

На правах рукописи

Борисов Сергей Аркадьевич

**СТРУКТУРНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
РАЗУПОРЯДОЧЕННЫХ И СИЛЬНО ДЕФЕКТНЫХ КРИСТАЛЛОВ.**

Специальность – «01.04.04 – Физическая электроника»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург - 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Научный руководитель:

Вахрушев Сергей Борисович, доктор физ.-мат. наук, профессор, старший научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Афанасьев Валентин Петрович, доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», зав. кафедрой квантовой электроники и оптико-электронных приборов.

Клементьев Евгений Станиславович, канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник Национального исследовательского центра "Курчатовский институт".

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет».

Защита состоится «19» декабря 2013 года в 16.00 на заседании диссертационного совета Д 212.229.01 ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, к. 4 ауд. 305.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Автореферат разослан « ____ » «_ноября_» 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д. т. н., профессор

Коротков Александр Станиславович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В последнее время все большее внимание привлекает к себе проблема исследования и создания новых высокоэффективных сегнетоэлектрических и пьезоэлектрических функциональных материалов. К числу перспективных относятся смешанные, композиционно разупорядоченные диэлектрики и сегнетоэлектрики, допированные полупроводники и другие подобные соединения. Важным дополнением к современным условиям создания этих материалов стало непрерывно растущее требование экологически чистого производства.

Общая черта, объединяющая эти функциональные материалы, состоит в том, что они имеют регулярную решетку, часть элементов в которой замещается на атомы примеси, чьи равновесные положения смещены из узлов решетки. Это приводит к огромному разнообразию фазовых переходов: сегнетоэлектрические или сегнетоэластические фазы, состояния дипольного или квадрупольного стекла, промежуточные фазы и появлению уникальных физических свойств. Примерами такого рода объектов являются ставшие уже классическими пьезоэлектрики на основе цирконата - титаната свинца и сегнетоэлектрики-релаксоры.

Макроскопические свойства такого рода объектов изучены достаточно хорошо [1, 2]. В то же время микроскопический механизм явлений, происходящих в указанных выше системах, изучен далеко не полностью. Такого рода исследования требуют развития подхода, базирующего на совместном использовании различных методик проведения исследований.

Целью диссертационной работы является выявление закономерностей микроскопических процессов перестройки структуры и критического поведения при фазовых переходах в системах с частично разупорядоченной структурой, полученных с помощью современных комплексных методов исследований, установление связи этих процессов с деформациями структуры и динамикой решетки.

Основные задачи работы:

- Определить микроскопические механизмы, ответственные за появление аномалий физических свойств в сильно допированном пьезоэлектрике арсениде галлия (GaAs:Te).
- Выявить основные закономерности процессов микроскопической перестройки структуры, приводящие к возникновению при низких температурах аномалий диэлектрического отклика в соединениях на основе титаната калия, допированного литием и ниобием (KLTN).
- Получить данные о деталях структуры низкотемпературной фазы и характере возникающего при низких температурах состояния в кристаллах KLTN с разным допированием.

- Используя метод квазиупругого рассеяния нейтронов определить микроскопический механизм формирования пространственно - неоднородных полярных нанобластей вблизи фазового перехода в одноосном сегнетоэлектрике - релаксоре ниобате бария стронция ($\text{Sr}_{0.6}\text{Ba}_{0.4}\text{Nb}_2\text{O}_6$).

- Разработать и испытать фокусирующий нейтронный монохроматор, значительно повышающий светосилу экспериментальных установок.

Научная новизна работы. В диссертации впервые получены следующие результаты:

- В сильно допированном соединении GaAs:Te существует дополнительное локализованное возбуждение, сильно взаимодействующее с поперечной акустической модой.

- Монокристаллы $\text{K}_{0.999}\text{Li}_{0.001}\text{Ta}_{0.974}\text{Nb}_{0.026}\text{O}_3(\text{:Cu})$ (далее KLTN277) и $\text{K}_{0.9986}\text{Li}_{0.0014}\text{Ta}_{0.976}\text{Nb}_{0.024}\text{O}_3$ (далее KLTN123) при охлаждении вплоть до самых низких температур остаются кубическими.

- в KLTN277 ниже $T \sim 60$ К происходят существенные неоднородные сдвиговые деформации.

- в KLTN123 ниже $T \sim 65$ К вблизи пиков семейства (hhh) наблюдается появление сателлитов, которые могут быть связаны с нуклеацией ромбоэдрической фазы.

- Для SBN60 определены значения критических индексов ($\nu = 0.67(2)$, $\gamma = 1.33(17)$).

- Ниже T_C происходит "замерзание" радиуса корреляции, величина которого составляет около 27 nm, кристалл "разбивается" на нанодомены. В пространственно-однородное полярное состояние SBN60 не переходит.

- Приложение электрического поля $\sim 2.8 \cdot 10^5$ V/m приводит к подавлению процесса формирования нанодоменов и возникновению пространственно-однородного полярного состояния.

- Создан действующий образец фокусирующего нейтронного монохроматора. Получено увеличение плотности нейтронного потока в 1.8 раза.

Научная и практическая значимость работы. В настоящее время все пьезо - и сегнетокерамики изготавливаются из смешанных перовскитоподобных материалов. Легированный GaAs используется, например, при создании полупроводниковых переключателей и высокочувствительных датчиков широкого спектрального диапазона. Соединения на основе KLTN представляются весьма перспективными для создания различных устройств на основе бессвинцовой керамики, например

для фоторефрактивных устройств. Интерес к кристаллам SBN возник в связи с уникальными значениями практически важных параметров, в частности, колоссальным значением пьезоэлектрического коэффициента, большой нелинейностью спонтанной поляризации в определенном интервале температур, сравнительно низкими коэрцитивными полями.

