

На правах рукописи
УДК 535.375:535.361

Раупов Наимджон Набиджонович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ СТРУКТУРЫ
ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ
НА СПЕКТРЫ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ
СВЕТА**

Специальность 01.04.05 – оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Красноярск 2006

Работа выполнена в Худжандском государственном
университете им. академика Б. Гафурова
Республики Таджикистан

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Умаров М.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор Ветров С. Я.

кандидат физико-математических наук,
Крылов А. С.

Ведущая организация: Красноярский государственный
университет

Защита состоится «04» декабря 2006 г. на заседании диссертационного совета Д 003.055.01 в Институте физики им. Л. В. Киренского СО РАН по адресу: 660036, Красноярск, Академгородок, Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики им. Л. В. Киренского СО РАН.

Автореферат разослан «03» ноября 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

А. Н. Втюрин

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы

В последнее время в связи с развитием твердотельной электроники, лазерной техники и нелинейной оптики широкое применение получили пьезоэлектрические кристаллы, характеризующиеся наличием определенных типов элементарных колебательных возбуждений: фононов, поляритонов, плазмонов, колебательных экситонов и др.

Пьезоэлектрические кристаллы благодаря своим сильно выраженным нелинейно-оптическим свойствам находят обширное применение в различных устройствах квантовой электроники в качестве модуляторов, дефлекторов, преобразователей частоты лазерного излучения, микрогенераторов, фильтров и т. д.

В процессе выращивания пьезоэлектрических кристаллов относительно больших размеров, как правило, возникают пространственные неоднородности, связанные с реальными отклонениями от стехиометрии состава, кластеризацией дефектов и т. д. Области пространственной неоднородности кристалла могут становиться зародышами новой фазы, а также областями, ответственными за разрушение кристаллов в процессе их обработки, при использовании в качестве облучаемых лазером кристаллов. В связи с этим возникает необходимость изучения локальных оптических свойств и качества кристаллов, что влечет за собой поиск и разработку различных экспериментальных методов, позволяющих проводить такие исследования. Среди них одним из наиболее подходящих является метод комбинационного рассеяния света (КРС).

Спектроскопия КРС в последние годы стала одним из ведущих методов исследования конденсированных сред. Современные лазерные источники когерентного излучения, возбуждающие спектр, в сочетании с малошумящими монохроматорами, высокочувствительными приемниками слабых оптических сигналов и автоматизированными системами обработки данных позволяют получать высококачественные спектры от самых разнообразных объектов при минимальных требованиях к объему и предварительной подготовке образцов. В связи с этим возникает задача установления корреляций параметров колебательного спектра кристаллов с количественными характеристиками их

качества, такими, как добротность, концентрация дефектов или примесей. Сказанное выше обосновывает актуальность выбранного в работе направления исследований.

Целью работы

является исследование связи добротности и спектральных свойств некоторых пьезоэлектрических кристаллов, и на основании этих исследований разработка оптических методов определения их качества.

Для достижения этой цели было намечено следующее:

- Исследовать спектры КРС первого и второго порядка монокристаллов ниобата лития и установить корреляции спектральных параметров и добротности образцов.
- Исследовать колебательные спектры нового пьезоэлектрика $\text{Pr}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$ чистого и легированного лантаном и установить корреляцию концентрации примеси лантана и спектральных характеристик.
- Исследовать динамику решетки смешанных твердых кристаллов галогенидов таллия, выявить зависимость параметров взаимодействия оптических и акустических колебаний от состава кристалла.

Научная новизна

1. Методами КРС идентифицированы кристаллы ниобата лития со стехиометрическим составом; в спектрах КРС впервые обнаружен максимум в области 120 см^{-1} (при комнатной температуре), соответствующий связанному состоянию двух акустических фононов, который весьма чувствителен к изменению акустической добротности кристалла.
2. На основании исследования квазиупругого рассеяния света в кристаллах кварца и танталата лития установлена связь степени деполяризации рассеянного света с акустическими потерями. Найдены области экспоненциальной зависимости степени деполяризации рассеянного света от акустической добротности этих кристаллов, что позволяет производить оценку их добротности оптическими методами.
3. Впервые исследованы спектральные свойства нового пьезоэлектрика $\text{Pr}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$ с различным содержанием легирующих примесей лантана методами КРС и ИК-спектроскопии. Уста-

новлена прямая корреляция между интенсивностью обертонов в колебательном спектре и концентрацией примеси лантана.

