

На правах рукописи

Билык Владислав Романович

**ДИНАМИКА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПОД
ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ТЕНАГЕРЦОВОЙ ЧАСТОТЫ
В ТОНКОЙ ПЛЕНКЕ ТИТАНАТА БАРИЯ-СТРОНЦИЯ И КРИСТАЛЛЕ
ТИТАНАТА СТРОНЦИЯ**

Специальность: 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

МОСКВА – 2020

Работа выполнена на кафедре наноэлектроники физико-технологического института федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА).

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор **Мишина Елена Дмитриевна**

Официальные оппоненты: **Политова Екатерина Дмитриевна**, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук», главный научный сотрудник лаборатории функциональных наноматериалов

Калашникова Александра Михайловна, PhD, федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физико-технический институт имени А.Ф.Иоффе Российской академии наук», и.о. ведущего научного сотрудника - заведующий лабораторией физики ферроиков

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»

Защита диссертации состоится «27» марта 2020 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.263.09 при ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет» по адресу: 170002, г. Тверь, Садовый переулок, 35, ауд. 226.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Тверского государственного университета по адресу: 170100, г. Тверь, ул. Трехсвятская, д. 16/31 и в сети Интернет на сайте Тверского государственного университета <http://dissertations.tversu.ru/>

Автореферат разослан «___» _____ 2020 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.263.09

Е.В. Барабанова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию воздействия сильных электрических полей терагерцового диапазона частот на изменение состояния поляризации в сегнетоэлектрической тонкой пленке $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$ и инициирование скрытого полярного состояния в потенциальном сегнетоэлектрике SrTiO_3 .

Актуальность

Способность ферроиков (сегнетоэлектриков, магнетиков, мультиферроиков) переключаться между двумя битовыми состояниями лежит в основе современной технологии хранения данных. Ферроики демонстрируют также (электро-) магнито-оптический эффект с высоким коэффициентом преобразования, что обеспечивает их эффективное использование в качестве модуляторов оптического излучения. Однако при модуляции оптических свойств ферроика с использованием электрического контура или электромагнита скорость переключения ограничивается, как правило, наносекундами, что соответствует частотам порядка единиц гигагерц. Поиск концептуально нового способа управления состоянием ферроика за существенно меньшее, вплоть до пикосекунд, время является новой проблемой в фундаментальных исследованиях конденсированных сред. К таким новым концепциям относится использование коротких (суб)пикосекундных электромагнитных (ЭМ) импульсов оптического (видимого и ближнего инфракрасного (ИК)), а также терагерцового (ТГц) диапазонов.

Первым было достигнуто переключение магнитного параметра порядка оптическим импульсом: была показана высокая эффективность воздействия оптического импульса на спиновую подсистему, то есть намагниченность, в магнитных металлических структурах и феррит-гранатах [1,2]. В сегнетоэлектриках, где параметр порядка связан с ионными степенями свободы, воздействие оптического импульса на ион является гораздо более опосредованным, чем в магнетике на спин электрона. Большой эффективности можно ожидать при прямом воздействии на ионы короткого импульса электрического поля. Экспериментальная возможность такого воздействия появилась только после создания мощных источников электромагнитного поля, генерирующих импульс, близкий к однопериодному, частота которого лежит в диапазоне 1-3 ТГц, а поле может достигать 40 МВ/см [3]. Использование таких источников требует разработки новых методик исследования и новых подходов описания взаимодействия короткого мощного импульса с сегнетоэлектриками и способно обеспечить прорыв в области, связанной с управлением сегнетоэлектрическим параметром порядка.

Для исследования были выбраны сегнетоэлектрические пленки $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$, используемые в настоящее время для создания фазовращателей терагерцового диапазона, то есть характеризующиеся достаточно быстрым откликом на электрическое поле и являющиеся перспективными в связи с этим для терагерцовых приложений, а также модельный монокристалл потенциального сегнетоэлектрика SrTiO_3 в качестве тестового образца.

Теоретические и экспериментальные исследования динамики оптического отклика этих материалов на воздействие мощного терагерцового импульса, позволяющие развить методы диагностики сверхбыстрой модуляции и динамического переключения диэлектрической поляризации, установить их механизмы, а также определить перспективы использования исследуемых эффектов в устройствах нового поколения, в частности, полностью оптически-управляемых, ранее не проводились.

Цель работы заключается в исследовании динамики диэлектрической поляризации сегнетоэлектрика при воздействии мощного однопериодного импульса электрического поля терагерцовой частоты при регистрации нелинейно-оптического отклика.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие **задачи**:

1. Экспериментальное исследование воздействия электрического поля однопериодных терагерцовых импульсов на изменение состояния поляризации в сегнетоэлектрической пленке $\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3$, измеряемое по нелинейно-оптическому отклику.
2. Экспериментальное исследование воздействия электрического поля однопериодных терагерцовых импульсов на нелинейно-оптические характеристики потенциального сегнетоэлектрика SrTiO_3 .
3. Теоретическое описание временной динамики диэлектрической поляризации и параметров второй оптической гармоники в пленке $\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3$ и кристалле SrTiO_3 во время действия электрического поля терагерцового импульса.
4. Исследование влияния интенсивных терагерцовых импульсов на среду, не обладающую выраженными резонансами в частотной области возбуждающего терагерцового импульса.

Личный вклад автора

Автор принимал непосредственное участие в постановке цели и задач проводимого исследования, формулировке основных положений и выводов, анализе и интерпретации полученных в ходе исследования результатов.

Автором лично были проведены все экспериментальные и теоретические исследования, в ходе которых:

- была отлажена методика терагерцового возбуждения – нелинейно-оптического зондирования для исследования сегнетоэлектрических материалов с учетом низкой частоты повторения (10 Гц) лазерных импульсов; получены экспериментальные результаты исследования нелинейно-оптического отклика образцов тонкой пленки $\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3$ и кристалла SrTiO_3 под действием субпикосекундных терагерцовых импульсов при различных условиях возбуждения;

- проведен теоретический расчет динамики сегнетоэлектрической поляризации, инициируемой воздействием короткого импульса терагерцового поля в пленке сегнетоэлектрика $\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3$. Представлено теоретическое описание эффектов, связанных со взаимным распространением интенсивных

терагерцовых импульсов и оптических импульсов зондирующего излучения в центросимметричном материале подложки MgO.

Методы исследования, достоверность и обоснованность

Изготовление эпитаксиальной тонкой пленки $Ba_{0,8}Sr_{0,2}TiO_3$ было проведено методом высокочастотного распыления керамических мишеней при повышенном давлении кислорода. Для исследования структуры были использованы стандартные методы рентгенодифракционного анализа (В.М. Мухортов, ЮНЦ РАН).

Исследования доменной структуры сегнетоэлектрической пленки проводились методом нелинейно-оптической конфокальной сканирующей микроскопии с использованием методики, развитой и сертифицированной в РТУ МИРЭА. При выполнении исследований использовалось оборудование объединенного центра коллективного пользования РТУ МИРЭА.

Экспериментальное исследование нелинейно-оптического отклика при воздействии сильных электрических полей терагерцовых частот проводилось методом терагерцового возбуждения – нелинейно-оптического зондирования. Экспериментальная установка была разработана и создана при непосредственном участии автора данной работы на базе уникальной научной установки «Лазерный тераваттный фемтосекундный комплекс» (руководитель М.Б.Агранат) в объединенном институте высоких температур РАН (ОИВТ РАН). Временной профиль напряженности электрического поля терагерцовых импульсов измерялся при помощи метода терагерцовой спектроскопии с временным разрешением.

Для расчета динамики сегнетоэлектрической поляризации в пленке $Ba_{0,8}Sr_{0,2}TiO_3$ использовался теоретический подход, основанный на решении уравнения Ландау-Халатникова.

Обоснованность методов, используемых для конкретных теоретических и экспериментальных исследований, подтверждается большим количеством российских и зарубежных литературных источников, описывающих применение аналогичных методик для решения близких задач в других материалах.

Обоснованность и достоверность результатов обеспечивается за счет использования современного оборудования при проведении экспериментальных исследований, воспроизводимости экспериментальных результатов при многократных измерениях. Теоретические исследования строятся на основе фундаментальных представлений в области физики конденсированного состояния, а полученные результаты вписываются в концепцию данного теоретического исследования и не противоречат результатам, опубликованным в российских и зарубежных литературных источниках.

Полученные в работе результаты были представлены и широко обсуждались на российских и международных конференциях, а также опубликованы в российских и международных рецензируемых журналах, в том числе входящих в базы данных Web of Science и Scopus, имеют позитивный отклик в цитировании.

Научная новизна

В работе впервые представлены результаты экспериментальных исследований воздействия сверхсильных, вплоть до 23МВ/см, электрических полей однопериодных терагерцовых импульсов на сегнетоэлектрическую пленку $\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3$ и монокристалл потенциального сегнетоэлектрика SrTiO_3 .

Впервые продемонстрирована модуляция сегнетоэлектрической поляризации, измеренная по нелинейно-оптическому отклику, в тонкой пленке $\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3$ и монокристалле SrTiO_3 при воздействии электрического поля высокой напряженности однопериодного терагерцового импульса в диапазоне частот 0,1-3,0 ТГц.