Экспериментальные результаты, полученные в данной диссертационной работе, позволяют значительно расширить физические представления о микроскопических механизмах возникновения дефектно индуцированной моды в сильно допированном кристалле GaAs, упорядочения дипольных моментов в KLTN и механизма возникновения полярных нанобластей в SBN. Полученные данные могут быть полезны при определении технологических направлений для создания новых композиционно разупорядоченных материалов, а также для разработки новых теоретических представлений об особенностях процессов в области фазовых переходов в подобного рода дефектных разупорядоченных структурах.

Для оснащения нейтронных дифрактометров и спектрометров устройствами, повышающими светосилу экспериментальных установок, разработан и испытан фокусирующий нейтронный монохроматор с переменным фокусным расстоянием.

Объекты и методы исследования. В представляемой диссертационной работе рассматриваются три группы объектов.

Пьезоэлектрик арсенид галлия (*GaAs*), допированный атомами теллура (*Te*), создающего в кристалле систему дипольных примесных центров, которые оказывают существенное влияние на его электрофизические свойства.

Квантовый параэлектрик танталат калия, допированный литием и ниобием ($K_{1-x}Li_xTa_{1-y}Nb_yO_3$), представлен двумя образцами с разным стехиометрическим составом: $K_{0.999}Li_{0.001}Ta_{0.974}Nb_{0.026}O_3$ (:Cu) (KLTN277) и $K_{0.9986}Li_{0.0014}Ta_{0.988}Nb_{0.012}O_3$ (KLTN123).

Ниобат бария стронция ($Sr_{0.6}Ba_{0.4}Nb_2O_6$). Одноосный сегнетоэлектрик с сильным структурным разупорядочением катионов стронция и бария.

Для исследования динамических и структурных свойств вышеперечисленных систем применялись следующие методики:

1. Неупругое рассеяние нейтронов.
2. Дифракция нейтронов и синхротронного (рентгеновского) излучения.
3. Диэлектрическая спектроскопия.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1 – Существование в сильно легированном GaAs локализованной моды, взаимодействующей с поперечными акустическими фононами.

2 – Появление при низких температурах в кристалле KLTN277 существенных сдвиговых деформаций, приводящих к возникновению состояния типа «сегнетоэластического стекла».

3 - Гетерофазность кристаллической структуры KLTN123, состоящей из основной кубической матрицы и зародышей ромбоэдрической фазы.

4 - Наличие двух компонент в диффузном рассеянии, наблюдаемом в одноосном сегнетоэлектрике $\text{Sr}_{0.6}\text{Ba}_{0.4}\text{Nb}_2\text{O}_6$ в окрестности фазового перехода, связанных с термодинамическими и конфигурационными флуктуациями, и значения критических индексов, описывающих диффузное рассеяние в $\text{Sr}_{0.6}\text{Ba}_{0.4}\text{Nb}_2\text{O}_6$.

5 - Подавление конфигурационных флуктуаций в $\text{Sr}_{0.6}\text{Ba}_{0.4}\text{Nb}_2\text{O}_6$ при приложении электрического поля.

6 – Повышение эффективности трехосного нейтронного спектрометра за счет разработки и применения фокусирующего монохроматора.

Достоверность результатов, приведенных в работе, обеспечивается использованием комплекса современных экспериментальных методик, включая неупругое и квазиупругое рассеяние нейтронов, дифракцию нейтронов и синхротронного излучения и диэлектрическую спектроскопию. Измерения проводились на современных установках в российских и международных центрах коллективного пользования, а анализ данных проводился с использованием современного программного обеспечения. Представленные в диссертации выводы соответствуют существующим теоретическим представлениям об особенностях структуры и динамики решетки подобных соединений и подтверждаются исследованиями аналогичных соединений, сделанными другими авторами.

Апробация работы.

Основные результаты диссертации докладывались на всероссийских и международных конференциях, в частности: на International Workshop on Relaxor Ferroelectrics (IWRP-2013), St.-Petersburg, July 1-6 2013; на Объединенном международном симпозиуме 11nd International Seminar on Relaxor Ferroelectrics - Russia/CIS/Baltic/Japan Symposium on Ferroelectricity (ISFD-11th-RCBJSF), Екатеринбург, 20 – 24 августа 2012 г.; на Всероссийских конференциях по физике сегнетоэлектриков "ВКС – XIX" (Москва 2011 г.), "ВКС–XVIII" (Санкт-Петербург 2008 г.) и "ВКС – XVI" (Тверь 2002 г.); на XX, XVIII и XVII Совещаниях по использованию рассеяния нейтронов при исследованиях конденсированного состояния ("РНИКС-2008", Гатчина 2008 г., "РНИКС-2004", Заречный 2004 г. и "РНИКС-2002", Гатчина 2002 г.); на объединенном XIX Совещании по использованию рассеяния нейтронов при исследованиях конденсированного состояния (РНИКС-2006) /19th Workshop on Applications of Neutron Scattering in Study of Condensed Matter, Обнинск 12-15 сентября 2006 г.; на 4-й Национальной конференции по применению Рентгеновского, синхротронного излучений, нейтронов и электронов для

исследования материалов, Москва 17 – 22 ноября 2003 г.; на 3rd European Conference on Neutron Scattering, Montpellier France September 3 - 6 2003; на 7th Russia/CIS/Baltic/Japan Symposium on Ferroelectricity (RCBJSF-7), St.-Petersburg, June 24-28 2002; на 2nd International Seminar on Relaxor Ferroelectrics (ISRF-2th), Dubna June 23 - 26 1998; на International Conference on Neutron Scattering, Toronto Canada, August 17 - 21, 1997.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 18 печатных работах, из них 4 статьи в рецензируемых журналах (1 - 4) и 14 тезисов докладов (5 - 18).