4. На основании изучения колебательных спектров и акустических характеристик смешанных твердых растворов галогенидов таллия обнаружено взаимодействие акустической ветви с фононной и его экстремальное изменение в зависимости от соотношения концентраций галогена (хлора и йода); установлена прямая корреляция между интенсивностями колебательного спектра, поглощением акустических волн и составом кристалла.

Научно-практическая значимость работы

Разработан и создан автоматизированный прибор для входного контроля качества необработанных пьезоэлектрических кристаллов при комнатной температуре. Установлена связь колебательных спектров КРС кристаллов с величиной акустической добротности. Наблюдаемый эффект взаимодействия фононной и акустической ветви позволяет использовать спектры КРС для контроля концентрации примеси в кристаллах. Полученные в работе зависимости позволяют производить количественные оценки акустической добротности пьезо- и сегнетоэлектрических кристаллов и проводить их отбраковку.

Защищаемые положения

диссертации частично включены в пункты научной новизны и практической значимости работы.

1. Предложение и обоснование неразрушающих способов контроля качества и концентрации примесей в пьезоэлектрических кристаллах.
2. Установление связи между степенью деполяризации рассеяния света, интенсивности колебательных линий и коэффициента поглощения звука от концентрации примесей и добротности кристаллов.

Достоверность результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивалась применением современного и надежного оборудования для исследования структуры и физических свойств пьезоэлектрических кристаллов различными экспериментальными методами, надежной статистикой проведенных экспериментов, применением со-

временных и независимых методов обработки данных, в ряде случаев – согласием с результатами других авторов. Разработанные оптические методы оценки акустической добротности были проверены независимыми радиотехническими методами, в том числе – в промышленных условиях.

Личный вклад автора

является основным на всех этапах научного исследования и заключается в постановке проблемы исследований, непосредственном выполнении основной части работы, в проведении экспериментов, в обсуждении и анализе полученных результатов и формулировании основных выводов. Анализ и обобщение результатов исследований выполнены в соавторстве. Выполненная работа является частью плановых НИР физико-технического факультета Худжандского Госуниверситета им. академика Б. Гафурова и заказ-наряда МО РТ шифр «УМФ-1» Гос. рег. № ТД2002Р1176 по теме «Разработка и исследование физических свойств перспективных искусственных кристаллов и горных минералов спектроскопическими методами».

Апробация

Результаты работы докладывались на международной конференции «Проблемы современной физико-механических свойств конденсированных сред» (Худжанд, 2002), X-ой международной конференции по «Композиционной энергетике» (США, 2003), IX-ом международном междисциплинарном симпозиуме «Порядок, беспорядок и свойства оксидов» (ОДРО-9, 2006, Сочи), Международном семинаре по ферроэластикам (2006, Воронеж), республиканских конференциях молодых ученых и специалистов (Худжанд, 2002, 2003, 2004, 2005) ежегодных научных семинарах и конференциях профессорско-преподавательского состава ХГУ им. академика Б. Гафурова. По теме диссертации опубликованы 13 работ, в том числе одна монография «Дефекты и рассеяние света в кристаллах» в соавторстве.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Работа изложена на 102 страницах, включает 26 рисунков, 4 таблицы, список литературы из 98 наименований.

Содержание работы

Во введении

кратко обсуждается актуальность темы, формулируется цель исследований, характеризуется научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе

рассматривается элементарное описание процессов неупругого рассеяния света в кристаллах. Рассмотрены методы теоретико-группового анализа спектров КРС в кристаллах, методы моделирования колебательных спектров многоатомных кристаллических решеток, в частности, модель жестких ионов. Обсуждаются механизмы влияния примесей на форму линий и соотношение интенсивностей полос колебательного спектра пьезоэлектрических кристаллов. Обоснована возможность контроля состава этих кристаллов на основании измерения параметров колебательного спектра.

