Лекція 11. Комбінаційне розсіяння на змішаних LO фонон-плазмових збудженнях. Механізми розсіяння: деформаційний потенціал і електронно-оптичний механізм, механізм флуктуації зарядової густини та незбереження хвильового вектора. Вільні носії заряду і домішки. Електронне КРС. КРС на магнонах.

Завдання для самостійної роботи

(6 год.)

1. Вивчення матеріалу лекцій.
2. Опрацювання матеріалу по темі:
 - а) Поляритони . *Література [1,2, 6-8, 21-28]*

б) П.Н.Шорыгин. Комбинационное рассеяние света вдали и вблизи от резонанса. Успехи физических наук, 1973, т.19, с.293.

Тема 5. КОЛИВНІ ВЛАСТИВОСТІ НАНОСТРУКТУР (6 год.)

Лекція 12. Розмірно-обмежені 3D, 2D, 1D, 0D кристалічні середовища. Дискретність хвильового вектора. Квантово-розмірні ефекти - квантування енергії електронів, фононів. Двомірна квантова яма, одномірна квантова нитка і нульмірна квантова точка. Надгратки.

Завдання для самостійної роботи (6 год.)

1. Вивчення матеріалу лекцій.
2. Опрацювання матеріалу по темі: Наноструктури. Розмірне квантування. Структури з квантовими ямами, нитка і точками.
3. Опрацювання матеріалу по темі: Квантові точки та їх коливні і випромінювальні оптичні спектри.

Література [1,3, 10]

Лекція 13. Фонони в надгратках. Наближення пружного континуума.

Раманівське розсіяння на складених (folding phonons) акустичних фононах.

Конфаймент фононів. Раманівське розсіяння на квантованих конфайментних оптичних фонах (Confinement modes). Раманівське розсіяння на інтерфейсних модах (Interface modes).

Завдання для самостійної роботи

(6 год.)

1. Вивчення матеріалу лекцій.
2. Опрацювання матеріалу по темі: Коливна спектроскопія АЗВ5 наноструктур (InGaAs/GaAs, GaAlAs/GaAs структури з квантовими ямами, надгратки).
3. Опрацювання матеріалу по темі: Спектроскопія КРС монокристалів і квантових наноструктур на основі кремнію: SiGe/Ge квантових ям та квантових точок *Література [1,3, 10]*

Лекція 14. Фонони в нанокристалах. Модель пружного континуума. Низькочастотна “дихаюча” мода - Лембовська мода. Модель механічного континуума (модель Ріхтера). Конфайментні оптичні моди. Модель діелектричного континуума. Інтерфейсні (поверхневі) оптичні моди. Розрахунки коливних спектрів нанокристалів.

Завдання для самостійної роботи

(10 год.)

1. Вивчення матеріалу лекцій.
2. Опрацювання матеріалу по темі: Коливна спектроскопія макро- і мікрокомпонентних матеріалів (нанокристали в аморфній матриці (a-Si/μ-Si, μ-Si/SiO₂), просторово неоднорідні матеріали, AlN/SiC)

Література [1,3, 10]

Лекція 15. Коливні властивості вуглецевих наноструктур. Структурні форми елементарного вуглецю з різним координаційним числом і дальністю впорядкування. Фононні спектри алмазу, графіту, графену, фуллеренів, вуглецевих нанотрубок, аморфного вуглецю, склоподібний графіту, сажи.

Завдання для самостійної роботи

(8 год.)

1. Вивчення матеріалу лекцій.

2. Опрацювання матеріалу по темі: Резонансна спектроскопія КРС вуглецевих нанотрубок *Література [1,3, 4,6]*

Тема 6. РАМАНІВСЬКА МІКРОСПЕКТРОСКОПІЯ (4 год.)

Лекція 16. Субмікронна спектроскопія мікро-КРС. Конфокальна спектроскопія

і спектроскопія ближнього поля. Мікрокартографування деформацій в полікристалічних алмазних плівках.

Література [5,6, 13]

Завдання для самостійної роботи (2год.)

1. Вивчення матеріалу лекцій.
2. Опрацювання матеріалу по темі: Методи мікроспектроскопії КРС у криміналістичному аналізі та в дефектоскопії

Лекція 17. Підсилена поверхню спектроскопія КРС (SERS). Застосування.

Досягнення і перспективи сучасних КРС-спектрометрів. Застосування.

Література [5,6, 14]

Завдання для самостійної роботи (2 год.)