Личный вклад автора. Результаты, изложенные в диссертации, и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Вклад автора в методическую часть диссертации, посвященную тестированию фокусирующего монохроматора, был определяющим. Экспериментальные исследования проводились совместно с соавторами, обработка экспериментальных данных проведена автором лично. Автор внес значительный вклад в интерпретацию полученных результатов и в написание статей, раскрывающих содержание работы.

Структура диссертации. Диссертация изложена на 110 страницах и состоит из введения, пяти глав, и заключения. Работа содержит 42 рисунка, 1 таблицу и список литературы из 98 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертации, определена цель работы, обоснованы научные новизна и значимость, а также практическая ценность работы, достоверность результатов и сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Содержатся сведения об апробации работы.

Первая глава посвящена обзору литературы по данному вопросу. Рассмотрен ряд работ, посвященных частично упорядоченным системам со случайными взаимодействиями. Подробно рассматриваются различные аномалии, ранее обнаруженные в исследуемых объектах. Например, изменение теплоемкости, скорости ультразвука и коэффициента поглощения ИК излучения в легированном GaAs, резкая зависимость макроскопических свойств в KLTN в зависимости от концентраций примесей, нелинейность спонтанной поляризации в определенном интервале температур в SBN и пр. Природа некоторых из них до сих пор оставалась неизвестной.

Обсуждаются структурные фазовые переходы, причины образования полярного неоднородного состояния и возникновение спонтанной поляризации в разупорядоченных системах, в том числе и в кристаллах с

дипольными примесями [3]. Приведена оценка концентрации примесей, при которой начинается зарождение спонтанной поляризации $Nr_c^3 \approx 5 \cdot 10^{-3}$, где N - концентрация примесей, r_c — радиус корреляции.

Исследования релаксоров показали, что наличие "замороженных" случайных полей выше точки фазового перехода может приводить к смене режима критического поведения.

Во **второй главе** рассматривается один из способов повышения эффективности экспериментальных установок. На базе нейтронного спектрометра "Нейтрон-3", созданного в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе и установленного на реакторе ВВР-М Санкт-Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова (ФГБУ «ПИАФ», г. Гатчина) разработан и изготовлен узел фокусирующего монохроматора (ФМ).

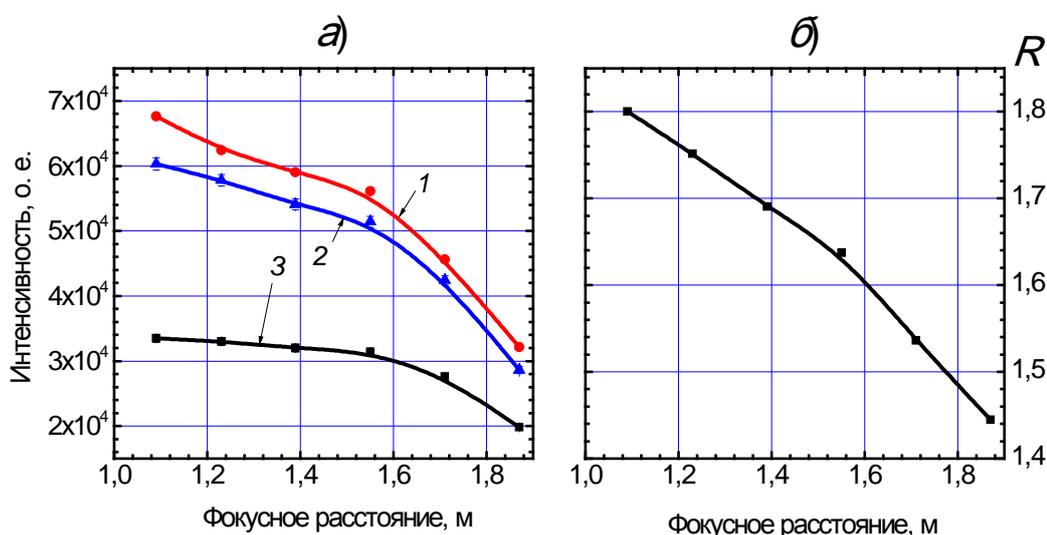


Рис. 1. Зависимости интенсивности (а) и коэффициента выигрыша R в светосиле (б) от фокусного расстояния для ФМ. 1 – максимально возможная интенсивность на образце; 2, 3 – интенсивности на образце для фокусирующего и плоского режимов.

Была выбрана схема вертикально фокусирующего монохроматора с переменным фокусным расстоянием на базе 9 пластин из монокристаллов Ge. Необходимо отметить, что тщательный подбор по критериям мозаичность и эффективность отражения, а также точность юстировки пластин весьма критична для качества ФМ. В нашем случае, при фактической высоте падающего пучка нейтронов равной 55мм, в фокусировке участвовали 5 из 9 пластин германия в монохроматоре, что предполагало увеличение интенсивности в два раза для идеального случая фокусировки в одной плоскости. Практически удалось поднять интенсивность в 1,8 раза на расстоянии 1,1 м и в 1,45 раза – на расстоянии

1,9 м (рис. 1 б)). На рис. 1 а) показаны интенсивности для различных режимов в относительных единицах.

Таким образом показано, что использование предложенной схемы существенно повысило интенсивность пучка нейтронов на образце.

Третья глава посвящена результатам исследования дефектно индуцированной моды в арсениде галлия GaAs, легированного теллуром Te.

Измерения проводились в температурном интервале от 363 до 253 К для значений приведенного волнового вектора $0.06a^* < q < 0.2a^*$ (a^* — параметр обратной решетки).