Во второй главе

описывается методика экспериментальных исследований спектров рассеяния света в кристаллах. Экспериментальная установка для регистрации спектров КРС состоит из следующих основных элементов:

- 1) источник возбуждающего излучения;
- 2) исследуемый образец;
- 3) спектральный прибор и набор осветительных конденсоров, проектирующих изображение рассеивающего объема на щель спектрометра;
- 4) электрическую систему регистрации рассеянного излучения.

Источниками возбуждающего излучения служили аргоновые (ИЛА-120) и гелий-неоновые (ЛГН-38) лазеры. В качестве спектрального прибора для регистрации спектров КРС использовался двойной монохроматор спектрометра ДФС-24. Сканирование спектральных приборов осуществляется программно через модуль управления шаговым двигателем. Программа управления спектрометром предусматривает автоматическую установку начала диапазона сканирования, изменение шага сканирования, ус-

тановку любого числа отсчетов при накоплении информации в каждой точке спектра.

Для автоматизации и цифровой обработки результатов эксперимента была собрана схема выборки полезного сигнала состоящего из:

- 1) аналогового ключа (АК);
- 2) компаратора (СА);
- 3) аналого-цифрового преобразователя (АЦП);
- 4) цифро-аналогового преобразователя (ЦАП).

Уровень регистрируемого сигнала определяется сигналом на выходе ЦАП, задаваемого программно персональным компьютером (ПК) через выходной порт P2 модема. Когда уровень сигнала на выходе синхронного усилителя (СУ) превышает уровень задаваемого сигнала через компаратор СА, сигнал поступает на вход АЦП. Преобразованный сигнал в цифровом виде через входной порт P1 модема записывается в память ПК. Для регистрации результатов измерений была создана подпрограмма на языке Ассемблер. Обработка результатов измерений проводилось с помощью программы на языке Турбо-Паскаль.

Была собрана автоматизированная установка для определения интенсивности квазиупругого рассеяния света в пьезоэлектрических кристаллах при комнатной температуре. Эта установка содержит следующие элементы:

- 1) гелий-неоновый лазер ЛГ-38 ($\lambda = 6328 \text{ \AA}$);
- 2) фокусирующие линзы и поляризатор;
- 3) кювета с иммерсионной жидкостью ($n=1,50$);
- 4) фотоумножитель ФЭУ-79;
- 5) цифровой вольтметр;
- 6) микро ЭВМ.

Для получения полной картины по динамике фононных спектров были проведены также измерения скорости и поглощения звука в смешанных кристаллах. Затухание упругих волн измерялось методом брэгговской дифракции света на ультразвуковой волне при комнатной температуре в диапазоне частот 100–800 МГц. При этом упругие волны в образцах возбуждались с помощью пьезопреобразователей из ниобата лития толщиной 50–100 мкм. Пьезопластинка диаметром 2–3 мм приклеивалась к одному из торцов исследуемого образца с помощью эпоксидной смолы.

Третья глава

посвящена результатам исследования низкочастотной области спектров КРС кристаллов ниобата лития.

Получены низкочастотные спектры КРС пьезоэлектрического кристалла ниобата лития от образцов с различными акустическими добротностями Q при комнатной температуре (акустическая добротность образцов была предварительно измерена радиотехническим методом). Спектры приведены на рис. 1.

