

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. А.Ф. ИОФФЕ

На правах рукописи

**ЮРКОВ АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ**

**ЭФФЕКТЫ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА В  
КРИСТАЛЛАХ КАЛОМЕЛИ**

Специальность 01.04.07 - физика конденсированного состояния

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук

Санкт-Петербург  
2008

Работа выполнена в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской Академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
главный научный сотрудник ФТИ РАН  
Марков Ю.Ф.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Соколов А.И.

доктор физико-математических наук,  
Смирнов М.Б.

Ведущая организация: Институт физики им. Киренского  
СО РАН

Защита диссертации состоится “\_\_” \_\_\_\_\_ 2008 г. в \_\_ часов  
на заседании диссертационного совета Д 002.205.01 при Физико-  
техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН по адресу: 194021,  
Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-  
технического института им. А.Ф. Иоффе РАН.

Автореферат разослан “\_\_” \_\_\_\_\_ 2008 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 002.205.01,  
кандидат физико-математических наук

Петров А.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Среди диэлектрических кристаллов имеется обширный класс кристаллов, для которых характерно возникновение, как правило при понижении температуры, спонтанной электрической поляризации (сегнетоэлектрики) или спонтанной деформации (сегнетоэластики). Исследование происходящих при этом физических процессов представляет фундаментальный и прикладной интерес.

Одним из наиболее ярких представителей класса сегнетоэластиков является хлорид одновалентной ртути — каломель. Простота кристаллической структуры этого кристалла, четкие проявления сегнетоэластического фазового перехода в нем, а также возможность описания соответствующего фазового перехода в рамках теории Ландау (по существу теории среднего поля для фононной подсистемы) делают его модельным сегнетоэластиком.

Кроме того, каломель — весьма уникальный кристалл с точки зрения практических приложений. При высокой прозрачности в широком спектральном диапазоне, включающем диапазон видимого света, в этом кристалле наблюдаются рекордные значения оптического двулучепреломления, величины упругой анизотропии, акустооптических констант, крайне низкие значения скорости одной из ветвей акустических волн, достигающие скорости звука в воздухе. Все эти особенности весьма важны для прикладной оптики, акустоэлектроники, акустооптики.

Применительно к фазовому переходу в кристалле каломели накоплен большой объем экспериментальной информации. Корректно теоретически описать этот фазовый переход и, основываясь на таком описании, рассмотреть большинство наблюдаемых явлений, в

том числе динамических и флуктуационных, — актуальная задача.

В связи с вышеизложенным, **целью** диссертационной работы является:

1. Построить адекватную эксперименту версию теории Ландау для описания сегнетоэластического фазового перехода в кристаллах каломели.
2. Применить описание, основанное на теории Ландау, для:
  - (a) эффектов в ядерной спиновой релаксации;
  - (b) эффектов в комбинационном рассеянии света;
  - (c) эффектов в инфракрасных спектрах;
  - (d) эффектов в диффузном рентгеновском рассеянии.

**Научная новизна работы.** Впервые получены следующие результаты:

1. Построена теория типа Ландау для фазового перехода в кристаллах каломели, адекватная экспериментальным результатам, что потребовало введения в разложение термодинамического потенциала членов шестого порядка. Разработана также версия теории Ландау при наличии внешнего электрического поля.
2. Рассмотрен вклад прямых процессов с участием мягкой моды в спин-решеточную релаксацию ядер хлора. Показано, что он является определяющим и удовлетворительно описывает эксперимент.
3. Рассмотрены спектроскопические характеристики комбинационного рассеяния света в кристаллах каломели. Выведены формулы, согласующиеся с экспериментом.

4. Рассмотрены эффекты фазового перехода в инфракрасных спектрах. Выведены соответствующие формулы, удовлетворительно согласующиеся с экспериментальными результатами.
5. Рассмотрено взаимодействие флуктуаций параметра порядка в кристаллах каломели через поле упругих напряжений. Показано, что такое взаимодействие заметно меняет параметры дисперсии флуктуаций.
6. Рассмотрены эффекты фазового перехода в диффузном рассеянии рентгеновского излучения. Объяснена природа ранее наблюдавшихся, но не интерпретированных линий рентгеновской дифракции, соответствующих  $Z$ -точкам зоны Бриллюэна.