При больших значениях приведенного волнового вектора q ($q > 0.1a^*$) при всех исследованных температурах наблюдалась поперечная акустическая мода (ТА) с параметрами, аналогичными полученным для чистого GaAs, но сопровождаемая приливом со стороны высоких энергий, положение которого сильно зависело от q .

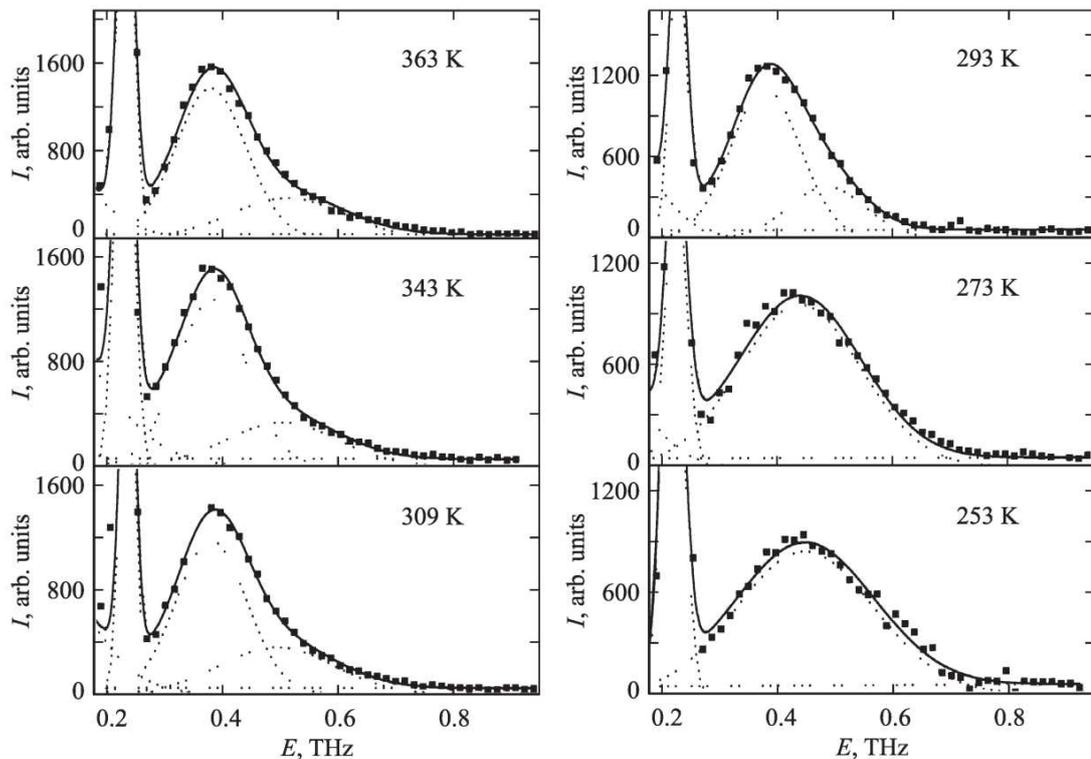


Рис. 2. Температурная эволюция формы ТА фононного резонанса в GaAs:Te при $q = (2\ 2\ 0.07)$. Сплошная линия - результат подгонки, пунктирные линии - вклад отдельных компонент: основного ТА фона, дополнительного плеча и линейного фона. Узкий пик при $E = 0.2$ THz – «хвост» брэгговского рассеяния.

В процессе охлаждения при $q > 0.1a^*$ форма наблюдаемого фононного резонанса не изменялась, в то время как при малых q ($q < 0.1a^*$) уменьшение температуры приводило к возрастанию интегральной интенсивности дополнительного вклада, который ниже 273 К практически полностью

сливался с основным ТА пиком, при этом происходило уширение последнего. На рис. 2 приведена температурная зависимость формы линии ТА резонанса вблизи узла (220) при $q = 0.07a^*$, хорошо видно, что положение максимума этого дополнительного вклада при понижении температуры смещается в сторону меньших энергий.

В диссертации такое поведение объясняется появлением дополнительной, индуцированной дефектами резонансной моды в области низкочастотных возбуждений вблизи центра зоны Брюллиэна, которая и может быть ответственна за наблюдаемые аномалии физических свойств в сильно допированном GaAs. Эта мода взаимодействует с ТА фононом, что приводит к искажению его формы и сдвигу положения максимума при малых q , аналогично наблюдававшемуся в релаксоре $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$.

В четвертой главе приводятся результаты исследования структуры и свойств танталата калия, допированного литием и ниобием $\text{K}_{1-x}\text{Li}_x\text{Ta}_{1-y}\text{Nb}_y\text{O}_3$.