В рамках модели, основанной на решении уравнения Ландау-Халатникова впервые проведено теоретическое исследование динамического переключения состояния поляризации в пленке $\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3$ при воздействии ТГц импульсов пикосекундной длительности с реальными параметрами образца.

Показано возникновение электрооптического эффекта в центросимметричном объемном материале MgO в поле интенсивных терагерцовых импульсов, приводящего к повороту плоскости поляризации оптического излучения.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработанная методика терагерцового возбуждения/нелинейно-оптического зондирования обеспечивает регистрацию по нелинейно-оптическому отклику модуляции диэлектрической поляризации, индуцированной электрическим полем однопериодного терагерцового импульса, с частотой в диапазоне 0,5-3,0 ТГц.

2. Временные зависимости формы нелинейно-оптического отклика в пленке $\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3$ следуют профилю напряженности электрического поля терагерцового импульса, в то время как для монокристалла потенциального сегнетоэлектрика SrTiO_3 аналогичная зависимость проявляет экспоненциальное затухание.

3. Изменение нелинейно-оптического отклика в сегнетоэлектрической пленке $\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3$, обусловленное динамическим изменением поляризации под действием терагерцового импульса, хорошо описывается решением уравнения Ландау-Халатникова при использовании реальных констант разложения Ландау для этого материала и учете свертки временного профиля поляризации как решения уравнения и временного гауссового профиля оптического зондирующего импульса.

4. В центросимметричном кристалле MgO при приложении электрического поля терагерцового импульса напряженностью 1МВ/см наблюдается электрооптический эффект, характеризуемых удельным углом поворота плоскости поляризации порядка $16^\circ/\text{мм}$.

5. В поле терагерцового импульса в кристалле потенциального сегнетоэлектрика SrTiO_3 генерируется электроиндуцированная вторая гармоника, характеризующаяся относительными значениями компонент тензора нелинейной восприимчивости четвертого ранга в соотношении $\chi_{xxxx}^{(3)} : \chi_{xyxy}^{(3)} : \chi_{xyyx}^{(3)}$

= 0:1:1,65; величина эффекта сравнима с аналогичной в сегнетоэлектрической пленке BST, что указывает на инициирование полярного состояния.

Апробация работы

Результаты работы были представлены на следующих международных и всероссийских конференциях: SPM-2019-RCWDFM, Ekaterinburg, August 25-28, 2019; XXXIV Международная конференция по взаимодействию мощных потоков энергии с веществом (IEFM-2019), 2019, Россия, Эльбрус, Кабардино-Балкария; Европейская конференция по применению полярных диэлектриков (ESAPD-2018), 2018, Россия, Москва; Российско-Швейцарский семинар «Материалы электронной техники в сверхсильном сверхкоротком электромагнитном поле», 2018, Россия, Москва; Международная конференция по физике материалов и физике конденсированного состояния (MSCMP-2018), 2018, Республика Молдова, Кишинев; XXI Всероссийская конференция по физике сегнетоэлектриков (ВКС- XXI), 2017, Россия, Москва; III-я Научно-техническая конференция РТУ МИРЭА, 2018, Россия, Москва.

Практическая значимость

Практическая значимость диссертационной работы состоит в развитии перспективных методов управления поляризацией в сегнетоэлектрических материалах с помощью электрического поля мощного терагерцового импульса, дистанционной модуляции и диагностики свойств сегнетоэлектрических материалов. Важно отметить, что понимание процессов взаимодействия и распространения ТГц излучения в материалах открывает возможности для дальнейшего развития нового направления физики - ТГц фотоники, результаты которой, в частности, могут быть использованы для создания компактных лазеров, усилителей и модуляторов, работающих в ТГц диапазоне частот.

Внедрение результатов работ и рекомендации по их использованию

Результаты работы были использованы при выполнении работ по проектам Министерства высшего образования и науки РФ, в том числе в рамках государственного задания вузу за 2016-2019 гг, постановления Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. № 220 (соглашение №14.Z50.31.0034), а также проекта Российского научного фонда «Сверхбыстрое переключение параметра порядка в ферроиках мощными пикосекундными импульсами ТГц излучения» №16-12-10520.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 4 статьях в рецензируемых отечественных и международных научных журналах из перечня рекомендованных ВАК. Получено одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы, который включает 160 наименований. Общий объем диссертации составляет 132 страницы и содержит 44 рисунка и 1 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи работы, отмечена научная новизна и практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту.

Первая глава является обзорной и содержит описание основных свойств и характеристик сегнетоэлектрических материалов. В начале главы приводится рассмотрение сегнетоэлектрического параметра порядка в рамках феноменологической теории фазовых переходов Ландау.

Приводится литературный обзор современных достижений в области сверхбыстрого управления параметром порядка в сегнетоэлектрике. Продемонстрировано, что характерное время отклика материалов на внешнее воздействие может составлять единицы пикосекунд, а воздействие интенсивных терагерцовых импульсов способно вызывать коллективные когерентные колебания атомов кристаллической решетки в сегнетоэлектрике. При этом смещения атомов из своего положения равновесия, при достижимых на сегодняшний день напряженностях электрического поля в терагерцовом импульсе [4], соответствуют устойчивому переключению состояния поляризации [5].

Несколько разделов данной главы посвящены описанию сегнетоэлектрических свойств твердого раствора титаната бария стронция $BaSrTiO_3$, а также особенностей, возникающих в тонких пленках со стехиометрическим составом $Ba_{0,8}Sr_{0,2}TiO_3$ при различной толщине пленок и их кристаллографической ориентации. Также рассматриваются сегнетоэлектрические свойства в потенциальном сегнетоэлектрике $SrTiO_3$.

В конце главы приводятся основные положения возникновения динамической поляризации среды в поле оптического импульса, применяемые при феноменологическом описании генерации второй оптической гармоники (ГВГ) и генерации постоянной компоненты электрического поля.

Вторая глава посвящена описанию основных экспериментальных методик, используемых в ходе работы над диссертационным исследованием.

В начале главы описывается процесс генерации импульсов терагерцового диапазона частот с высокой напряженностью электрического поля за счет нелинейно-оптического выпрямления фемтосекундных лазерных импульсов в нелинейном органическом кристалле ОН1. Приводится методика оценки величины напряженности электрического поля в импульсе.

Показаны особенности генерации излучения на частоте второй оптической гармоники (ВГ) при исследовании сегнетоэлектрических материалов. В частности, показаны связь интенсивности ВГ с сегнетоэлектрической поляризацией, возможность наблюдения за сегнетоэлектрическим параметром порядка при температурных и поляризационных исследованиях. Описана методика нелинейно-оптической сканирующей конфокальной микроскопии.

Приведено детальное описание методик возбуждения-зондирования с временным разрешением (терагерцовой спектроскопии с временным разрешением, терагерцового возбуждения – нелинейно-оптического

зондирования), а также особенности применения этих методик при исследовании процессов взаимодействия ТГц излучения с сегнетоэлектрическими материалами.

Третья глава посвящена характеристике пленки $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$ методами рентгеновской дифракции и конфокальной нелинейно-оптической микроскопии, а также экспериментальному и теоретическому исследованию влияния интенсивных импульсов терагерцовой частоты на динамику состояния поляризации в сегнетоэлектрической пленке.

Пленка толщиной 400 нм была изготовлена методом высокочастотного распыления стехиометрической мишени на подложке (111) MgO толщиной 600 мкм в федеральном исследовательском центре южном научном центре российской академии наук (ЮНЦ РАН) научной группой под руководством В.М. Мухортова. Рентгеноструктурные исследования пленки подтвердили эпитаксиальный рост пленки таким образом, что кристаллографическое направление [111] параллельно направлению [111] подложки MgO.

Азимутальные исследования методом нелинейно-оптической конфокальной микроскопии (рисунок 1а) показали наличие 180-градусных доменных областей размером не более 1 мкм. Направление вектора поляризации в соседних областях составляет 60° . В данной пленке возможна реализация двух азимутальных ориентаций образца (α_E) относительно вектора E падающей оптической волны, при которых собственный кристаллографический вклад в генерацию излучения ВГ принимает минимальное $\alpha_E = 0^\circ$, либо максимальное $\alpha_E = 90^\circ$ значения (рисунок 1б).