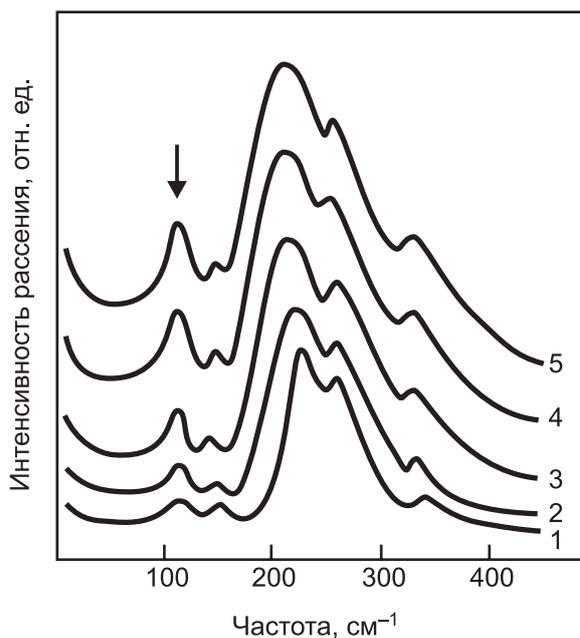


Рис. 1. Низкочастотные спектры КРС A_1 (ТО) фононов при $X(ZZ)Y$ геометрии рассеяния для различных кристаллов ниобата лития.

- 1 – $Q = 1.45 \times 10^4$,
- 2 – $Q = 1.17 \times 10^4$,
- 3 – $Q = 0.85 \times 10^4$,
- 4 – $Q = 0.52 \times 10^4$,
- 5 – $Q = 0.35 \times 10^4$

Как видно из рисунка, в спектрах КРС ниобата лития в $X(ZZ)Y$ геометрии рассеяния в низкочастотной области наблюдается малоинтенсивный максимум в области 120 см^{-1} (показан на рисунке стрелкой). Как видно из рисунка, его интенсивность весьма чувствительна к изменению добротности кристаллов ниобата лития: с ухудшением добротности кристаллов ниобата лития интенсивность этой линии возрастает.

Зависимость интенсивности максимума на $\Omega = 120 \text{ см}^{-1}$ от величины добротности Q показана на рис. 2. Как видно из этого рисунка, между величинами добротности и максимальной спектральной интенсивности существует простая, близкая к линейной зависимость.

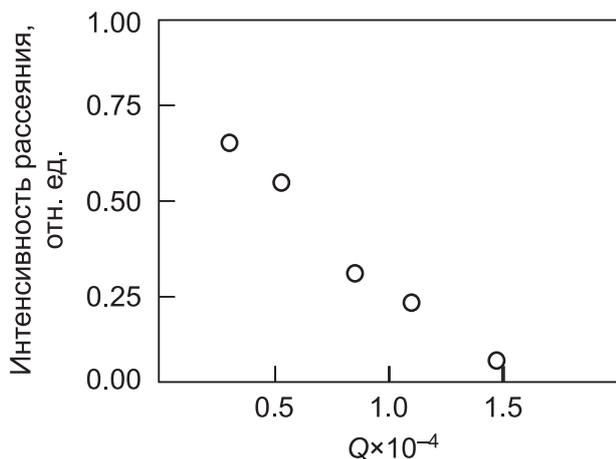


Рис. 2. Зависимость интенсивности полосы 120 см^{-1} в кристаллах ниобата лития от добротности Q .

Ранее Аникьевым А. А. и др. (Аникьев А. А., Горелик В. С., Умаров Б. С. Препринт физического ин-та АН СССР № 248, М., 1982) было показано, что появление этого максимума связано с нелинейным резонансом мягкой моды с континуумом двухфоновных состояний, что позже было подтверждено исследованиями температурной зависимости КР, рассеяния на поляритонах и неупругого рассеяния нейтронов (Сидоров Н. В., Волк Т. Р., Маврин Б. Н., Калинин В. Т. Ниобат лития: дефекты, фоторефракция, спектроскопия, поляритоны. М., Наука, 2003). В недавней работе Аникьева А. А. (ФТТ, 1999, **41** 130) теоретически было установлено, что плотность этих двухфоновных состояний должна сильно зависеть от дефектности структуры кристалла. Очевидно, что проявление этого мы и видим в эксперименте.

Таким образом, интенсивность максимума в области 120 см^{-1} в спектре КРС кристалла ниобата лития можно связать с его акустической добротностью.