1. Вивчення матеріалу лекцій.
2. Опрацювання матеріалу по темі: Наноструктури в електроніці, оптико-інформаційних системах, біології і медицині.
3. Опрацювання матеріалу по темі:
 - а) Мікроспектроскопія КРС біологічних об'єктів
 - б) TERS-спектроскопія.

Завдання для самостійної роботи (3 год.)

1. Вивчення матеріалу лекцій.
2. Опрацювання матеріалу по темі: Використання КРС для мікрокартографування деформацій в полікристалічних алмазних плівках.
3. Підготовка реферату
4. Підготовка до модульної контрольної № 2
Література [5,6]

Контрольні запитання до змістового модуля 2

1. Класифікація фононних мод - фундаментальні, обертонові і складені коливні частоти.
2. Резонансне непружне розсіяння світла в кристалах .
3. Плазмони. Взаємодія плазмових і фононних збуджень.
4. Діелектрична проникливість кристала.
5. Непружне розсіяння на одочастинкових і колективних електронних збудженнях кристалу.

6. Залежність взаємодії LO фононних мод з плазмонами від концентрації носіїв.
7. Розсіяння на магнонах.
8. Визначення фононної температури із стоксового і антистоксового спектру КРС.
9. При яких розмірах твердого тіла (InAs, InSb) проявляються розмірні ефекти ?
10. Довжина хвилі де-Бройля
11. Квантова яма, квантова нитка, квантова точка.
12. Типи напівпровідникових надграток.
13. Напівпровідникові точки в діелектричній матриці.
14. Дискретність хвильового вектора
15. Просторово-обмежені (“confinement”) фонони
16. Складені акустичні фонони (“folded phonons”)
17. Інтерфейсні, поверхневі фонони
18. Методи коливної спектроскопії для кількісного і якісного аналізу в хімії.

19. Мікро-КРС дослідження АЗВ5 гетероструктур.

20. Діагностичні можливості мікро-КРС спектроскопії для біологічних об'єктів.

ЗАВДАННЯ МОДУЛЬНОЇ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

Модульна контрольна робота № 1

1. Класичний і квантовомеханічний підхід для опису коливних спектрів.
2. Коливання і хвилі в лінійному одномірному періодичному ланцюжку з атомами одного типу.
3. Закон дисперсії для коливань одномірного періодичного ланцюжка з атомами двох типів. Акустичні і оптичні коливання. Повздовжні і поперечні оптичні (акустичні) хвилі.
4. Коливання атомів тривимірної решітки. Нормальні координати. Кінетична і потенціальна енергія коливань атомів. Фонони.
5. Кубічна структура. Фонони в кубічних кристалах. Іонний зв'язок в полярних кристалах. Коливання в полярних кубічних кристалах. Співвідношення Ліддана-Сакса-Теллера.
6. Елементи симетрії кристалічних структур. Решітки Браве. Параметри Вейса. Індокси Мюллера. Як побудува комірку Вігнера-Зейтца і зони Бріллюена ?
7. Фонони в кристалах з вюрцитною кристалічною граткою. Модель Лоудона для одноосних кристалів і її застосування до нітридів АЗВ5 групи.
8. Фізичні основи комбінаційного розсіяння світла (КРС). Макроскопічна (класична) і мікроскопічна теорія КРС.
9. Фізичні основи вимушеного і когерентного антистоксового комбінаційного розсіяння світла (ВКР і КАРС). Застосування.
10. Фр'юлівська електрон-фононна взаємодія в полярних кристалах. Правила відбору. Приклади. Алмаз, кремній і германій.
11. Сучасні КРС-спектрометри. Макро і конфокальна КРС-спектроскопія. Основні компоненти і технічні характеристики КРС-спектрометрів.
12. Техніка експерименту КРС. Поляризаційні вимірювання. Позначення Порто. Приклади спектрів КРС.

13. Розсіяння на акустичних фононах (Мандельштама-Бріллюена).
14. Інфрачервона спектроскопія: спектри поглинання (Фононні процеси).
15. Механізми поглинання світла в напівпровідниках. Край поглинання у прямозонних і непрямозонних напівпровідниках. Край Урбаха. Ефект Бурштейна-Мосса
16. Фононні спектри змішаних напівпровідників. Локальні коливання домішок.
17. ІЧ спектроскопія молекулярних коливань. Типи молекулярних коливань.
18. Тензор комбінаційне розсіяння світла і правила відбору. Алмаз. Графіт.
19. Затухання фононів (ангармонізм).
20. Деформаційний потенціал. Фрьоліхівська взаємодія в полярних кристалах.
21. Фонони структури типу цинкової обманки (GaAs). Фононний спектр вюртцитної структури (w-GaN).
22. Фононні спектри КРС твердих розчинів напівпровідників. Одно-, двох і трьохмодовий тип перебудови фононного спектру. Політипи карбїду кремнію та їх фононні спектри.

