

На правах рукописи

Бурковский Роман Георгиевич

**МЯГКОМОДОВАЯ ДИНАМИКА И  
ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ КОРРЕЛЯЦИЙ  
ИОННЫХ СМЕЩЕНИЙ В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКЕ  
РЕЛАКСОРЕ МАГНОНИОБАТЕ СВИНЦА**

01.04.04 – Физическая электроника

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник,  
Вахрушев Сергей Борисович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник,  
Марковин Павел Алексеевич,  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник,  
Черненко Юрий Петрович

Ведущая организация: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский Государственный Электротехнический Университет "ЛЭТИ"им. В.И. Ульянова (Ленина)"

Защита состоится 24 февраля 2011 г. в 16 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.229.01 при ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет расположенном по адресу:

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, учебный корпус 2, ауд. 470.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Автореферат разослан 21 января 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук, профессор

Коротков А.С.

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность работы**

Разупорядоченные сегнетоэлектрики являются основой большинства современных сегнето- и пьезоэлектрических материалов, ведется активный поиск новых методов и подходов к созданию новых материалов с улучшенными характеристиками на их основе. Особое место среди наиболее перспективных разупорядоченных сегнетоэлектриков занимают сегнетоэлектрики релаксоры, существенно превосходящие по ряду параметров широко используемые в настоящее время материалы. С момента открытия более 50 лет назад А.Г. Смоленским релаксоры являются предметом активного изучения. Достаточно хорошо изучены макроскопические свойства, для их описания выдвинут ряд моделей. В то же время, стоящие за наблюдаемыми макросвойствами особенности микроскопической структуры и атомной динамики остаются в настоящее время в значительной степени непонятными и требуют разъяснения для построения согласованной модели релаксоров, необходимой для создания новых материалов с заранее заданными свойствами. Важными открытыми вопросами в данной области на сегодняшний день являются вопросы микроскопических механизмов, ответственных за формирование полярных нанообластей, связи этих механизмов с мягкомодовой динамикой и квазистатическими структурными искажениями. В частности, особый интерес представляет информация о данных механизмах в важных с практической точки зрения тонких пленках релаксоров, особенно в случае, когда толщина пленки становится сопоставимой с характерными размерами структурных и композиционных неоднородностей материала.

### **Цель и задачи диссертационной работы.**

Диссертационная работа посвящена исследованию микроскопических механизмов формирования наногетерогенных полярных состояний в массивных и тонкопленочных сегнетоэлектриках релаксорах методами упругого и неупругого рассеяния нейтронов и синхротронного излучения.

Основные задачи:

1. Проведение экспериментального исследования низкочастотной динамики решетки магнониобата свинца методом неупругого рассеяния нейтронов и анализ полученных данных с учетом возможного межмодового взаимодействия. Определение на основании проведенного анализа температурной зависимости фононных дисперсион-

ных кривых в магнониобате свинца.

2. Исследование двумерного распределения интенсивности упругого диффузного рассеяния нейтронов в парафазе магнониобата свинца, анализ полученных данных в рамках модели анизотропно-скоррелированных ионных смещений и упругих микродеформаций решетки.
3. Исследование температурной эволюции квазиупругой компоненты диффузного рассеяния в магнониобате свинца в нескольких зонах Бриллюэна, анализ полученных зависимостей и определение взаимосвязи между полярными и неполярными вкладами в ионные смещения в полярных нанобластях.
4. Разработка методики исследования фононных дисперсионных кривых в тонкопленочных образцах с использованием жесткого синхротронного излучения, применение данной методики для изучения процессов формирования полярных нанобластей в тонких пленках магнониобата свинца.

### **Научная новизна**

Все результаты, полученные в данной работе являются новыми. В частности, впервые была продемонстрирована применимость двухмодовой модели для описания кривых неупругого рассеяния нейтронов в центре зоны Бриллюэна в монокристаллах магнониобата свинца, впервые представлена модель динамики решетки данного соединения, находящаяся в согласии с результатами исследований истинной параэлектрической фазы методом диэлектрической спектроскопии. Впервые обнаружена анизотропия диффузного рассеяния в параэлектрической фазе РМН и предложена микроскопическая модель, дающая непротиворечивое описание наблюдаемого рассеяния. Впервые установлена линейная взаимосвязь между величинами полярных и неполярных вкладов в ионные смещения, ответственные за квазиупругое рассеяние в магнониобате свинца. Впервые экспериментально продемонстрирована возможность изучения фононных дисперсионных кривых в тонкопленочных образцах, в частности, с контролем глубины исследуемых слоев образца с использованием неупругого рассеяния синхротронного излучения. Данная методика применена для исследования эпитаксиальных пленок магнониобата свинца толщиной менее 100 нм, и показано что в объектах такой толщины с понижением температуры происходит формирование полярных нанобластей.