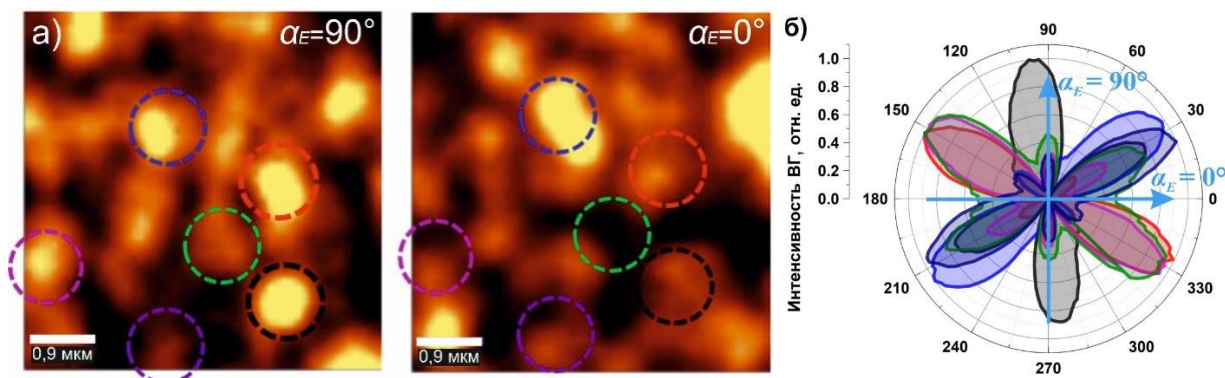


Рисунок 1. а) нелинейно-оптические изображения пленки BST для двух азимутальных ориентаций образца $\alpha_E = 0^\circ$ и $\alpha_E = 90^\circ$ относительно вектора E падающей оптической волны; б) азимутальные зависимости интенсивности ВГ. Стрелками обозначены направления вектора E падающей оптической волны относительно кристаллографического вклада в ВГ для случаев $\alpha_E = 0^\circ$ и $\alpha_E = 90^\circ$.

Представлены результаты экспериментальных исследований динамики сегнетоэлектрической поляризации в пленке титаната бария стронция в поле терагерцового импульса. Показана сильная модуляция интенсивности ВГ на частоте возбуждающего импульса (рисунок 2а).

Для объяснения природы наблюдаемого нелинейно-оптического отклика и воздействия на сегнетоэлектрический параметр порядка терагерцового

импульса рассматривается возникновение поляризации в материале как суммы ионного и электронного вклада. Сравнение величин этих вкладов был проведен путем экспериментальных исследований воздействия однопериодных ТГц импульсов с напряженностью электрического поля в 500 кВ/см на сегнетоэлектрическую пленку и два полупроводниковых материала: centrosymmetric кремний и нецентросимметричный арсенид галлия.

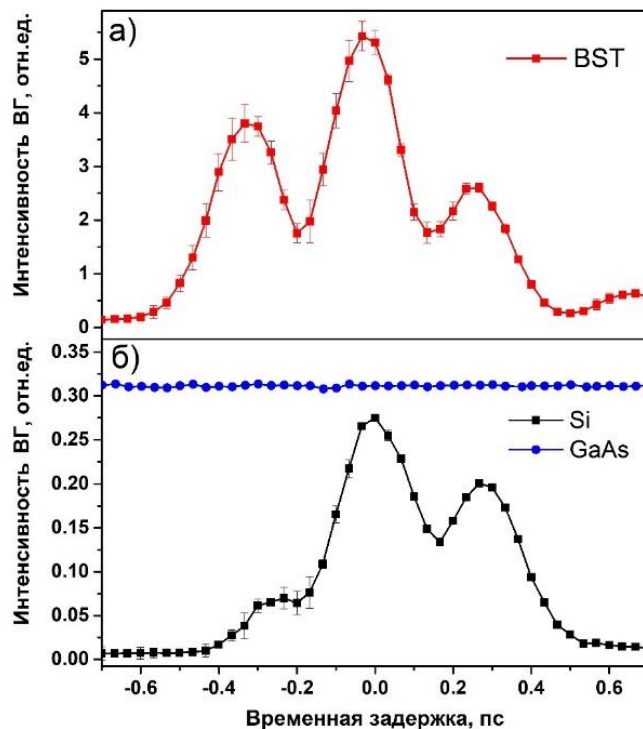


Рисунок 2. Интенсивности ВГ во время воздействия ТГц импульса в а) пленке BST; б) кремнии и арсениде галлия.

В рамках электродипольного приближения величина поляризации на частоте оптической ВГ рассматривается как сумма кристаллографического и электроиндуцированного вклада.

$$\mathcal{P}^{(2\omega)} = \mathcal{P}_{\text{крист}}^{(2\omega)} + \mathcal{P}_{\text{инд}}^{(2\omega)} \quad (1)$$

Из рисунка 2 видно, что качественно временные зависимости интенсивности ВГ пленке BST и Si имеют схожую форму. В случае ГВГ в центросимметричном кристалле Si кристаллографический вклад в поляризацию запрещен согласно электродипольному приближению. В таком случае величина интенсивности ВГ будет определяться только слагаемым, обусловленным воздействием электрического поля ТГц импульса. При этом слабая (более чем на порядок), относительно пленки BST, модуляция сигнала ВГ в Si дает основание утверждать, что вклад в суммарную поляризацию обусловлен только электронной компонентой поляризации.

В экспериментах кристаллографический вклад GaAs в ГВГ по величине сопоставим с вкладом в пленке BST. Однако отсутствие регистрируемой модуляции электрическим полем связано со значительным преобладанием для данного материала величины кристаллографического вклада над величиной электроиндуцированного вклада. Поэтому можно заключить, что ГВГ при

воздействии ТГц импульса в GaAs, по аналогии с кремнием, демонстрирует электронный вклад в поляризацию, а нелинейная восприимчивость является электронной по своей природе.

Эксперименты по воздействию терагерцового излучения на пленку BST проводились при двух азимутальных ориентациях образца $\alpha_E = 0^\circ$ и $\alpha_E = 90^\circ$ относительно направления вектора E падающего оптического импульса (рисунок 3).

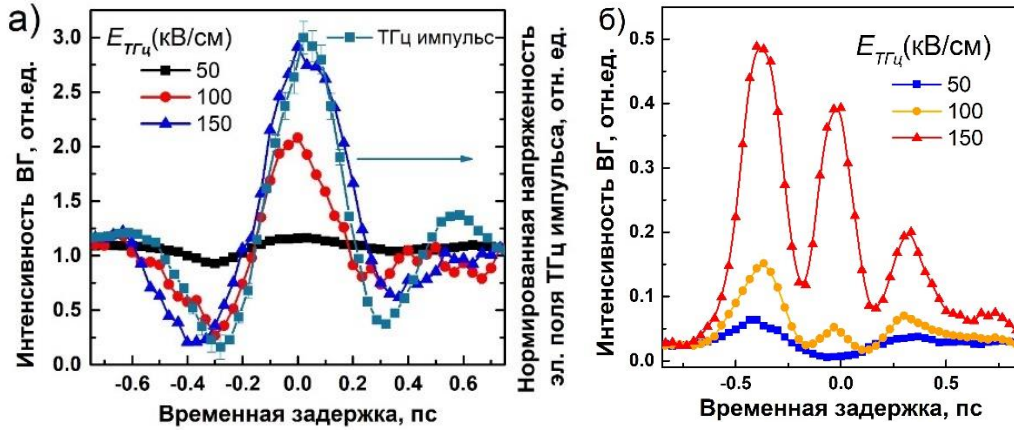


Рисунок 3. а) Временная зависимость интенсивности ВГ в пленке BST ($\alpha_E = 90^\circ$) и временной профиль ТГц импульса и б) временная зависимость интенсивности ВГ в пленке BST ($\alpha_E = 0^\circ$).

Различия в наблюдаемых временных формах нелинейно-оптического отклика в поле терагерцового импульса $E^{(\Omega)}$ были описаны следующим уравнением:

$$I^{(2\omega)}(E^{(\Omega)}) \propto (\mathcal{P}^{(2\omega)})^2 \propto (\chi^{(2)})^2 + 2\chi^{(2)}\chi^{(3)}E^{(\Omega)} + (\chi^{(3)}E^{(\Omega)})^2, \quad (2)$$

в котором первое слагаемое в правой части обуславливало кристаллографический вклад в ГВГ, тогда как второе и третье слагаемые зависят от величины внешнего электрического поля $E^{(\Omega)}$ (терагерцового).

В области относительно малых электрических полей, либо сильного кристаллографического вклада ($\alpha_E = 90^\circ$) происходит интерференция двух источников ВГ, независимого и линейно зависимого от поля, а именно первого и второго слагаемого в уравнении (2). В таком случае результирующий сигнал ВГ повторяет временной профиль ТГц импульса, (рисунок 3а и синяя кривая на рисунке 3б). При увеличении напряженности электрического поля ТГц импульса вкладами кристаллографической и линейно зависящей от поля составляющих в ГВГ можно пренебречь на фоне быстрорастущего третьего слагаемого. Форма нелинейно-оптического отклика в таком случае следует квадрату профиля терагерцового импульса.

Далее приводятся экспериментальные исследования динамики нелинейно-оптического отклика в широком диапазоне значений напряженности электрического поля ТГц импульса (до 23,2 МВ/см) и различной температуре при фиксированной азимутальной ориентации образца $\alpha_E = 0^\circ$.

На рисунке 4 приведена зависимость интенсивности ВГ, измеряемая в центральном максимуме (временная задержка $t_3=0$), от напряженности

электрического поля ТГц импульса в диапазоне величин 0,15 – 0,9 МВ/см. Данная экспериментальная зависимость в целом демонстрирует существенно нелинейную зависимость (на графике, построенном в логарифмическом масштабе шкал, степенные зависимости изображаются прямыми). Поскольку качественно временные формы интенсивности ВГ повторяют либо форму импульса, либо форму квадрата импульса, естественно попытаться выделить области линейной и квадратичной зависимостей. Действительно, такие области существуют: первая в диапазоне полей менее 350 кВ/см проявляет линейную зависимость ($K = 1,2 \pm 0,3$), вторая – квадратичную ($K = 2,2 \pm 0,2$) в диапазоне более 600 кВ/см. Однако, область 350-600 кВ/см демонстрирует сильную нелинейную зависимость ($K=2,8\pm 0,2$).