Модульна контрольна робота № 2

1. Резонансне комбінаційне розсіяння світла в кристалах. Вхідний, вихідний резонанс.
2. Багатофоновне резонансне КРС і електрон-фононна взаємодія.
3. Комбінаційне розсіяння на змішаних LO фонон-плазмових збудженнях.
4. Механізми розсіяння: деформаційний потенціал і електронно-оптичний механізм, механізм флуктуації зарядової густини та незбереження хвильового вектора.
5. Електронне КРС. КРС на магнонах.
6. Розмірно-обмежені 3D, 2D, 1D, 0D кристалічні середовища. Дискретність хвильового вектора. Квантово-розмірні ефекти - квантування енергії електронів, фононів.
7. Двомірна квантова яма, одномірна квантова нитка і нульмірна квантова точка.
8. Надгратки. Фонони в надгратках. Наближення пружного континуума. Раманівське розсіяння на складених (folding phonons) акустичних фононах.
9. Конфаймент фононів. Раманівське розсіяння на квантованих конфайментних оптичних фононах (Confinement modes).
10. Раманівське розсіяння на інтерфейсних модах (Interface modes).
11. Фонони в нанокристалах. Модель пружного континуума. Низькочастотна “дихаюча” мода - Лембовська мода.
12. Фонони в нанокристалах. Модель механічного континуума (модель Ріхтера). Конфайментні оптичні моди.
13. Модель діелектричного континуума. Інтерфейсні (поверхневі) оптичні моди.
14. Структурні форми елементарного вуглецю з різним координаційним числом і дальністю впорядкування.
15. Фононні спектри алмазу, графіту, графену, вуглецевих нанотрубок.

16.Субмікронна спектроскопія мікро-КРС. Конфокальна спектроскопія і спектроскопія ближнього поля.

17.Підсилена поверхнею спектроскопія КРС(SERS). Застосування.

18.Досягнення і перспективи сучасних КРС-спектрометрів.

Мікроспектроскопія КРС біологічних об'єктів

19. TERS-спектроскопія.

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

Технічні засоби: Мультимедійний проєктор.

Обладнання: персональні ком'ютери, ноутбуки.

Програмне забезпечення Windows 10, Microsoft Power Point.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА:

Основна:

1. Мица В.М. Колебательные спектры и структурные корреляции в бескислородных стеклообразных сплавах: К., Учебно-методический кабинет по высшему образованию, 1992, -55 с.
2. I.Beszeda, T.Hadházy, S.Kokenyesi, V.Mitsa, Nemkristályos szilárd anyagok szerkezete és spektroszkópiai vizsgálata, MTA Szabolcs-Szatmár-Bereg Megyei Tudományos Testületének Közleményei, Sorozatszám: 23. Nyíregyháza – Ungvár. (1994.). 102 p. ISBN:963-8048-174.
3. Mitsa V., Holomb R., Veres M., Koós M. “Raman szórás nanoszerkezetű kalkogénid üvegekben”. Hungarian Academy of Sciences. Budapest: Intermix Kiadó, - 2009 . ISBN 978-963-9814-18-9.
4. В.Мица, О.Фегер, Р.Голомб, В. Ткач, О.Мица, М.Иванда, С.Петрецький Взаємозв'язок низькотемпературних аномалій теплопровідності та низькочастотних раман спектрів широкозонних халькогенідних стекол для оптичних покриттів силової оптики. Видавництво ТОВ «Рік-У», 2018 – 140 с
5. Рассеяние света в твердых телах /Под ред. М.Кардоны), М., Мир, 1979, 390 с. Фабелинский И.Л. Комбинационному рассеянию света – 70 лет (Из истории физики) Успехи физических наук, 1998, т.168, №12, с.1342-1360. П.Н.Шорыгин. Комбинационное рассеяние света вдали и вблизи от резонанса. Успехи физических наук, 1973, т.19, с.293.
6. Рассеяние света в твердых телах IV Электронное рассеяние, спиновые эффекты, морфические эффекты. /Под ред. М.Кардоны), М., Мир, 1986, 408 с.
7. Light Scattering in Solids V. Superlattice and other microstructures. Ed. By V.Cardona and G.Guntherodt.- Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1989, 211 p.
8. Light Scattering in Solids VIII. Fullerenes, Semiconductor Surface, Coherent Phonons. Ed. By V.Cardona and G.Guntherodt.- Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2000, 220 p.
9. Light Scattering in Solids IX. Novel Materials and Techniques. Ed. by V.Cardona and G.Guntherodt.- Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007, 422p.
10. W.H.Weber, R.Merlin. Raman Scattering in Materials Science. - Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2000, 492 p.