### **Научная и практическая значимость работы**

Изложенные в диссертации результаты представляют интерес с точки зрения физики наногетерогенных разупорядоченных сегнетоэлектриков, а также могут быть использованы при разработке новых материалов с заданными характеристиками на основе релаксоров. Разработанная методика изучения неупругого отклика тонкопленочных образцов во всей зоне Бриллюэна может быть использована в исследованиях как сегнетоэлектрических тонких пленок, так и пленок других представляющих научный и практический интерес соединений.

**На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:**

1. Систематическое описание динамики решетки магнониобата свинца моделью двухмодового поведения мягкой моды в широком интервале температур и приведенных волновых векторов. Демонстрация соответствия температурной зависимости квадрата частоты обеих ветвей мягкой моды закону Кюри-Вейсса. Показано, что для низкоэнергетической ветви критическая температура близка к критической температуре, получаемой из анализа температурной зависимости диэлектрической проницаемости в истинной параэлектрической фазе.
2. Обнаружение выраженной анизотропии температурно-независимой компоненты диффузного рассеяния в магнониобате свинца. Описание наблюдаемого анизотропного рассеяния моделью упругих микродеформаций решетки, возникающих в результате композиционных неоднородностей материала. Интерпретация наблюдаемых максимумов-сателлитов как эффекта конечного экспериментального разрешения.
3. Обнаружение линейной взаимосвязи между величинами локальной деформации и локальной поляризацией в магнониобата свинца на основе совместного анализа температурных зависимостей интенсивности диффузного рассеяния в различных зонах Бриллюэна.
4. Разработка методики исследования фононных дисперсионных кривых в эпитаксиальных тонких пленках с использованием неупругого рассеяния жесткого синхротронного излучения. Экспериментальная демонстрация возможности изучения фононных дисперсионных кривых в пленках толщиной 120 нм. Проведение при помощи данной методики исследования тонких пленок модельного релаксора магнониобата свинца. Показано, что частота поперечной оптической моды в пленке существенно выше соответствующей частоты в массивных образцах PMN. Показано, что при охлаждении

образца от  $T=800$  К до 250 К наблюдается монотонное увеличение интенсивности квазиупругого рассеяния, что свидетельствует о возможности образования полярных нанобластей в образцах PMN столь малой толщины.

**Апробация работы** Основные результаты диссертации докладывались на всероссийских и международных конференциях, в частности на 26-м Европейском кристаллографическом конгрессе (ЕСМ 26), 2010 г., 12-м Международном совещании по кристаллографии (IMF-12), 2009 г., XX Совещании по использованию рассеяния нейтронов в исследованиях конденсированного состояния (РНИКС-2008), 2008 г., XVIII Всероссийской конференции по физике сегнетоэлектриков (ВКС–XVIII), 2008 г., 4-й Европейской конференции по рассеянию нейтронов (ECNS 2007), 2007 г., VI Национальной конференции по применению рентгеновского, синхротронного излучений, нейтронов и электронов для исследования материалов (РСНЭ-2007), 2007 г., Международном семинаре по фундаментальной физике сегнетоэлектриков (Fundamental Physics of Ferroelectrics), 2010 г., 5-м Азиатском совещании по сегнетоэлектрикам (The 5th Asian meeting on Ferroelectrics), 2006 г., Всероссийском форуме "Наука и инновации в технических университетах 2008 г.

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в 18 печатных работах, из них 5 статей в рецензируемых журналах [1–5] и 13 тезисов докладов (наиболее значимые приведены в списке публикаций [6–10]).

**Личный вклад автора** Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Описанные в диссертации экспериментальные исследования проводились совместно с соавторами, обработка экспериментальных данных проведена автором. Вклад автора был определяющим при написании статей, раскрывающих содержание работы.

**Структура и объем диссертации** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации 125 страниц, включая 61 рисунок. Список литературы включает 120 наименований.

## Содержание работы

**Во Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель, показаны научная новизна исследований и практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

**В Главе 1** приводится обзор литературы по тематике диссертации - особенностям микроскопической структуры и динамики решетки сегнетоэлектриков релаксоров. Представлена общая информация по данным соединениям, освещены основные проблемы и степень их решения на современном этапе развития данного направления исследований. В частности, обсуждены основные особенности макроскопических характеристик релаксоров, кратко описаны существующие на сегодняшний день подходы к их модельному описанию. Более подробно освещены исследования последних лет, посвященные изучению локальной структуры и микродеформаций решетки релаксоров методами упругого рассеяния нейтронов и синхротронного излучения, а также результаты исследования динамики решетки, полученные методом нейтронной спектроскопии. В конце главы приводится обобщение изложенного материала и формулируются основные проблемы, на решение которых направлена диссертационная работа.