Отметим, что, как легко заметить на рис. 1., интенсивность крыла квазиупругого рассеяния в этом кристалле также заметно зависит от добротности образца. Однако наши попытки установить здесь количественную корреляцию привели к слишком большому разбросу величин интенсивностей. Это связано с сильной модификацией формы крыла квазиупругого рассеяния при изменении добротности, что также, очевидно, связано с перераспределением плотности низкочастотных двухфоновных состояний.

В четвертой главе

изложены результаты исследований кристаллов кварца, танталата лития и недавно синтезированного пьезоэлектрика $\text{Pr}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$ методами колебательной спектроскопии.

Как было показано в предыдущей главе, интенсивность квазиупругого рассеяния света коррелирует со степенью дефектности, и, соответственно, с акустической добротностью пьезоэлектрических кристаллов. В связи с этим в этой главе были проведены исследования этой связи для классических пьезоэлектрических кристаллов кварца и танталата лития.

Поскольку прямые измерения интенсивности рассеяния достаточно трудоемки и характеризуются значительными погрешностями, была исследована зависимость поляризационных характеристик рассеянного света от качества этих кристаллов. В результате было установлено, что наибольшее влияние дефекты оказывают на интенсивность поперечно поляризованного излучения (по отношению к поляризации падающего на кристалл света). В связи с этим удобным измеряемым параметром является степень деполяризации рассеянного света:

$$\rho = \frac{I_{yx}^1 + I_{ZX}^1}{I_{ZZ}^1 + I_{YZ}^1}$$

Были проведены измерения этой величины для кристаллов естественного кварца из различных месторождений Таджикистана и искусственного кварца с различными заранее измеренными величинами добротности: $Q = 0,02; 0,06; 0,15; 0,80; 1,27; 2,00; 2,75; 3,50; 4,50; 5,60; 6,50 \times 10^6$, а также кристаллов танталата лития с добротностями: $Q = 0,25; 0,64; 1,13; 2,55; 4,50; 7,75 \times 10^3$.

В результате выполненных экспериментальных измерений было установлено, что зависимость степени деполяризации ρ от добротности Q для танталата лития и кварца в данном диапазоне добротностей близка к экспоненциальной (рис. 3).

Используя полученные зависимости, были оценены добротности других образцов этих кристаллов. Проведенные впоследствии прямые измерения добротностей показали, что погрешность оценки добротности по данным рассеяния света не превышает 6%.

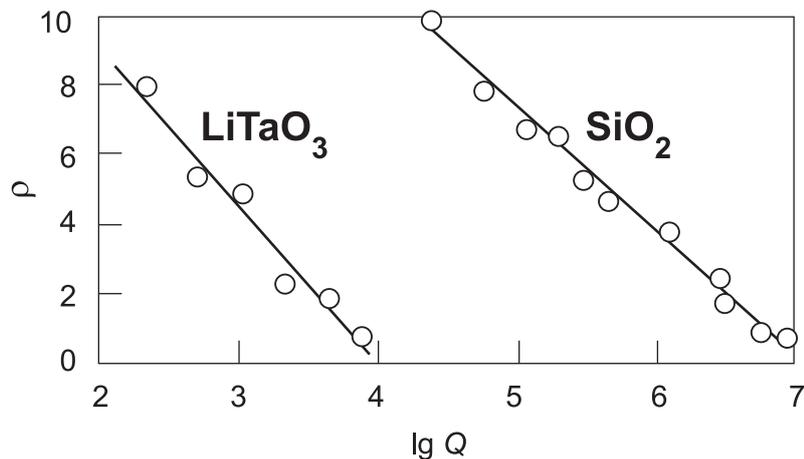


Рис. 3. Зависимость степени деполяризации квазиупругого рассеяния света от добротности образцов кристаллов кварца и танталата лития.

В этой же главе были приведены результаты исследований нового пьезоэлектрического кристалла $\text{Pr}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$, чистого и легированных лантаном с различной концентрацией (0,025; 0,038; 0,049; 0,072 и 0,112 моль.%).