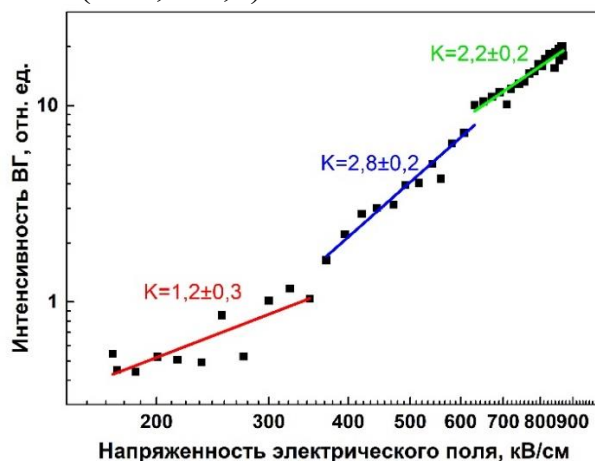


Рисунок 4. Зависимость интенсивности ВГ при $t_3 = 0$ в диапазоне величин напряженности электрического поля ТГц импульса 0,15 – 0,9 МВ/см.

Так линейная и квадратичная зависимости интенсивности ВГ согласуются с формулой (2) в области слабых и сильных электрических полей, соответственно. В тоже время кубическая зависимость величины интенсивности ВГ не может быть объяснена уравнением (2), что может свидетельствовать о сильной нелинейной динамике, индуцированной воздействием высоких напряженностей поля ТГц импульса.

При дальнейшем увеличении напряженности поля временная зависимость сигнала ВГ (рисунок 5а) продолжает повторять квадратичную зависимость формы возбуждающего терагерцового импульса в результате преобладания третьего слагаемого в уравнении (2). Для удобства отображения графики разнесены на постоянную величину. Однако, величина интенсивности ВГ (рисунок 5б) проявляет близкую к квадратичной, но уже заметно меньшую зависимость от величины поля ($K = 1,6 \pm 0,2$). Такое поведение может свидетельствовать о насыщении поляризации при воздействии столь высоких напряженностей полей.

Представлены экспериментальные результаты температурных исследований (рисунок 6), полученные при величине напряженности электрического поля ТГц импульса порядка 600 кВ/см, при которой временные формы интенсивности ВГ повторяют квадрат формы ТГц импульса. Видно, что при увеличении температуры происходит уменьшение как ТГц-

индуцированного сигнала ВГ, так и величины интенсивности ВГ от невозбужденного образца. Так же наблюдается небольшое уменьшение частоты индуцированного сигнала ВГ.

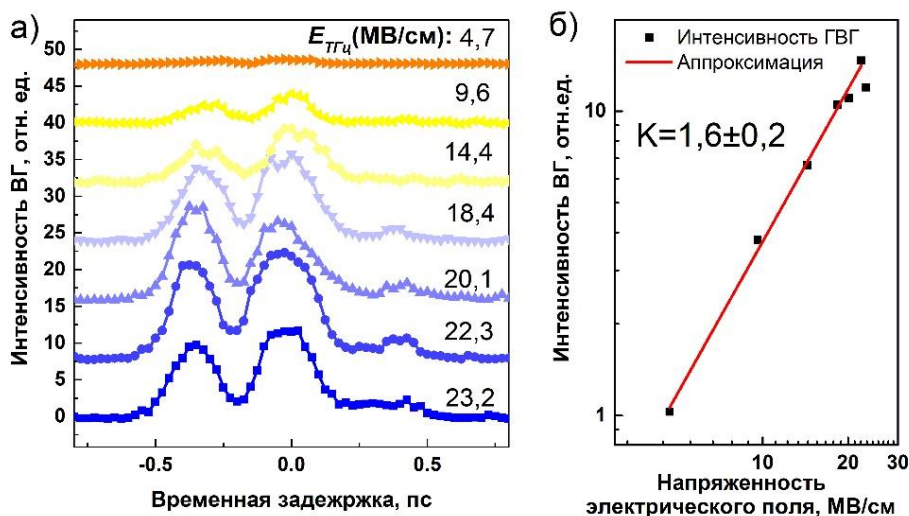


Рисунок 5. а) Временная зависимость интенсивности ВГ в пленке BST при различных величинах напряженности электрического поля ТГц импульса (в диапазоне 4,7 – 23,2 МВ/см). б) Зависимость интенсивности ВГ при $t_3 = 0$.

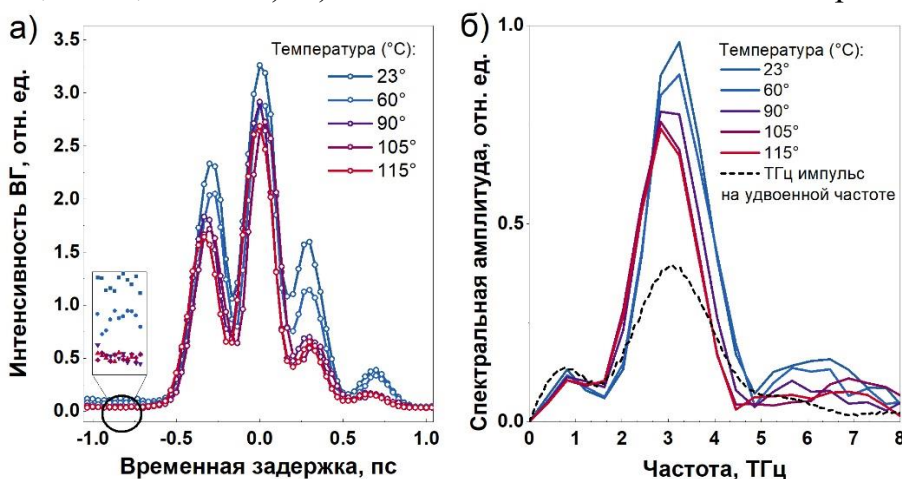


Рисунок 6. а) Температурная зависимость интенсивности ВГ в пленке BST под действием ТГц-импульса, б) частотный спектр нелинейно-оптического отклика и спектр ТГц-импульса на удвоенной частоте [6].

Рассмотрение временной динамики интенсивности ВГ, а следовательно, и сегнетоэлектрической поляризации, можно разделить на два случая: до воздействия ТГц-импульса и в момент воздействия максимальной напряженности электрического поля ТГц-импульса.

Выражение для электроиндуцированного сигнала ВГ в случае высокой напряженности поля ТГц импульса можно упростить до вида:

$$I^{(2\omega)}(E^{(\Omega)}) \propto (\chi^{(3)} E^{(\Omega)})^2 \propto (\mathcal{P}^{(2\omega)}(E^{(\Omega)}))^2 \quad (3)$$

Максимальное значение индуцированной внешним электрическим полем поляризации $\mathcal{P}_{\text{макс}}^{(2\omega)}$ на частоте ВГ будет соответствовать моменту времени $t_3 = 0$

пс, остаточная поляризация $\mathcal{P}_0^{(2\omega)}$ - относительной задержке $t_3 = -1$ пс, а их величина будет пропорциональна квадратному корню интенсивности ВГ:

$$\mathcal{P}_{\text{макс}}^{(2\omega)} = \sqrt{I^{2\omega}(t_3 = 0 \text{ пс})} \quad (4)$$

$$\mathcal{P}_0^{(2\omega)} = \sqrt{I^{2\omega}(t_3 = -1 \text{ пс})} \quad (5)$$

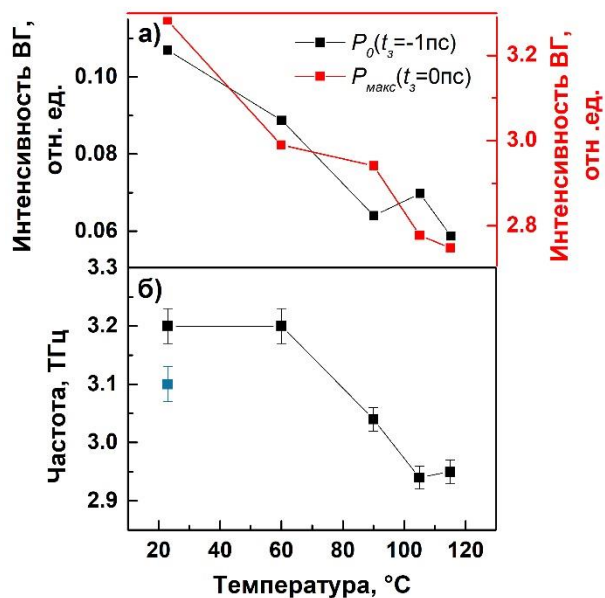


Рисунок 7. а) Зависимость интенсивности ВГ от температуры в отсутствии ТГ-импульса (черная кривая) и в максимуме интенсивности (красная кривая), б) зависимость центральной частоты нелинейно-оптического отклика от температуры Ω_0 и центральная частота квадрата падающего ТГц импульса.