**Глава 2** посвящена исследованию критической динамики магнониобата свинца методом неупругого рассеяния нейтронов и интерпретации полученных данных в рамках модели взаимодействующих мод. Измерения проводились на спектрометре IN22 в нейтронноводном зале высокопоточного реактора Института Лауэ Ланжевена с использованием в качестве образца монокристалла PMN, выращенного методом Чохральского в Институте Физики РГУ.

Кривые неупругого рассеяния на магнониобате свинца при приближении к температуре Бернса перестают содержать ярко выраженные резонансы, соответствующие рассеянию на поперечных оптических фононах, вследствие аномального увеличения затухания данных фононов (Рисунок 1). Это приводит к затруднению разделения вкладов от различных фононных ветвей. Для преодоления данной трудности измерения проводились параллельно в двух зонах Бриллюэна (200) и (300). Такая постановка эксперимента позволяет значительно сократить количество варьируемых модельных параметров при численной обработке данных и провести однозначное разделение вкладов от различных фононных резонансов. При обработке данных применен формализм рассеяния на системе квазигармонических осцилляторов с учетом возможного межмодового взаимодействия. При вычислении интенсивности рассеяния применена свертка функции неупругого отклика образца с четырехмерной функцией разрешения спектрометра.

Для того чтобы увеличить статистическую обоснованность задачи оптимизации параметров модели, подгонка осуществлялась одновременно для ряда спектров, соответствующим

ющих одной температуре и различным значениям приведенного волнового вектора  $q$  в различных зонах Бриллюэна. При этом в рассматриваемой области малых  $q$  дисперсионные кривые ТА и ТО фононов аппроксимировались выражениями:

$$\omega_{TA} = A \cdot \sin(\pi q), \quad \omega_{TO}^2 = \omega_0^2 + D \cdot q^2 \quad (1)$$

Параметры  $A$ ,  $B$  и  $C$  этих зависимостей являлись подгоночными при оптимизации.

Показано, что модель, подразумевающая наличие только одного мягкого поперечного оптического возбуждения не позволяет одновременно описать данные в различных зонах Бриллюэна, в то время как модель с двумя ТО модами находится в соответствии с экспериментом.

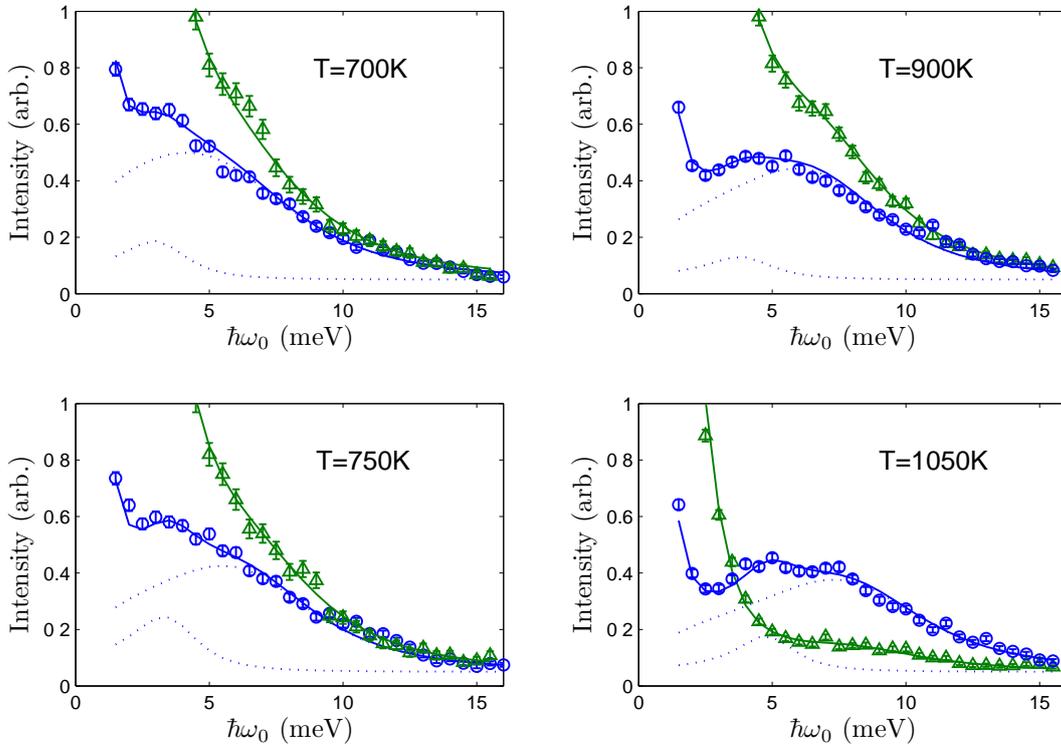


Рис. 1. Результат подгонки спектров неупругого рассеяния нейтронов, снятых в центрах зон (200) (треугольники) и (300) (квадраты), при помощи модели с двумя ТО модами. Пунктирными линиями показаны вклады двух ТО ветвей в интенсивность рассеяния в зоне (300).

