

УЖГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ЛЕЩЕНКО
Михаил Афанасьевич

УДК 537.226. 33 :537.226.4

**ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ
СПЕКТРОСКОПИЯ СЛАБОУПОРЯДОЧЕННЫХ
СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ**

01.04.10 – Физика полупроводников и диэлектриков

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Ужгород – 1993

113 27.998
Работа выполнена на кафедре микроэлектроники
Киевского политехнического института

Научный руководитель - доктор физико-математических наук,
профессор Поплаво Ю.М.

Официальные оппоненты - доктор физико-математических наук,
директор НИИ физики и химии твердого
тела Ужгородского университета,
профессор Височанский Ю.М.

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00815714 (Q)

- доктор физико-математических наук,
профессор Кошечая С.В.

Ведущая организация : - Институт полупроводников АН Украины

Защита состоится : "21" 10 1993 г. в 14⁰⁰ часов на
заседании Специализированного Совета К 068.07.02 в Ужгородском
государственном университете (294000 , г. Ужгород, ул. Горького,
46 , ауд. N _____).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке УжГУ .

Автореферат разослан "7" июня 1993 г.

Ученый секретарь Специализированного

Совета, доктор физ.-мат. наук, проф.

Блещкан Д.И.

Актуальность темы. В последние годы существенно повысился научный и практический интерес к исследованию явлений в слабоупорядоченных системах. К таким системам могут быть отнесены сегнетоэлектрики с размытым фазовым переходом (РФП): магнониобат свинца (PMN) [6,8], ниобат бария-стронция (SBN), цирконат-титанат свинца (ЦТС) и цирконат-титанат свинца с лантаном (ЦТСЛ) в области морфотропной фазовой границы [2,3,9,10], композиционно упорядочивающиеся соединения $Pb(B'_{1/2}B''_{1/2})O_3$ (индониобат свинца - ИНС, скандониобат свинца - СНС, и другие) [20], их твердые растворы [16,21]; различные композитные и многофазные вещества [7,19], а также KLT - монокристаллы танталата калия с нецентральными примесными ионами Li ($K_{1-x}Li_xTaO_3$) [8,12,14,17]. Нарушения дальнего порядка оказывают существенное влияние на динамику кристаллической решетки и диэлектрический отклик. Многообразие свойств слабоупорядоченных сегнетоэлектриков с одной стороны, и наличие у них общих черт (РФП, например) с другой, делает их чрезвычайно интересными объектами для фундаментальных физических исследований. Так общей чертой строения многих веществ с размытым фазовым переходом является наличие ионов разного сорта в одинаковых кристаллографических позициях. По мнению многих авторов именно беспорядок в этом расположении ионов ответственен за размытие фазового перехода. Ряд новых материалов с общей химической формулой $Pb(B'_{1/2}B''_{1/2})O_3$ (ИНС, СНС и другие) обладают уникальным свойством - они могут композиционно упорядочиваться, изменяя степень порядка в системе ионных подрешеток. Это дает возможность непосредственно изучать корреляции степени упорядоченности и степени размытия фазового перехода. Перечисленное подчеркивает актуальность исследования таких материалов.

Как показал опыт изучения слабоупорядоченных сегнетоэлектриков, для построения общей картины свойств и явлений весьма информативным является изучение комплексной диэлектрической проницаемости $\epsilon^*(\omega, T)$. Причем в слабоупорядоченных сегнетоэлектриках полная картина механизмов поляризации может быть составлена только с охватом широкого частотного интервала при исследовании диэлектрических спектров (ДС) от инфранизких частот (ИНЧ) до сверхвысоких (СВЧ) (10^{-3} - 10^{11} Гц) [2,6,8-10].

Однако, применение методов диэлектрической спектроскопии к изучению слабоупорядоченных сегнетоэлектриков сдерживается как не

приспособленными к специфике этих веществ экспериментальными методами, так и несовершенством методов обработки диэлектрических спектров. И очевидно, что для исследования таких веществ методы диэлектрической спектроскопии нуждаются в дальнейшем развитии, как с точки зрения экспериментальной базы, (ввиду необходимости исследовать в широком диапазоне частот вещества с большими значениями ϵ' и $\text{tg}\delta$), так и с точки зрения методов обработки диэлектрических спектров и получения из них физической информации об исследуемом веществе. Поэтому проблема развития методов диэлектрической спектроскопии и их применимости к исследованию указанных слабоупорядоченных сегнетоэлектриков, несомненно, является актуальной.

Кроме того, широкое практическое использование перечисленных материалов в различных областях техники делает актуальным также и материаловедческий аспект подобных исследований [7,9,10,19,21].

Таким образом, тема диссертационной работы представляется актуальной в научном и прикладном аспектах.

Целью диссертационной работы является выявление механизмов размытия сегнетоэлектрических фазовых переходов, а также механизмов поляризации и их частотно-температурной динамики в слабоупорядоченных сегнетоэлектриках методом диэлектрической спектроскопии.

В литературе термин "слабоупорядоченные" применяется для обозначения веществ у которых наблюдаются отклонения от строгой упорядоченности в расположении некоторых структурных элементов их кристаллического строения. Применительно к объектам настоящей работы под "слабоупорядоченностью" понимается:

- нарушение степени дальнего порядка (S) в расположении ионов В' и В'' по эквивалентным кристаллографическим позициям в соединениях типа $\text{Pb}(\text{B}'_{1/2}\text{B}''_{1/2})\text{O}_3$ (индониобат и скандониобат свинца), ионов Nb и Mg в $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$;

- неоднородности упорядочения в сложных перовскитах;

- случайное распределение по объему кристалла примесных нецентральных ионов Li в $\text{K}_{1-x}\text{Li}_x\text{TaO}_3$.

Указанные отклонения от упорядоченного состояния являются общим свойством приведенных объектов, что и позволило автору объединить их рассмотрение под общим названием и осуществить их изучение с единых позиций методом диэлектрической спектроскопии.

В соответствии с поставленной целью в диссертационной работе необходимо было решить следующие задачи :

1. Развить экспериментальные методы диэлектрической спектроскопии для исследования слабоупорядоченных веществ в широком диапазоне частот.
2. Разработать методы анализа диэлектрических спектров слабоупорядоченных сегнетоэлектриков на основе непосредственного определения функции распределения времен релаксации (ФРВР).
3. Исследовать влияние степени композиционного упорядочения на величину размытия фазового перехода (ФП) на примере кристаллов $PbIn_{1/2}Nb_{1/2}O_3$ (ИНС).
4. Исследовать поляризационные механизмы в кристаллах ИНС, сопровождающие процессы композиционного упорядочения.
5. Исследовать влияние неоднородностей в упорядочении на размытие ФП в ряду твердых растворов $x \cdot PMN - (1-x) \cdot PSN$.
6. Уточнить механизмы ФП и релаксационной динамики в кристаллах с нецентральной примесью ионом KLT.

Научная новизна работы состоит в следующем :

1. Рассмотрение задачи анализа диэлектрических спектров (ДС) как математически некорректно сформулированной, позволило объяснить нечувствительность классических методов анализа ДС к малым искажениям диэлектрического спектра и к погрешности его измерения.
2. На основе применения методов регуляризации Тихонова А. Н. к решению некорректных задач разработан ряд алгоритмов обработки ДС, дающих устойчивые функции распределения времен релаксации (ФРВР) и органически учитывающих погрешность экспериментальных данных.
3. Для частично упорядоченных кристаллов индониобата свинца (ИНС) из области тройной АСЭ-СЭ-ПЭ точки на фазовой T-S диаграмме обнаружено увеличение степени размытия фазового перехода и дополнительный диэлектрический вклад в низкотемпературной фазе.
4. Установлено соответствие температурного хода $(\epsilon'(T))^{-1}$ квадратичному закону для однородно упорядоченных монокристаллов ИНС, тогда как для неупорядоченных поликристаллических твердых растворов $x \cdot PMN - (1-x) \cdot PSN$ квадратичный закон не выполняется.
5. Изучена концентрационная зависимость степени размытия ФП $\epsilon' = \epsilon'(x)$ для ряда $x \cdot PMN - (1-x) \cdot PSN$ и обнаружено уменьшение ϵ' в области концентраций $x=0.3 - 0.6$.

