

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной и инновационной
деятельности ФГБОУВО

«Тверской государственной
университет»»,

доктор технических наук, профессор




И.А. Каплунов

05 июня 2016 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Боднарчук Ядвиги Викторовны «Особенности формирования сегнетоэлектрических доменов в условиях пространственно неоднородных полей атомно-силового микроскопа и электронного облучения», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Диссертационная работа Боднарчук Ядвиги Викторовны посвящена изучению динамики доменной структуры и механизма формирования микродоменов и микродоменных комплексов с заданной конфигурацией в сегнетоэлектрических кристаллах и оптических волноводах на их основе под действием электрических полей зонда атомно-силового микроскопа (АСМ) и локального облучения электронными пучками в растровом электронном микроскопе (РЭМ).

Интерес к созданию регулярных сегнетоэлектрических доменных структур микро- и субмикроскопического масштаба и изучению механизмов их формирования связан с перспективами применения таких структур в интегральной оптике при создании преобразователей частоты лазерного излучения и необходимостью учета их влияния при создании оптических волноводов в нелинейных средах.

В качестве объектов исследования в работе выбраны модельные сегнетоэлектрические кристаллы LiNbO_3 , а также кристаллы твердых растворов $\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$ (SBN) со структурой тетрагональной вольфрамовой бронзы (ТВБ). Эти соединения являются эффективными материалами для создания нелинейных фотонных сред и подложек в волноводных элементах интегральной оптики.

В качестве метода исследования динамики и статистики доменов на нано- и микроскопическом уровне выбран метод атомно-силовой микроскопии (АСМ), который позволяет не только исследовать, но и создавать доменные структуры, используя зонд АСМ в качестве точечного электрода, индуцирующего локальное переключение, а также электронное облучение в растровом электронном микроскопе (РЭМ).

Актуальность темы исследования определяется практической важностью проблемы нелинейного преобразования излучения на доменных структурах в объемных оптических элементах и волноводных (интегральных) устройствах и перспективностью микроскопических методов (поля зонда АСМ и электронно-лучевой записи в РЭМ) для создания доменных структур с периодами вплоть до субмикронного масштаба.

Новизна исследований, выполненных в работе Я. В. Боднарчук, связана с анализом процессов переключения и формирования доменов на неполярных поверхностях кристаллов SBN, процесса записи доменов и доменных структур на этих поверхностях, а также с изучением процессов формирования доменных структур под действием электронного облучения в оптических волноводах на основе LiNbO₃, которые ранее не проводились.

Рецензируемая диссертация, имеет традиционную структуру и состоит из введения, 4 глав, выводов, списка опубликованных статей и списка цитируемой литературы из 129 наименований. Общий объем диссертации составляет 125 страниц, включая 59 рисунков и 5 таблиц.

Результаты работы прошли достаточную апробацию, они опубликованы в 6 статьях в отечественных и международных научных журналах, входящих в рекомендованный список ВАК Минобрнауки РФ, в том числе в 5 статьях, входящих в базу данных Scopus и WoS, а также в материалах 13 международных и национальных научных конференций.

Введение посвящено обоснованию актуальности темы диссертационной работы, определению цели исследования и формулировке задачи работы. В нем также отражена научная новизна, практическая значимость полученных результатов, сформулированы выносимые на защиту научные положения, дана информация об апробации работы, публикациях по теме диссертации, личном вкладе автора.

В первой главе представлен анализ литературных данных по теме исследования: обсуждаются современные представления о механизме сегнетоэлектрического переключения и динамики доменов с учетом механизма ползучести (creep); даны основные представления о специфике макроскопических свойств релаксорных сегнетоэлектриков и их связи с характерными для этих систем полярными нанокластерами (PNR); приводятся результаты исследования доменной структуры SBN и интерпретация наблюдаемых явлений в рамках теории случайного поля

(RF); приведен обзор полученных ранее результатов по записи доменов методом АСМ в SBN; сформулирована постановка задач диссертации.

Во второй главе представлены сведения об использованных методах исследования - методике зондовой микроскопии в сегнетоэлектрических кристаллах, а также обсуждены принципы записи доменов на поверхности SBN постоянным полем зонда АСМ и исследования доменов и доменных структур методом микроскопии пьезоотклика (PFM).

Глава 3 посвящена исследованиям записи доменов и доменных структур в поле зонда АСМ на неполярной поверхности кристаллов SBN с целью анализа особенностей переключения релаксорных сегнетоэлектриков, к которым относится этот материал. Описаны характеристики записи одиночных доменов и обсуждается механизм фронтального роста доменов на основании полученных результатов. Показано, что при приложении напряжения к зонду АСМ, находящемуся в контакте с неполярной поверхностью, домены, зародившиеся в точке контакта, прорастают вдоль полярной оси в приповерхностном слое под действием тангенциальной составляющей поля зонда. При проведении эксперимента удалось установить зависимость размеров доменов от приложенного к зонду напряжения и времени воздействия поля на поверхность кристалла. Анализ экспериментальной зависимости кинетики роста домена проведен на основе модели Миллера-Вайнрайха. Кроме того, приведены результаты измерений петель пьезоэлектрического гистерезиса на неполярной поверхности и проведено сравнение с результатами подобных измерений на полярной поверхности SBN. Обнаружена характерная для релаксорных сегнетоэлектриков низкочастотная дисперсия петель гистерезиса в области 1 – 10 Гц. Анализируется запись доменных решеток методом растровой литографии с использованием шаблона и процессы их релаксации при различной их ориентации относительно полярной оси. Обнаружена повышенная устойчивость структур встречных доменов, которая объясняется автором эффектами экранирования на доменных границах, нормальных к P_s .

