

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
«Федеральный исследовательский центр
«Казанский научный центр
Российской академии наук»

Академик РАН _____ Синяшин О.Г.

«20» февраля 2020 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»» на диссертационную работу **Билык 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.

Актуальность темы

Диссертационная работа В.Р. Билык посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию воздействия электромагнитных импульсов терагерцового диапазона частот на динамику состояния поляризации в пленке титаната бария стронция и монокристалле титаната стронция. Актуальность заявленного исследования обуславливается необходимостью в поиске концептуально нового способа воздействия на структурные свойства диэлектрических материалов, а именно управления сегнетоэлектрической поляризацией, посредством воздействия непосредственно на колебательные фононные моды. Для этого в работе используются терагерцовые импульсы с напряженностью электрического поля, сопоставимой и зачастую

превышающей поля пробоя в сегнетоэлектрических конденсаторах. Методика генерации второй оптической гармоники, выбранная автором в качестве основного инструмента исследования, успешно применяется при исследовании сегнетоэлектрических свойств диэлектриков за счет высокой чувствительности к симметрии исследуемой структуры.

Структура диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и список цитируемой литературы из 160 наименований. Общий объём диссертации составляет 132 страницы и содержит 44 рисунка и 1 таблицу.

Во введении приводится обоснование актуальности выбранной тематики исследования, формулируются цель и необходимые для ее достижения задачи.

В первой главе представлен литературный обзор по заявленной тематике исследования. Показаны современные достижения в области экспериментальных исследований сверхбыстрого управления поляризацией, в т.ч. электромагнитными импульсами терагерцового диапазона частот. При достигаемых на сегодняшний день напряженностях электрического поля в импульсе, демонстрируется возможность управления сегнетоэлектрической поляризацией на временах, сопоставимых с периодом колебаний низкочастотных оптических фононов. Представлены основные сегнетоэлектрические свойства исследуемых материалов.

Во второй главе приводятся описание методик экспериментального исследования. Обосновывается выбор и применимость методики генерации второй оптической гармоники при исследовании состояния поляризации в сегнетоэлектриках. Описана методика нелинейно-оптической конфокальной микроскопии. Детально представлены методики, обеспечивающие временное разрешение на субпикосекундном масштабе: терагерцовая спектроскопия с

временным разрешением и терагерцовое возбуждение – нелинейно-оптическое зондирование.

В третьей главе представляются экспериментальные результаты по воздействию ТГц электромагнитных импульсов на динамику состояния поляризации. В данной главе автором показано, что воздействие интенсивных ТГц импульсов приводит к модуляции сегнетоэлектрической поляризации в пленке $\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3$. Проявление сильной нелинейности объясняется динамическим переключением сегнетоэлектрической поляризации и подтверждается моделированием динамики поляризации в поле терагерцового импульса согласно решению уравнения Ландау-Халатникова. Показано, что переключение сегнетоэлектрической поляризации в пленке титаната бария происходит при достижении пикового значения напряженности электрического поля в ТГц импульсе ~ 400 кВ/см за время воздействия ТГц импульса.

В четвертой главе представлены результаты исследования нелинейно-оптического отклика на импульсы терагерцового поля в структуре пленки титаната бария стронция на подложке оксида магния. Наблюдаемый отклик обусловлен возникновением в толщине подложки области оптической неоднородности, распространяющейся со скоростью терагерцового импульса, в результате которой, зондирующий оптический импульс претерпевает поворот поляризации. Также в данной главе приводится результат исследования воздействия ТГц импульсов на кристалл потенциального сегнетоэлектрика. На основании совместной аппроксимации поляризационных зависимостей генерации второй оптической гармоники найдены компоненты тензора нелинейно восприимчивости третьего порядка для данного материала.

Оценка содержания диссертации

Полученные результаты работы подробно раскрыты в тексте диссертации. В диссертации сформулированы **научная новизна** и пять научных положений, выносимых на защиту. Все выводы хорошо обоснованы и не вызывают возражений.

Научная новизна

В работе автором была впервые продемонстрирована модуляция сегнетоэлектрической поляризации в поле терагерцового импульса (0,1-3,0 ТГц) с напряженностью до 23 МВ/см в пленке титаната бария стронция и кристалле титаната стронция посредством детектирования нелинейно-оптического сигнала на частоте второй гармоники. Результаты моделирования согласно решению уравнения Ландау-Халатникова демонстрируют корреляцию с полученными в эксперименте зависимостями интенсивности второй оптической гармоники, что объясняется модуляцией и динамическим переключением поляризации в пленке титаната бария стронция в поле терагерцовых импульсов.