6. При исследовании диэлектрических спектров монокристаллов $K_{1-x}Li_xTaO_3$ обнаружены аномалии вблизи некоторой особенной температуры T_0 : замедление динамики кластерного механизма поляризации; резкое изменение энергии активации ионного механизма релаксации; увеличение степени размытия ДС кластерного механизма.

7. Установлено соответствие особой температуры T_0 и линии переходов ПЭ-СЭ на фазовой $T_c - x$ диаграмме системы $K_{1-x}Li_xTaO_3$.

Практическая ценность работы заключается в том, что:

1. Разработан полуавтоматический диэлектрический спектрометр диапазона 500ГГц - 1.250ГГц, включающий в себя комплекс измерительной аппаратуры и пакет программного обеспечения для обработки данных. Спектрометр внедрен в лаборатории диэлектрической спектроскопии Киевского политехнического института и на кафедре полупроводников Ужгородского университета.

2. Разработаны численные методы анализа диэлектрических спектров на основе регуляризованных методов непосредственного определения ФРФР. Отлаженное программное обеспечение по методам может внедряться в научных подразделениях, занимающихся исследованием диэлектрических свойств твердых тел.

3. Получены экспериментальные данные о размытии ФП в композиционно упорядочивающихся соединениях (ИНС, x -PMN - $(1-x)$ -PSN) и кристаллах с нецентральной примесным ионом KLT, необходимые для развития представлений и совершенствования теории сегнетоэлектриков с неупорядоченной структурой.

4. Полученные экспериментальные диэлектрические спектры монокристаллов ИНС и ряда твердых растворов x -PMN - $(1-x)$ -PSN необходимы при отработке технологии изготовления этих материалов для нужд практического использования.

На заклиту выносятся следующие положения:

1. Задача непосредственного определения вида функции распределения времен релаксации (ФРФР) по диэлектрическому спектру $\epsilon''(\omega)$ относится к широкому классу так называемых "математически некорректно сформулированных". К ее решению применены методы регуляризации Тихонова А. Н. и построены устойчивые на экспериментальных диэлектрических спектрах алгоритмы вычисления ФРФР $Y(\Omega)$.

2. Сосуществование антисегнетоэлектрической (АСЭ) и сегнетоэлектрической (СЭ) фаз ответственно за дополнительный поляризационный механизм, и увеличение степени размытия фазового перехода в

ниакотемпературном состоянии ($T < T_m$) частично упорядоченных монокристаллов индониобата свинца (ИНС), близких к тройной точке АСЭ-СЭ-ПЭ на фазовой T-S диаграмме. Вдали от области тройной точки данный механизм отсутствует.

3. Гипотеза о нормальном распределении микрос областей по локальным температурам Кюри применима для феноменологического описания размытого фазового перехода в однородно упорядоченных кристаллах ИНС, и не применима для неоднородно упорядочивавшихся керамических твердых растворов $x \cdot \text{PMN} - (1-x) \cdot \text{PSN}$.

4. В кристаллах танталата калия с нецентральным примесным ионом лития $\text{K}_{1-x}\text{Li}_x\text{TaO}_3$ для $x > 0.05$ вблизи особой точки T_0 наблюдаются аномалии на температурных зависимостях времени релаксации кластерного и ионного поляризационных механизмов $\tau(T)$, степени размытия диэлектрического спектра кластерного механизма $\alpha(T)$.

5. Соответствие особой точки T_0 с фазовой диаграммой $T_c - x$ системы KLT, а также характер наблюдаемых вблизи T_0 аномалий позволяет связывать T_0 с точкой сегнетоэлектрического фазового перехода.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на 7 Всесоюзных и республиканских, 5 международных конференциях, симпозиумах и семинарах, в том числе:

III Междуведомственном семинаре-выставке "Получение, исследование и применение прозрачной сегнетокерамики", Рига, 19-21 апреля 1988г.

III Всесоюзной конференции по физико-химическим основам технологии сегнетоэлектрических и родственных материалов, Звенигород, 24-28 октября 1988г.

XII Всесоюзной конференции по физике сегнетоэлектриков, Ростов-на-Дону, сентябрь, 1989г.

International Conference "Electronic ceramics - production and properties", Riga, April 30 - May 2, 1990.

I Советско-польском симпозиуме по физике сегнетоэлектриков и родственных материалов, Львов, 4-8 июня, 1990г.

Всесоюзном совещании "Метрологическое обеспечение диэлектрических измерений", Иркутск, 21-23 мая, 1991г.

Всесоюзном научно-техническом совещании "Электрическая релаксация и кинетические явления в твердых телах", Сочи, 19-25 сентября 1991г.

International Conference "TFC'91", Riga, October 2-6, 1991.

IV Всесоюзной конференции "Актуальные проблемы получения и применения сегнето-, пьезо-, пьезоэлектриков и родственных им материалов", Москва, 2-4 декабря, 1991г.

Российско-Американском симпозиуме по сегнетоэлектричеству, Санкт-Петербург, апрель, 1992г.

XIII Конференции по физике сегнетоэлектриков, Тверь, 15-19 сентября, 1992г.

Украинско-Польском симпозиуме по физике сегнетоэлектриков, Вроцлав, сентябрь, 1992г.

Решением организационного и программного комитетов XIII конференции по физике сегнетоэлектриков (Тверь, 1992г.) исследования: "Диэлектрические свойства кристаллов Pb_2InNbO_6 с различной степенью порядка", "Размытие фазового перехода в твердых растворах на основе магнониобата свинца" в составе цикла работ по композиционно упорядочивающимся веществам признаны в числе лучших на конференции и отмечены премией.

Дубликации. По теме диссертации опубликована 21 печатная работа, перечень которых приведен в конце реферата.

Объем и структура диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и приложения, включая 117 страниц машинописного текста, 46 рисунков, 3 таблиц и перечень литературных источников, содержащий 149 наименований. Общий объем работы составляет 167 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована научная и практическая актуальность темы диссертации, сформулированы поставленные цели и решаемые в работе задачи, приведены основные положения, выносимые на защиту, изложено краткое содержание и структура работы.

В первой главе обоснована эффективность метода диэлектрической спектроскопии при исследовании сегнетоэлектрических и родственных им материалов. Отмечены особенности исследования слабоупорядоченных сегнетоэлектриков. В главе изложены экспериментальные методики измерения комплексной диэлектрической проницаемости в широком диапазоне частот от 10^4 до 10^{11} Гц.

Измерения ϵ' и ϵ'' являются косвенными, так как непосредственно в экспериментах по исследованию диэлектрических

спектров определяются емкости C , добротности Q , резонансные частоты f_0 , комплексные коэффициенты прохождения T^* , отражения R^* и другие характеристики измерительных ячеек, содержащих образец из исследуемого материала. При этом расчет ϵ' и ϵ'' прост лишь для сравнительно низкочастотных методов (до частот $\sim 10^6$ Гц), когда применимы квазистатические приближения и измерительный образец можно рассматривать как сосредоточенную емкость с потерями. При измерениях ϵ^* на более высоких частотах (свыше 10^7 Гц), при соизмеримости электрической длины образца с длиной электромагнитной волны, исследуемый образец уже приходится рассматривать как систему с распределенными параметрами. Это вызывает определенные вычислительные трудности, так как приходится строго решать электродинамические задачи.