В результате обработки были определены дисперсионные зависимости для обеих ветвей мягкой моды, значения структурных факторов, коэффициенты затухания и температурная эволюция этих параметров. Показано, что квадрат частоты для каждой из оптических ветвей в центре зоны изменяется с температурой согласно закону Кюри-Вейсса

(Рисунок 2). Для низкоэнергетической ветви, вклад которой в диэлектрический отклик должен быть доминирующим, значение температуры Кюри  $T_c$  400 К хорошо согласуется с данными диэлектрической спектроскопии и результатами анализа температурной эволюции интегральной интенсивности рассеяния на оптических фононах в магнониобате свинца.

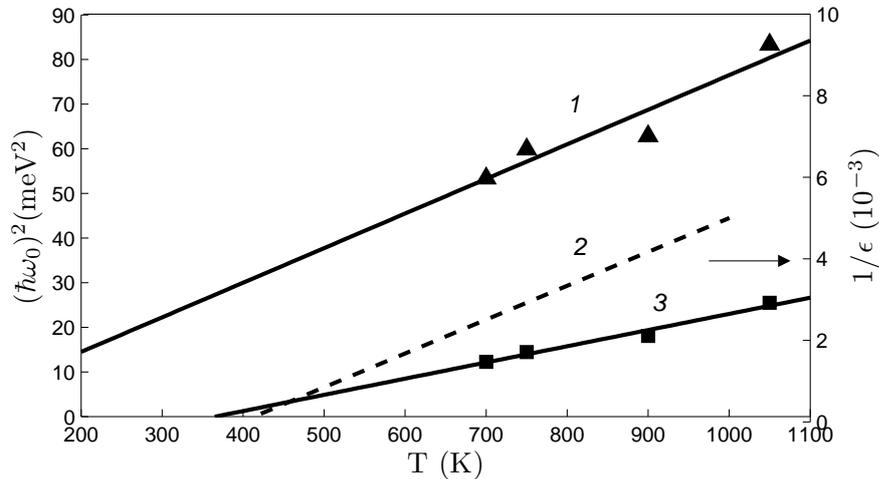


Рис. 2. Температурная зависимость квадратов частоты высокоэнергетического (1) и низкоэнергетического (3) ТО фононов. Пунктирной линией (2) показан ход обратной величины диэлектрической проницаемости

Таким образом, получено однозначное и непротиворечивое описание мягкомодового поведения в магнониобате свинца, находящаяся в согласии как с данными неупругого рассеяния нейтронов, так и с данными диэлектрической спектроскопии. Позже данный результат был независимо подтвержден с использованием гиперрамановской спектроскопии. На основании полученных параметров двух ветвей мягкой моды можно предположить, что сильно локализованные фононы, соответствующие низкоэнергетической ветви, связаны с формированием полярной фазы в образующихся ниже температуры Бернса полярных нанобластях, в то время как высокоэнергетическая ветвь соответствует ТО фононам, распространяющимся в средней решетке PMN, симметрия которой остается кубической при любых экспериментально доступных температурах.

Результаты второй главы опубликованы в работах [1, 2].

**В главе 3** приводятся результаты экспериментального исследования диффузного рассеяния нейтронов в параэлектрической фазе магнониобата свинца и дается физическая интерпретация его ключевых особенностей. Исследование проведено при помощи

трехосного нейтронного спектрометра 5G-PONTA, установленного на реакторе JRR-3M Института физики твердого тела (г. Токай, Япония). Были измерены двухмерные карты интенсивности исследуемого рассеяния вблизи трех узлов обратной решетки с различной симметрией. Полученные карты интенсивности представлены на рис. 3. Результаты, соответствующие высокосимметричному узлу (300) находятся в согласии с ранее полученными данными для узла (100), обладающего такой же симметрией - рассеяние является продольным и содержит слабые пики-сателлиты при значениях приведенного волнового векора  $q = 0.15 \text{ \AA}^{-1}$ . Рассеяние является в целом продольным также и для узлов более низкой симметрии (310) и (210), однако в этих узлах проявляется важная особенность - направления максимальной интенсивности рассеяния смещены относительно направления вектора рассеяния  $\mathbf{Q}$  в сторону высокосимметричных направлений  $\{100\}$ .