Наблюдения за особенностями генерации второй гармоники при прохождении структуры BST/MgO показали наличие электрооптического эффекта в поле ТГц импульса в подложке MgO.

Проведённый анализ анизотропных зависимостей интенсивности второй гармоники в кристалле титаната стронция, совместно с наблюдением динамического отклика, свидетельствует о возникновении полярного состояния в кристалле потенциального сегнетоэлектрика в поле ТГц импульсов.

Все представленные результаты получены впервые.

Практическая значимость работы

Практическая значимость работы состоит в развитии методов сверхбыстрой модуляции электрооптических свойств сегнетоэлектрических материалов и, в частности, управления параметром порядка на терагерцовых

частотах ($\sim 10^{12}$ Гц), тем самым непосредственно приближаясь к фундаментальному пределу скорости переключения сегнетоэлектрической поляризации. Полученные данные позволяют оценить перспективы использования наблюдаемых эффектов в устройствах нового поколения (в частности полностью оптически-управляемых).

Достоверность и обоснованность результатов и выводов подтверждается корреляцией экспериментальных данных с теоретическими расчетами, полученными при использовании современного экспериментального оборудования и распространённых теоретических моделей. Полученные результаты и выводы не противоречат аналогичным данным, опубликованным российскими и зарубежными научными группами.

Основные положения, выносимые на защиту, последовательно обосновываются в ходе изложения материала диссертационной работы.

К **важнейшим результатам** диссертационной работы Билык В.Р. можно отнести экспериментальное наблюдение в сегнетоэлектрической пленке $\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3$ нелинейно-оптического отклика в результате действия терагерцового импульса и теоретическое описание этих результатов с использованием уравнения Ландау-Халатникова для описания динамики поляризации. Отдельно следует отметить, как положительную особенность диссертации, уместное сочетание экспериментальных исследований с теоретическим моделированием и анализом полученных результатов.

Результаты исследований обладают несомненной научной новизной и могут способствовать дальнейшему развитию методов терагерцового воздействия для изучения динамики поляризации в сегнетоэлектриках и дальнейшего поиска новых способов локального переключения сегнетоэлектрической поляризации. Результаты работы достаточно полно изложены в 4 рецензируемых статьях в журналах из списка

рекомендованных ВАК, а также были широко апробированы на российских и международных конференциях.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.

Результаты и выводы диссертационной работы Билык В. Р. могут быть рекомендованы к использованию многими организациями Российской Федерации: ИОФ РАН, ФИ РАН, ФТИ им. Иоффе, КФТИ им Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН, ИФ им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН, ФИЦ ЮНЦ РАН, Институт физики микроструктур РАН, ведущими университетами, такими как МГУ, Санкт-Петербургский государственный университет, НИУ МИЭТ, РТУ МИРЭА, КФУ, ЮФУ, УФУ и др.

В то же время необходимо отметить следующие замечания:

1. В работе не говорится, может ли облучение исследуемых материалов терагерцовыми импульсами приводить к каким-либо тепловым эффектам и как наличие этих эффектов могло бы повлиять на динамику наблюдаемого сигнала.
2. При расчете динамики поляризации в поле терагерцового импульса не учитывается влияние деполяризующего поля в диэлектрике, возникающего на границе области фокусировки терагерцового импульса.
3. Сравнение экспериментальных результатов и теоретически рассчитанных зависимостей нелинейно-оптического отклика от пикового значения напряженности электрического поля приводится не во всем диапазоне имеющихся экспериментальных данных, вплоть до 23 МВ/см.
4. В четвертой главе автор отмечает, что в поле терагерцового импульса в материале подложки оксиде магния возникает электрооптический эффект,

однако, не приводятся данных о его характере: линейном или квадратичном от величины напряженности поля.

5. В тексте диссертации присутствуют опечатки и стилистические неточности.

Отмеченные замечания не снижают общую положительную оценку представленной диссертационной работы и не противоречат ее основным выводам.