Указанные выше сложности приводят к невозможности выполнить исследования во всем интересующем нас диапазоне частот, применяя лишь какую-то одну экспериментальную методику. Кроме того, выбор метода измерений определяется не только частотным диапазоном, но и величиной ϵ' , и уровнем потерь в исследуемом веществе. Поэтому первая глава диссертации посвящена рассмотрению особенностей различных экспериментальных методик, применявшихся автором при исследовании слабоупорядоченных сегнетоэлектриков в диапазоне частот $10^3 - 10^{10}$ Гц.

Особое внимание уделено методике метрового, дециметрового и сантиметрового диапазона, как наиболее информативной при исследовании слабоупорядоченных сегнетоэлектриков. В этих диапазонах исследования диэлектрических спектров $\epsilon^*(\omega)$ проводились по измерению комплексного коэффициента отражения Γ^* ТЕМ-волны от цилиндрического образца, помещенного в конце коаксиальной линии между центральным проводником и закорачивающим электродом. Изложен подход, основанный на электродинамическом рассмотрении задачи о распределении полей в измерительном конденсаторе, что позволяет отказаться от квазистатического приближения при вычислении ϵ^* . Такой подход практически снимает ограничения на величину измеряемых ϵ' , ϵ'' и одновременно повышает точность измерений [7,19]. Погрешность измерений в наших экспериментах не превышала 3% для ϵ' и 7% для ϵ'' . Описаны процедуры калибровки, позволяющие учитывать неидеальности коаксиального тракта и регистрирующей аппаратуры путем определения реальных матриц рассеяния $[S]$ в каждом конкретном эксперименте. Измерения по этой методике осуществлялись на полу-автоматизированном диэлектрическом спектрометре, раз-

работанном на базе измерителей комплексных коэффициентов передачи серии Р4-37 и ПЭВМ типа IBM PC-XT. Приведена структурная схема спектрометра.

На частотах свыше 7ГГц измерения выполнялись по классическим волноводным методам короткозамкнутого волновода и волноводного резонанса. В главе изложены алгоритмы для автоматизированной обработки данных по этим методикам, приведены структурные схемы измерительных установок.

Во второй главе рассмотрены различные методы анализа релаксационных диэлектрических спектров. Наряду с экспериментальными методиками измерения ϵ^* (изложенными в первой главе диссертации) они составляют неотъемлемую часть методов диэлектрической спектроскопии в целом [1,4,5,11,13,15,18]. С их помощью удается получать как качественную, так и количественную информацию, характеризующую тот или иной механизм поляризации, диэлектрический вклад, релаксационный процесс. В качестве такой информации может быть: время релаксации и его температурная зависимость $\tau(T)$, сила диэлектрического вклада $\Delta \epsilon(T) = \epsilon_0^T - \epsilon_\infty^T$, высокочастотный предел релаксации ϵ_∞^T и др.

Для слабоупорядоченных сегнетоэлектриков типичными являются, так называемые размытые диэлектрические спектры $\epsilon^*(\omega)$, то есть спектры, которые не могут быть описаны одним временем релаксации τ_0 в уравнении Дебая. В настоящей главе сделан обзор существующих методов анализа размытых диэлектрических спектров, проведено их сравнение. Отмечена слабая чувствительность классических методов (Коула-Коула, Коула-Дэвидсона и других аналогичных) к малым изменениям степени размытия диэлектрических спектров, их неустойчивость к конечной погрешности экспериментальных данных $\epsilon^*(\omega)$, а также отсутствие модельного обоснования применяемых эмпирических соотношений [1,5,11]. Некоторые преимущества в этом плане имеют методы, основанные на представлении о ФРФР [11]. Однако, наилучшие результаты могут быть достигнуты с применением методов прямого определения вида ФРФР непосредственно по экспериментальным данным $\epsilon^*(\omega)$, не требующие априорных гипотез о виде ФРФР. Изложена разработанная автором оригинальная методика последнего типа, основанная на квадратурном подходе [11,13,15,18].

Как оказалось в процессе исследования, важное влияние на получаемый результат имеет погрешность измерения диэлектрических спектров ϵ [15,18]. Анализ математических особенностей исследуе-

мой задачи показал существенную неустойчивость получаемых всеми перечисленными выше методами ФРВР (либо эмпирических коэффициентов) к конечным (даже малым) погрешностям диэлектрического спектра $\epsilon^*(\omega)$. На рис. 1 показано, как даже малая погрешность δ искажает до неузнаваемости функции распределения времен релаксации для модельного спектра Коула-Коула, рассчитываемые по обычным методикам. Это свойство является общим свойством так называемых математически некорректно сформулированных задач.

Автором показано, что к последним как раз и относится задача диэлектрической спектроскопии. Это объясняет слабую чувствительность всех перечисленных методов к малым искажениям самого диэлектрического спектра, слабую устойчивость к погрешностям $\delta(\omega)$. Показано, что все методы, в которых экспериментальному спектру априорно навязывается какая-либо предварительно детерминированная ФРВР, оказываются недостаточно надежными, так как эти методы не дают указаний относительно принадлежности этих ФРВР классу решений.

Для построения устойчивых алгоритмов определения ФРВР автором использована методика регуляризации Тихонова А. Н. Она применена к методу нахождения ФРВР с использованием интегрального преобразования Фурье, с одной стороны, и к квадратурному подходу, с другой [18]. В обоих случаях получаемые ФРВР оказывались устойчивыми к погрешностям в экспериментальном спектре $\epsilon^*(\omega)$. На рис. 2 показано результат расчета ФРВР по модельному диэлектрическому спектру Коула-Коула, в который вводилась случайная погрешность δ . Даже при уровне $\delta \sim 10\%$ "восстановленная" с применением регуляризованных процедур ФРВР оказывается устойчивой и незначительно отличается от теоретической (в пределах 3%).

Разработанные методики сохранили в себе все преимущества традиционных методов, а также приобрели новые выгодные качества. Они позволяют корректно определять по экспериментальным ДС их количественные характеристики: наиболее вероятное время релаксации $\tau_{нв}$, без привлечения априорных гипотез о типе релаксации; ФРВР и на основе ее силу диэлектрического вклада ($\epsilon_0 - \epsilon_\infty$) и значение высокочастотного предела дисперсии ϵ_∞ .

Привлечение мощных вычислительных машин для построения пространственных "температурных" зависимостей ФРВР $Y(\Omega, T)$ и карт их топографических срезов (смотри рис. 4, 5) позволяет на совершенно новом уровне исследовать температурную динамику времени релаксации и степени размытия диэлектрических спектров.

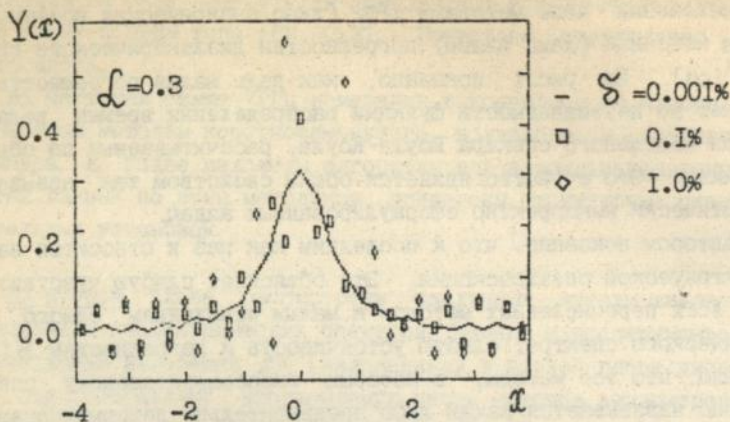


Рис.1. Иллюстрация математической некорректности задачи диэлектрической спектроскопии - неустойчивости решений $Y(x)$ к малой погрешности δ исходных данных $\epsilon^*(\omega)$ на примере диэлектрического спектра Коула-Коула.