Кристалл $\text{Pr}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$ имеет пространственную группу T_d^3 , $Z=4$, является кубическим кристаллом, оптически изотропен, обладает большими пьезоэлектрическими коэффициентами. Колебания кристаллической решетки празеодима сурьмы разделяется по типам симметрии следующим образом:

$$\Gamma = 6A_1 + 3A_2 + 9E + 13F_1 + 18F_2$$

Колебательные спектры этого кристалла были исследованы впервые. Были обнаружены большинство предсказанных теорией групп колебательных мод, активных в спектре КРС, наблюдалось значительное LO–TO расщепление полярных колебаний.

Было обнаружено, что малые легирующие примеси лантана незначительно изменяют колебательные спектры первого порядка, но значительно модифицируют распределение интенсивностей в высокочастотной области спектра, соответствующей обертонам. Установлена корреляция между интенсивностями этих мод и концентрацией лантана.

Пятая глава

посвящена изучению спектров КРС и поглощения звука на частотах 100–800 МГц $\text{TlBr}_x\text{I}_{1-x}$ во всем диапазоне концентраций

($0 \leq x \leq 1$) с целью выявления особенностей фоновой плотности состояний и вклада фонон-фононных взаимодействий в поглощение звука твердых растворов по отношению к чистым кристаллам галогенидов таллия.

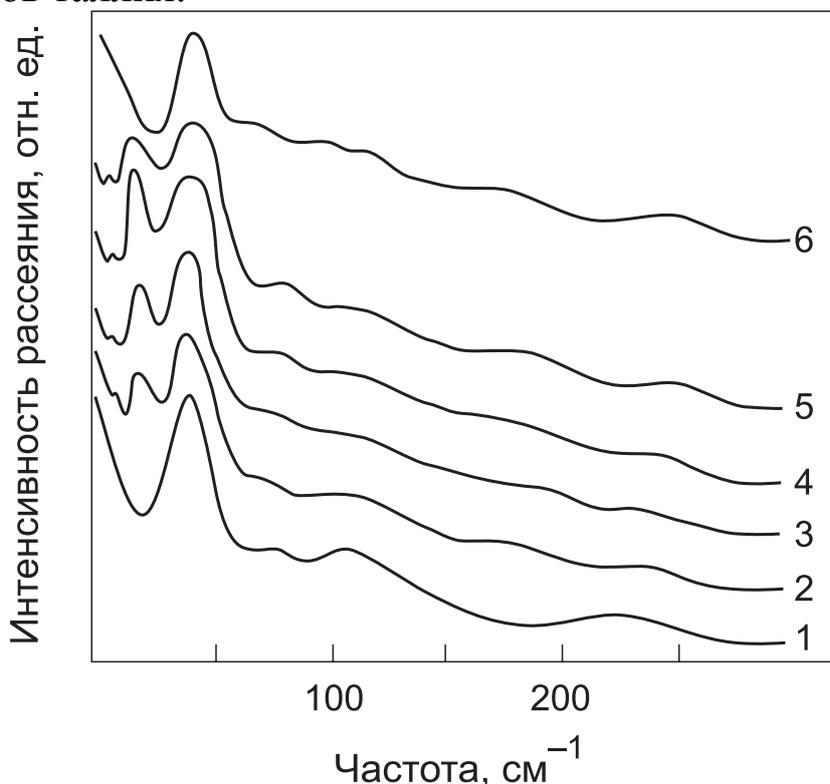


Рис. 4. Спектры КРС смешанных кристаллов $\text{TlBr}_x\text{I}_{1-x}$ при $T = 300$ К.

1 – $x = 1.00$, 2 – $x = 0.80$, 3 – $x = 0.42$,
4 – $x = 0.30$, 5 – $x = 0.20$, 6 – $x = 0.00$.

В спектрах КРС (см. рис. 4) с изменением концентрации галогенов обнаруживаются два дополнительных максимума с частотами $\nu_5 = 12,9 \text{ см}^{-1}$ и $\nu_6 = 19,8 \text{ см}^{-1}$, происхождение которых связано с перераспределением плотности фононных состояний (аналогично тому, как это наблюдалось в ниобате лития).

