

На правах рукописи
УДК 535.375:535.361

КОЗИЕВ КАМОЛУДИН САНГИНОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ФАЗОВЫХ
ПЕРЕХОДОВ ТВЕРДЫХ ТЕЛ С ДЕФЕКТАМИ

Специальность 01.04.05 – оптика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Красноярск – 2004

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

Научные руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Умаров М.
Научный консультант: Кандидат физико-математических наук,
доцент Кадыров А. Л.
Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Слабко В. В.,
кандидат физико-математических наук,
доцент Абдуллоев Н. С.
Ведущая организация: Красноярский государственный
университет

Автореферат разослан «___»_____ 2004 г.

Защита состоится «3» сентября 2004 г. на заседании
Специализированного совета Д 003.055.01 в Институте физики им.
Л. В. Киренского СО АН России 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.

Ученый секретарь
Специализированного совета,
доктор физико-математических наук: А. Н. Втюрин

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы

В течение последних лет общеизвестно широкое применение в различных областях науки и техники большого числа природных и искусственных кристаллов в качестве активных элементов различных устройств радио-, акусто- и оптоэлектроники. Это связано с тем, что, с одной стороны, кристаллы обладают многочисленными практически значимыми физическими характеристиками, а с другой, способны менять свои свойства и характеристики под влиянием различных внешних воздействий и факторов, таких, как электрические и магнитные поля, оптическое излучение, температура и т. п. В процессе выращивания кристаллов относительно больших размеров в них неизбежно возникают пространственные неоднородности, связанные с локальными отклонениями от стехиометрии состава, кластеризацией дефектов и т. д. Области пространственной неоднородности кристалла, испытывающего фазовый переход, могут становиться зародышами новой фазы и тем самым обуславливать изменения тепловых, механических, электрических и других его свойств. В связи с этим возникает необходимость изучения термического поведения структуры и физических свойств кристаллов, что влечет за собой поиск и разработку методов, позволяющих проводить такие исследования. Среди них весьма эффективным методом и широко применяемым является метод лазерной спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС).

В связи с тем, что во многих кристаллах реализуются структурные фазовые переходы, весьма важным для целей практического применения является изучение особенностей поведения структуры и физических свойств кристаллов вблизи точек фазовых переходов на основе анализа изменений, происходящих в колебательных спектрах. Связь колебательных спектров с физическими характеристиками кристаллов описывается в рамках определенных теоретических моделей

реальных кристаллических структур. Любая экспериментальная твердотельная система не лишена дефектов. Этим определяется необходимость развития общих представлений об особенностях структуры и физических свойств твердых кристаллов с дефектами при различных температурах, особенно вблизи точек структурных фазовых переходов. Только целенаправленные и систематические исследования в этом направлении позволяют научно-обосновано разрабатывать методы исследования физических свойств твердых кристаллов при различных температурах.

Целью работы

является исследование методом спектроскопии комбинационного рассеяния света структуры и физических свойств твердых кристаллов с дефектами, получение информации об особенностях динамики кристаллических решеток этих кристаллов при различных температурах, разработка методик и рекомендаций для экспериментального определения основных характеристик таких кристаллов методами колебательной спектроскопии.

Задачи, которые решались для достижения поставленных целей:

- Развитие методики изочастотной спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) для исследования динамики кристаллических решеток твердых тел с дефектами вблизи фазовых переходов в рамках релаксационной модели, получение сведений о динамике кристаллических решеток твердых тел с дефектами вблизи точек фазовых переходов.
- Исследование формирования пика квазиупругого рассеяния (критической опалесценции) и аномалий низкочастотного рассеяния в кристалле кварца методом изочастотной спектроскопии. Исследование влияния дефектов на процессы предпереходного рассеяния света в природных и искусственных кристаллах кварца, установление связи

параметров рассеяния и характеристик структурных дефектов.

- Исследование изочастотного предпереходного рассеяния света в нелинейных сегнетоэлектрических кристаллах ниобата лития и ниобата бария-стронция с дефектами.
- Исследование процессов ориентационного упорядочения в кристалле хлористого аммония методом изочастотного рассеяния. Установление связи процессов ориентационного упорядочения и низкочастотной динамики решетки кристалла.