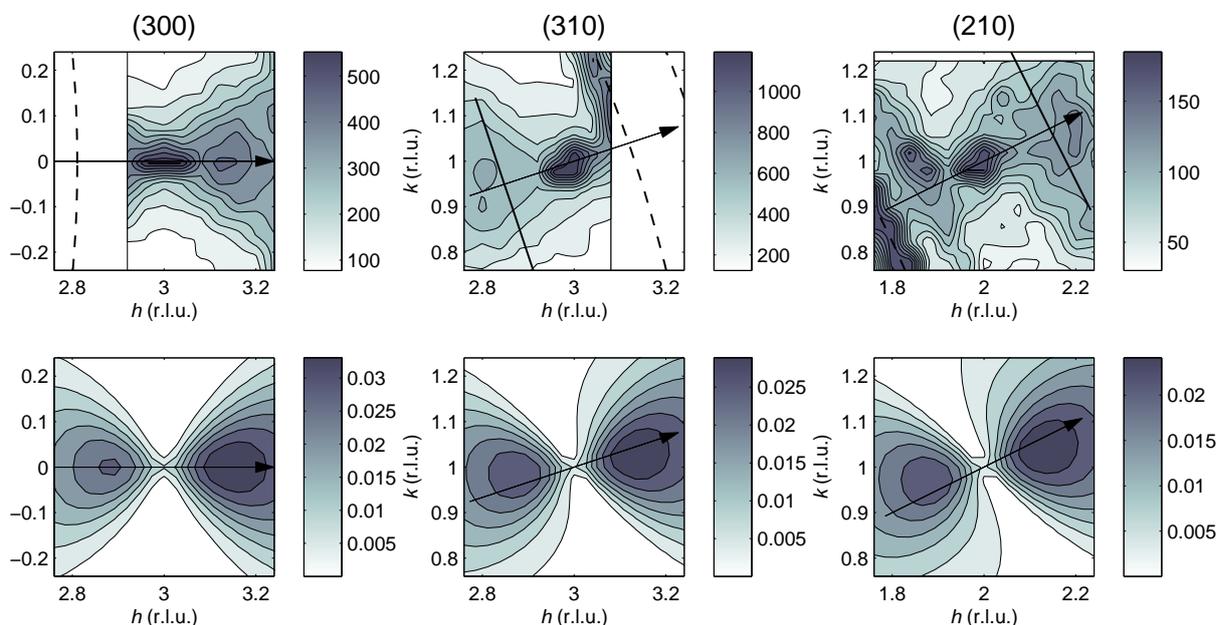


Рис. 3. Изоинтенсивностные контуры диффузного рассеяния на монокристалле PMN при температуре  $T = 650 \text{ K}$  вблизи трех узлов обратной решетки (сверху) и модельные расчеты на основе формализма Хуанговского рассеяния с учетом экранировки полей деформаций. Пунктирными линиями показаны расчетные положения колец рассеяния на держателе образца. Стрелкой на рисунке обозначено направление вектора обратной решетки  $\mathcal{T}$ .

Для описания полученных экспериментальных данных были использованы две раз-

личные модели - модель рассеяния на анизотропно скоррелированных ионных смещениях, предложенная ранее в литературе, и модель рассеяния на упругих микродеформациях решетки, вызванных дефектами. Показано, что наилучшее согласие с экспериментом может быть получено с использованием второй модели. Распределение деформационных полей в кристалле определяется набором упругих постоянных кристалла, определяемых независимо, и тензором, задающим симметрию дефектов. Наблюдаемая анизотропия рассеяния наилучшим образом описывается в случае, когда данный тензор имеет кубическую симметрию, то есть описывает дефекты, создающие изотропные растяжения или сжатия окружающей решетки.

Показано, что максимумы-сателлиты, наблюдаемые вблизи Брэгговских рефлексов (Рисунок 3) могут быть проинтерпретированы как эффект конечного экспериментального разрешения. При этом распределение интенсивности диффузного рассеяния в обратном пространстве само по себе (до свертки с функцией разрешения) может не содержать максимумов, кроме максимума в центре зоны. Проведенный анализ показывает, что для появления пиков-сателлитов в таком случае необходимо, чтобы вблизи центра зоны интенсивность диффузного рассеяния как функция переданного волнового вектора содержала поляризационный множитель вида  $\cos(\phi)$  для продольного рассеяния или  $\sin(\phi)$  для поперечного рассеяния, где  $\phi$  - угол между направлениями вектора обратной решетки  $\tau$  и приведенного волнового вектора  $q$ . Таким образом показано, что наблюдаемые максимумы-сателлиты не являются прямым доказательством наличия в РМН мезоскопического упорядочения или сверхструктур.