Спектроскопия комбинационного рассеяния света в газах и жидкостях (Под ред. А.Вебера) М.: Мир , 1982, 373 с.

A.Fadini, F.-M.Shnepel. Vibrational Spectroscopy: Methods and Applications. Ellis Horwood Ltd, Chichester, 1989

Even Smith, Geoffrey Dent. Modern Raman Spectroscopy – A practical approach.- John Wiley Sons, Ltd, 2005, 225 с.

R.L.McCreery. Raman Spectroscopy for Chemical Analysis. John Wiley Sons, Inc., New York, 2000.

11. Питер Ю, Кардона М. Основы физики полупроводников / Под ред. И.И.Решинной / Физматлит, Москва, 2002,560 с.
12. Применение спектров комбинационного рассеяния / под ред. А.Андерсона, пер. с англ./ М.: Мир , 1977, 586 с.
13. Сущинський М.М. Комбинационное рассеяние света и строение вещества. - М: Наука, 1981, 183 с. Сущинський М.М. Спектры комбинационного рассеяния света молекул и кристаллов, - М: Наука, 1969, 576 с.
- 10.Строшило М., Дута М. Фонони в наноструктурах /под ред.Г.Н.Жижина, пер. с англ./ М.: Физматлит, 2006, 319 с.
11. Уханов Ю.И. Оптические свойства полупроводников.- М.: Наука, 1977, 366 с.
12. Китель Ч. Введение в физику твердого тела.- М.: Физматлит, 1963, 384 с
13. Corle T.R., Kino G.S. Confocal Scanning Optical Microscope and Related Imaging Systems.- Academ. pres., San Diego, London, Boston,..., 2000, 331 p.
14. Гиганское комбинационное рассеяние /под ред.Р.Ченга, Т.Фуртака/.- М.: Мир, 1984, 407 с.

Додаткова:

15. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. — М.: Наука, 1977.
16. Херман, М. Полупроводниковые сверхрешетки / М. Херман. — М.: Мир, 1989, 238 с.
17. Елецкий А.В. Углеродные нанотрубки. // УФН, Т. 167, №9 (1997) С. 945– 972
18. Вуль А.Я. Фуллерены как материал электронной техники. //Материалы электронной техники. - №7 (1999) С. 4–7.
19. M.Burghard. Electronic and vibrational properties of chemically modified single-well carbon nanotubes . Surface Science Reports 58 (2005) p. 1-109.
20. Гусев, А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев. — М.: Физматлит, 2005.
21. Оптика наноструктур / Под ред. А.В. Федорова. — СПб: Недра, 2005.
22. Физика низкоразмерных систем / А.Я. Шик, Л.Г. Бакуева, С.Ф. Мусихин, С.А. Рыков. — СПб: Наука, 2001.
23. Оптические явления в полупроводниковых квантово-размерных структурах / Л.Е. Воробьев, Л.Г. Голуб, С.Н. Данилов, Е.Л. Ивченко, Д.А. Фирсов, В.А. Шалыгин. — СПб: СПб ГТУ, 2000.
24. Bimberg, D. Quantum dot heterostructures / D. Bimberg, M. Grundman, N.N. Ledentsov. NY: J. Wiley, 1999.
25. Брандт, Н.Б. Квазичастицы в физике конденсированного состояния / Н.Б. Брандт, В.А. Кульбачинский. — М.: Физматлит, 2005.
26. Китель, Ч. Квантовая теория твердых тел / Ч. Китель. — М.: Наука, 1967.
27. Бонч-Бруевич, В.Л. Физика полупроводников / В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. — М.: Наука, 1977.
28. Давыдов, А.С. Теория твердого тела / А.С. Давыдов. — М.: Наука, 1976.

Рекомендації по використанню Інтернет-ресурсів і інших електронних інформаційних джерел:

1. <http://www.ru.wikipedia.org/wiki/Спектроскопия>
2. www.elsevier.com
3. <http://www.elibrary.ru>
4. <http://www.nanonewsnet.ru>