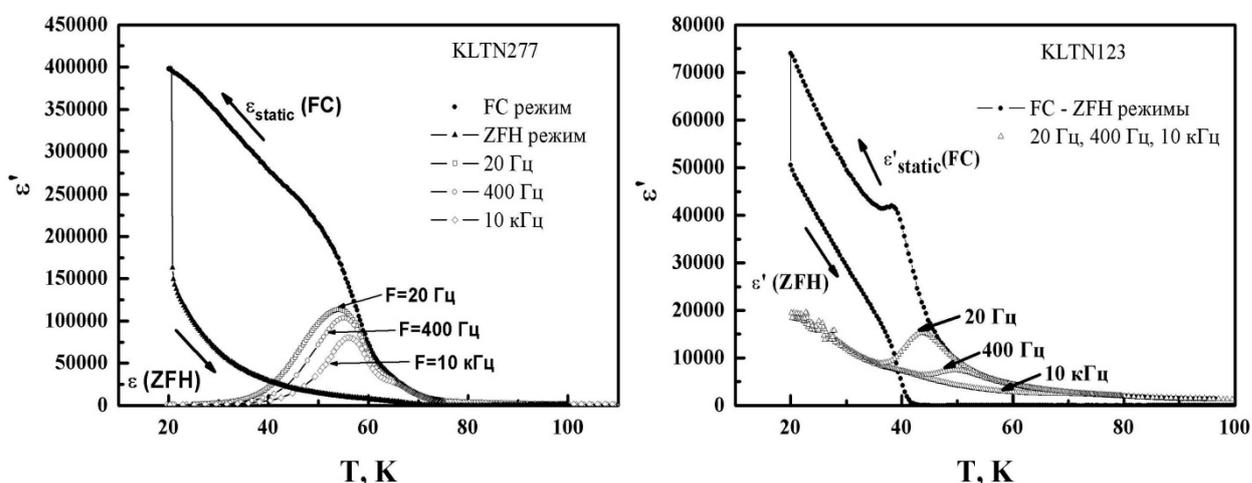


Рис. 3. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости для частот 20 Гц, 400 Гц и 10 кГц и $\epsilon'_{\text{static}}$ для монокристаллов KLTN277 и KLTN123.

Результаты измерения диэлектрического отклика двух образцов KLTN277 и KLTN123 представлены на рис. 3. На зависимости $\epsilon'(T, \omega)$ для KLTN277 наблюдается широкий пик с максимумом при $T \approx 57$ К и значительная частотная дисперсия при более низких температурах. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости $\epsilon'_{\text{static}}$ носит монотонный характер. В KLTN123 были получены гораздо меньшие максимальные значения $\epsilon'_{\text{static}}$ и обнаружены особенности температурной зависимости $\epsilon'_{\text{static}}$ вблизи ~ 40 К: перегиб при охлаждении в FC-режиме и резкое падение при нагреве в ZFH-режиме. В частотных зависимостях $\epsilon'(T, \omega)$ наблюдается явное смещение максимума при понижении частоты и значительная дисперсия ниже температуры максимума.

Анализ дифракционных данных для KLTN277 (Рис. 4, слева) показал, что при $T \sim 60$ К и ниже наблюдается резкое изменение зависимости

параметра ячейки $a(T)$. Кроме этого, исследование температурной зависимости формы брэгговского пика (003) при продольном и поперечном сканировании при рассеянии синхротронного излучения показало, что ниже 60 К происходит резкое увеличение полной ширины на полувысоте (FWHM) пика в поперечном направлении. Совместный анализ данных диэлектрической спектроскопии и результатов дифракционных измерений позволил сделать вывод о возникновении в KLTN277 ниже $T \sim 60$ К существенных неоднородных сдвиговых деформаций, приводящих к возникновению состояния типа "сегнетоэластического стекла".

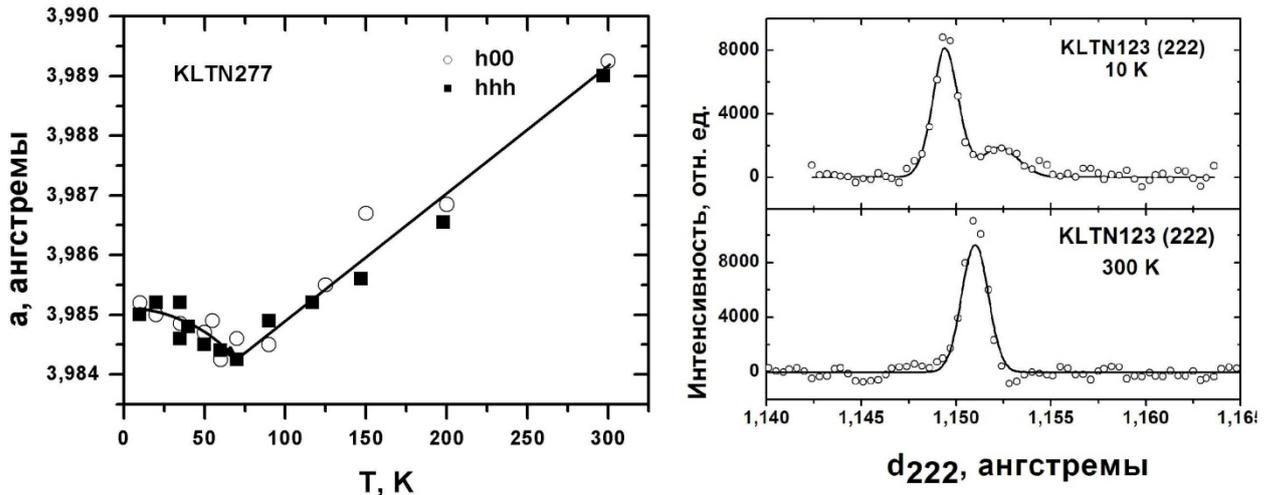


Рис. 4. Слева: температурная зависимость постоянной решетки $a(T)$ для KLTN277, полученная из анализа отражений семейств (h00) и (hhh). Справа: Часть дифрактограмм в окрестности узла (222) для образца KLTN123 при 10 К и 300 К, полученные на Фурье - дифрактометре высокого разрешения HRFD (ОИЯИ, Дубна).

В монокристалле KLTN123 ниже 65 К обнаружено появление дополнительных пиков (сателлитов) (Рис. 4, справа), соответствующих ромбоэдрической структуре. Их интенсивность возрастает, а ширина уменьшается при дальнейшем охлаждении, но, тем не менее, их интегральная интенсивность остается существенно меньше интенсивностей пиков, соответствующих основной кубической фазе. Таким образом можно сделать вывод о том, что в этом диапазоне температур наблюдается сосуществование основной кубической структуры и вкраплений ромбоэдрической фазы.