Наиболее вероятной причиной появления упругих микродеформаций в кристаллах  $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$  являются флуктуации химического состава. Наноразмерные области, обогащенные ионами  $\text{Mg}^{2+}$  либо  $\text{Nb}^{5+}$ , которые неизбежно образуются в данных химически разупорядоченных кристаллах, характеризуются различными постоянными ячейки в силу различия ионных радиусов для данных ионов, а также в силу различных эффективных зарядов данных ионов. Благодаря этому такие области могут играть роль дефектов, вызывающих сжатия и растяжения окружающей решетки. Помимо различия в постоянных ячейки области данного типа характеризуются различным средним зарядом и благодаря этому взаимодействуют с окружающей решеткой за счет кулоновских сил, также приводящих к появлению деформаций.

Результаты третьей главы опубликованы в работе [1].

**Глава 4** посвящена исследованию параметров ионных смещений, вызывающих сильное температурно-зависимое упругое рассеяние рентгеновского излучения и нейтронов вблизи Брэгговских рефлексов в релаксорах. Следует отметить, что природа данного рассеяния на данный момент является неясной несмотря на большое количество опубликованных по данной тематике работ. На сегодня ни одна из предложенных моделей не позволяет самосогласованно учесть все ключевые характеристики данного рассеяния, такие как его аномально высокая интенсивность, параметры анизотропии, зависимость интенсивности от зоны Бриллюэна и температурную зависимость интенсивности. Вектора ионных смещений, приводящих к такому рассеянию не соответствуют векторам смещений, характерных для мягкой моды в PMN, то есть рассеяние идет не на классических сегнетофлуктуациях, а в результате неких других механизмов. На основании анализа интенсивности диффузного рассеяния в ряде зон Бриллюэна в работах было показано, что ионные смещения содержат как полярные вклады, сохраняющие положение центра масс элементарной ячейки кристалла, так и неполярные, соответствующие сдвигу некоего микрообъема кристалла как целого. С целью определения взаимосвязи данных вкладов и выяснения природы температурно-зависимого диффузного рассеяния были проведены измерения такого рассеяния в кристаллах PMN в интервале температур от 300 К до 650 К в различных зонах Бриллюэна с использованием спектрометра AKANE, установленного на реакторе JRR-3M Института физики твердого тела (г. Токай, Япония). На рисунке 4 приведены упругие сканы, проходящие через центр зоны Бриллюэна по диагонали зоны, на которой значения переданного волнового вектора принимают значения  $\mathbf{q} = (\xi, -\xi, 0)$ .

Показано, что для эквивалентных точек в различных зонах Бриллюэна температурные зависимости для нормированной на единицу интенсивности диффузного рассеяния являются идентичными. Такая ситуация возможна только в том случае, когда соотношение величин полярных и неполярных вкладов в вызывающие диффузное рассеяние ионные смещения не зависит от температуры. Таким образом показано, что в кристаллах PMN в широком температурном интервале существует линейная взаимосвязь между величинами локальных упругих деформаций и локальной поляризации.

**В Главе 5** описана методика исследования фононных дисперсионных кривых в тонких пленках с использованием неупругого рассеяния рентгеновского излучения (НРРИ) и приведены результаты применения данной методики для изучения процессов формирования полярных нанобластей в сегнетоэлектриках релаксорах. Исторически первым для

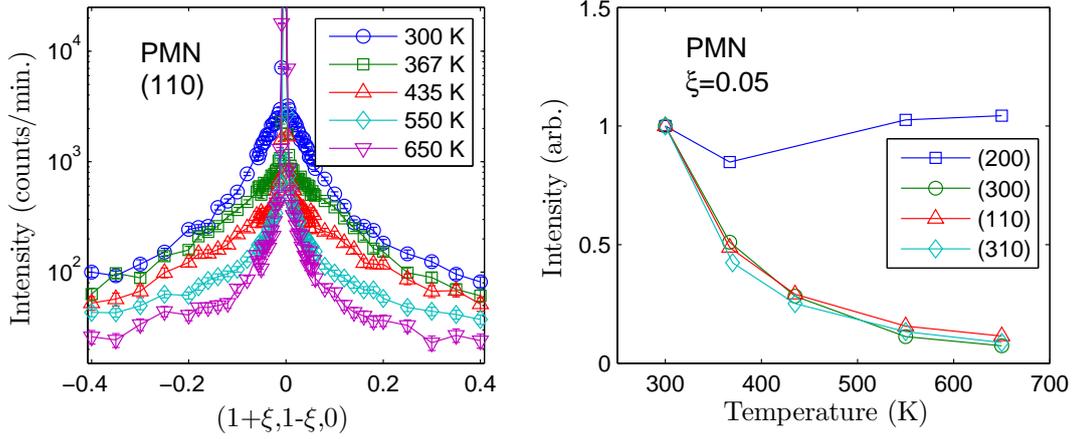


Рис. 4. Упругие сканы, снятые на PMN при различных температурах в зоне Бриллюэна (110) (слева) и температурные зависимости интенсивности для  $\xi = 0,5$  (справа).