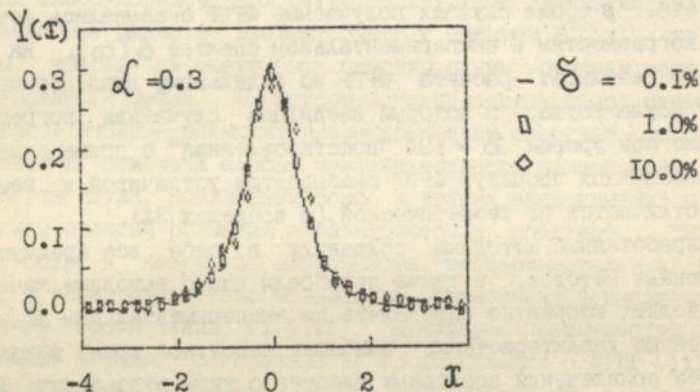


Рис.2. Применение регуляризованных методов к восстановлению ФРВР по модельному диэлектрическому спектру $\epsilon^*(\omega)$ Коула-Коула, в который искусственно введена случайная погрешность δ , моделирующая погрешность эксперимента.

Более того, эти методики позволяют естественным образом учитывать погрешность эксперимента и заранее планировать, эксперимент и прогнозировать его результаты.

Таким образом, в настоящей главе для анализа релаксационных механизмов поляризации и потерь в реальных диэлектриках предложены и развиты устойчивые (регуляризованные) методы непосредственного определения вида ФРРР по экспериментальным диэлектрическим спектрам $\epsilon''(\omega)$, не накладывающие никаких ограничений на вид ФРРР и учитывающие отмеченные математические особенности задачи диэлектрической спектроскопии. Тестирование этих методик на модельных и практических примерах показало их преимущества перед использовавшимися ранее: повышенную устойчивость к погрешности экспериментальных данных, высокую чувствительность к малым искажениям реальных диэлектрических спектров.

В третьей главе метод диэлектрической спектроскопии применен к исследованию влияния степени композиционного порядка на степень размытия фазового перехода, на динамику поляризационных механизмов в области РФП на примере монокристаллов $\text{PbIn}_{1/2}\text{Nb}_{1/2}\text{O}_3$ (ИНС) и ряда твердых растворов $x \cdot \text{PMN} - (1-x) \cdot \text{PSN}$.

Индониобат свинца (ИНС) $\text{PbIn}_{1/2}\text{Nb}_{1/2}\text{O}_3$ относится к широкому семейству композиционно-упорядочивающихся веществ. При $T_p = 1020^\circ\text{C}$ в кристаллах ИНС наблюдается фазовый переход типа композиционный порядок-беспорядок, и применение соответствующей термообработки позволяет получать для исследований образцы ИНС (PIN) с различной степенью упорядочения S .

Автором выполнены измерения температурно-частотных зависимостей $\epsilon''(\omega, T)$ в интервале температур $20 - 300^\circ\text{C}$ и частот $50\text{кГц} - 1.250\text{ГГц}$ [20]. Монокристаллические образцы ИНС любезно предоставлены для исследований сотрудником института физики твердого тела при госуниверситете г. Ростова-на-Дону к. ф. -м. н. Боковым А. А. Все температурные манипуляции над объектами осуществлялись таким образом, чтобы не повлиять на "замороженное" метастабильное состояние однородного упорядочения (разных образцов с разным значением S). В качестве объектов использовались сегнетоэлектрические образцы ИНС, полностью разупорядоченные (PIN1, $S=0$) путем отжига при $T > T_p$ ($T_o = 1030^\circ\text{C}$ в течение 20 мин.), и частично упорядоченные (PIN2, $S=0.6-0.7$) путем отжига при T_o и выдержки в течение 1.5 часов при $T_v < T_p$ ($T_v = 920^\circ\text{C}$).

В обоих случаях кристаллы ИНС претерпевают размытый сегнето-

электрический фазовый переход, причем температура максимума $\epsilon'(T)$ (на частоте 70кГц) [20] у кристалла PIN1 ($T_m=75^\circ\text{C}$) несколько выше, чем у PIN2 ($T_m=56^\circ\text{C}$). Для количественной оценки степени размытия ФП использовалась методика, основанная на описании температурной зависимости $\epsilon'(T)$ в области РФП степенным законом.

Исуповым В. А., Роловым Е. Н., Фришбергом В. Я. показано, что в области размытого фазового перехода диэлектрическая проницаемость определяется релаксационной поляризацией полярных и неполярных областей, а поведение $\epsilon^*(T)$ может быть описано динамической кластерной моделью, дающей для $\epsilon'(T)$ степенную зависимость:

$$1/\epsilon' = 1/\epsilon'_m + B \cdot (T - T_m)^n, \quad (1)$$

где ϵ'_m и T_m - максимальное значение диэлектрической проницаемости и температура, при которой оно достигается. В этой модели показатель n в точности равен 2. И для этого случая можно ввести параметр размытия ФП ϵ , связанный с константой B :

$$B = 1/(2 \cdot \epsilon'_m \cdot \epsilon^2) \quad (2)$$

В такой модели ϵ исчисляется в [К] и определяет статистическую ширину нормального распределения полярных областей по их локальным температурам Кюри θ_f :

$$\Phi(\theta_f) = (2 \cdot \epsilon \cdot \epsilon^2)^{-1/2} \cdot \exp[-(\theta_f - T_m)^2 / 2 \cdot \epsilon^2] \quad (3)$$

В работе показано, что во всей температурной области РФП, как выше так и ниже температуры максимума диэлектрической проницаемости T_m , зависимость $\epsilon'(T)$ в точности соответствует степенному закону (1). Значения параметров ϵ и n для различных кристаллов приведены в таблице 1. Близость n к 2 позволяет утверждать применимость для однородно упорядоченных кристаллов ИНС гипотезы о нормальном распределении микрообластей кристалла по локальным температурам Кюри (3) в предпереходной области.

Интересным является вопрос о влиянии степени композиционного порядка S на степень размытия фазового перехода ϵ . Для ИНС получено подтверждение выводов о немонотонном характере зависимости степени размытия ФП ϵ от степени композиционного порядка S : $\epsilon(S)$, так как обнаружена область роста ϵ при увеличении S . Такое поведение ϵ наблюдается в окрестностях тройной АСЭ-СЭ-ПЭ точки на фазовой T-S диаграмме кристаллов ИНС и связывается с сосуществованием АСЭ и СЭ фаз.

Для частично упорядоченных ($S=0.6-0.7$) образцов ИНС (PIN2, относящихся к области тройной точки), в низкотемпературной фазе обнаружен дополнительный диэлектрический вклад, природа которого также связывается с сосуществованием АСЭ и СЭ фаз при $T < T_m$. Нади-

чие этого механизма поляризации качественно отличает кристаллы из области тройной точки PIN2 от полностью разупорядоченных образцов PIN1. Сегнетоэлектрические образцы полностью разупорядоченного ИЭС (PIN1, $S=0$) при $T < T_m$ не содержат микрообластей АСЭ фазы и никаких дополнительных диэлектрических вкладов при $T < T_m$ в PIN1 не обнаружено.

Таблица 1

Характеристики размытия ФП и радиочастотного диэлектрического вклада монокристаллов $Pb_{1/2}Nb_{1/2}O_3$ с разной степенью порядка

Температура отжига, °C	Параметр порядка S	* T_m , °C	* $\epsilon'_m \times 10^{-3}$	T > T _m		T < T _m		U, эВ
				n	ϵ'' , К	n	ϵ'' , К	
1030 °C PIN1	0	75	7.2	1.91	81 - - 86	1.97	31	0.05- -0.07
920 °C PIN2	0.65- - 0.7	56	4.8	1.94	86- -95	1.80	28	0.03- -0.05

* - для частоты измерительного поля 10^4 Гц

Таким образом, для монокристаллов ИЭС из окрестности тройной АСЭ-СЭ-ПЭ точки на фазовой T-S диаграмме, гетерофазное состояние в области размытого фазового перехода приводит к увеличению степени размытия ФП, и оно ответственно за дополнительный поляризационный механизм в низкотемпературном состоянии ИЭС. Вдали от области тройной точки данный механизм отсутствует.