Графики на рисунке 7 демонстрируют монотонное убывание величин остаточной поляризации $\mathcal{P}_0^{(2\omega)}$ и максимальной индуцированной поляризации $\mathcal{P}_{\text{макс}}^{(2\omega)}$ с увеличением температуры. Также с увеличением температуры происходит небольшое уменьшение частоты вынужденных колебаний Ω_0 . Сдвиг Ω_0 в область более низкой частоты сильно превышает величину среднего квадратического отклонения ошибки измерения, но намного меньше ширины максимумов.

Уменьшение частоты вынужденных колебаний с увеличением температуры, а также их интенсивности характерно для полярных колебаний в сегнетоэлектрике. В частности, измерения комбинационного рассеяния в пленке BST/(111)MgO показали [7], что при увеличении температуры наблюдалась линейная температурная зависимость квадрата частоты мягкой моды, свойственная для фазового перехода типа «смещение». Характерное уменьшение частоты происходило вплоть до температуры в 100°C, что согласуется с наблюдением полярного колебания, полученного измерениями комбинационного рассеяния, вплоть до температур 360–380K [7].

Далее в данной главе приводится моделирование динамики сегнетоэлектрической поляризации в пленке BST в поле терагерцового импульса, а также сравнение экспериментальных данных с результатами проведенного моделирования. Динамические процессы, происходящие в

сегнетоэлектрике при воздействии на него внешних электрических полей, рассчитываются в рамках модели Ландау-Халатникова. Рассмотрение применимости теории Ландау к быстропротекающим процессам выходит за рамки данной работы. В связи с этим дальнейшее теоретическое рассмотрение будет основываться на уравнении Дуффинга, которое является уравнением движения ионов, и в котором не накладываются никакие ограничения на скорости изменения координат ионов.

Уравнение для поляризации записывается в виде [8]:

$$\frac{\kappa^2}{\varepsilon_0} \frac{d^2 P}{dt^2} + \frac{\gamma \kappa^2}{\varepsilon_0} \frac{dP}{dt} = -\frac{\partial F}{\partial P} + E, \quad (6)$$

где κ – коэффициент, содержащий зарядовое и массовое число колебательной моды, γ – коэффициент затухания, E – внешнее электрическое поле (терагерцового импульса), которое в общем случае может быть направлено в произвольном направлении $E = (E_x, E_y, E_z)$. Последующее моделирование динамики поляризации в пленке BST осуществлялось с использованием значений параметров κ и γ в диапазоне, указанном в работе [9]. Для простоты описания ограничимся случаем, когда внешнее электрическое поле ориентированно в направлении, параллельном вектору спонтанной поляризации в сегнетоэлектрике, т.е. имеет проекцию на соответствующую ось элементарной ячейки P_x .

Используя константы разложения для данного материала и задав параметры возбуждающего терагерцового импульса, рассматривается изменение поляризации как смещение иона титана из положения равновесия одного из минимумов сегнетоэлектрической потенциальной ямы.

При малых амплитудах напряженности электрического поля ТГц импульса (рисунок 8а) переключения состояния поляризации не наблюдается. Атомы, находящиеся в положительных и отрицательных ямах, колеблются вблизи своих положений равновесия.

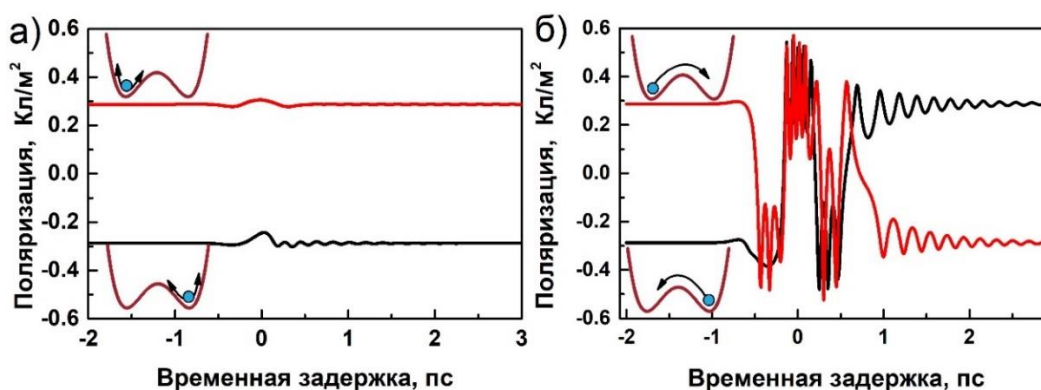


Рисунок 8. Модель динамики сегнетоэлектрической поляризации при воздействии терагерцового импульса при малой (а) и большой (б) величинах напряженности электрического поля.

Чтобы переориентировать поляризацию решетки, амплитуда когерентных колебаний должна быть достаточно большой, чтобы преодолеть потенциальный барьер между двумя устойчивыми положениями атома в потенциальной яме.

При больших амплитудах поля наблюдается динамическое переключение поляризации с дальнейшей релаксацией к одному из положений равновесия (рисунок 8б). В этом режиме также возможно несколько вариантов развития колебательной динамики. Так поле короткого импульса после окончания его воздействия приводит к свободным колебаниям поляризации, которые в зависимости от величины поля и коэффициента затухания могут релаксировать как в начальное, так и противоположное положение минимума двухъямного потенциала. Однако, при исследовании методом генерации ВГ разница между двумя этими ситуациями в наблюдаемых временных формах неразличима.

Для сравнения полученных в эксперименте временных зависимостей интенсивности ВГ с результатами моделирования динамики поляризации в поле терагерцового импульса необходимо восстановить из полученных решений форму сигнала ВГ. Поскольку в эксперименте пространственное разрешение определялось диаметром сфокусированного зондирующего излучения (~100 мкм), моделирование сигнала ВГ проводилось с учетом соответствующих вкладов от областей кристалла, составляющих угол с направлением вектора падающей волны $E_{TГц}$ (рисунок 1б). Результирующая интенсивность ВГ будет являться квадратом суммы всех решений $P_i(t)$:

$$I^{(2\omega)}(t) \propto (P(t))^2 = \left(\sum_i P_i(t) \right)^2 \quad (7)$$

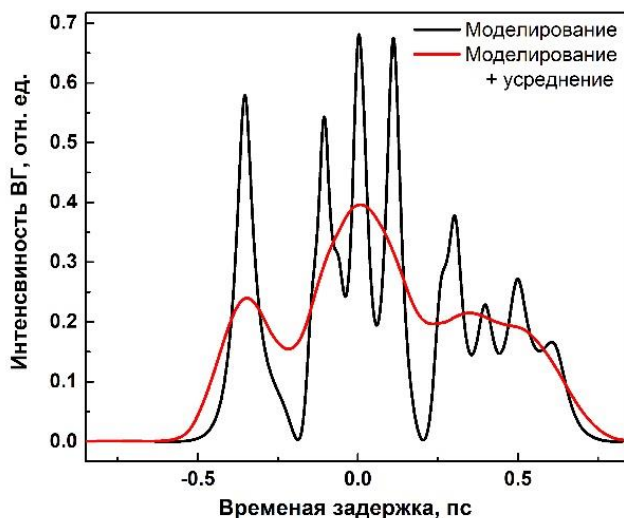


Рисунок 9. Моделирование сигнала ВГ и его усреднение функцией Гаусса.

Один из примеров результата моделирования согласно формуле (7) представлен на рисунке 9. Видно, что существует различие между наблюдаемой в эксперименте формой сигнала ВГ (рисунок 2а) и полученной путем моделирования. В отличие от математического моделирования сигнала ВГ в реальном эксперименте временное разрешение, обусловленное длительностью зондирующего импульса, ограничивало обнаружение высокочастотных колебаний, полученных при расчетах. Использование усреднения функцией Гаусса по двадцати точкам при временном шаге в 5 фс позволило сгладить формы смоделированного сигнала ВГ и приблизить их к наблюдаемым в

эксперименте. Дальнейшее моделирование временных форм сигнала ВГ будет происходить с использованием аналогичного усреднения (рисунок 10).

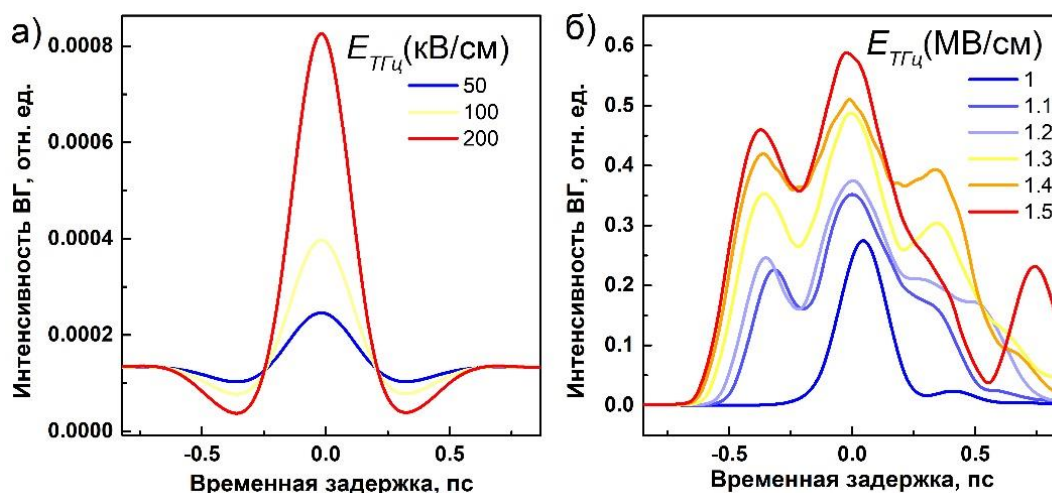


Рисунок 10. Интенсивность ВГ, смоделированная путем решения уравнения (7) в диапазоне а) малых и б) высоких напряженностей электрического поля ТГц импульса.