**Научная и практическая значимость работы.** Результаты, полученные в диссертационной работе, представляют собой существенный вклад в физику сегнетоэластических фазовых переходов. Анализ с единых позиций довольно широкого круга явлений имеет значение как в чисто научном отношении, указывая на связь ряда экспериментов между собой и позволяя более целенаправленно планировать дальнейшие эксперименты, так и в прикладном отношении, давая инструмент для предсказания поведения кристаллов при их использовании в тех или иных технических устройствах.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Теоретическое описание в рамках теории Ландау фазового перехода в кристаллах каломели с учетом членов шестого порядка в разложении потенциала.
2. Учет влияния внешнего электрического поля на фазовый переход в названных кристаллах.

3. Анализ вклада прямых процессов с участием мягкой моды в спин-решеточную релаксацию ядер хлора.
4. Анализ спектроскопических характеристик комбинационного рассеяния света в кристаллах каломели в области фазового перехода.
5. Описание эффектов фазового перехода в инфракрасных спектрах.
6. Анализ взаимодействия термодинамических флуктуаций параметра порядка каломели через поле упругих напряжений.
7. Описание эффектов фазового перехода в диффузном рассеянии рентгеновского излучения и объяснение природы ранее наблюдавшихся, но не интерпретированных линий рентгеновской дифракции, соответствующих  $Z$ -точкам зоны Бриллюэна.

**Обоснованность и достоверность** результатов обеспечивается тем, что в своей основе все результаты получены из устойчивых принципов физики конденсированного состояния, а конкретное применение этих принципов осуществлялось в тесной связи с экспериментом.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: на Всесоюзной конференции по физике сегнетоэластиков (Ужгород, СССР, 1991 г.); на XVII Всероссийской конференции по физике сегнетоэлектриков (Пенза, Россия, 2005 г.); на пятом международном семинаре по физике сегнетоэластиков (Воронеж, Россия, 2006 г.); на XVIII Всероссийской конференции по физике сегнетоэлектриков (Санкт-Петербург, Россия, 2008 г.); на международной конферен-

ции "Диэлектрики-2008" (Санкт-Петербург, Россия, 2008 г.).

**Публикации.** По теме диссертации автором опубликовано восемь печатных работ в ведущих научных журналах [А1-А8].

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий ее объем составляет 144 страницы, включая 11 рисунков.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследований, сформулирована цель и научная новизна работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту, определена научная и практическая значимость работы.

**Первая глава** "Фазовый переход в кристаллах каломели и его описание в рамках теории Ландау" посвящена анализу эффектов, непосредственно связанных с описанием фазового перехода в рамках теории Ландау.

Первый параграф представляет собой обзор теоретических и экспериментальных работ, посвященных исследованию кристаллов каломели. Существовавшее ранее описание фазового перехода в этих кристаллах основывалось на разложении термодинамического потенциала с точностью до членов четвертого порядка [1,2] и приводило к существенному расхождению между экспериментом и теорией. В [А3] было показано, что причина расхождений в том, что фазовый переход является близким к трикритической точке и членов четвертого порядка в разложении не достаточно.

Во втором параграфе на основе симметричного анализа построено разложение термодинамического потенциала с точностью до членов шестого порядка, для которого выведены условия равновесия