Научная новизна

1. Автоматизирована установка для исследования термического поведения структуры и физических свойств нелинейных кристаллов в окрестности температуры фазовых переходов при фиксированных частотах спектрального прибора в зависимости от температуры (изочастотная спектроскопия КРС).
2. Проведены комплексные исследования квазиупругого рассеяния света в кристаллах кварца различного происхождения с различной степенью дефектности с целью выяснения природы центрального пика в окрестности температуры структурного фазового перехода. Установлено, что критическая опалесценция в кварце не связана с поведением мягкой моды, а обусловлена образованием статических неоднородностей, которые приводят к возрастанию интенсивности центрального несмещенного пика. Интенсивность этого пика существенно отличается у различных образцов кварца и сильно возрастает при наличии дефектов. Присутствие дефектов сказывается также на температуре структурного фазового перехода (α - β) в кварце, смещая его в сторону низких температур.
3. Изочастотным методом КРС определены параметры сильнозатухающих мягких мод в кристаллах ниобата бария-стронция (НБС) и установлена прямая корреляция между

температурой сегнетоэлектрического фазового перехода и концентрацией бария. В результате выполненных исследований вычислены температурный коэффициент мягкой моды, вириальные коэффициенты термодинамического потенциала и установлены их температурные зависимости; сделаны оценки константы Кюри–Вейсса, теплоемкости и других величин, характеризующих особенности кристалла НБС вблизи температуры фазового перехода, достигнуто удовлетворительное согласие с данными измерения этих величин другими методами. Обнаружен эффект возрастания интенсивности центральной компоненты и константы Кюри–Вейсса вблизи температуры фазового перехода при концентрации бария $X = 0,67$, который может быть обусловлен возрастанием флуктуаций энтропии, спонтанной деформации, диэлектрической проницаемости и т. д. при фазовом переходе в кристаллах НБС.

4. Экспериментально установлена количественная связь величины интенсивности рассеянного света в узкой температурной области вблизи точки фазового перехода в кристаллах ниобата лития с величиной дефектности. С ростом концентрации примеси железа в кристаллах ниобата лития происходит смещение точки сегнетоэлектрического фазового перехода в сторону низких температур. Получена количественная информация о фундаментальных колебаниях вблизи температуры фазового перехода в кристаллах хлористого аммония. Установлено соответствие формы полученной изочастотной зависимости с теоретическими расчетами вблизи температуры фазового перехода.

Научно-практическая значимость работы

Разработан и создан автоматизированный прибор для регистрации изочастотных спектров КРС в кристаллах при различных температурах, позволяющий получить количественную информацию о поведении низкочастотных колебаний вблизи температуры структурного фазового

перехода. Разработана оптическая градиентная кювета для исследования спектров КРС в ближайшей окрестности точки фазового перехода с высокой точностью. Обнаруженные резкие изменения интенсивности в спектре КРС вблизи температуры фазового перехода дают возможность индикации структурных фазовых переходов и исследования зависимостей температур структурных переходов от концентрации примесей, условий выращивания, стехиометрии и других факторов.

Полученные в работе зависимости позволяют производить количественные оценки величин пьезоэффекта в пьезоэлектрических кристаллах, проводить их отбраковку. Возможными областями практического применения являются:

- теория и практика синтеза монокристаллов;
- технологическая разработка материалов с заданными физическими свойствами при производстве элементной базы микроэлектроники, радиотехнических приборов, вычислительной техники и устройств связи;
- оценка качества оптического сырья нелинейной оптики и квантовой электроники.

Защищаемые положения

диссертации частично включены разделы о научной новизне и практической значимости работы. Они включают:

1. Расширение возможностей лазерной спектроскопии комбинационного рассеяния света, как эффективного, информативного и надежного метода исследования физических свойств кристаллов и их температурных зависимостей.
2. Выяснение природы центрального пика и аномалий низкочастотного рассеяния в исследованных кристаллах и зависимости его физических параметров от степени дефектности кристаллических решеток.

Надежность и достоверность

Надежность полученных результатов обеспечивалась применением современных и надежных оборудований для

исследования структуры и физических свойств твердых кристаллов спектроскопическим методом КРС. Их достоверность обеспечивается надежной статистикой проведенных экспериментов, применением современных и независимых методов физического исследования, согласованностью с имеющимися теоретическими моделями.

Личный вклад автора

заключается в участии в постановке задач исследований, в проведении экспериментов, в обсуждении и анализе 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 и естественных кристаллов и горных минералов спектроскопическими методами».