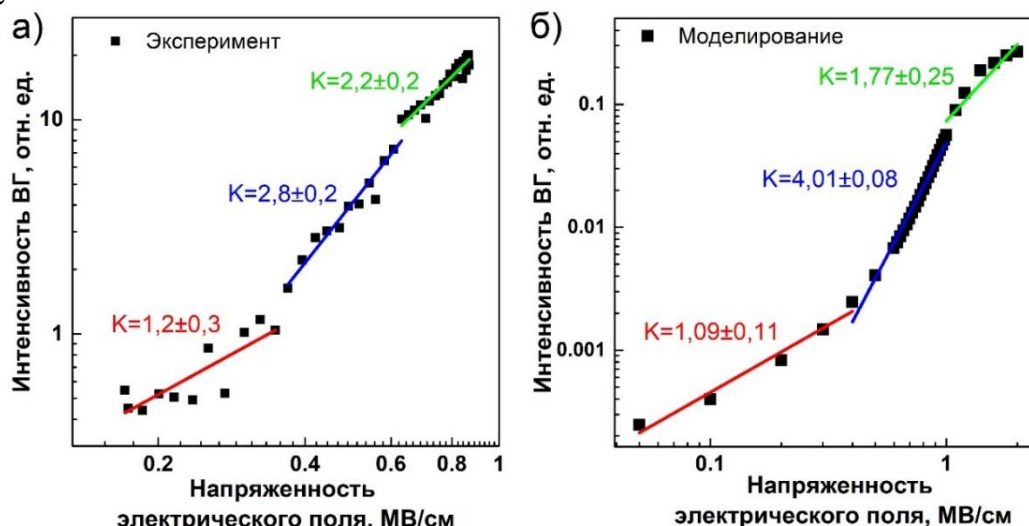


Рисунок 11. Интенсивность сигнала ВГ в центральном максимуме ($t_3 = 0$) от величины напряженности электрического поля ТГц импульса полученная (а) экспериментально, (б) путем моделирования.

Представленные зависимости имеют явное сходство с наблюдаемыми в эксперименте временными формами сигнала ВГ в момент воздействия ТГц импульса, и также могут быть описаны уравнением (2). Наблюдение за максимумом интенсивности ВГ ($t_3 = 0$ пс) смоделированного сигнала (рисунок 11б) демонстрирует три участка наклона, по аналогии с наблюдаемым в эксперименте (рисунок 11а).

Участок с линейной и квадратичной зависимостью ВГ от величины напряженности поля, по аналогии с экспериментально полученными данными, отражает форму сигнала ВГ и характеризуется преобладанием того или иного слагаемого в выражении (2). Участок, демонстрирующий сильно ангармоническую зависимость, развивается в диапазоне напряженностей

электрического поля 0,3 – 0,6 МВ/см для экспериментальной зависимости и 0,4 – 0,9 МВ/см для теоретической.

Сильная нелинейная зависимости сигнала ВГ может быть связана моментом переключения сегнетоэлектрической поляризации, когда атом, находящийся в одном из минимумов потенциальной ямы, в результате воздействия электрического поля ТГц импульса, переходит в противоположный минимум потенциальной ямы. Тогда, даже небольшое воздействие электрического поля, при преодолении потенциального барьера атомом, будет приводить к его дальнейшему ускоренному движению в сторону противоположного локального минимума энергии.

Результаты моделирования температурных зависимостей нелинейно-оптического сигнала показали уменьшение интенсивности ВГ как для собственного кристаллографического вклада ($t_3 = -1$ пс), так и индуцированного электрическим полем ТГц импульса ($t_3 = 0$ пс) (рисунок 12 а). Также наблюдается уменьшение частоты вынужденных колебаний при приближении к температуре фазового перехода (рисунок 12 б). Представленные результаты моделирования согласуются с полученными экспериментальными данными.

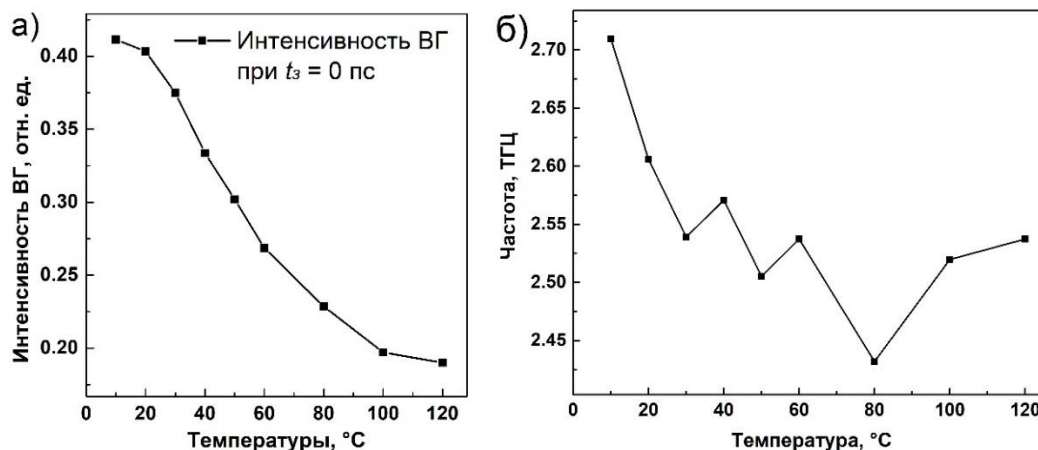


Рисунок 12. а) Моделирование зависимости интенсивности ВГ от температуры при временной задержке, отвечающей пиковому значению поля ($t_3 = 0$ пс). б) Моделирование зависимости частоты индуцированной ВГ от температуры.

Четвертая глава посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию структурного отклика centrosymmetric сред: подложки MgO, являющейся основой для напыления пленки BST, и кристалла потенциального сегнетоэлектрика SrTiO₃.

Представленная на рисунке 13а зависимость интенсивности ВГ при прохождении ТГц импульса через структуру BST/MgO демонстрирует 3 существенно отличающихся по характеру генерации ВГ участка. Первый участок описывается в диапазоне временной задержки от -1 до 1 пс, а наблюдаемая генерация ВГ на этом участке обусловлена воздействием ТГц импульса на пленку Ba_{0,8}Sr_{0,2}TiO₃ и подробно описана в третьей главе. Сразу после воздействия ТГц импульса (второй участок) интенсивность сигнала ВГ близка к сигналу невозмущенного образца. Начиная с 2,6 пс (третий участок) средний

уровень сигнала ВГ повышается до некоторого постоянного значения. Сигнал возвращается к уровню, соответствующему невозмущенной среде, через 12 пс.

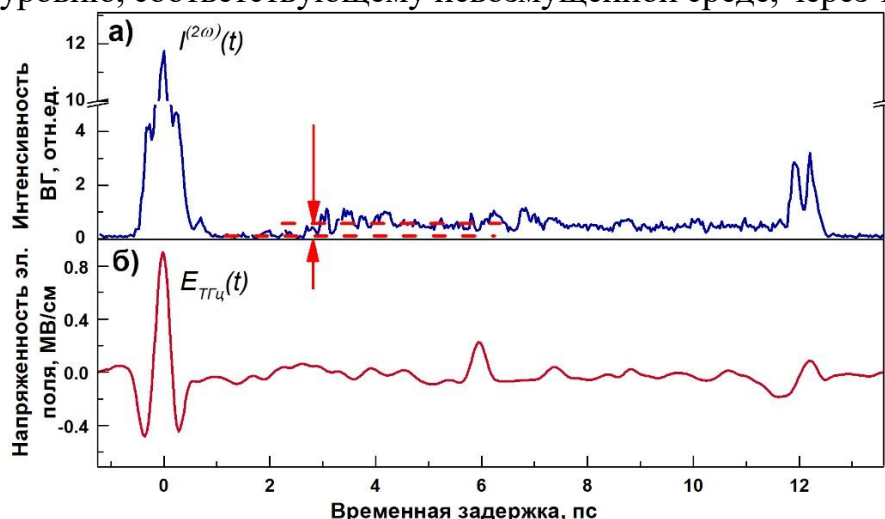


Рисунок 13. а) динамика нелинейно-оптического отклика, б) временной профиль терагерцового импульса при прохождении через структуру $Ba_{0,8}Sr_{0,2}TiO_3/MgO$ в диапазоне -1 – 14 пс.