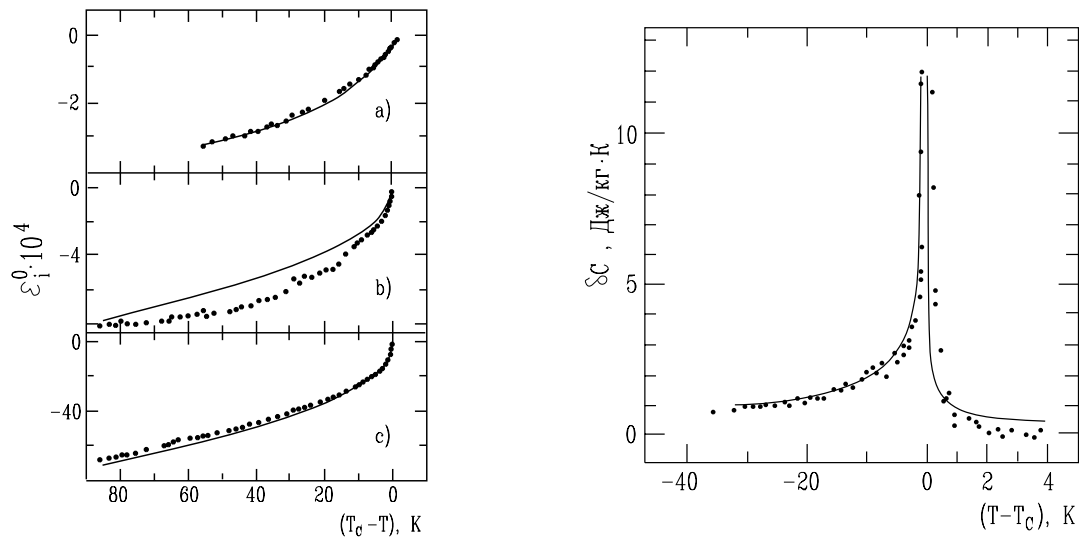


Рис. 1. Зависимость компонент спонтанной деформации  $\varepsilon_3(a)$ ,  $\varepsilon_1(b)$ ,  $\varepsilon_6(c)$  от температуры в низкосимметричной фазе (слева) и зависимость аномальной части теплоемкости от температуры (справа). Линии — расчет, точки — экспериментальные результаты. На графике теплоемкости в высокотемпературной фазе сплошной линией показана флуктуационная поправка в гауссовом приближении.

и устойчивости, получены формулы для температурного поведения основных термодинамических величин. Анализ экспериментальных данных показывает, что члены четвертой степени по параметру порядка  $\eta$ , перенормированные упругими взаимодействиями, оказываются близки к нулю, а фазовый переход — близким к трикритической точке. При этом  $\eta \sim (T_C - T)^{1/4}$ ,  $\varepsilon_i \sim (T_C - T)^{1/2}$ , а теплоемкость  $C_P \sim (T_C - T)^{-1/2}$ , что хорошо согласуется с экспериментальными данными (см. рис. 1.).

В третьем параграфе рассматриваются проявления фазового перехода в ядерном квадрупольном резонансе (ЯКР)  $\text{Cl}^{35}$ .



На основе теоретико-группового анализа симметрии окружения ядра хлора определен спин-гамильтониан ядра  $\text{Cl}^{35}$ , который, с учетом малой величины сдвига частоты ЯКР, приводит к зависимости  $\delta\omega_{NQR} \sim \eta^2$ . В эксперименте [3,4] наблюдается зависимость  $\delta\omega_{NQR} \sim (T_C - T)^{1/2}$ , откуда следует зависимость  $\eta \sim (T_C - T)^{1/4}$ , характерная для трикритического фазового перехода. Таким образом ЯКР эксперименты также ярко свидетельствуют о близости фазового перехода в каломели к трикритической точке.

Анализ аномалий, вызванных фазовым переходом в спин-решеточной релаксации, также позволяет добиться согласия с экспериментом (см. рис. 2.).

В четвертом параграфе рассматривается влияние фазового перехода на диэлектрическую проницаемость  $\epsilon$  кристаллов. Кристалл  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$  является "чистым" сегнетоэластиком и сильной аномалии диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  вблизи  $T_C$ , характерной для сегнетоэлектриков, в этом кристалле быть не может. Тем не менее, вблизи  $T_C$  возможна более слабая аномалия типа излома.

На основе теоретико-группового анализа получены дополнительные члены в разложении термодинамического потенциала, возникающие при наличии внешнего электрического поля, которые приво-

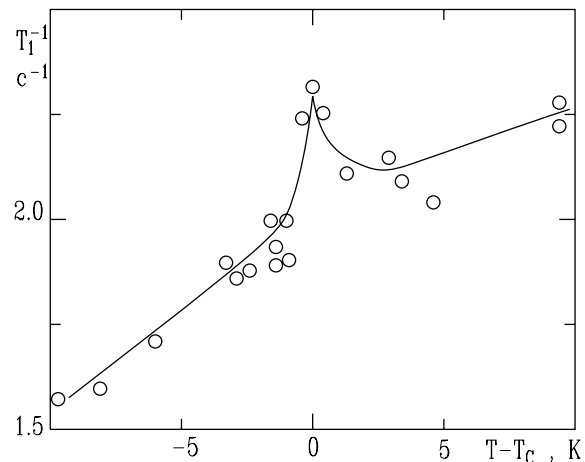


Рис. 2. Зависимость скорости спин-решеточной релаксации ядер хлора от температуры. Сплошная линия — расчет, точки — эксперимент [3].