Апробация

Результаты работы докладывались на Международном семинаре по химической инженерии и физической химии (Германия, 1999), III Международной конференции «Проблемы и прикладные вопросы физики» (Саранск, 1999), Международной конференции «Проблемы современной физико-механических свойств конденсированных сред» (Худжанд, 2002), республиканских конференциях молодых ученых и специалистов (Худжанд, 2001, 2002, 2003), ежегодных научных семинарах и конференциях профессорско-преподавательского состава ХГУ им. академика Б. Гафурова. По теме диссертации опубликованы 7 работ и выпущена одна монография «Комбинационное рассеяние света в сегнето- и пьезоэлектриках» в соавторстве.

Содержание работы

Во введении

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

В первой главе

рассмотрены литературные данные о структурных фазовых переходах в твердых телах и спектроскопии комбинационного рассеяния света в кристаллах. Кратко освещены теоретические основы используемого изочастотного метода КРС.

Анализ изочастотных зависимостей выполнен на основе феноменологического описания рассеяния света вблизи точки фазового перехода второго рода, развитого В. Л. Гинзбургом и А. П. Леванюком.

Спектральная интенсивность рассеянного света для однокомпонентного параметра порядка $\eta(t)$ имеет вид:

$$J(0, \Omega) = J(\Omega) = VQ_{so} \langle |\Delta\epsilon(0, \Omega)|^2 \rangle = VQ_{so} \left(\frac{d\epsilon}{d\eta} \right)_{\eta=\eta_0} \langle |\eta(0, \Omega)|^2 \rangle, (1)$$

Простейший вариант уравнения движения для параметра порядка:

$$\mu\ddot{\eta} + \gamma\dot{\eta} + a\eta = h(t), (2)$$

где здесь μ – эффективная масса, γ – затухание, $h(t)$ – поле, сопряженное параметру порядка, и на основе теории Ландау для коэффициента a можно записать:

$$a = \begin{cases} 2a_0(T_c - T) = 2a_0 |\Delta T|, & T < T_c \\ a_0(T - T_c) = a_0 |\Delta T|, & T > T_c \end{cases} (3)$$

Из (2) для обобщенной восприимчивости следует:

$$\chi(\Omega) = a + i\gamma a - \mu a^2. (4)$$

В соответствии с флуктуационно-диссипационной теоремой спектральная интенсивность КРС ниже точки фазового перехода может быть представлена как:

$$J(\Omega, T) \approx \eta_0^2(T)[n(\Omega, T) + 1]\text{Im}(\chi(\Omega, T)), \quad (5)$$

где функция $\chi(\Omega, T)$ находится из (4), $n(\Omega, T)$ – фактор Бозе, η_0 – равновесное значение параметра порядка.

Используя известную из теории фазовых переходов второго рода температурную зависимость η_0 , для приведенной спектральной интенсивности $i \approx J(\Omega, T)/T$ из (5) и (3) находим:

$$i(\Omega, X) = \frac{2A_0\Gamma\Delta T}{(2A_0\Delta T - \Omega^2)^2 + \Gamma^2\Delta T^2}, \quad (6)$$

где $\Delta T = T_c - T$, $\Gamma = \gamma/\mu$, и $A_0 = a_0/\mu$. Достаточно близко к точке фазового перехода с учетом малости Ω ($\Omega \ll \Gamma$) распределение спектральной интенсивности рассеяния света соответствует релаксационной модели:

$$i(\Omega, \Delta T) = \frac{\Omega_R}{\Omega_R^2 + \Omega^2} = \frac{b\Delta T}{b^2\Delta T^2 + \Omega^2}, \quad (7)$$

где частота релаксации $\Omega_R = b\Delta T$, $b = 2A_0/\Gamma = 2a_0/\gamma$. При фиксированной частоте Ω соотношения (6–7) определяют распределение приведенной спектральной интенсивности рассеяния света для релаксационной модели – изочастотные зависимости рассеяния света. Отметим, что функция (7) имеет максимум с координатами:

$$i_0 = 1/2\Omega, \quad \Delta T_0 = \Omega/b, \quad (8)$$

и шириной:

$$\xi = \Omega\sqrt{3}/b. \quad (9)$$

Экспериментальное определение величин (8–9) позволяет найти феноменологические параметры уравнения движения (2) и тем самым получить количественное описание поведения параметра

порядка и связанных с ним характеристик кристалла вблизи точки фазового перехода.