изучения фононов в монокристаллах применялся и применяется метод неупругого рассеяния нейтронов, однако около пятнадцати лет назад стало возможным применять для этих целей также и неупругое рассеяние рентгеновского излучения. Очевидным преимуществом НРПИ являются существенно большие потоки, позволяющие, с одной стороны, сократить время проведения измерений, а с другой - использовать образцы на порядки меньшего объема. Около пяти лет велись дискуссии о возможности применения данного метода для анализа фононных дисперсионных кривых в тонких пленках, в данной работе такая возможность впервые подтверждена на практике. Эксперимент проводился на наиболее интенсивном из современных синхротронных источников SPring-8 (Япония) на экспериментальной линии BL35XU, также являющейся уникальной с точки зрения интенсивности и достижимого энергетического разрешения - порядка 1 мэВ, что сопоставимо с возможностями неупругого рассеяния нейтронов. При проведении экспериментов использованы эпитаксиальные пленки магнониобата свинца, выращенные на подложке из оксида магния. Применен метод рассеяния СИ под углами, близкими к углу полного отражения, за счет варьирования величины которого изменялась глубина проникновения излучения в образец. Показано, что методом НРСИ в пленках PMN толщиной 120 нм могут быть зарегистрированы как фононы в приповерхностных областях, так и фононы в объеме образца. Исследованы дисперсионные кривые поперечных акустических и оптических фононов в пленках PMN толщиной 120 нм с энергетическим разрешением  $\delta E = 1.2$  мэВ (Рисунок 5). Показано, что частота поперечной оптической моды в пленке существенно выше соответ-

ствующей частоты в массивных образцах PMN. Показано, что при охлаждении образца от  $T=800$  К до 250 К наблюдается монотонное увеличение интенсивности квазиупругого рассеяния, что свидетельствует о возможности образования полярных нанодоменов в образцах PMN столь малой толщины.

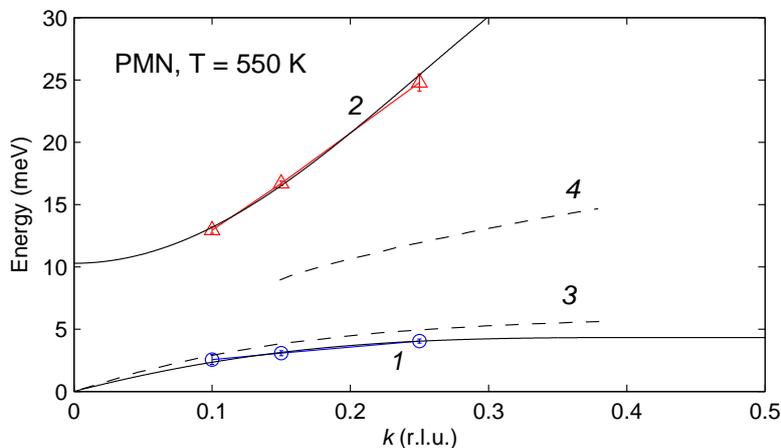


Рис. 5. Дисперсионные кривые для фононов в пленке PMN толщиной 120 нм. 1 и 2 - поперечные акустическая и оптическая моды в пленке PMN, 3 и 4 - поперечные акустическая и оптическая моды в массивном PMN.

Результаты пятой главы опубликованы в работах [4] и [5].

**В Заключение** сформулированы основные выводы диссертационной работы:

1. Кривые неупругого рассеяния нейтронов в модельном релаксоре магнониобате свинца в центре зоны Бриллюэна могут быть однозначно описаны моделью, подразумевающей двухмодовое поведение для мягкой моды. Одномодовая модель не позволяет совместно описать спектры рассеяния, полученные в разных зонах. Температурные зависимости для частот высокоэнергетической и низкоэнергетической ветвей мягкой моды подчиняются закону Кюри-Вейсса, причем для низкоэнергетической ветви критическая температура близка к критической температуре, получаемой из анализа данных диэлектрической спектроскопии.
2. Обнаружена выраженная анизотропия температурно-независимой компоненты диффузного рассеяния в магнониобате свинца и предложена модель, позволяющая описать такое рассеяние как рассеяние на упругих микродеформациях решетки, возникающих в результате композиционных неоднородностей материала. Показано, что наблюдаемые на эксперименте максимумы-спутники могут быть следствием конеч-

ного экспериментального разрешения и, таким образом, не являются прямым доказательством наличия сверхструктур или мезоскопического упорядочения.

