

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу **Билька Владислава Романовича** «Динамика диэлектрической поляризации под действием электрического поля терагерцовой частоты в тонкой пленке титаната бария-стронция и кристалле титаната стронция», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Сегнетоэлектрические (СЭ) материалы широко используют в микро- и оптоэлектронике в качестве активных элементов памяти, оптических конверторов частот, электрооптических модуляторов, сенсоров, в волноводных устройствах.

Одной из тенденций современной электроники является использование электромагнитных импульсов с частотой, лежащей в области фоновых колебаний, при возбуждении динамики кристаллической решетки в сегнетоэлектриках. Такие работы получили развитие в течение последнего десятилетия в связи с созданием источников генерации интенсивных терагерцовых импульсов с напряженностью электрических полей, достигающей десятков МВ/см. Реализация возможности непосредственного резонансного воздействия на колебания мягкой фоновой моды в сегнетоэлектрике электрическим полем пикосекундной длительности определяет перспективы сверхбыстрого управления поляризацией.

Таким образом, **актуальность** темы представленной к защите диссертационной работы Билька В.Р., посвященной экспериментальному и теоретическому исследованию процессов управления сегнетоэлектрической поляризацией мощными импульсами терагерцового поля на временах порядка единиц пикосекунд, не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения и четырех глав, включает обзор литературы с описанием основных свойств СЭ материалов (глава 1), описание использованных экспериментальных методик (глава 2), результаты характеристики исследуемой пленки $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$ (BST) методами рентгеновской дифракции и нелинейно-оптической конфокальной микроскопии, экспериментального и теоретического исследования влияния интенсивных импульсов терагерцовой частоты на динамику поляризации в СЭ пленке (глава 3), результаты экспериментальных и теоретических исследований структурного и нелинейно-оптического откликов centrosymmetric сред на примере подложки MgO и кристалла SrTiO_3 (глава 4), заключение и список цитируемой литературы из 160 наименований. Диссертация изложена на 132 страницах, включает 44 рисунка и 1 таблицу.

Во **введении** диссертантом обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи работы, отмечены научная новизна и практическая значимость работы, представлены научные положения, выносимые на защиту, перечислены объекты и методы исследования,

приведены сведения об апробации работы и публикациях по теме диссертации, выделен личный вклад автора.

Цель работы – исследование динамики поляризации сегнетоэлектрика при воздействии мощного однопериодного импульса электрического поля терагерцовой частоты при регистрации нелинейно-оптического отклика.

Задачи работы включают экспериментальное исследование действия электрического поля однопериодных терагерцовых импульсов на изменение состояния поляризации в СЭ пленке BST, измеряемое по нелинейно-оптическому отклику, на нелинейно-оптические характеристики centrosymmetric сред (кристаллов SrTiO₃ и Si, подложки MgO) и неcentrosymmetric GaAs, теоретическое описание динамики поляризации и параметров второй оптической гармоники в этих объектах по время действия электрического поля терагерцового импульса.

Сформулированные цель и задачи работы отвечают **критериям новизны**, важны для создания новых устройств микро- и нанoelectronics, а положения, выносимые на защиту, в полной мере отражают содержание диссертационной работы.

В первой главе (литературном обзоре) диссертант описывает основные свойства СЭ материалов - BaTiO₃ и твердого раствора Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO₃, приводит рассмотрение сегнетоэлектрического параметра порядка в рамках феноменологической теории фазовых переходов Ландау, описывает достижения проведенных теоретических и экспериментальных исследований зарубежными и российскими научными группами в области сверхбыстрого управления параметром порядка в сегнетоэлектриках.

Во второй главе описаны экспериментальные методики, использованные диссертантом, в том числе изложены принципы методик генерации импульсов терагерцового диапазона частот с различной напряженностью электрического поля и генерации второй оптической гармоники при исследовании сегнетоэлектрических материалов. Описаны методики нелинейно-оптической сканирующей конфокальной микроскопии, методики возбуждения-зондирования с временным разрешением, особенности их применения при исследовании процессов взаимодействия ТГц излучения с сегнетоэлектрическими материалами.

В третьей главе приведены результаты исследования СЭ пленки BST методами рентгеновской дифракции и нелинейно-оптической конфокальной микроскопии, а также – результаты экспериментального и теоретического исследованию влияния импульсов терагерцовой частоты на динамику состояния поляризации в СЭ пленке.

Установлено соответствие результатов численного моделирования динамики поляризации в момент воздействия пикового значения поля терагерцовых импульсов с наблюдаемыми нелинейными зависимостями в сигнале второй гармоники. Показано, что

при приближении к фазовому переходу со стороны низких температур имеет место характерное для сегнетоэлектриков уменьшение величины спонтанной поляризации и регистрируемое уменьшение интенсивности сигнала второй оптической гармоники.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований нелинейно-оптического отклика centrosymmetric сред в поле терагерцовых импульсов - кристаллов SrTiO_3 и Si , подложки для пленок MgO . Приведены также данные по терагерцовой спектроскопии этих материалов. Показано, что низкочастотный отклик в кристалле SrTiO_3 обусловлен фонной модой на частоте 2,7 ТГц. Методом терагерцового возбуждения – нелинейно-оптического зондирования - показана возможность воздействия на данную моду импульсами терагерцового поля, приводящего к возникновению полярного состояния, сопровождающегося анизотропными зависимостями генерации нелинейно-оптического сигнала при возбуждении терагерцовыми импульсами. Продемонстрирован электрооптический эффект в подложке MgO , наблюдаемый в присутствии электрического поля терагерцового импульса.