Во второй главе

описывается методика экспериментальных исследований изочастотного рассеяния света в кристаллах вблизи точек фазовых переходов. Методика заключается в регистрации интенсивности рассеянного света на заданной частоте Ω спектрального прибора при непрерывном изменении температуры образца. По завершении цикла сканирования температуры фиксируется другая частота и проводится следующий цикл нагревания или охлаждения в специальных устройствах в окрестности температуры фазового перехода. Серия температурных зависимостей интенсивности рассеяния на различных фиксированных частотах вблизи возбуждающей линии (изочастотные зависимости) дает возможность получить достаточную информацию о поведении низкочастотных колебаний кристаллической решетки в зависимости от степени дефектности структуры кристалла вблизи температуры фазового перехода.

Источниками возбуждающего излучения служили аргоновые (ИЛА-120) и гелий-неоновые (ЛГН-38) лазеры. В качестве спектрального прибора использовался двойной монохроматор спектрометра ДФС-24. Сканирование спектрографа осуществляется программно через модули управления шаговыми двигателями. Программа управления спектрометром предусматривает автоматическую установку начала диапазона сканирования, изменение шага сканирования, установку любого числа отсчетов при накоплении сигнала в каждой точке спектра, либо накопление сигнала до достижения заданного отношения сигнал/шум.

Комплекс можно разбить на три функционально выделенные подсистемы:

- подсистема управления внешними воздействиями: включает термостатируемую оптическую кювету с

- образцами, устройство регулирования температуры, источник лазерного излучения с устройством питания;
- подсистема измерений: состоит из дифракционного спектрометра с механизмом управления углом поворота дифракционных решеток, фотоприёмника с источником питания, регистрирующей аппаратуры с цифровым выходом;
 - подсистема управления ходом эксперимента и обработки результатов: включает пульт оператора, персональный компьютер, дисплей, устройства сопряжения, графопостроитель.

Для исследования спектров КРС кристаллов при высоких температурах использовался высокотемпературный термостат, который позволяет нагревать образец до температур порядка 1500 К. При исследовании спектров КРС кристаллов ниже комнатной температуры использовался азотный криостат, позволяющий проводить исследования до 77 К. При исследовании спектров КРС в ближайшей окрестности точки фазового перехода и определении температурной зависимости интенсивности рассеянного света для фиксированной точки кристалла использовалось специально сконструированная градиентная кювета.

Третья глава

посвящена результатам исследования рассеяния света вблизи температуры структурного фазового перехода в кристаллах кварца.

В кристаллическом кварце в точке α - β перехода наблюдается интенсивное рассеяние света (критическая опалесценция) причиной которого могут быть как статические дефекты (дислокации и т. д.) так и а также оптические неоднородности, возникающие в результате тепловых флуктуаций различной природы.

В настоящей работе проведено исследование квазиупругого рассеяния света в кристаллах кварца с дефектами для изучения природы центрального пика и установления влияния дефектов

структуры на акустическую добротность кристаллов кварца и температуру структурного фазового перехода.

Для изучения природы центрального пика в кристаллах кварца в окрестности температуры фазового перехода была использована градиентная кювета, которая позволяла исследовать рассеяние света в ближайшей окрестности структурного фазового перехода.

В результате проведенных измерений установлено, что критическая опалесценция в кварце не связана непосредственно с конденсацией мягкой моды, а вызвана образованием статических неоднородностей, которые обуславливают возрастание интенсивности несмещенного центрального пика. Интенсивность данного пика существенно отличается у различных образцов кварца и сильно возрастает при наличии дефектов.

На образцах кристаллов кварца с дефектами различной природы и концентрации получены зависимости интенсивности квазиупругого рассеяния света от длины волны, угла рассеяния, степени деполяризации и температуры. Установлено, что во всех образцах синтетического кварца закон Рэлея $i \sim \lambda^{-4}$ выполняется во всей области температур, что соответствует рассеянию малыми по сравнению длиной волны сферами; в то же время для образцов природного кварца интенсивность рассеяния света с высокой точностью следует зависимости $i \sim \lambda^{-2}$, что объясняется протяженной формой возникающих неоднородностей. В рамках теории Ми были рассчитаны характерные размеры неоднородностей, которые составили для синтетического кварца $60 \div 65$ нм, и для природного – $6200 \div 7000$ нм. Удалось определить тип, форму и размеры дефектов в различных образцах кварца с различной концентрацией дефектов.