Другим важным объектом исследования настоящей главы был ряд твердых растворов $x \cdot PMN - (1-x) \cdot PSN$ (и не в последнюю очередь благодаря его широкому практическому использованию).

Ранее этот ряд исследовался лишь на фиксированных частотах в области низких частот. Исследований в сколько-нибудь широком частотном интервале $\epsilon^*(\omega, T)$ проведено не было. Поэтому, сами по

себе экспериментальные данные о температурно-частотной динамике $\epsilon^*(\omega, T)$ уже представляют интерес. Для практических нужд также важным является исследование степени размытия фазового перехода в ряду $x \cdot \text{PMN} - (1-x) \cdot \text{PSN}$.

Таблица 2

Характеристики размытия ФП в твердых растворах
ряда $x \cdot \text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3 - (1-x) \cdot \text{PbSc}_{1/2}\text{Nb}_{1/2}\text{O}_3$
(получены на частотах $\sim 10^4$ Гц)

Твердый раствор x	ϵ'_{max}	Tm, °C	T > Tm		T < Tm	
			n	ϵ', K	n	ϵ', K
x = 1.00 PMN	13000	-8	1.84	30 - - 38	1.59	16- -20
x = 0.70	19000	22.4	1.69	23 - - 38	2.5	18- -20
x = 0.55	20000	31.8	2.03- -1.95	23	2.5	15- -21
x = 0.45	23000	44.5	1.34	20 - - 33	3.1	6 - - 19
x = 0.25	25000	73.0	1.35	21 - - 30	2.1	9.5- -11.4
x = 0.00 PSN	21000	106.6	1.5- -1.66	26- -31	2.10	14- -16

Объекты для исследований были переданы д. ф. -м. н. Клиным Н. К. из Санкт.-Петербургского ФТИ им. Иоффе. Для измерений на поверхности образцов наносились вжиганием из паст серебряные электроды. Образцы всех концентраций x в одинаковых условиях длительное время отжигались при T=700-800°C для установления во всех образцах одинаковых условий в отношении композиционного упорядочения. Од-

нако, специальные меры увеличивающие однородность упорядочения по объему не применялись.

Во всей области концентраций x твердые растворы $x \cdot \text{PMN} - (1-x) \cdot \text{PSN}$ претерпевают размытый фазовый переход. Для количественной оценки степени размытия ФП использовалось соотношение (1). Величины n и ϵ' определялись методом линейной регрессии по НЧ экспериментальным зависимостям $\epsilon'(T)$ и сведены в таблицу 2.

Из таблицы 2 видно, что практически для всех x показатель степени n значительно отличается от 2, то есть $1/\epsilon'$ зависит от температуры по степенному, однако не квадратичному закону. Это значит, что для имеющегося ряда твердых растворов $x\text{PMN} - (1-x)\text{PSN}$ в области РФП наблюдаются значительные отклонения от нормального распределения локальных температур Кюри (3).

В качестве причины этих отклонений рассматривается неоднородность S по объему исследованных образцов. Действительно, для однородно упорядоченных монокристаллов ИНС соответствие $n=2$ строго соблюдается, а для неоднородно упорядоченных образцов $n \neq 2$. Другими авторами эта закономерность наблюдалась и для других соединений. В случае же твердых растворов $x \cdot \text{PMN} - (1-x) \cdot \text{PSN}$ однородного упорядочения видимо добиться не удастся, так как не удается его добиться и в самом PMN. Высказывается предположение о том, что неоднородности упорядочения могут быть причиной дополнительного размытия фазового перехода.

В четвертой главе исследованы диэлектрические спектры монокристаллов $K_{1-x}Li_xTaO_3$ (KLT). Экспериментальные данные, описываемые в настоящей главе, получены в интервале частот $10^3 - 10^{40}$ Гц и температур 80 - 320К.

Монокристаллы танталата калия с литием были выращены в Ленинградском ФТИ им. Иоффе Сырниковым П. П. и любезно предоставлены д. ф. - м. н. Кшиным Н. К. Реальное содержание лития в $K_{1-x}Li_xTaO_3$ определено авторами кристаллов из данных по содержанию лития в шихте, использованной для выращивания кристаллов. Образцы доводились до требуемых размеров шлифовкой, на их грани были нанесены электроды вжиганием серебра из паст. Затем образцы были термообработаны. Суть термообработки - в длительной выдержке образцов при температуре 700 - 800°C с последующим медленным охлаждением. Термообработка осуществлена сотрудниками лаборатории проф. Шильникова А. В. из Волгоградского инженерно-строительного института.

В эксперименте снимались зависимости $\epsilon^*(\omega, T)$ в цикле нагре-

ва-охлаждения со скоростью не более 0.15K/мин. В области частот менее 20МГц измерения проводились на фиксированных частотах, а в диапазоне 20МГц - 4ГГц в каждой температурной точке снимался весь частотный спектр. Подробные экспериментальные данные, полученные в области метровых, дециметровых и сантиметровых длин волн, позволили обнаружить ряд аномалий вблизи некоторой особой точки T_0 .

Применение метода Коула-Коула для обработки диэлектрических спектров KLT для $x=0.10$, $x=0.14$ позволило обнаружить максимумы на температурной зависимости параметра размытия ДС $\mathcal{L}(T)$ вблизи некоторой точки T_0 [17]. Для $x=0.05$ на зависимости $\mathcal{L}(T)$ обнаружен рост \mathcal{L} с понижением температуры. По аналогии с $x=0.10$ и 0.14 можно предположить и для $x=0.05$ существование аналогичного максимума при $T_0 < 80K$.

Однако, как отмечено в главе 2, эмпирический подход Коула - Коула не дает наглядного представления о частотном распределении релаксирующих объектов. Восполнить этот недостаток позволяют методы непосредственного определения функций распределения времен релаксации (ФРВР) $Y(\Omega)$. Для построения ФРВР, отвечающих размытому релаксационному процессу III в KLT, автор использовал регуляризованный квадратурный подход. Полученные с его помощью ФРВР $Y(\Omega)$ представлены на рис. 3. Пространственные температурно-частотные поверхности ФРВР $Y(\Omega, T)$ для $x=0.14$ изображены на рис. 4.

Температурная динамика ФРВР вблизи T_0 подтверждает вывод о том, что с приближением к T_0 степень размытия релаксационного процесса III возрастает. При этом релаксационный процесс II остается практически неразмытым во всем температурном интервале. Эти результаты хорошо соответствуют с выводами о степени размытия ДС сделанными по методу Коула-Коула [8,17].

На рис. 5 представлены проекции линий уровня (так называемые топографические срезы) пространственных поверхностей ФРВР для кластерного механизма поляризации в KLT. Анализ топограмм позволяет детально проследить температурные изменения параметров диэлектрического спектра KLT: степени размытия и среднего времени релаксации - τ .