В **пятой главе** приведены результаты изучения квазиупругого рассеяния нейтронов в одноосном сегнетоэлектрике - релаксоре ниобате стронция - бария $Sr_{0.6}Ba_{0.4}Nb_2O_6$ в нулевом поле и при приложении постоянного внешнего электрического поля.

Сканирование осуществлялось вблизи узла (0 0 2) в направлении [1 1 0], перпендикулярном вектору обратной решетки τ . Были получены

температурные зависимости диффузного рассеяния в большом диапазоне значений приведенного волнового вектора q (Рис. 5).

При обработке полученных зависимостей использовалось следующее феноменологическое выражение, представляющее собой сумму гауссиана (брэгговское рассеяние), лоренциана, квадрированного лоренциана и линейного фона:

$$I(q) = \frac{I_0 \kappa^2}{q^2 + \kappa^2} + \frac{I_1 \kappa^4}{(q^2 + \kappa^2)^2} + I_{br} e^{-q^2/2\sigma^2} + I_{bkg},$$

где q - приведенный волновой вектор; κ^2 - квадрат обратного радиуса корреляции, имеющего размерность обратной длины; σ - стандартное отклонение.

Первый член соответствует Орнштейн-Церниковской корреляционной функции, описывающей термодинамические флуктуации (ТФ) с пиковой интенсивностью I_0 . Известно, что в соответствии с положениями флуктуационно - диссипационной теоремы, значение I_0 должно быть пропорциональным статической восприимчивости системы $\chi^{(0)}$. Второй член соответствует рассеянию на нанодоменах с интенсивностью I_1 при $q = 0$, или конфигурационным флуктуациям (КФ). Третье слагаемое описывает брэгговский вклад, четвертое дает фоновый вклад I_{bkg} в рассеяние.

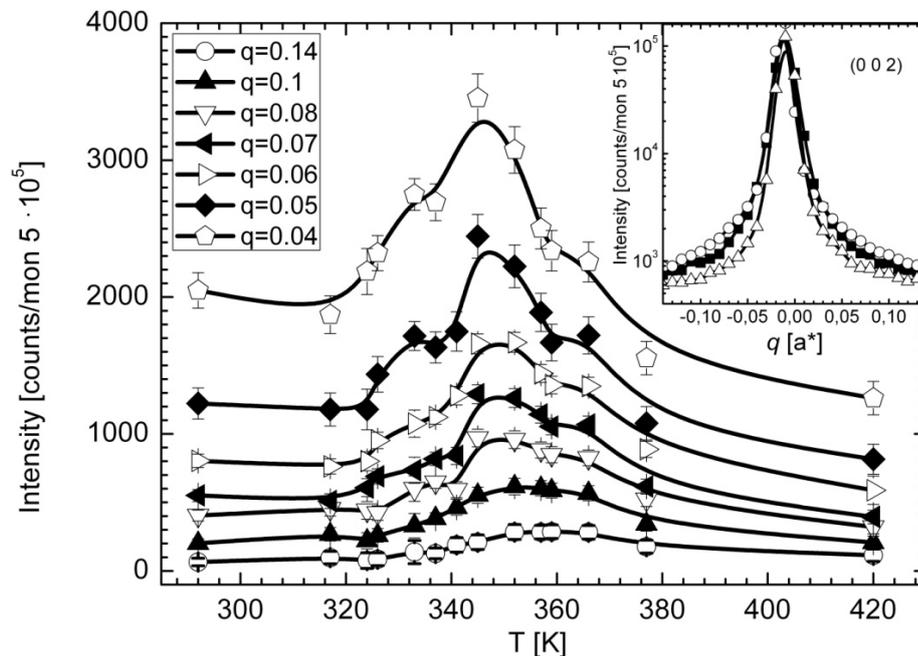


Рис. 5. Температурные зависимости интенсивностей диффузного рассеяния нейтронов $I(q, T)$ в SBN60 при различных значениях q вблизи узла (002). На вставке приведены в логарифмическом масштабе экспериментальные зависимости интенсивности рассеяния в узле (002) в диапазоне по q (-0.15\AA^{-1} - $+0.15\text{\AA}^{-1}$) для трех температур: 343(1) К – окружности, 291(1) К – квадраты и 424(1) К – треугольники.

Температурные зависимости квадрата обратного радиуса корреляции κ^2 и статической восприимчивости системы $\chi^{(0)}$ выше T_C описывались следующими классическими выражениями:

$$\kappa^2 = \kappa_0^2 (T - T_C)^{2\nu} \quad \text{и} \quad \chi^{(0)} = C (T - T_C)^{-\gamma}$$

На рис. 6 приведены результаты обработки экспериментальных данных, получены значения для пиковых интенсивностей (при $q=0$) $I_0(0, T)$ и $I_1(0, T)$. Это позволило получить температуру Кюри T_C и определить значения критических экспонент ν и γ для радиуса корреляции и восприимчивости, соответственно.