В четвертой главе

изложены результаты исследований рассеяния света в кристаллах ниобата бария-стронция (НБС) и ниобата лития (НЛ) вблизи температуры сегнетоэлектрических фазовых переходов. Следует отметить, что несмотря на большое число работ,

посвященных исследованию спектров этих кристаллов, с помощью обычной методики КРС или инфракрасного поглощения не удастся выполнить количественных измерений поведения мягкой фононной моды вблизи точки фазового перехода. В связи с этим были проведены исследования изочастотных спектров рассеяния и термического поведения физических параметров (8–9) эффективных мягких мод кристаллов $Ba_xSr_{1-x}Nb_2O_6$ при различных концентрациях бария ($x = 0,25$; $x = 0,39$; $x = 0,50$; $x = 0,67$ и $x = 0,75$) и $LiNbO_3$ легированных железом различной концентрации (0,004; 0,009; 0,015; 0,018; 0,023 и 0,030%) вблизи точек фазовых переходов.

В результате выполненных исследований был вычислен температурный коэффициент мягкой моды, с использованием полученных температурных зависимостей коэффициентов уравнения движения параметра порядка сделаны оценки константы Кюри–Вейсса, теплоемкости и ряда других физических параметров кристалла НБС вблизи температуры фазового перехода; достигнуто хорошее согласие с имеющимися литературными данными прямых измерений этих параметров.

Наблюдаемые отклонения построенных температурных зависимостей параметров изочастотного рассеяния от теоретических в области высоких (более 40 см^{-1}) частот обусловлены взаимодействием мягкой моды в рассматриваемом кристалле с дополнительными колебательными состояниями, наблюдаемыми экспериментально.

Обнаружено возрастание интенсивности центральной компоненты и константы Кюри–Вейсса вблизи температуры фазового перехода при концентрации бария $x = 0,67$. На основе экспериментальных данных установлена корреляция между температурой сегнетоэлектрического фазового перехода и концентрацией бария в кристаллах НБС.

Экспериментально показано, что величина интенсивности рассеянного света в узкой температурной области вблизи точки фазового перехода в кристаллах ниобата лития существенно отличается у различных образцов и сильно возрастает при

наличии в кристалле дефектов. При изменении концентрации примеси железа от 0% до 0,03% в кристаллах НЛ происходит смещение точки фазового перехода на 23 К в сторону низких температур. Высказано предположение, что примесь железа понижает локальную симметрию кристалла НЛ, создавая отвечающие ненулевому локальному параметру порядка искажения.

В пятой главе

рассматриваются особенности неупругого рассеяния света вблизи точки фазового перехода в кристаллах хлористого аммония. Согласно существующей теории рассеяния света в этих кристаллах^{*1} интенсивность линии 93 см^{-1} изменяется с температурой по закону $1 - \eta^2(T)$ (за исключением непосредственной близости к T_c), где $\eta(T)$ – параметр дальнего порядка, достигающий единицы в полностью упорядоченном кристалле. В результате выполненных экспериментальных измерений установлено, что температурная зависимость интенсивности моды 144 см^{-1} также описывается этой зависимостью, и, следовательно, описывается тем же физическим механизмом. Отмечается, однако, что симметрия кристалла разрешает рассеяние на моде 144 см^{-1} только в геометрии $X(ZX)Y$, в отличие от моды 93 см^{-1} , которая разрешена в геометрии рассеяния $X(ZZ)Y$. Экспериментально показано хорошее согласие результатов измерений, полученных по традиционной методике КРС и с использованием изочастотного метода.

В то же время следует отметить, что на изочастотных зависимостях, соответствующих этим частотам, наблюдаются резкие изменения интенсивности рассеяния света. Этот факт может быть использован для точной индикации температуры фазового перехода в реальных кристаллах и исследования влияния примесей, стехиометрии, условий выращивания и т. д. на температуру данного фазового перехода.

^{*1} Wang C.H. and Wright R.B. Raman scattering study of the Disorder – Order phase transition in NH_4Cl // J.Chem. Phys. –1972. –V.56. -№5. –P.2124-2129.