По экстремумам ФРВР $Y(\Omega)$, полученным для различных температур, легко фиксируемым по топограммам, построены температурные зависимости τ для каждого из наблюдавшихся в эксперименте релаксационных процессов $\tau_i(T)$ (рис. 6). Обращает на себя внимание температурная точка T_0 . Для кристаллов $K_{1-x}Li_xTaO_3$ с $x=0.14$ $T_0=115K$ является точкой излома зависимости $\tau_{II}(T)$ - времени ре-

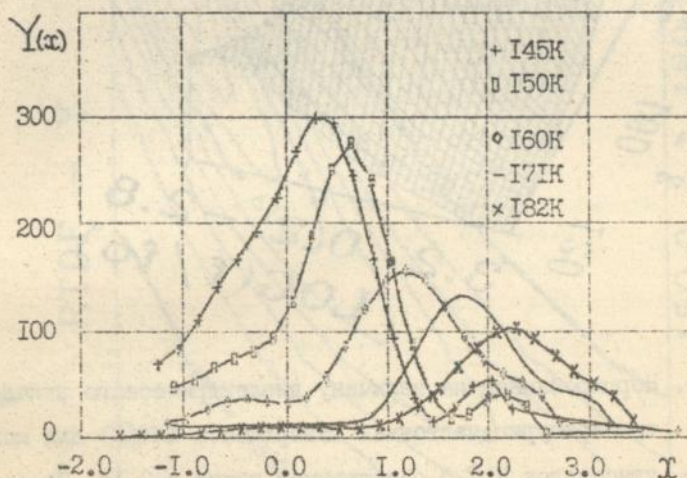
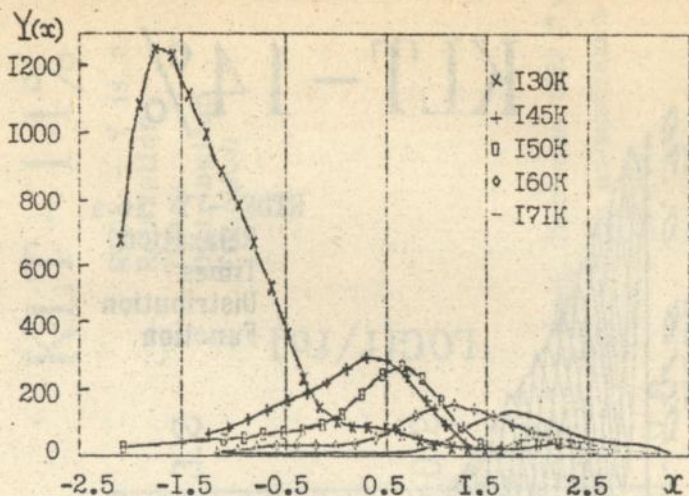


Рис.3. Функции распределения времён релаксации $Y(x)$ /в абсолютных значениях/ для монокристаллов KLT с $x=0.14$ для различных температур. По оси абсцисс $x = \lg(t/t_0)$, $t_0 = 10^6$ Гц.

KLT-14%

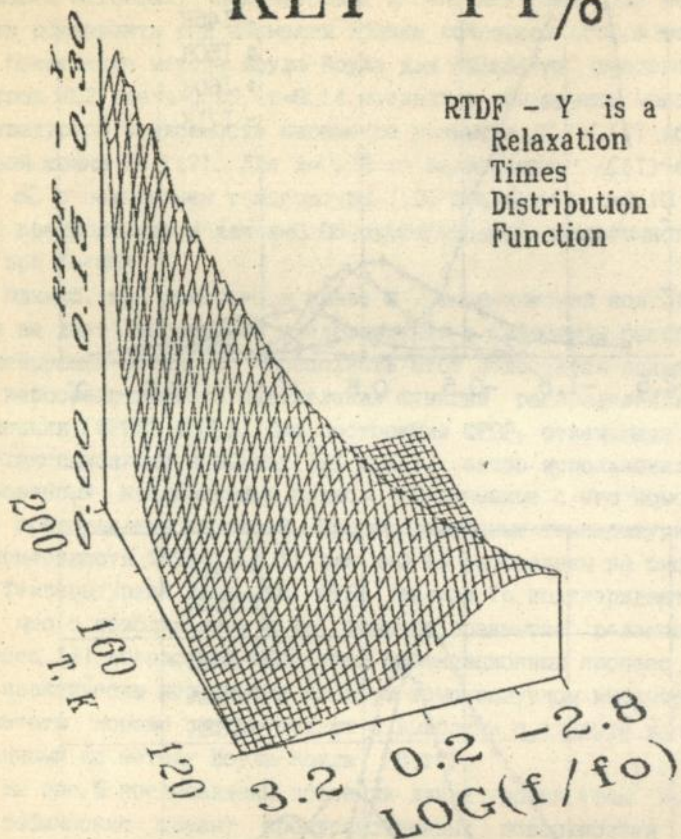


Рис.4. Нормированная на величину диэлектрического вклада температурно-частотная поверхность $Y(s, T)$ для монокристаллов KLT с содержанием лития $x=0.14$. По оси абсцисс $s = \lg(f/f_0)$, $f_0 = 10^6$ Гц.

RTDF - Y

KLT-14%

RTDF - Y is a
Relaxation
Times
Distribution
Function

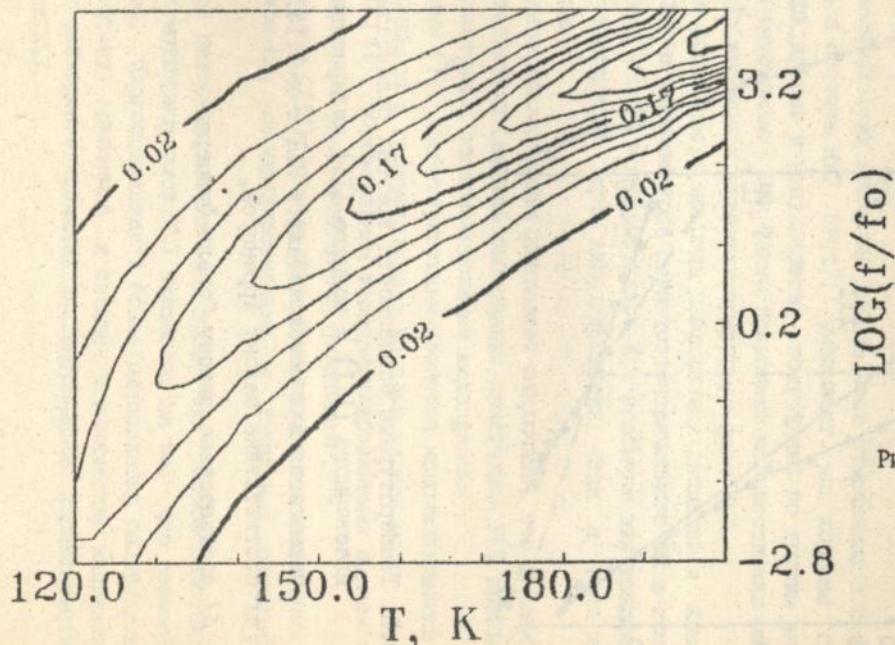


Рис. 5 Топограмма ФРВР $Y(v, T)$
для монокристаллов KLT
($x=0.14$).
 $v = \lg(f/f_0)$
 $f_0 = 10^6 \text{ Гц}$

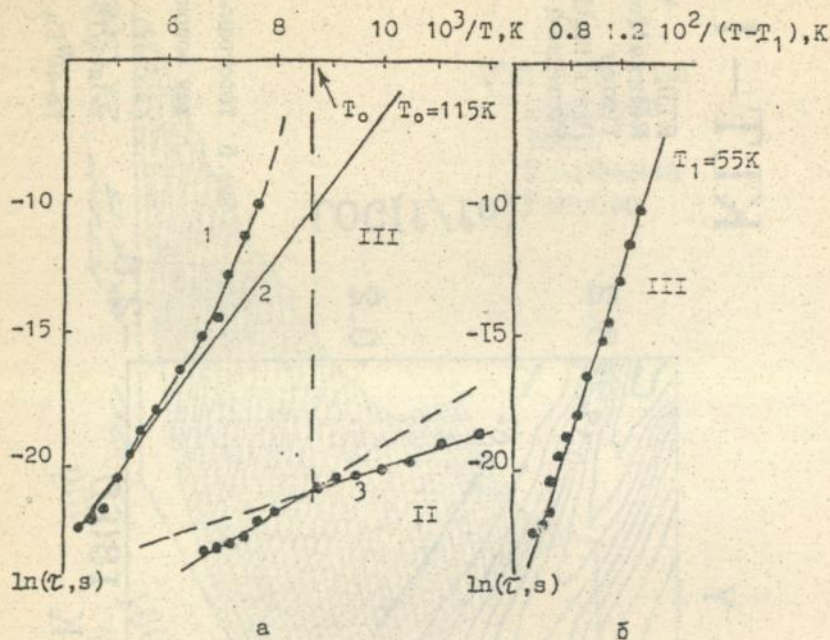


Рис.6. Температурные зависимости времени релаксации для кластерного (III) и ионного (II) поляризационных механизмов для монокристаллов KLT с $x=0.14$.