дят ко вкладу в тензор диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{ij}$ , пропорциональному  $\eta^2$ . В диагональных компонентах эффект не наблюдаем, однако в компоненте  $\varepsilon_{xy}$  может наблюдаться, но лишь в монодоменизированном образце.

Вычисления дают зависимость  $\delta\varepsilon_{xy} = at^{1/2}$ , где  $t = (T_C - T)/T_C$ ,  $a = \text{const}$ , причем в доменах разного типа величина  $a$  имеет противоположный знак, а по абсолютной величине она порядка единицы.

В этом параграфе также обсуждается эффект фазового перехода в нелинейной диэлектрической проницаемости и сделана оценка сдвига температуры фазового перехода  $T_C$  под действием электрического поля. Зависимость  $T_C$  от поля определяется формулой  $\delta T_C = gE_x E_y$ , где константа  $g \sim 10^{-6} \text{K}/\text{Гс}^2$ .

В пятом параграфе рассматривается рамановское рассеяние света на мягкой фононной моде. Рассеяние света рассматривается общепринятым методом [5], как рассеяние на флуктуациях диэлектрической проницаемости кристалла. Динамика мягкой моды рассматривается

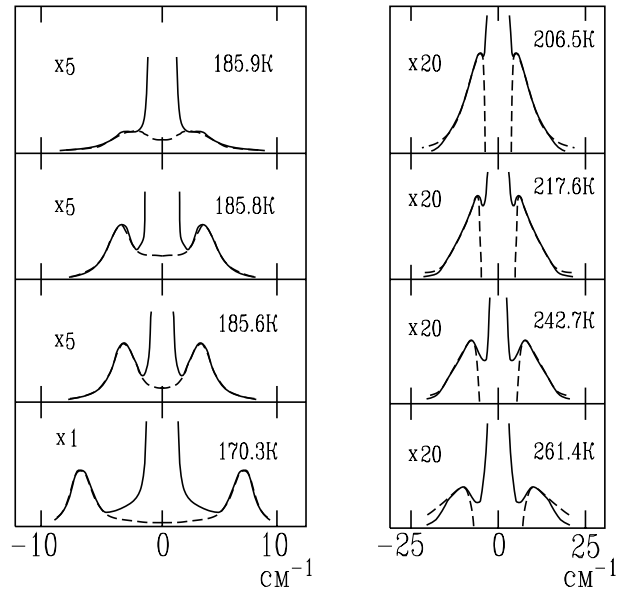


Рис. 3. Спектры комбинационного рассеяния на мягкой моде. Слева — низкосимметричная фаза (рассеяние первого порядка), справа — высокосимметричная фаза (рассеяние второго порядка). Пунктирные линии — теория, сплошные — эксперимент.

феноменологически как динамика флуктуаций параметра порядка фазового перехода. Как для высокотемпературной, так и для низкотемпературной фазы кристалла получено удовлетворительное согласие между расчетом и экспериментом (см. рис. 3.).

**Вторая глава** ”Динамика полярных фононных мод и эффекты в инфракрасных спектрах” посвящена анализу эффектов фазового перехода в инфракрасных спектрах кристаллов каломели и детальному теоретическому описанию эффекта возгорания новых линий инфракрасного поглощения в низкосимметричной фазе каломели, экспериментально обнаруженного в работе [6].

В первом параграфе рассматривается использованный метод теоретического описания эффектов фазового перехода в инфракрасных спектрах. Поскольку длина волны излучения много больше параметра решетки, распространение электромагнитных волн может описываться в рамках макроскопической электродинамики сплошной среды и, тем самым, задача сводится к определению эффектов фазового перехода в диэлектрической проницаемости на соответствующих частотах.

Во втором параграфе рассматривается влияние искажений решетки, вызванных фазовым переходом, на диэлектрическую проницаемость. Основной вклад в диэлектрическую проницаемость на инфракрасных частотах является решеточным и, таким образом, задача сводится к анализу влияния фазового перехода на динамику фононных мод. Интермодуляционный ангармонизм между ”замороженными” при фазовом переходе смещениями и колебаниями атомов на инфракрасных частотах приводит к смешиванию фононных мод высокосимметричной фазы, что приводит к появлению новых полюсов диэлектрической проницаемости, соответствующих возго-

рающим линиям поглощения.