Заключение

Диссертационная работа Билык В.Р. является самостоятельным и целостным научным исследованием, выполненным на высоком уровне. Представленные результаты имеют научную новизну, а также теоретическую и практическую ценность, и получены в интенсивно развивающейся и перспективной области исследований в современной физике конденсированного состояния. Автореферат диссертации полностью отражает ее содержание.

Диссертационная работа Билык В.Р. удовлетворяет всем требованиям ВАК п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842, предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Билык В.Р. Заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа представлена и обсуждена на расширенном научном семинаре отдела физики перспективных материалов Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского – обособленного структурного подразделения Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук» протокол №1 от 19

февраля 2020 года, отзыв заслушан и утвержден на заседании Ученого Совета Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского – обособленного структурного подразделения Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук» протокол №5 от 20 февраля 2020 года.

Ведущий научный сотрудник,
зав. Лаборатории физики ферроиков
и функциональных материалов,
КФТИ – обособленного структурного
подразделения ФИЦ КазНЦ РАН
телефон: 8 (843) 2721254
420029, Российская Федерация, Татарстан,
г. Казань, Сибирский тракт 10/7
E-mail: mamin@kfti.knc.ru
д. физ.-мат. наук, с.н.с,

Мамин Ринат Файзрахманович

Заместитель директора по научной
работе ФИЦ КазНЦ РАН
телефон: 8 (843) 2720503
420029, Российская Федерация, Татарстан,
г. Казань, Сибирский тракт 10/7
E-mail: a.a.kalachev@mail.ru
д. физ.-мат. н. профессор РАН

Калачев Алексей Алексеевич

СВЕДЕНИЯ О ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»»
Почтовый адрес: 420111, Российская Федерация, Татарстан, г. Казань, ул. Лобачевского, 2/31, а/я 261.
Телефон организации: +7(843) 292-75-97
Факс: +7(843) 292-77-45
Адрес электронной почты организации: presidium@knc.ru
Адрес официального сайта
организации в сети Интернет <http://knc.ru/>

СВЕДЕНИЯ О ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

по диссертации Билык Владислава Романовича, выполненной на тему: «Динамика диэлектрической поляризации под действием электрического поля терагерцовой частоты в тонких пленках титаната бария-стронция и кристаллах титаната стронция» по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

1.	Полное наименование организации	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук» »
2.	Сокращенное наименование организации	ФИЦ КазНЦ РАН
3.	Организационно-правовая форма организации	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
4.	Ведомственная принадлежность организации	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
5.	Место нахождения	Российская Федерация, Татарстан, г. Казань,
6.	Почтовый адрес организации	420111, Российская Федерация, Татарстан, г. Казань, ул. Лобачевского, 2/31, а/я 261.
7.	Телефон организации	Телефон: +7(843) 292-75-97 Факс: +7(843) 292-77-45
8.	Адрес электронной почты организации	presidium@knc.ru
9.	Адрес официального сайта организации в сети Интернет	http://knc.ru/
10.	Руководитель организации	Академик Синяшин Олег Герольдович
11.	Наименование профильного структурного подразделения, занимающегося проблематикой диссертации	Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского – обособленное структурное подразделение Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук»
12.	Сведения о лице, утверждающем отзыв ведущей организации	Директор ФИЦ КазНЦ РАН, академик РАН Синяшин Олег Герольдович
13.	Сведения о составителе отзыва из ведущей организации	Мамин Ринат Файзрахманович, доктор физ.-мат. наук, с.н.с, ведущий научный сотрудник
14.	<p>Список публикаций работников ведущей организации по теме диссертации В.Р. Билык за последние 5 лет:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Р. Ф. Мамин, С. А. Мигачев, М. Ф. Садыков, Р. В. Юсупов, Фотопроводимость и фотостимулированные явления в PLZT керамике, ФТТ, т. 57, № 3, 519-522 (2015). 2. Р.Ф. Мамин, Т.С. Шапошникова, Возникновение релаксорного поведения, Письма в ЖЭТФ, т.111, №1 (2015) . 3. R.I. Batalov, R.M. Bayazitov, I.A. Faizrakhmanov, N.M. Lyadov, V.A. Shustov and G.D. Ivlev. Pulsed laser annealing of highly doped Ge:Sb layers deposited on different substrates // J. Phys. D: Appl. Phys. 49 (2016) 395102 (7pp). 4. Selective detection of intermolecular response in benzonitrile through double-pulse excitation in optical Kerr effect spectroscopy Nikiforov V.G., Zharkov D.K., Shmelev A.G., Leontyev A.V., Lobkov V.S. Applied Physics B: Lasers and Optics. 123. (2017) 1229. 5. Д.П.Павлов, И.И.Пиянзина, В.М.Мухортов, А.М.Балбашов, Д.А.Таюрский, И.А. 	