- а/ соответствие закону Аррениуса,
- б/ соответствие закону Фогеля-Фулчера.

лаксации ионного (II) механизма; вблизи T_0 на радио частотах наблюдается аномальное замедление динамики кластерного (III) механизма. Параметр Кюри-Вейсса θ , обычно определяемый из ИЧ данных по зависимости $1/\epsilon'$ от T , также оказывается близким к 115К.

Аномалии на температурной зависимости $\chi(T)$ аналогичные тем, что представлены на рис. 6 для $x=0.14$, наблюдались также и для монокристаллов KLT с $x=0.05$ и 0.10 .

Вблизи T_0 наблюдаются также и аномалии на температурной зависимости степени размытия ДС $\mathcal{L}(T)$ (в привычных терминах Коула-Коула) для $x=0.05$ ($T_0 < 80\text{K}$), $x=0.10$ ($T_0 = 100\text{K}$), $x=0.14$ ($T_0 = 115\text{K}$).

Сопоставление этих значений T_0 для всех отмеченных x с фазовой диаграммой системы KLT [8,17] указывает на хорошее соответствие наших данных и результатов, полученных по другим экспериментальным методикам. Эти факты позволяют количественно разделить точкой T_0 высоко- и низкотемпературную фазы KLT.

В работе обсуждается природа наблюдаемых аномалий и возможная связь T_0 с температурой сегнетоэлектрического \overline{QI} в системе KLT. Отмечено, что ДС монокристаллов KLT необычны для традиционных сегнетоэлектриков: как типа смещения, так и типа порядок-беспорядок.

Проведенное исследование позволяет заключить, что диэлектрические характеристики термообработанных кристаллов KLT определяются тремя различными поляризационными механизмами:

- фононным (I), характеризующим свойства кристаллической решетки и находящимся в соответствии с моделью мягких мод;
- ионным (II), образованным термоактивированными перескоками отдельных ионов Li в многоминимумном потенциале;
- кластерным (III), обусловленным термоактивированными перескоками ионов Li, скоррелированными в локальных областях - кластерах.

Сравнение диэлектрических спектров как термообработанных, так и обычных монокристаллов KLT указывает на то, что термообработка, видимо, благоприятствует более однородному распределению примеси по объему кристалла и снимает механические напряжения, что облегчает наблюдение аномалий диэлектрических характеристик в монокристаллах KLT.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. С учетом особенностей слабоупорядоченных сегнетоэлектриков подобран комплекс экспериментальных методов, позволяющий проводить исследования ϵ^* в диапазоне частот $10^4 - 10^{10}$ Гц. Особое внимание уделено диапазонам метровых, дециметровых и сантиметровых длин волн. Автором развит подход к коаксиальным методам измерений, позволивший не накладывать никаких ограничений на величину измеряемых ϵ' и $\text{tg}\delta$. На его основе разработан полуавтоматический диэлектрический спектрометр диапазона 500кГц-1.250ГГц.

2. При рассмотрении существующих классических методов анализа диэлектрических спектров (ДС) и методов непосредственного учета функции распределения времён релаксации (ФРВР), отмечены их общие недостатки: слабая чувствительность к малым изменениям степени размытия ДС и неустойчивость к малым конечным погрешностям их измерения. Причина этих "неудач" классических методов кроется в математических свойствах самой задачи определения параметров размытия ДС либо ФРВР, так называемой задачи диэлектрической спектроскопии. Показано, что последняя относится к классу математически некорректно сформулированных задач.

3. В математике известны методы регуляризации Тихонова А. Н. для решения математически некорректных задач. В работе проведен анализ и показана их применимость к решению задачи диэлектрической спектроскопии, то есть к получению устойчивых ФРВР $Y(\Omega)$ по экспериментальным диэлектрическим спектрам $\epsilon^*(\omega)$.

4. На основе методов регуляризации Тихонова А. Н. предложены два подхода к решению задачи диэлектрической спектроскопии: с применением регуляризации решений уравнения типа свертки, и с применением регуляризации к квадратурному подходу. Достоинство методов - в получении устойчивых ФРВР по ДС даже с высоким уровнем погрешности (10-20%). Методики учитывают реальную экспериментальную погрешность и позволяют заранее планировать эксперимент и прогнозировать его результаты. Программное воплощение этих методик протестировано как на модельных, так и на практических задачах.

5. На практике показана эффективность методов диэлектрической спектроскопии (экспериментальных подходов к измерению $\epsilon^*(\omega, T)$ и методов анализа ДС) при исследовании эффектов влияния композиционного упорядочения на диэлектрические свойства таких "слабоупорядоченных" веществ, как индониобат свинца и ряд твердых растворов $x \cdot \text{PMN} - (1-x) \cdot \text{PSN}$; а также эффектов упорядочения в подсистеме нецентральных ионов Li в KLT. Полученные экспериментальные диэлектрические спектры этих веществ имеют самостоятельное научное и прикладное значение.

6. В монокристаллах индониобата свинца (ИНС) в области тройной АСЭ-СЭ-ПЭ точки на фазовой T-S диаграмме обнаружена аномальная область роста степени размытия $\Delta T \epsilon'$ с увеличением степени композиционного порядка S, что подтверждает результат других авторов о немонотонном характере зависимости $\epsilon'(S)$. В диэлектрических спектрах этих образцов ИНС обнаружен дополнительный диэлектрический вклад при $T < T_m$, свойственный лишь кристаллам из окрестности тройной точки. Вдали от области тройной точки этот поляризационный механизм отсутствует. Физическое объяснение наблюдаемым явлениям может быть дано в рамках представлений о сосуществовании в индониобате свинца антисегнетоэлектрической и сегнетоэлектрической фаз при $T < T_m$.

7. Для однородно упорядочивающихся монокристаллов ИНС показано соответствие их диэлектрической проницаемости квадратичному закону:

$$1/\epsilon' = 1/\epsilon'_m + B \cdot (T - T_m)^n, \quad n=2,$$

что указывает на справедливость для этих объектов гипотезы о нормальном распределении микрорегионов по локальным температурам Кюри. На примере неоднородно упорядочивающихся твердых растворов $x \cdot \text{PMN} - (1-x) \cdot \text{PSN}$ показано, что неоднородности в упорядочении искажают подобное распределение и приводят к дополнительному размытию фазового перехода.

8. Впервые непосредственно по экспериментальным диэлектрическим спектрам $\epsilon^*(\omega, T)$ рассчитаны функции распределения времен релаксации (ФРВР) $Y(\Omega, T)$ для монокристаллов KLT с $x=0.10$ и $x=0.14$, и изучена их температурная эволюция.