В третьем параграфе выведенные ранее общие формулы применяются к конкретной структуре каломели. На основе теоретико-группового анализа определено, какие именно фононные моды смешиваются, на каких частотах появляются дополнительные полюса диэлектрической проницаемости, как меняются с температурой вычеты в этих полюсах (вычеты определяют интенсивность линии поглощения).

Также в этом параграфе обсуждается анизотропия диэлектрической проницаемости в базисной плоскости кристалла и возможность использования этой анизотропии для выделения возгорающих линий из фонового поглощения. Рассчитанные спектры сравниваются с экспериментальными, отмечается удовлетворительное согласие. Определяются параметры ангармонизма решетки.

В четвертом параграфе обсуждается связь эффектов фазового перехода в инфракрасных спектрах и эффектов в низкочастотной диэлектрической проницаемости кристалла. На основе этого определяется численное значение параметра  $a$ , введенного в четвертом параграфе первой главы.

**Третья глава** ”Термодинамические флуктуации параметра порядка кристалла каломели в высокотемпературной фазе”.

В первом параграфе обсуждаются методы теоретического описания флуктуаций параметра порядка. За исключением случая аномально низкой температуры фазового перехода, когда необходимо использовать методы квантовой статистики [7], теория таких флуктуаций сводится к теории классического флуктуирующего поля, формально эквивалентной трехмерной евклидовой квантовой теории поля, математический аппарат которой основан на технике кон-

тинуального интегрирования и фейнмановских диаграммах.

Во втором параграфе обсуждаются флуктуации параметра порядка каломели в гауссовом приближении и соответствующие поправки к теплоемкости и упругим модулям.

В третьем параграфе строится диаграммная техника, описывающая взаимодействие флуктуаций через поле упругих деформаций. Обсуждается роль однородных деформаций, выводятся формулы для пропагаторов и вершин.

В четвертом параграфе построенная ранее диаграммная техника применяется для нахождения температурной зависимости коррелятора флуктуаций второго порядка. Задача сводится к вычислению собственно-энергетической части  $\Sigma(\mathbf{k})$ , которая удовлетворяет уравнению Дайсона, в графическом представлении имеющему вид:

$$\textcircled{\Sigma} = \text{loop} + \text{loop with } \Gamma_3$$

где сплошные линии соответствуют пропагатору параметра порядка, а волнистые — упругому пропагатору.

Уравнение Дайсона решается в нулевом приближении по поправкам к вершине  $\Gamma_3$  с использованием следующего анзаца для полного пропагатора параметра порядка:

$$G_{int}(\mathbf{k}) = \frac{T}{\alpha_{ij}(\tau)k_i k_j + \beta(\tau)}. \quad (1)$$

С целью самосогласованности,  $\Sigma(\mathbf{k})$  представляется в виде разложения по степеням компонент вектора  $\mathbf{k}$  с точностью до членов второго порядка. В таком приближенном представлении уравнение

Дайсона сводится к системе нелинейных алгебраических уравнений, которая решается численными методами.

Проведенное исследование показывает, что с учетом взаимодействия через поле упругих деформаций параметры дисперсии флуктуаций, постоянные в гауссовом приближении, становятся функциями температуры (см. рис. 4.). Физической причиной такой зависимости является то, что на моды с разным значением волнового вектора действует разное среднее поле других фононных мод.

**Четвертая глава** ”Дифракция рентгеновского излучения на кристалле каломели с учетом термодинамических флуктуаций параметра порядка” посвящена изучению диффузного рентгеновского рассеяния, возникающего выше температуры фазового перехода.

В первом параграфе описывается связь рентгеновской дифракции с электронной плотностью кристалла. Обсуждается роль конечной степени когерентности падающего излучения и роль конечной апертуры детектора излучения.