3. Показано, что в различных зонах Бриллюэна температурные зависимости интенсивности диффузного рассеяния являются идентичными с точностью до нормировочного множителя, на основании чего однозначно следует вывод о линейной связи между величинами полярных и неполярных в кладов в ионные смещения в рамках модели мягкой моды с фазовым сдвигом или, что эквивалентно, о линейной связи локальной деформации и локальной поляризации в магнониобате свинца.
4. Разработана методика исследования фононных дисперсионных кривых в эпитаксиальных тонких пленках с использованием неупругого рассеяния жесткого синхротронного излучения. Экспериментально продемонстрирована возможность изучения фононных дисперсионных кривых в пленках толщиной 120 нм. При помощи данной методики проведено исследование тонких пленок модельного релаксора магнониобата свинца. Показано, что частота поперечной оптической моды в пленке существенно выше соответствующей частоты в массивных образцах PMN. Показано, что при охлаждении образца от  $T=800$  К до 250 К наблюдается монотонное увеличение интенсивности квазиупругого рассеяния, что свидетельствует о возможности образования полярных нанобластей в образцах PMN столь малой толщины.

#### Публикации в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК.

- [1] **Burkovsky, R.** Inelastic and quasielastic neutron scattering in  $\text{pbmg}_{1/3}\text{nb}_{2/3}\text{o}_3$  above the burns temperature [Text] / Burkovsky R., Vakhrushev S. B., Hirota K., Matsuura M. // Ferroelectrics. — 2010. — Vol. 400. — Pp. 372–386.
- [2] **Вахрушев, С. Б.** Двухмодовое поведение в релаксоре  $\text{pbmg}_{1/3}\text{nb}_{2/3}\text{o}_3$  [Текст] / Вахрушев С. Б., Бурковский Р. Г., Шапиро С., Иванов А. // Физика твердого тела. — 2010. — Т. 52. — С. 838–841.
- [3] **Бурковский, Р. Г.** Монте-карло моделирование и оптимизация трехосного нейтронного спектрометра для реактора пик [Текст] / Бурковский Р. Г., Вахрушев С. Б., Зворыкина О. И. и др. // Кристаллография. — 2007. — Т. 52. — С. 606–611.

- [4] **Филимонов, А. В.** Возможность формирования полярных нанобластей в тонких пленках магнониобата свинца [Текст] / Филимонов А. В., Вахрушев С. Б., Бурковский Р. Г., Рудской А. И. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. — 2009. — Т. 4 (88). — С. 99–106.
- [5] **Филимонов, А. В.** Локальные структурные искажения и образование полярных нанодоменов в тонких пленках сегнетоэлектриков релаксоров [Текст] / Филимонов А. В., Вахрушев С. Б., Бурковский Р. Г., Рудской А. И. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. — 2010. — Т. 3 (99). — С. 66–75.

### Прочие публикации по теме диссертации

- [6] **Бурковский, Р. Г.** Мягкая мода и диффузное рассеяние нейтронов в парафазе кристалла  $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$  [Текст] / Бурковский Р. Г., Вахрушев С. Б. // XVIII Всероссийская конференция по физике сегнетоэлектриков, 9-14 июня 2008 г., труды конференции. — С. 147.
- [7] **Burkovsky, R.** Diffuse neutron scattering in high-temperature phase of relaxor  $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$  [Text] / Burkovsky R., Vakhrushev S., Hirota K., Matsuura M. // 26-th European Crystallographic Meeting, 29 August – 02 September 2010, Darmstadt, Germany, conference abstractbook. — Pp. 214–215.
- [8] **Vakhrushev, S.** Formation and temperature evolution of the polar nanoregions in relaxors [Text] / Vakhrushev S., Shaganov A., Burkovsky R. et al. // Fundamental Physics of Ferroelectrics, February 10 – 13 2008, Williamsburg, VA, USA. — Pp. 88–89.
- [9] **Бурковский, Р. Г.** Мезоскопическая структура смешанного сегнетоэлектрика цирконата-титаната свинца [Текст] / Бурковский Р. Г., Филимонов А. В., Вахрушев С. Б. // Труды международного Политехнического симпозиума: Молодые ученые - промышленности Северо-Западного региона, 29 мая 2010, Санкт-Петербург. — С. 110–111.
- [10] **Курсков, А. В.** Диффузное и неупругое рассеяние синхротронного излучения в тонких пленках магнониобата свинца [Текст] / Курсков А. В., Бурковский Р. Г., Филимонов А. В., Вахрушев С. Б. // Труды международного Политехнического симпозиума: Молодые ученые - промышленности Северо-Западного региона, 29 мая 2010, Санкт-Петербург. — С. 108–110.