Проведенные дополнительные эксперименты по методике терагерцовой спектроскопии с временным разрешением (рисунок 13б) показали, что при прохождении ТГц импульса через структуру $Ba_{0,8}Sr_{0,2}TiO_3/MgO$ также наблюдаются особенности в сигнале на временной задержке 12пс. Данная особенность возникает при переотражении ТГц импульса от задней грани структуры и согласуется с расчетным временем распространения ТГц импульса при известных показателе преломления на частоте 1 ТГц [10] в материале подложки MgO и ее толщине. Полученные данные позволяют заключить, что наблюдаемые особенности в генерации ВГ возникают во временном интервале, когда в образце присутствует и распространяется ТГц импульс.

Отсюда становится возможным связать возникновение скачкообразного увеличения сигнала ВГ с распространением терагерцового импульса в толщине исследуемой структуры. Данное предположение также подтверждается экспериментом, проведенным со встречно распространяющимися терагерцовым возбуждающим импульсом и зондирующим оптическим импульсом. Стоит отметить, что ситуация со встречным распространением терагерцового и оптического импульсов реализуется и в случае эксперимента в геометрии сонаправленных импульсов, в случае переотражения терагерцового импульса от задней поверхности образца. Расчет времени взаимодействия импульсов в подложке ($L = 600$ мкм) согласно формуле $t = \frac{L}{c} (n_{THz} + n_{opt})$ при известных показателях преломления на частотах терагерцового $n_{THz} = 3,11$ и оптического $n_{opt} = 1,72$ [11] импульсов в MgO дает значение равное 9,8 пс, что согласуется с длительностью области скачкообразного увеличения сигнала ВГ в обеих геометриях эксперимента.

Изменение величины детектируемого сигнала ВГ в этой области может быть объяснена на основании статической поляризационной зависимости

генерации сигнала ВГ исследуемой структурой от поворота поляризации оптического излучения на основной частоте в отсутствие терагерцового импульса. Материал подложки MgO не является электрооптическим, однако в присутствии распространяющегося интенсивного терагерцового импульса образуется область наведенной анизотропии, действующая на оптический импульс как фазовая пластина. Так оптическое излучение при взаимодействии с терагерцовым импульсом в объеме centrosymmetric подложки претерпевает поворот поляризации.

Поскольку источником ВГ в исследуемой структуре является пленка BST, то оптический импульс, достигший пленки в результате переотражения от задней грани и повернутый на величину, пропорциональную электрическому полю терагерцового импульса, определяет величину скачкообразного изменения сигнала ВГ. Так воздействие терагерцового импульса с напряженностью поля порядка 1 МВ/см приводит к повороту поляризации оптического импульса на угол $\alpha \sim 16^\circ/\text{мм}$ за счет электрооптического эффекта.

Далее в главе приводится результат экспериментального воздействия ТГц импульса на кристалл потенциального сегнетоэлектрика SrTiO₃. Методом терагерцовой спектроскопии с временным разрешением показано, что низкочастотный терагерцовый отклик от SrTiO₃ в основном обусловлен низколежащей мягкой фононной модой TO1 с частотой 2,7 ТГц.

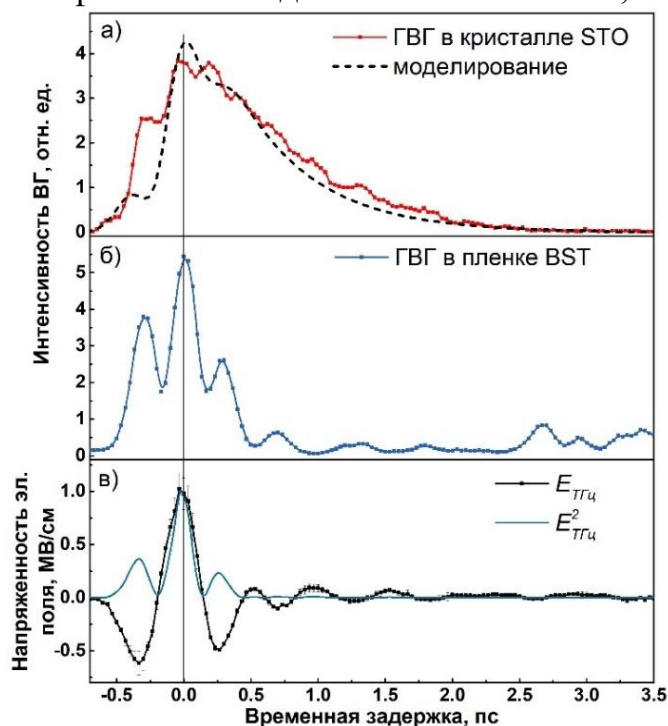


Рисунок 14. Динамика нелинейно-оптического отклика, индуцированного электрическим полем терагерцового импульса а) в кристалле STO, б) в пленке BST, в) временной профиль ТГц импульса.

В отличие от нелинейно-оптического сигнала, полученного при возбуждении сегнетоэлектрической пленки BST, сигнал от кристалла потенциального сегнетоэлектрика STO демонстрирует иную форму (рисунок 14). В момент воздействия ТГц импульса наблюдается резкое

увеличение интенсивности ВГ с дальнейшим экспоненциальным затуханием сигнала после окончания воздействия ТГц импульса. При этом абсолютное значение индуцированного сигнала ВГ при воздействии пикового значения напряженности поля ТГц импульса (~ 500 кВ/см) в STO по порядку величины совпадает с наблюдаемым сигналом в BST при одинаковых условиях возбуждения. Отметим при этом, что сигнал ВГ от кремния, обладающего только электронным вкладом в нелинейную восприимчивость, в тех же условиях в 20 раз меньше. Поэтому по величине электроиндуцированного нелинейно-оптического отклика можно сделать вывод о том, что основной вклад в его генерацию вносит ионная компонента тензора нелинейной восприимчивости $\chi^{(3)}$, аналогично вкладу ионной компоненты в линейную восприимчивость [12,13].

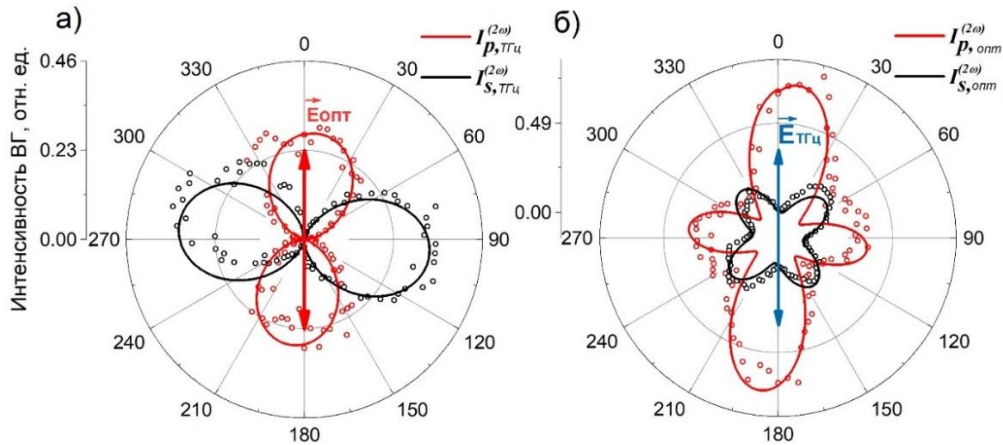


Рисунок 15. Зависимости интенсивности ВГ при вращении поляризации в $t_3 = 0$ пс а) ТГц импульса и б) зондирующего ИК импульса.

Анализируются статические анизотропные зависимости генерации ВГ (рисунок 15) в момент воздействия пиковой напряженности электрического поля ТГц импульса ($t_3 = 0$ пс) на кристалл SrTiO₃. Экспериментальные зависимости интенсивности ВГ были аппроксимированы как функция поворота плоскости поляризации падающих излучений (терагерцового или оптического) при анализируемых ортогональных поляризациях зондирующего излучения $I_p^{(2\omega)}$ и $I_s^{(2\omega)}$:

$$\begin{aligned}
 I_{p,THz}^{(2\omega)} &= (0,0032 \times (\chi_2 + \chi_3) \times \cos(\phi_{THz})^2 + \\
 &+ (0.0217 \chi_1 + 0.02813 \chi_2 + 0.0916 \chi_3) \times \cos(\phi_{THz})^2 + \\
 &+ 0.1667 (\chi_1 - \chi_2) \times \sin(\phi_{THz})^2)^2 \\
 I_{s,THz}^{(2\omega)} &= 0.0094 (\chi_1 - \chi_3)^2 \times \cos(\phi_{THz})^2 \times \sin(\phi_{THz})^2 \\
 I_{p,omn}^{(2\omega)} &= k(0,0032 \times (\chi_2 + \chi_3) \times \cos(\phi_{omn})^2 + \\
 &+ (0.0217 \chi_1 + 0.02813 \chi_2 + 0.0916 \chi_3) \times \cos(\phi_{omn})^2 + \\
 &+ 0.1667 (\chi_1 - \chi_2))^2 \\
 I_{s,omn}^{(2\omega)} &= l(0.0192 \chi_1 - 0.0192 \chi_2 - 0.0425 \chi_3)^2 \times \cos(\phi_{omn})^2 \times \sin(\phi_{omn})^2
 \end{aligned} \tag{8}$$

где варьируемыми параметрами были компоненты χ_1, χ_2, χ_3 , коэффициенты пропорциональности k и l . Числовые коэффициенты в выражении (8) возникают в результате перехода из лабораторной системы координат в кристаллографическую.

