

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по инновационному
развитию ФГБОУ ВО «Московский
технологический университет»
(МИРЭА)

Рагуткин А.В.

«14» сентября 2016 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертации *Елисеева Антона Юрьевича* «Процессы переключения и диэлектрический гистерезис керамики цирконата-титаната свинца и монокристаллов ниобата бария кальция», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»

Практическое использование сегнетоактивных материалов в микроэлектронике, пьезотехнике, оптических и инфракрасных преобразователях напрямую связано с проблемой энергетических потерь, возникающих в процессе переключения поляризации. Актуальным вопросом в этом направлении является установление механизмов диссипации энергии, определение зависимостей от параметров материала и переключающего поля. В сегнетоэлектрических материалах в значительной степени проявляется составляющая потерь, обусловленная движением доменных стенок в процессе переключения в электрических полях; процессы переключения при использовании больших

электрических полей могут приводить к энергетическим потерям, проявляющимся в виде значительной генерации тепла (саморазогрев образца). Поэтому тема диссертационной работы А.Ю. Елисеева представляется весьма актуальной как в научном, так и в практическом отношении.

Диссертационная работа Елисеева А.Ю. посвящена исследованию монокристаллов твердых растворов ниобата бария–кальция $\text{Ca}_{0.32}\text{Ba}_{68}\text{Nb}_2\text{O}_6$ (СВН32) и пьезокерамики цирконата-титаната свинца $\text{Pb}_{0.95}\text{Sr}_{0.05}(\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47})\text{O}_3 + \text{Nb}_2\text{O}_5$ 1% (ЦТС-19). Диссертантом были решены задачи по установлению связей процессов разогрева образцов с переключением поляризации, а также зависимости температуры саморазогрева от характеристик электрического поля. По материалам диссертации опубликовано 4 работы, три из которых в журналах, рекомендованных ВАК России. Результаты докладывались на всероссийских и международных конференциях, известны специалистам в нашей стране и за рубежом.

На основании большого объема проведенных экспериментальных исследований их анализа автором получен ряд новых, принципиально важных результатов, среди которых наиболее интересными, на наш взгляд являются следующие:

1. Выявлены физические закономерности саморазогрева монокристаллических твердых растворов ниобата бария кальция и пьезоэлектрической керамики цирконата-титаната свинца в переменных электрических полях, проведено сравнение полученных закономерностей для монокристаллических и керамических образцов.
2. Установлена связь процессов разогрева образцов сегнетоэлектрических материалов с переключением спонтанной поляризации и зависимость температуры саморазогрева от амплитуды и частоты электрического поля, а также от формы (синусоидальный или меандр) задающего сигнала.

3. Показано, что при частотах выше критической после формирования петли ход частотной зависимости переключаемой поляризации не зависит от частоты переключающего поля.
4. Предложена методика оценки теплоемкости единицы объема сегнетоэлектрических материалов по зависимостям тепловой энергии, выделяемой в процессе переключения спонтанной поляризации, от скорости саморазогрева образцов.

Отметим, что полученные в работе результаты представляются достоверными, а выводы и основные положения, выносимые на защиту обоснованными. Это обеспечивается применением в работе апробированных экспериментальных методик, воспроизводимостью полученных результатов и их соответствием основным законам физики твердого тела и известным литературным данным.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, изложенных на 145 страницах машинописного текста, включая 102 рисунка, 14 таблиц и список литературы из 132 наименований.

Во введении сформулированы задачи, решаемые в диссертационной работе, обоснована их актуальность, новизна и практическая значимость.

В первой главе сделан литературный обзор по теме исследования. Подробно рассмотрены механизмы потерь в сегнетоэлектриках и вопросы тепловыделения в сегнетоэлектрических материалах под воздействием сильных электрических полей и/или полей высокой частоты. Описаны основные диэлектрические характеристики исследуемых материалов: пьезоэлектрической керамики состава ЦТС-19 и монокристаллов CBN32.

На основе анализа литературных данных сформулирована постановка задачи исследования.

Вторая глава посвящена описанию методик исследования. Рассмотрены особенности исследования петель диэлектрического гистерезиса в высоких (до

2кВ) полях и на частотах до 1,5 кГц. Подробно изложен разработанный автором метод компьютерной обработки аналоговых экспериментальных данных.

В третьей главе изложены экспериментальные результаты по исследованию петель диэлектрического гистерезиса монокристалла CBN32. Измерения проводились в синусоидальном поле амплитудой 1270 В/мм, при разных частотах модуляции. Показано, что температура саморазогрева, до которой разогревается образец при воздействии на него переменным электрическим полем, имеет максимальное значение в диапазоне частот электрического поля 120 – 300 Гц. Увеличение частоты электрического поля приводит к уменьшению как температуры саморазогрева, так и величины переключаемой поляризации не только для частных петель (наблюдаемых в начальный момент подачи на образец электрического поля), но и для сформированных петель гистерезиса. Трансформация петли в полную происходит только на тех частотах, при которых образец в процессе разогрева достигал температуры 80 °С, выше которой имеет место резкое уменьшение коэрцитивного поля, приводящее к увеличению величины переключаемой поляризации.