Применение комплекса методов диэлектрической спектроскопии и

современных алгоритмов определения ФРВР к изучению монокристаллов KLT ($x > 0.05$) позволило обнаружить особую точку T_0 , подтверждающую существование ФП в кристаллах с нецентральной примесью ионом $K_{1-x}Li_xTaO_3$ для $x > 0.05$. Вблизи T_0 наблюдается: замедление релаксационной динамики кластерного механизма поляризации по типу критического; изменение энергии активации ионного механизма релаксации в KLT; увеличение степени размытия ДС кластерного механизма поляризации (III) при практически "неразмытом" ДС ионного (II) механизма.

9. Сравнение диэлектрических спектров как термообработанных, так и обычных монокристаллов KLT указывает на то, что термообработка, видимо, благоприятствует более однородному распределению примеси по объему кристалла и снимает механические напряжения, что облегчает наблюдение аномалий диэлектрических характеристик в монокристаллах KLT.

Проведенное исследование позволяет заключить, что диэлектрические характеристики термообработанных кристаллов KLT определяются тремя различными поляризационными механизмами:

- фононным (I), характеризующим свойства кристаллической решетки и находящимся в соответствии с моделью мягких мод;
- ионным (II), образованным термоактивированными перескоками отдельных ионов Li в многомиминимном потенциале;
- кластерным (III), обусловленным термоактивированными перескоками ионов Li, скоррелированными в локальных областях - кластерах.

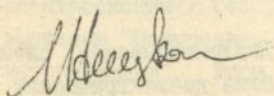
Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Лещенко М. А., Бовтун В. П., Поплавко Ю. М. Диэлектрическая СВЧ дисперсия в пьезоэлектрических кристаллах триглицинсульфата, легированных зланином (АТГС) // Диэлектрики и полупроводники. - 1988. - Вып. 33. - С. 10-12.
2. Поплавко Ю. М., Бовтун В. П., Лещенко М. А. Исследование сегнетоэлектриков с размытым фазовым переходом методом диэлектрической спектроскопии // Тез. докл. III-Международного семинара-выставки "Получение, исследование и применение прозрачной сегнетокерамики". Рига, 19-21.04.1988г. Ч. 2. - Рига: ЛГУ, 1988. - С. 161-163.

3. Поплавко Ю. М., Бовтун В. П., Лещенко М. А. Сравнение диэлектрических спектров сегнетоэлектриков типа смещения, порядок-беспорядок и с размытым фазовым переходом // Теор. докл. III-Всесоюзной конф. по физ.-хим. основам технологии сегнетоэлектрических и родственных материалов. Звенигород, 24-28 октября, 1988г. - М.: Наука, 1988. - С. 137.
4. Лещенко М. А., Поплавко Ю. М., Бовтун В. П. и др. Дисперсия диэлектрической проницаемости кристаллов диглициннитрата // ФТТ. - 1989. - Т. 31, N1. - С. 286-289.
5. Лещенко М. А. Исследование комплексной диэлектрической проницаемости кристаллов диглициннитрата в диапазонах радиочастот и СВЧ // Диэлектрики и полупроводники. - 1989. - Вып. 35. - С. 12-16.
6. Поплавко Ю. М., Лещенко М. А., Бовтун В. П. Диэлектрическая спектроскопия слабоупорядоченных сегнетоэлектриков // Теор. док. XII-Всесоюзной конференции по физике сегнетоэлектриков. Т. 1. - Ростов-на-Дону: РГУ, - 1989. - С. 13.
7. Поплавко Ю. М., Бовтун В. П., Заворотный В. Ф., Лещенко М. А. Диэлектрические и теплофизические свойства пьезокомпозитов // Диэлектрики и полупроводники. - 1990. - N37. - С. 3-8.
8. Лещенко М. А., Поплавко Ю. М., Бовтун В. П. Диэлектрическая спектроскопия слабоупорядоченных сегнетоэлектриков // Изв. АН СССР. Сер. Физическая. - 1990. - Т. 54, N4. - С. 607-613.
9. Poplavko Yu. M., Leschenko M. A., Bovtun V. P. Microwave absorption in disordered ferroelectrics // Abstr. I Int. Conf. ECPP'90. Riga, 30.04-2.05.90. - Riga: Inst Sol. State Phys., 1990. - P. 43.
10. Poplavko Yu. M., Leschenko M. A., Bovtun V. P. Microwave absorption in disordered ferroelectrics // Proc. I Int. Conf. ECPP'90. Riga, 30.04-2.05.90. - Riga: Inst Sol. State Phys., 1990. - P. 128-130.
11. Leschenko M. A., Poplavko Yu. M. Dielectric spectrum analysis of ferroelectrics (on DGN example) // Теор. докл. I Сов.-Польск. симпозиума по физ. сегнетоэлектриков и родственных им материалов. Львов, 4-8 июня, 1990г. - Киев: Изд. ИТФ АН УССР, 1990. - С. 117-118.
12. Лещенко М. А., Поплавко Ю. М., Мизерис Р. СВЧ диэлектрическая релаксация в кристаллах KLT // УФЖ - 1990. - Т. 35, N7. - С. 1077-1082.
13. Лещенко М. А., Поплавко Ю. М. Диэлектрическая спектроскопия: экспериментальные подходы и анализ диэлектрических спектров //

Тез. докл. Всесоюзного совещания "Метрологическое обеспечение диэлектрических измерений". Иркутск, 21-23 мая, 1991г. - Иркутск, 1991. - С. 54-55.

14. Leschenko M. A., Poplavko Yu. M., Bovtun V. P. Relaxation times anomalies in KLT single crystals// Collected abstr. Int. Conf. TFC'91. Riga, Oct. 2-8, 1991. - Riga: Inst. Solid State Phys. - 1991. - P. 125-126.
15. Лещенко М. А., Поплавко Ю. М., Бовтун В. П. Анализ размытых диэлектрических спектров сегнетоэлектрических материалов// Тез. докл. IV-Всесоюзной конф. "Актуальные проблемы получения и применения сегнето-, пьезо-, пироэлектриков и родственных им материалов". Москва, 2-4 декабря, 1991г. - М.: Изд. НИИТЭХИМ, 1991. - С. 30.
16. Лещенко М. А., Бовтун В. П. Диэлектрические свойства твердых растворов на основе магнониобата свинца // Тез. докл. IV-Всесоюзной конференции "Актуальные проблемы получения и применения сегнето-, пьезо-, пироэлектриков и родственных им материалов". Москва, 2-4 декабря, 1991г. - М.: НИИ ТЭХИМ, 1991. - С. 30-31.
17. Leschenko M. A., Poplavko Yu. M., Bovtun V. P. Relaxation anomalies in $K_{1-x}Li_xTaO_3$ single crystals// Ferroelectrics. - 1992. - V. 131. - P. 213-217.
18. Лещенко М. А., Поплавко Ю. М. Анализ размытых диэлектрических спектров// УДЖ. - 1992. - Т. 37, №6. - С. 898-904.
19. Бовтун В. П., Аристархов А. И., Лещенко М. А. и др. Диэлектрические спектры сегнетоэлектрических конденсаторных материалов // Тез. докл. XIII конф. по физике сегнетоэлектриков. Тверь, 15-19 сентября, 1992г. Т. 2. - Тверь, 1992. - С. 137.
20. Лещенко М. А., Боков А. А. Диэлектрические свойства кристаллов Pb_2InNbO_6 с различной степенью порядка // Тез. докл. XIII конф. по физике сегнетоэлектриков. Тверь, 15-19 сентября, 1992г. Т. 2. - Тверь, 1992. - С. 115.
21. Лещенко М. А., Бовтун В. П., Емельянов С. М. Размытие фазового перехода в твердых растворах на основе магнониобата свинца// Тез. докл. XIII конф. по физике сегнетоэлектриков. Тверь, 15-19 сентября, 1992г. Т. 2. - Тверь, 1992. - С. 116.



Подписано в печать: 13.04.93
Формат 60 90/16

Печ. листы 2.
Заказ 1130

УПИК "Патент", ул. Гагарина, 101

AB 27.998

AB 27.998