- Гарифуллин, Р.Ф.Мамин, Двумерный электронный газ на границе сегнетоэлектрика $\text{Ba}_0.8\text{Sr}_0.2\text{TiO}_3$ и антиферромагнетика LaMnO_3 , Письма в ЖЭТФ, том 106, вып. 7, с. 440 – 444 (2017).
6. Р.И. Баталов, Р.М. Баязитов, Г.А. Новиков, И.А. Файзрахманов, В.А. Шустов, Г.Д. Ивлев. Наносекундный импульсный отжиг сильно легированных слоев Ge:Sb на Ge подложках // Микроэлектроника, Т.47, №5, с.74-82 (2018).
7. Р.И. Баталов, В.В. Воробьев, В.И. Нуждин, В.Ф. Валеев, Д.А. Бизяев, А.А. Бухараев, Р.М. Баязитов, Ю.Н. Осин, Г.Д. Ивлев, А.Л. Степанов. Воздействие импульсного лазерного излучения на слои Si с высокой дозой имплантированных ионов Ag^+ // Оптика и спектр., Т.125, №4, с.549-555 (2018).
8. R.I. Batalov, V.I. Nuzhdin, V.F. Valeev, V.V. Vorobev, Yu.N. Osin, G.D. Ivlev, A.L. Stepanov Pulsed laser annealing of high-dose Ag^+ -ion implanted Si layer // J. Phys. D: Appl. Phys., v.51, p.015109(5pp.) (2018).
9. А.С. Елшин, И.В. Лунев, С.А. Мигачев, Д.К. Жарков, Р.И. Баталов, В.В. Базаров, Д.А. Бизяев, Т.С. Шапошникова, Р.Ф. Мамин, Свойства пленок титаната бария-стронция на кремниевой подложке для использования в солнечной энергетике, Наука юга России, Т. 14 № 3 с. 29–36 (2018).
10. V.G. Nikiforov, V.S. Lobkov, V.V. Samartsev, A.P.Saiko, Coherent control of the molecular dynamics in a liquid by femtosecond four-pulse excitation, Laser Physics, v. 25, 015701 (2015).
11. A.V. Leontyev, L.A. Nurtdinova, A.G. Shmelev, D.K. Zharkov, V.G. Nikiforov, V.S. Lobkov and V.V. Samartsev, Time-resolved photoinduced charge dynamics of Cd chalcogenide-based materials, Laser Phys. Lett. **16** 015901 (3pp) (2019).
12. V.G. Nikiforov, A.V. Leontyev, A.G. Shmelev, D.K. Zharkov, V.S. Lobkov and V.V. Samartsev, Ultrafast photoinduced charge dynamics in colloidal CdSe/CdS quantum dots in toluene, Laser Phys. Lett. **16** (2019) 065901 (6pp) (2019).
13. Р.И. Баталов, В.И. Нуждин, В.Ф. Валеев, Н.И. Нургазизов, А.А. Бухараев, Г.Д. Ивлев, А.Л. Степанов. Фотоэлектрические свойства композитных слоев Si с наночастицами Ag , полученных ионной имплантацией и лазерным отжигом // Оптика и спектр., Т.126(2), с.214-219 (2019).) (2019).
14. I.I. Piyanzina, D.P. Pavlov, R.R. Zagidullin, D.A. Tayurskii and R.F. Mamin, Structural and electronic properties of heterointerface composed of non-polar oxides: SrTiO_3 and ferroelectric BaTiO_3 , Ferroelectrics v.542, Issue 1, Pages: 7-12 (2019).) (2019).

Ведущая организация подтверждает, что соискатель не является ее сотрудником и не имеет научных работ по теме диссертации, подготовленных на базе ведущей организации или в соавторстве с ее сотрудниками.

Главный ученый секретарь ФИЦ КазНЦ РАН
к.х.н.

Зиганшина С.А.