Во втором параграфе обсуждается качественная физическая картина диффузного рассеяния на мягкой фононной моде и вычи-

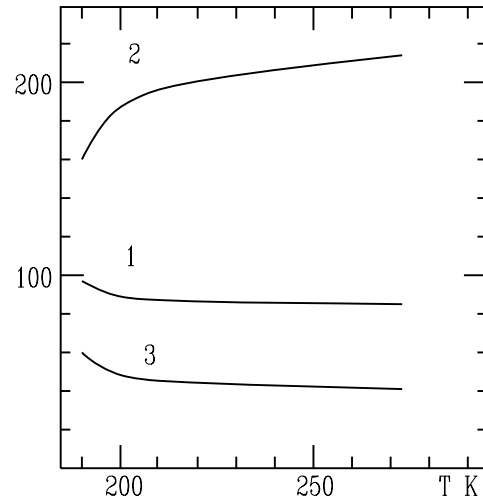


Рис. 4. Температурная зависимость параметров дисперсии  $\alpha_i$  (в относительных единицах) мягкой моды кристалла  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ . Цифры соответствуют индексу  $i$ . График для  $\alpha_1$  и  $\alpha_3$  изображен с увеличением по вертикали в масштабе 10:1 и 2:1 соответственно.

сляется двухточечный коррелятор электронной плотности, определяющий интенсивность рассеянного излучения. Электронная плотность представляется в виде суперпозиции атомных электронных плотностей, что, после ряда преобразований, позволяет выразить интенсивность дифрагированного излучения через производящий функционал связанных функций Грина флуктуирующего поля параметра порядка.

В гауссовом приближении производящий функционал выражается через пропагатор флуктуирующего поля, что в итоге дает выражение для интенсивности рассеянного излучения в виде суммы четырех вкладов: фундаментального рассеяния, имеющегося и при отсутствии флуктуаций; двух диффузных компонент, соответствующих двум  $X$ -точкам зоны Бриллюэна; диффузной компоненты, соответствующей  $Z$ -точке зоны Бриллюэна. Во всех компонентах рассеяния имеется мягкомодовый фактор Дебая-Валлера, который выражается через пропагатор.

В третьем параграфе обсуждается температурное поведение линий диффузного рассеяния рентгеновского излучения и их трансформация в фундаментальные линии ниже  $T_C$ .  $X$ -линии являются однофононными, и для них, с точностью до фактора Дебая-Валлера, амплитуда растет с приближением к  $T_C$  как  $T/(T - T_C)$ , а ширина уменьшается как  $(T - T_C)^{1/2}$ . Такое поведение коррелирует с экспериментально наблюдаемым [8-10].

$Z$ -линия имеет интермодуляционную природу и связана с рассеянием на биениях двух компонент параметра порядка. Эта составляющая, вообще говоря, существенно слабее диффузных компонент, отвечающим  $X$ -точкам. Однако, так как она находится в точках  $\mathbf{k}$ -пространства, где нет ни фундаментальных, ни  $X$ -компонент, она

вполне наблюдаема. Ранее такая компонента рассеяния была зарегистрирована экспериментально [8-10], однако ее природа была не выяснена. Температурное поведение ее амплитуды соответствует закону  $\sim T^2/(T-T_C)^{1/2}$ , а поведение ширины — закону  $\sim (T-T_C)^{1/2}$ .

Ниже температуры фазового перехода одна из диффузных X-линий трансформируется в фундаментальное рассеяние низкотемпературной фазы. Показано, что при длине волны излучения, применявшегося в экспериментах [8-10], интенсивность такой фундаментальной линии пропорциональна  $\eta^2$ , что согласуется с экспериментальными наблюдениями.

В **Заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы. Эти выводы соответствуют пункту ”Положения, выносимые на защиту”, приведенному в начале автореферата.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- A1. *V.S. Vikhnin, A.S. Yurkov*. Природа критического ускорения ядерной квадрупольной спин-решеточной релаксации в области фазового перехода в каломели // ФТТ. — 1991. — Т. 33, вып. 11. — С. 3348-3350.
- A2. *V.S. Vikhnin, A.S. Yurkov*. Anomalous NQR relaxation and resonant frequency shift near phase transition temperature in calomel crystal // Ferroelectrics. — 1992. — Vol. 130. — P. 257-262.
- A3. *M.E. Boiko, Yu.F. Markov, V.S. Vikhnin, A.S. Yurkov, B.S. Zadokhin*. Ferroelastic phase transition in univalent mercury halides in vicinity of tricritical point // Ferroelectrics. — 1992. — Vol. 130. — P. 263-283.