В результате совместной аппроксимации экспериментальных результатов были найдены относительные величины компонент тензора нелинейной восприимчивости третьего порядка: $\chi_1 = 0$, $\chi_2 = 4,61 \pm 0,12$, $\chi_3 = 7,62 \pm 0,08$.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе экспериментально и теоретически исследовано воздействие интенсивных электромагнитных импульсов терагерцового диапазона частот на динамику нелинейно-оптического отклика в пленке $\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3$ и монокристалле SrTiO_3 , связанную с изменением сегнетоэлектрического параметра порядка. При этом получены следующие основные результаты:

1. Методом терагерцового возбуждения – нелинейно-оптического зондирования экспериментально продемонстрирована модуляция нелинейно-оптического отклика на частоте второй оптической гармоники на пикосекундном временном масштабе при воздействии интенсивных терагерцовых импульсов. Временная форма нелинейно-оптического отклика в пленке BST следует форме возбуждающего импульса без запаздывания пределах погрешности в то время, как отклик в STO характеризуется экспоненциальным затуханием.

2. Сравнение отношения сигналов на частоте второй оптической гармоники при воздействии интенсивных терагерцовых импульсов и в их отсутствии в сегнетоэлектрической пленке BST, потенциальном сегнетоэлектрике STO, кремнии Si и арсениде галлия GaAs позволяет утверждать, что нелинейно-оптический отклик в BST и STO обусловлен ионной составляющей.

3. Теоретическое исследование динамики сегнетоэлектрической поляризации при воздействии квазиоднопериодных ТГц импульсов на пленку BST, в основном, согласуются с экспериментальными результатами. Путем численного решения уравнения Ландау-Халатникова с реальными константами в разложении термодинамического потенциала показано, что воздействие интенсивных импульсов терагерцового диапазона частот приводит к модуляции поляризации, а при достижении порогового значения (~ 400 кВ/см) к динамическому переключению поляризации. Сильная нелинейная зависимость интенсивности ГВГ от квадрата пикового значения поля ТГц импульса, наблюдаемая в эксперименте, проявляет пороговый характер и является индикатором динамического переключения состояния поляризации.

4. Сигнал ВГ, индуцированный ТГц импульсом в пленке BST, демонстрирует уменьшение интенсивности и частоты при приближении к температуре фазового перехода со стороны низких температур. Такое поведение

характерно для параметра порядка и мягкой фононной моды в сегнетоэлектрике, проявляющем фазовый переход типа «смещение».

5. Показано, что интенсивные терагерцовые импульсы способны наводить сильную анизотропию физических свойств в centrosymmetric кристалле MgO, приводящую к повороту поляризации зондирующего импульса при их совместном распространении через кристалл. При распространении импульсов в кристалле толщиной 600 мкм поворот поляризации зондирующего ИК импульса составил $\sim 10^\circ$, а удельный угол поворота вектора поляризации составляет $16^\circ/\text{мм}$.

6. При помощи метода терагерцовой спектроскопии с временным разрешением были исследованы диэлектрические свойства монокристалла потенциального сегнетоэлектрика титаната стронция в частотной области от 0,3 до 1,3 ТГц. Показано, что низкочастотный терагерцовый отклик в SrTiO₃ в основном обусловлен низколежащей мягкой фононной модой TO1 с частотой 2,7 ТГц.

7. Воздействие интенсивных ТГц импульсов на кристалл SrTiO₃ приводит к нарушению инверсионной симметрии и иницированию полярного состояния на временах порядка времени возбуждающего импульса. В результате совместной теоретической аппроксимации экспериментально полученных зависимостей интенсивности ГВГ от угла поворота плоскости поляризации терагерцовой и оптической волн найдены относительные значения компонент тензора нелинейной восприимчивости третьего порядка в соотношении $\chi_{xxx}^{(3)} : \chi_{xyy}^{(3)} : \chi_{xyx}^{(3)} = 0:1:1,65$.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих журналах из перечня ВАК и индексируемых в международных базах цитирования:

1. Билык В.Р., Гришунин, К.А. Комплексный показатель преломления титаната стронция в терагерцовом диапазоне частот // Российский технологический журнал. 2019. Т.7. №4. С. 71–80. (ВАК)

2. Mishina E. et al. Ultrafast polarization switching of (BaSr)TiO₃ thin film by a single-period terahertz pulse in a vicinity of phase transition // Ferroelectrics. 2018. Vol. 532, № 1. P. 199–207. (Web of Science, ВАК)

3. Mishina E. et al. Polarization switching in ferroelectric thin film induced by a single-period terahertz pulse // MRS Adv. 2018. Vol. 3, № 33. P. 1901–1906. (Web of Science, ВАК)

4. Grishunin K. et al. Transient Second Harmonic Generation Induced by Single Cycle THz pulses in Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO₃/MgO // Sci. Rep. 2019. Vol. 9, № 1. P. 697. (Web of Science, ВАК)

Патенты:

1. Гришунин К.А., Билык В.Р. Интерактивный учебный симулятор лабораторной установки на основе метода оптической спектроскопии временного разрешения для исследования сверхбыстрых процессов, происходящих в твердых телах под действием фемтосекундного лазерного импульса // Программа для ЭВМ №2016612988.

Список цитируемой литературы:

1. Kirilyuk A., Kimel A. V., Rasing T. Ultrafast optical manipulation of magnetic order // *Rev. Mod. Phys.* 2010. Vol. 82, № 3. P. 2731–2784.
2. Stupakiewicz A., Szerenos K., Afanasiev D., Kirilyuk A., Kimel A. V. Ultrafast nonthermal photo-magnetic recording in a transparent medium // *Nature*. 2017. Vol. 542, № 7639. P. 71–74.
3. Vicario C., Ovchinnikov A. V., Ashitkov S.I., Agranat M.B., Fortov V.E., Hauri C.P. Generation of 0.9-mJ THz pulses in DSTMS pumped by a Cr:Mg₂SiO₄ laser // *Opt. Lett.* 2014. Vol. 39, № 23. P. 6632.
4. Chen F., Zhu Y., Liu S., Qi Y., Hwang H.Y., Brandt N.C., Lu J., Quirin F., Enquist H., Zalden P., Hu T., Goodfellow J., Sher M.-J., Hoffmann M.C., Zhu D., Lemke H., Glowia J., Chollet M., Damodaran A.R., Park J., et al. Ultrafast terahertz-field-driven ionic response in ferroelectric BaTiO₃ // *Phys. Rev. B*. 2016. Vol. 94, № 18. P. 180104.
5. Cohen R.E. Origin of ferroelectricity in perovskite oxides // *Nature*. 1992. Vol. 358, № 6382. P. 136–138.
6. Mishina E., Grishunin K., Bilyk V., Sherstyuk N., Sigov A., Mukhortov V., Ovchinnikov A., Kimel A. Ultrafast polarization switching of (BaSr)TiO₃ thin film by a single-period terahertz pulse in a vicinity of phase transition // *Ferroelectrics*. 2018. Vol. 532, № 1. P. 199–207.
7. Anokhin A.S., Yuzyuk Y.I., Lyanguzov N. V., Razumnaya A.G., Stryukov D. V., Bunina O.A., Golovko Y.I., Shirokov V.B., Mukhortov V.M., El Marssi M. Direct transition from the rhombohedral ferroelectric to the paraelectric phase in a (Ba,Sr)TiO₃ thin film on a (111)MgO substrate // *EPL (Europhysics Lett.)*. 2015. Vol. 112, № 4. P. 47001.
8. Chew K.-H., Osman J., Stamps R.L., Tilley D.R., Webb J.F. Theory of far infrared spectroscopy for ferroelectric size effects // *Integr. Ferroelectr.* 1999. Vol. 23, № 1–4. P. 161–186.
9. Caputo J.-G., Maimistov A.I., Mishina E.D., Kazantseva E. V., Mukhortov V.M. High-frequency polarization switching of a thin ferroelectric film // *Phys. Rev. B*. 2010. Vol. 82, № 9. P. 094113.
10. Grischkowsky D., Keiding S. THz time-domain spectroscopy of high T_c substrates // *Appl. Phys. Lett.* 1990. Vol. 57, № 10. P. 1055–1057.
11. Stephens R.E., Malitson I.H. Index of refraction of magnesium oxide // *J. Res. Natl. Bur. Stand.* (1934). 1952. Vol. 49, № 4. P. 249.
12. Wang F. Calculation of the electro-optical and nonlinear optical coefficients of ferroelectric materials from their linear properties // *Phys. Rev. B*. 1999. Vol. 59, № 15. P. 9733–9736.
13. Veithen M., Gonze X., Ghosez P. First-Principles Study of the Electro-Optic Effect in Ferroelectric Oxides // *Phys. Rev. Lett.* 2004. Vol. 93, № 18. P. 187401.

Подписано в печать 24.01.2020. Формат 60 x 84 ¹/₁₆.

Усл. печ. л. 1,4. Тираж 100 экз. Заказ № 20.

Редакционно-издательское управление

Тверского государственного университета.

Адрес: 170100, г. Тверь, Студенческий пер. 12, корпус Б.

Тел. РИУ (4822) 35-60-63.