Зависимость интегральной интенсивности максимума на частоте $19,8 \text{ см}^{-1}$ от концентрации приведена на рис. 5. Как видно из рисунка, максимальное значение интегральной интенсивности достигается при значении концентрации $x = 0,30$.

Были проведены также измерения скорости и поглощения звука в этих кристаллах. Параметры упругих волн измерялись методом брэгговской дифракции света на ультразвуковой волне при комнатной температуре в диапазоне частот 100–800 МГц. На том же рис. 5. приведены полученные значения коэффициента за-

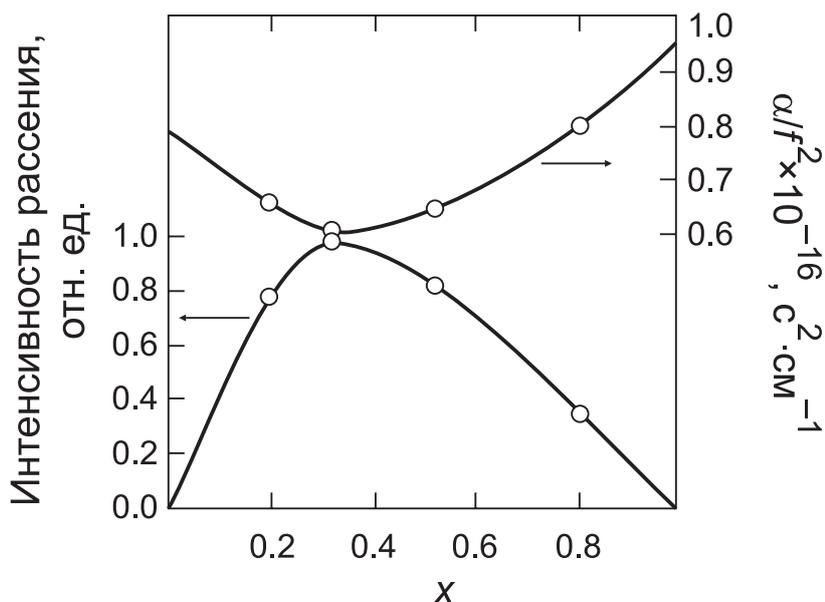


Рис. 5. Зависимость интенсивности I линии $19,8 \text{ см}^{-1}$ и коэффициента поглощения звука α/f^2 от концентрации x в смешанных кристаллах $\text{TlBr}_x\text{I}_{1-x}$.

тухания ультразвука для различных составов кристаллов. Как видно из рисунка, на обеих зависимостях при концентрации $x = 0.30$ наблюдается экстремум. Это дает основания предположить, что затухание акустических волн в этих кристаллах обусловлено взаимодействием с оптическими фононами и приводит к перераспределению плотности их состояний. На основе экспериментальных значений затухания и скорости УЗВ и литературных данных по теплопроводности рассчитана величина эффективной константы фонон-фононного взаимодействия, описывающей затухание упругих волн.

Предложен способ определения концентрации примесей в смешанных кристаллах, который позволяет на основе изменения величины интенсивности рассеянного света и поглощения звука определить с достаточной точностью концентрацию примесей в смешанных кристаллах.

Основные результаты и выводы

1. Показано, что низкочастотный максимум в спектре КР кристаллов ниобата лития, соответствующий связанному двухфононному состоянию, чувствителен к изменению качества кристаллов. Установлена прямая корреляция между интенсивностью этого максимума и акустической добротностью кристаллов.
2. Установлена корреляция интенсивности и степени деполяризации квазиупругого рассеяния света в пьезокристаллах ниобата лития, танталата лития и кварца с их акустической добротностью, что позволяет контролировать добротность пьезокристаллов оптическими методами
3. Впервые получены поляризованные спектры КР пьезокристалла $\text{Pr}_3\text{Sb}_5\text{O}_{12}$. Установлена связь интенсивности двухфононных линий колебательных спектров с концентрацией примеси лантана.
4. Впервые исследованы спектры рассеяния света в смешанных твердых кристаллах галогенидов таллия. В спектре КР обнаружены дополнительные линии, появление которых связано с локальным нарушением симметрии решетки. Установлена корреляция интенсивности дополнительных линий и коэффициента поглощения звука с концентрацией примеси.