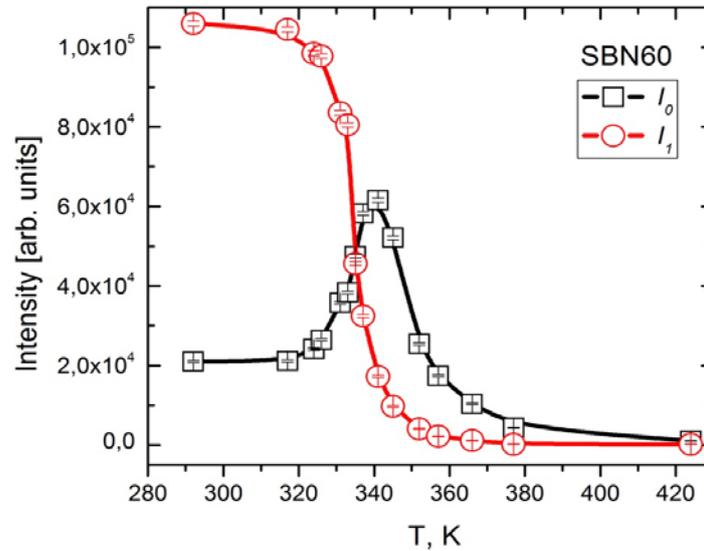


Рис. 6. Температурные зависимости расчетных значений пиковых интенсивностей $I_0(0, T)$ (квадраты) и $I_1(0, T)$ (окружности).

Полученные данные указывают на то, что, ниже 320 К происходит разбиение кристалла на систему нанодоменов. Их формирование начинается уже выше T_C , что подавляет расходимость радиуса корреляции и статической восприимчивости в точке ФП.

При приложении постоянного поля $E = 2.8 \cdot 10^5$ V/m картина наблюдаемого диффузного рассеяния резко изменяется. Внешнее электрическое поле подавляет процесс формирования нанодоменов и приводит к возникновению макродоменного (возможно монодоменного) состояния (рис. 7).

В **заключении** сформулированы основные выводы и результаты работы:

1 – Впервые на основании анализа данных по неупругому рассеянию нейтронов показано, что в сильно допированном GaAs вблизи центра зоны Бриллюэна существует индуцированная дефектами «мягкая» мода, приводящая к появлению аномалий физических свойств в этом кристалле и к возможному сегнетоэлектрическому (сегнетоэластическому) переходу.

Обнаружено сильное взаимодействие этой моды с ТА модой, существующей в арсениде галлия.

2 – Для кристалла KLTN277 обнаружен минимум в температурной зависимости параметра ячейки при $T \sim 60$ К, соответствующей аномалии в диэлектрическом отклике. Показано, что ниже этой температуры возникает состояние типа "сегнетоэластического стекла".

3 – Впервые показано, что в KLTN123 ниже $T \sim 65$ К вплоть до 10 К наблюдается сосуществование основной матрицы, сохраняющей кубическую симметрию, и зародышей ромбоэдрической фазы. Такая гетерофазность структуры приводит к появлению аномалий в диэлектрическом отклике.

4 – При охлаждении SBN60 в нулевом поле не возникает пространственно - однородное полярное состояние, а происходит разбиение кристалла на нанодомены при температурах ниже 320 К. Ниже точки Кюри происходит "замерзание" радиуса корреляции, величина которого составляет около 27 nm.

5 – Для SBN60 определены значения критических индексов $\nu = 0.67(2)$, $\gamma = 1.33(17)$ и температура Кюри $T_C = 340.5(12)$ К.

6 – Показано, что приложение электрического поля $\sim 2.8 \cdot 10^5$ V/m приводит к подавлению процесса формирования нанодоменов и возникновению пространственно однородного полярного состояния в SBN60.

7 – Разработанный образец фокусирующего нейтронного монохроматора с переменным фокусным расстоянием позволил получить выигрыш от фокусировки в первом приближении в 1.8 – 2 раза на расстояниях от монохроматора до образца в пределах 1 – 2 метров.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tokura, Y. Colossal Magnetoresistance Oxides [Текст] / ed. Y. Tokura // Gordon and Breach, London. – 1999. - 358 p..
2. Khomskii, D.I. Classifying multiferroics: Mechanisms and effects [Текст] / D.I. Khomskii // Physics. – 2009. - Vol. 2. - P. 20.
3. Вугмейстер, Б. Е. Особенности кооперативного поведения параэлектрических дефектов в сильно поляризуемых кристаллах [Текст] / Б. Е. Вугмейстер, М. Д. Глинчук // ЖЭТФ. – 1980. - Т. 79, 3. - Сс. 947 - 952.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Борисов, С.А. Особенности неупругого рассеяния нейтронов на ТА фонах в сильно легированном арсениде галлия [Текст] / С.А. Борисов, С.Б. Вахрушев, А.А. Набережнов, Н.М. Окунева // Физика Твёрдого Тела. — 2005. — Т. 47. — Вып. 6. — С. 1026-1031.
2. Борисов, С.А. Исследование температурной эволюции структуры монокристаллов $K_{1-x}Li_xTa_{1-y}Nb_yO_3$ [Текст] / С.А. Борисов, С.Б. Вахрушев,

Е.Ю. Королева, А.А. Набережнов, П.П. Сырников, В.Г. Симкин, З. Кутняк, Т. Эгами, В. Дмовский, П. Пикарз // Кристаллография. — 2007. — Т. 52. — Вып. 3. — С. 478-484.

3. Борисов, С.А. Фокусирующий нейтронный монохроматор с переменным фокусным расстоянием [Текст] / С.А. Борисов, С.Б. Вахрушев, А.А. Набережнов, Н.М. Окунева, А.В. Филимонов // Научно-технические ведомости СПбГПУ, серия Приборы и техника физического эксперимента. — 2010. — Вып. 4. — С. 118-127.

4. Борисов, С.А. Критическое рассеяние нейтронов в одноосном релаксоре $\text{Sr}_{0.6}\text{Ba}^{0.4}\text{Nb}_2\text{O}_6$ [Текст] / С.А. Борисов, С.Б. Вахрушев, А.А. Набережнов, Н.М. Окунева, Т.Р. Волк, А.В. Филимонов // Физика Твёрдого Тела. — 2013. — Т. 55. — Вып. 2. — С. 295-301.