Основные результаты и выводы

1. Автоматизирована установка получения изочастотных температурных зависимостей интенсивности КРС в твердых телах. Разработана оптическая градиентная кювета для исследования спектров КРС ближайшей окрестности точки фазового перехода кристаллов.
2. На основе проведенных комплексных исследований квазиупругого рассеяния света в кристаллах кварца различного происхождения с различной степенью дефектности установлено, что критическая опалесценция связана не с поведением мягкой моды, а с образованием статических неоднородностей. Интенсивность пика критической опалесценции существенно отличается у различных образцов кварца и сильно возрастает при наличии дефектов. Присутствие дефектов сказывается также на положении центрального пика, смещая его в сторону низких температур.
3. Изочастотным методом КРС определены параметры сильнозатухающих мягких мод в кристаллах ниобата бария-стронция, установлена прямая корреляция между температурой сегнетоэлектрического фазового перехода и концентрацией бария. В результате выполненных исследований были вычислены температурный коэффициент мягкой моды, вириальные коэффициенты термодинамического потенциала и установлены их температурные зависимости; сделаны оценки константы Кюри–Вейсса, теплоемкости и других величин, характеризующих особенности кристалла НБС вблизи температуры фазового перехода, достигнуто удовлетворительное согласие с литературными данными.
4. Установлена количественная связь величины интенсивности рассеянного света в узкой температурной окрестности точки фазового перехода в кристаллах ниобата лития с величиной дефектности. С ростом концентрации примеси железа в кристаллах ниобата лития

- происходит смещение точки сегнетоэлектрического фазового перехода в сторону низких температур.
5. Получена количественная информация о фундаментальных колебаниях вблизи температуры фазового перехода в кристаллах хлористого аммония. Установлено соответствие формы полученной изочастотной зависимости с теоретической вблизи температуры фазового перехода.
 6. Разработаны методы определения параметров качества, концентрации примесей, ряда основных физических характеристик исследованных кристаллов по данным измерения характеристик рассеяния света.

**Основные научные результаты диссертации
изложены в следующих работах:**

1. Умаров М., Козиев К. С. Комплексные исследования в кристаллах кварца с различными дефектами // Проблемы и прикладные вопросы физики: Тезисы докладов III Международной конференции, г. Саранск, 16–19 июня 1999 г. –2 с.
2. Аникъев А. А., Козиев К. С., Умаров М., Усмонов Г. Солитонная динамика сегнетоэлектриков // Проблемы современной физико-механических свойств конденсированных сред: Материалы международной конференции. г. Худжанд. 2–4 мая 2002 г. –3 с.
3. Kadyrov A. L., Koziev K. S., Umarov M. Influence of Impurity on Temperature Phase transition in Lithium Niobate Crystals // Композиционная энергетика: Тезисы докладов 10-й международной конференции, США, 20–26 июля 2003 г. –2 с.
4. Умаров М., Кадыров А. Л., Козиев К. С. Комбинационное рассеяние света в сегнето- и пьезоэлектриках. Худжанд. Хуросон, 2003 г. –166 с.
5. Кадыров А. Л., Козиев К. С., Умаров М. Особенности неупругого рассеяния света в кристаллах $Ba_xSr_{1-x}Nb_2O_6$ вблизи сегнетоэлектрического фазового перехода // Депонирован в НПИЦентре РФ № 54 (1599) 02 июля 2003 г. – 18 с.

6. Кадыров А. Л., Козиев К. С., Умаров М. Природа центрального пика в кварце вблизи температуры структурного фазового перехода // Ученые записки ХГУ им. акад. Б. Гафурова. –2003 г. –№6. –С. 58–63.
7. Кадыров А. Л., Козиев К. С., Умаров М. Оптический метод контроля качества пьезоэлектрических кристаллов // Ученые записки ХГУ им. акад. Б. Гафурова. –2003 г. – №6. –С. 64–69.
8. Kadyrov A. L., Koziev K. S., Umarov M. Isofrequency Raman scattering and phase transition in strontium-barium niobate crystal // Physics status solidi (b) – 2004 – V. 241, no 12. – PP. 52–54.

КОЗИЕВ
Камолудин
Сангинович

ИССЛЕДОВАНИЕ
СТРУКТУРНЫХ
ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ
ТВЕРДЫХ ТЕЛ
С ДЕФЕКТАМИ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации
на соискание ученой степени
кандидата
физико-математических наук

Подписано в печать 30.06.04.
Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100. Заказ №
Отпечатано в типографии Института физики СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, ИФ СО РАН