Основные научные результаты диссертации изложены в следующих работах:

1. Умаров М., Раупов Н., Каримов С.Н. Акустооптические свойства твердых растворов. // Сборник материалов международной научной конференции по «Современным проблемам физико-механических свойств конденсированных сред», Худжанд, – 2002. – С. 78–82.
2. Раупов Н., Умаров М. Неупругие рассеяния света вблизи точки фазового перехода в кристаллах хлористого аммония. // Ученые записки ХГУ им.акад. Б.Гафурова, Худжанд, – 2002. – № 5. – С. 18–23.
3. Кадыров А.Л., Раупов Н.Н., Умаров М. Природа центрального пика в кварце вблизи температуры структурного фазового перехода. // Ученые записки ХГУ им.акад. Б.Гафурова, Худжанд, – 2003. – № 6. – С. 64–69.
4. Кадыров А.Л., Раупов Н.Н., Умаров М. Оптический метод контроля качества пьезоэлектрических кристаллов. // Ученые записки ХГУ им.акад. Б.Гафурова, Худжанд, – 2003. – № 6. – С. 58–63.
5. Kadirov A.L. Raupov N. Umarov M. An automated instrument for the control of crystal quality. // Композиционная энергетика. Тезисы докладов X международной конференции, США, 20–26 июля 2003 – С. 129–130.
6. Kadirov A.L. Raupov N. Umarov M. New an automated non-destructive express methods for testing of crystal quality. // Композиционная энергетика. Тезисы докладов X международной конференции, США, 20–26 июля 2003 – С. 130 – 131.
7. Umarov M., Karimov S.N., Raupov N.N., Vtyrin A.N. Biphonon Raman intensity and quality of LiNbO₃ crystals // Physica status solidi (RRL) – Rapid Research Letters. 2006. – DOI 10.1002/pssr.200600053. – P. 124–126.
8. Umarov M., Raupov N.N., Vtyrin A.N. Optical control of Q -factor for piezoelectric crystals // Physica status solidi (RRL) – Rapid Research Letters. 2006. – DOI 10.1002/pssr.200600048 – P. 103–105.
9. Раупов Н.Н. Электрофизические свойства нелинейных кристаллов. // Сборник тезисов научно практической конференции профессорско-преподавательского состава ХГУ им. акад. Б.Гафурова, Худжанд, – 2006. – С. 45–47.

10. Втюрин А.Н., Раупов Н., Умаров М. Сегнетоэлектрические свойства кристаллов ниобата лития. // Сборник материалов международной конференции молодых ученых Узбекистана, Самарканд, , – 2006. – С. 101–105.
11. Умаров М. Раупов Н., Поведение оптических колебаний в спектрах комбинационного рассеяния смешанных кристаллов $TlBr_xI_{1-x}$ // Материалы 9-го международного, симпозиума «Порядок, беспорядок и свойства оксидов» (ODPO-9), Ростов-на-Дону, – 2006. – С. 172–173.
12. Умаров М., Раупов Н. Исследование низкочастотных колебаний кристаллов ниобата лития методом комбинационного рассеяния света // Материалы 5-го Международного семинара по физике сегнетоэластиков, Воронеж, – 2006 – С. 165–166.
13. Умаров М., Козиев К.С., Раупов Н.Н. Дефекты и рассеяние света в кристаллах. – Худжанд, 2006. – 141 с.

РАУПОВ
Наимджон
Набиджонович

ИССЛЕДОВАНИЕ
ВЛИЯНИЯ
ДЕФЕКТОВ СТРУКТУРЫ
ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
КРИСТАЛЛОВ
НА СПЕКТРЫ
КОМБИНАЦИОННОГО
РАСSEЯНИЯ СВЕТА

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации
на соискание ученой степени
кандидата
физико-математических наук

Подписано в печать 03.11.06
Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100. Заказ № 36
Отпечатано в типографии Института физики СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, ИФ СО РАН