В заключении сформулированы выводы по работе, в которой теоретически и экспериментально изучена динамика поляризации в пленке BST и кристалле SrTiO_3 при резонансном воздействии интенсивных терагерцовых электромагнитных импульсов на фонные моды данных материалов.

Отметим наиболее важные **новые результаты**, полученные диссертантом.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований воздействия сверхсильных, вплоть до 23МВ/см, электрических полей однопериодных терагерцовых импульсов на СЭ пленку BST и монокристалл SrTiO_3 .

Диссертантом продемонстрирована модуляция СЭ поляризации 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.

Впервые проведено теоретическое исследование динамического переключения состояния поляризации в пленке BST при воздействии ТГц импульсов пикосекундной длительности в рамках модели, основанной на решении уравнения Ландау-Халатникова.

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

В работе наблюдался электрооптический эффект в подложке MgO в присутствии электрического поля терагерцового импульса.

Полученные знания о свойствах СЭ материалов и их поведении в терагерцовых электрических полях, развитие сверхбыстрого метода управления функциональными свойствами СЭ материалов имеют **фундаментальную и практическую** значимость и могут

быть использованы при реализации устройств сегнетоэлектрической памяти и модуляторов оптического излучения, работающих в ТГц диапазоне частот.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в развитии сверхбыстрого метода управления функциональными свойствами СЭ материалов для устройств микро- и нанoeлектроники.

По содержанию и оформлению автореферата и диссертации можно сделать ряд замечаний.

1. Диссертантом не обоснован выбор конкретного состава СЭ пленки твердого раствора $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$, а также кристалла SrTiO_3 в качестве объектов исследования.
2. В диссертации отсутствует сравнительный анализ полученных результатов исследования с опубликованными данными по BaTiO_3 , на которые диссертант ссылается в литературном обзоре [Chen C. Et al, Ultrafast terahertz-field-driven ionic response in ferroelectric BaTiO_3 . Phys. Rev. B. 2016, V.94, P. 180104] и с опубликованными данными по пленкам твердых растворов $(\text{Ba,Sr})\text{TiO}_3$ [Snokhin A.S., et al., Direct transition from the rhombohedral ferroelectric to the paraelectric phase in a $(\text{Ba,Sr})\text{TiO}_3$ thin film on a (111) MgO substrate. EPL Europhys. Lett., 2015, V. 112, p. 47001].
3. В списке цитируемой литературы в автореферате ссылка [6] соответствует публикации автора [2].
4. В списке публикаций основных результатов диссертации в автореферате не указана фамилия диссертанта.
5. В текстах автореферата и диссертации имеются также опечатки и стилистические неточности (в автореферате - на страницах 6, 9, 11, 15, 18, 19, 22, в диссертации – на стр. 17, 25, 26, 28, 29, 31, 33, 35, 38, 81, 99, 110)

В целом указанные замечания и отмеченные неточности не снижают положительную оценку диссертации, которая выполнена на высоком экспериментальном и теоретическом уровне, является законченной научной квалификационной работой, содержащей решение задач, имеющих важное значение для физики конденсированного состояния и развития нового направления – ТГц фотоники, перспектив создания новых устройств, работающих в ТГц диапазоне частот.

Оценивая работу в целом, следует заключить, что в диссертации Билыка В.Р. получены **новые** ценные в научном и прикладном отношении результаты, и по ним сделаны вполне обоснованные выводы. **Достоверность** полученных результатов и **обоснованность** выводов диссертации обеспечена высоким научно-методическим уровнем проведенных исследований – применением современных экспериментальных методов, использованием надежных методов анализа результатов и хорошей теоретической подготовкой диссертанта.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 4-х статьях в рецензируемых отечественных и международных научных журналах из перечня рекомендованных ВАК, доложены на многочисленных Всероссийских и Международных научных конференциях. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Автореферат и публикации достаточно полно отражают содержание диссертации.

Диссертационная работа Билыка Владислава Романовича «Динамика диэлектрической поляризации под действием электрического поля терагерцовой частоты в тонкой пленке титаната бария-стронция и кристалле титаната стронция» соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842 (с изменениями и дополнениями от 28.08.2017), предъявленным Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. **Билык Владислав Романович** заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния» согласно пункту 4 паспорта специальности.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук (02.00.04 – Физическая химия)
Главный научный сотрудник Лаборатории функциональных нанокмпозитов
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный
исследовательский центр химической физики им. Н.Н.Семенова
Российской академии наук (ФИЦ ХФ РАН)
профессор

Политова Екатерина Дмитриевна
10 марта 2020 г.

Адрес: 119991, Москва, ул. Косыгина, 4
Тел: +79096474597
e-mail: politova@nifhi.ru

Подпись Е.Д. Политовой удостоверяю
Ученый секретарь ФИЦ ХФ РАН
к.ф.-м.н.

Ларичев М.Н.