5. Borisov, S.A. Inelastic neutron scattering on TA phonons in pure and doped GaAs, PS-A-15 [Текст] / S.A. Borisov, S.B. Vakhrushev, A.A. Naberezhnov, N.M. Okuneva // 15th Workshop on "Applications of Neutron Scattering in Study of Condensed Matter", Zarechny. — March 17-23, 1997. — P. 32.

6. Borisov, S.A. FOCUSING NEUTRON MONOCHROMATOR, PS-A-16 [Текст] / S.A. Borisov, S.B. Vakhrushev, A.A. Naberezhnov, N.M. Okuneva, N.V. Tuchkevich, V.A. Trunov // 15th Workshop on "Applications of Neutron Scattering in Study of Condensed Matter", Zarechny. — March 17-23, 1997. — P. 32.

7. Borisov, S. Influence of Doping on TA Phonon Lineshape in GaAs [Текст] / S.A. Borisov, S.B. Vakhrushev, A.A. Naberezhnov, N.M. Okuneva // Abstracts of International Conference on Neutron Scattering, Toronto. — August 17-21, 1997. — P. 237.

8. Borisov, S. Defect Induced Phase Transition in the GaAs [Текст] / S.A. Borisov, S.B. Vakhrushev, A.A. Naberezhnov, N.M. Okuneva // Abstracts of 2nd International Seminar on Relaxor Ferroelectrics, Dubna. — June 23-26, 1998. — P. 62.

9. Borisov, S. X-ray and neutron scattering study of mixed $\text{K}_{(1-x)}\text{Li}_{(x)}\text{Ta}_{(1-y)}\text{Nb}_{(y)}\text{O}_3$ crystals [Текст] / S. A. Borisov, A.A. Naberezhnov, P.P. Syrnikov, V.A. Trepakov, S.B. Vakhrushev, A.M. Balagurov, V.G. Simkin, B. Dorner, A. Ivanov, W. Dmowski, T. Egami, S.E. Kapphan // Abstracts of 7th Russia/CIS/Baltic/Japan Symposium on Ferroelectricity RCBJSF-7, St.-Petersburg. — June 24-28, 2002. — P. 164.

10. Борисов, С.А. Нейтронная дифракция на монокристалле KLTN(Cu) [Текст] / С.А. Борисов, А.М. Балагуров, С.Б. Вахрушев, А.А. Набережнов, Е.Ю. Королева, В.А. Трепаков, В.Г. Симкин // Сборник докладов XVI Всероссийской конференции по физике сегнетоэлектриков, Тверь. — 17-21 сентября 2002. — С. 105.

11. Borisov, S. Temperature evolution of the structure and lattice dynamics of KLTN mixed crystals [Текст] / S. Borisov, A. Naberezhnov, S. Vakhrushev, V. Trepakov, P. Syrnikov, B. Dorner, A. Ivanov, D. Strauch, T. Egami, W. Dmowski,

A. Balagurov // Abstracts of 3rd European Conference on Neutron Scattering, Montpellier. — September 3-6, 2003. — P. 303.

12. Борисов, С.А. Критические явления в разупорядоченных перовскитах [Текст] / С.А. Борисов, С.Б. Вахрушев, А.А. Набережнов, Н.М. Окунева // Сборник докладов XVIII Совещания "Использование рассеяния нейтронов в исследованиях конденсированного состояния", Заречный. — 12-16 октября 2004. — С. 139.

13. Борисов, С.А. Структура и диэлектрические свойства монокристаллов $K_{1-x}Li_xTa_{1-y}Nb_yO_3$ [Текст] / С.А. Борисов, С.Б. Вахрушев, А.А. Набережнов, А. Иванов, Е.Ю. Королева, М.А. Кораблев-Дайсон, П. П. Сырников, В. Г. Симкин, З. Кутняк // Сборник докладов XIX Совещания "Использование рассеяния нейтронов в исследованиях конденсированного состояния", Обнинск. — 12-15 сентября 2004. — С. 25.

14. Borisov, S. Defect induced phase transition in doped GaAs [Текст] / A. Naberezhnov, V. Sikolenko, S. Borisov // BENSC experimental report PHY-02-0448. — 2005. — P. 75.

15. Borisov, S. Lattice dynamics of strongly doped GaAs [Текст] / A. Naberezhnov, V. Sikolenko, S. Borisov // BENSC experimental report PHY-02-0524. — 2006. — P. 102.

16. Борисов, С.А. Исследование температурной зависимости квазиупругого рассеяния нейтронов на монокристалле $Sr_{0.6}Ba_{0.4}Nb_2O_6$ [Текст] / С.А. Борисов, С.Б. Вахрушев, А.А. Набережнов, Н.М. Окунева // Сборник докладов XVI Всероссийской конференции по физике сегнетоэлектриков, Санкт - Петербург. — 9-14 июня 2008. — С. 187.

17. Borisov, S. Critical neutron scattering in uniaxial relaxor $Sr_{0.6}Ba_{0.4}Nb_2O_6$ [Текст] / S. Borisov, N. Okuneva, S. Vakhrushev, A. Naberezhnov, T. Volk // Abstract book, Joint International Symposium 11th International Symposium on Ferroic Domains and Micro- to Nanoscopic Structures, 11th Russia/CIS/Baltic/Japan Symposium on Ferroelectricity, Ekaterinburg: Ural Federal University. — August 20-24, 2012. — P. 124.

18. Borisov, S. Critical exponents in uniaxial relaxor $Sr_{0.6}Ba_{0.4}Nb_2O_6$ [Текст] / S. Borisov, N. Okuneva, S. Vakhrushev, A. Naberezhnov, T. Volk // Abstract book, International Workshop on Relaxor Ferroelectrics - 2013, St.Petersburg. — July 1 - 6, 2013. — P. 110.