Четвертая глава содержит описание экспериментальных результатов по исследованию петель диэлектрического гистерезиса керамики цирконата-титаната свинца. Показано, что у образцов керамики ЦТС-19, также, как и у монокристаллов CBN32, при выдержке образца в переменном электрическом поле происходит изменение формы петли диэлектрического гистерезиса с одновременным саморазогревом образца.

В работе показана зависимость температуры саморазогрева образцов в процессе переключения не только от амплитуды и частоты электрического поля, но и от формы сигнала и площади исследуемых образцов. Для материала ЦТС-19 трансформация петли в полную происходит при достижении образцом температуры 100°С.

В пятой главе проводится подробный анализ и обсуждения полученных экспериментальных результатов. Показано существование критической частоты

электрического поля, зависящей как от свойств материала, так и от амплитуды поля и формы сигнала. Ниже этой частоты наблюдаются только частные петли диэлектрического гистерезиса.

При выдержке образцов в электрическом поле критической частоты, образец разогревался до температуры, достаточной для трансформации петли из частной в полную. Выявлено наличие трех областей на частотных зависимостях переключаемой поляризации и максимальной температуры. Первая область соответствует линейной зависимости температуры саморозогрева от частоты и частным петлям диэлектрического гистерезиса. Вторая – максимальным значениям температуры и величины переключаемой поляризации. Третья область характеризуется уменьшением температуры саморозогрева и экспоненциальным спадом переключаемой поляризации с увеличением частоты поля.

В работе показано, что причиной саморозогрева являются диэлектрические потери, определяемые площадью петли диэлектрического гистерезиса. Определенное на основе экспериментальных данных и аналитической аппроксимации отношение переключаемой поляризации к максимальной для исследуемых материалов имеет хорошее согласие с теоретическими оценками.

Представляет интерес экспериментальная реализация определения коэффициента теплоемкости единицы объема с использованием тепловых потерь в процессе переключения сегнетоэлектрика в сильных электрических полях. Полученные результаты полностью коррелируют с известными из литературы данными.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Диссертация А.Ю. Елисеева имеет важное **практическое значение**. Полученная в ней совокупность экспериментальных данных о диэлектрическом гистерезисе керамики цирконата-титаната свинца и монокристаллов ниобата бария кальция в широком частотном диапазоне, дает новые представления об особенностях процессов переключения в структурно неупорядоченных

сенетозлектрических материалах они могут быть использованы для анализа тепловых потерь сегнетозлектрических материалов, имеющих место в процессе переключения. Установленные в работе закономерности могут быть востребованы научными коллективами, занимающимися проблемами сегнетозлектриков, в частности пьезокерамикой.

В тоже время диссертация не лишена *недостатков*, некоторые из которых отмечены ниже:

1. В пьезокерамике экспериментально показано влияние размера зерен на процессы переключения, однако механизмы такого влияния не обсуждаются.

2. В выражении (5.1) при расчете потерь как площади петли представляется более корректной запись с использование интегрирования, а не просто произведения поляризации и электрического поля.

3. Одной из основных величин, полученных в эксперименте, является температура, измеряемая тепловизором. В работе не приводится погрешность измерения температуры. Более того, не представлены ни изображения «картинок» с тепловизора в режиме изображения, ни пространственное разрешение в режиме фокусировки. Не оценена методическая погрешность, возникающая в связи с измерением температуры в геометрии «с торца» при явной неоднородности температуры по всему образцу.

4. Редакционные и языковые недостатки: не дано определение «частной» петли; наблюдается некоторая путаница при использовании понятий переключаемая-спонтанная-остаточная поляризации; большое количество опечаток.

Заключение по диссертации

Сделанные замечания не уменьшают ценность работы и не влияют на ее основные выводы и защищаемые положения. Диссертация по актуальности избранной темы, степени обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в работе, их достоверности и новизне

соответствует критериям Положения о присуждении учёных степеней (п.9 – п.14), утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 г., а её автор *А.Ю. Елисеев* заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Отзыв заслушан и обсужден на заседании кафедры нанoeлектроники физико-технологического института Московского технологического университета (МИРЭА) 20 сентября 2016 г., Протокол № 9. Отзыв подготовлен доцентом кафедры нанoeлектроники доктором физико-математических наук Юрасовым Алексеем Николаевичем.

Доцент каф. нанoeлектроники,

д. ф.-м. н.

Юрасов А.Н.

Почтовый адрес: 119454, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78, Московский технологический университет (МИРЭА), физико-технологический институт

Телефон: (495) 434 7665

Адрес электронной почты: alexey_yurasov@mail.ru

Заведующий кафедрой,

академик РАН, доктор физ.-мат- наук

А.С. Сигов

Ученый секретарь

Л.Ю. Фетисов