- A4. *Б.С. Задохин, Ю.Ф. Марков, А.С. Юрков*. Спектроскопия мягких мод в несобственных сегнетоэластиках  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ ,  $\text{Hg}_2\text{Br}_2$  // ЖЭТФ. — 1993. — Т. 104, вып. 2(8). — С. 2799-2814.
- A5. *А.С. Юрков*. Флуктуации в парафазе несобственных сегнетоэластиков с учетом косвенных взаимодействий через поле упругих деформаций // ЖЭТФ. — 2004. — Т. 126, вып. 3(9). — С. 704-711.
- A6. *А.С. Юрков*. О влиянии фазового перехода на инфракрасные спектры несобственного сегнетоэластика  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$  // ФТТ. — 2007. — Т. 49, вып. 8. — С. 1463-1469.
- A7. *А.С. Юрков*. Аномалии диэлектрической проницаемости несобственного сегнетоэластика  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$  вблизи температуры фазового перехода // Изв. РАН. Сер. физ. — 2007. — Т. 71, N 10. — С. 1392-1394.
- A8. *А.С. Юрков*. Диффузное рассеяние рентгеновского излучения на кристалле каломели вблизи температуры структурного фазового перехода // Письма в ЖЭТФ. — 2008. — Т. 87, вып. 10. — С. 623-626.

## ЛИТЕРАТУРА, ЦИТИРУЕМАЯ В АВТОРЕФЕРАТЕ

1. *Ч. Барта, А.А. Каплянский, В.В. Кулаков, Б.З. Малкин, Ю.Ф. Марков*. Спектры комбинационного рассеяния и структурный фазовый переход в несобственных ферроэластиках  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$  и  $\text{Hg}_2\text{Br}_2$  // ЖЭТФ. — 1976. — Т. 70, вып. 4. — С. 1429-1444.
2. *Б.С. Задохин, А.А. Каплянский, Б.З. Малкин, Ю.Ф. Марков*. О термодинамическом потенциале несобственных ферроэла-

- стиков  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ ,  $\text{Hg}_2\text{Br}_2$  // ФТТ. — 1980. — Т. 22, вып. 5. — С. 1555-1558.
3. *А.А. Капльанский, S.N. Popov, C. Barta.* // Proc. of the XX Congress AMPERE. — 1979. — P. 314.
  4. *С.Н. Попов.* Ядерный квадрупольный резонанс  $^{35}\text{Cl}$  и макроскопическая сверхструктура в кристалле  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$  // ФТТ. — 1997. — Т. 39, вып. 7. — С. 1287-1290.
  5. *В.Л. Гинзбург, А.П. Леванюк, А.А. Собянин.* Рассеяние света вблизи точек фазовых переходов в твердом теле // УФН. — 1980. — Т. 130, вып. 4. — С. 615-673.
  6. *А.А. Капльанский, М.Ф. Лимонов, Ю.Ф. Марков.* Возгорание линий в инфракрасном спектре кристаллов  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ , вызванное удвоением ячейки при фазовом переходе // Письма в ЖЭТФ. — 1983. — Т. 37, вып. 5. — С. 212-215.
  7. *О.Е. Квятковский.* Квантовые эффекты в виртуальных и низкотемпературных сегнетоэлектриках // ФТТ. — 2001. — Т. 43, вып. 8. — С. 1345-1362.
  8. *Ю.Ф. Марков, К. Кнорр.* Кластеры в модельных сегнетоэластиках  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$  // ФТТ. — 1999. — Т. 41, вып. 1. — С. 148-152.
  9. *Yu.F. Markov, K. Knorr, E.M. Roginskii.* Clusters induced by real and incipient ferroelastic phase transitions // Ferroelectrics. — 2002. — Vol. 265. — P. 67-78.
  10. *Ю.Ф. Марков, К. Кнорр, Е.М. Рогинский.* Температурное поведение параметра порядка и диффузного рассеяния в модельном сегнетоэластике  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$  // ФТТ. — 2005. — Т. 47, вып. 2. — С. 314-318.

Лицензия ЛР N 020593 от 07.08.1997

---

Подписано в печать 26.08.2008. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Печать  
цифровая.

Усл. печ. л. 1,00. Уч.-изд. л 1,00. Тираж 100 экз.

---

Отпечатано с готового оригинал-макета, представленного  
автором,

в Цифровом типографском центре Издательства  
Политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул. 29.

Тел.: 550-40-14

Тел./факс: 297-57-76