В четвертой главе рассмотрены результаты исследования процессов переключения методами зондовой микроскопии в оптических волноводах, созданных имплантацией высокоэнергетичных ионов He в кристаллах SBN и LiNbO_3 . В первом разделе главы приведены краткие данные по принципам получения оптических волноводных структур методом ионной имплантации. Изложены результаты по записи доменов и доменных структур с помощью АСМ на He-имплантированной полярной поверхности кристалла SBN, приведена сравнительная оценка размера записанных доменов с толщиной имплантированного слоя. Обнаружена зависимость параметров процесса записи доменов от направления воздействующего электрического поля. Эта особенность сопровождается униполярностью, проявляющейся также в резкой асимметричности петель гистерезиса, и объясняющейся пиннингом доменов на структурно

поврежденном имплантированном слое. В этой главе приведены результаты исследования методами зондовой микроскопии доменных структур, записанных электронно-лучевым способом в волноводах на неполярной поверхности He-LiNbO_3 . Автор приводит краткий литературный обзор свойств кристаллов LiNbO_3 и принципов создания доменов электронно-лучевым методом на неполярной поверхности этого сегнетоэлектрика. Описываются результаты, указывающие, что рост доменов происходит в области, включающей в себя структурно поврежденный слой. Объяснение связывается с пиннингом растущего домена в имплантированном слое с повышенной концентрацией дефектов. Полученный результат позволяет при записи доменов электронным лучом подобрать методику, дающую максимальную регулярность решетки для волновода данной толщины.

Каждая глава диссертации сопровождается кратким заключением. В конце диссертации сформулированы общие выводы, которые отражают наиболее важные результаты работы в целом.

В качестве новых и наиболее важных результатов работы можно отметить следующие:

1. Впервые выполнено расширенное исследование формирования доменов на неполярной поверхности сегнетоэлектрика при приложении электрического поля зонда АСМ. Поле зонда АСМ созданы микродомены и регулярные микродоменные структуры на неполярной поверхности кристаллов релаксорного сегнетоэлектрика $\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$ (SBN). Показана информативность этого метода для исследования механизма динамики доменов. Впервые сформированы структуры встречных доменов (одиночных доменов “голова-к голове”, “хвост-к-хвосту” и встречных линейных доменов) на неполярной поверхности; установлена их повышенная устойчивость, связанная с процессами экранирования на доменной границе, нормальной P_s .

2. Показана возможность применения модели приближения поля линейного заряда к анализу механизма фронтального роста доменов на неполярной поверхности SBN под действием поля зонда АСМ. Отклонение значения равновесной длины доменов от значения, предсказываемого модельными расчетами, можно объяснить пиннингом доменных стенок на случайном внутреннем поле в объеме кристалла, характерном для релаксорных сегнетоэлектриков.

3. Впервые методами зондовой микроскопии исследовано формирование доменов в планарных оптических волноводах, созданных методом имплантации ионов He^+ на сегнетоэлектрических кристаллах. Поле зонда АСМ созданы микродомены и 1D и 2D микродоменные структуры в планарных оптических волноводах, изготовленных имплантацией ионов He с энергией 450 кэВ на кристаллах SBN.

5. При записи доменов методом АСМ в волноводах He-SBN выявлена значительная униполярность переключения, которая проявляется в

сильной зависимости процесса формирования доменов и кинетики их распада от знака записывающего напряжения поля зонда, т.е. от направления исходной остаточной поляризации. Эта униполярность, а также неустойчивость записанных структур объяснена пиннингом доменов на структурно поврежденном слое, возникающем при ионной имплантации.

6. Методом микроскопии пьезоотклика исследованы доменные структуры, впервые созданные электронным лучом РЭМ в планарных оптических волноводах, изготовленных имплантацией ионов He^+ с энергией 500 кэВ на неполярных поверхностях кристаллов LiNbO_3 . Исследование характеристик записанных доменных решеток от ускоряющего напряжения РЭМ U показало, что условием формирования регулярных решеток является $T_d \leq D$ (где T_d и D – глубина доменов и He -имплантированного слоя). Это позволяет выбрать величину U , обеспечивающую высокую однородность доменных решеток в волноводе данной толщины. При условии $T_d \leq D$ длина доменов и доменных решеток линейно увеличивается с временем облучения, что объясняется ростом доменов по закону вязкого трения. При $T_d > D$ линейность нарушается вследствие пиннинга доменов на He -имплантированном структурно поврежденном слое.

Практическая значимость работы не вызывает сомнений. Кристаллы SBN и LiNbO_3 широко используются на практике и являются перспективными материалами оптоэлектронной промышленности. Результаты диссертационной работы могут применяться в организациях и на предприятиях, выпускающих оптоэлектронные компоненты на основе этих материалов, при разработке новых применений. Исследуемые в работе регулярные сегнетоэлектрические доменные структуры микро- и субмикроскопического масштаба имеют широкие перспективы применения в интегральной оптике при создании преобразователей частоты лазерного излучения. Практическую значимость работы определяет также необходимость учета влияния доменной структуры на эксплуатационные параметры оптических волноводов на основе нелинейных сред.

В работе на основе АСМ исследований доменных структур, записанных электронно-лучевым методом в He -имплантированных волноводах на LiNbO_3 , выработаны рекомендации по выбору ускоряющего напряжения РЭМ, обеспечивающего оптимальные характеристики записываемых доменных решеток при данной толщине волновода.

Достоверность полученных в работе результатов достигается за счет применения современных методов экспериментального исследования нелинейных материалов: методов атомно-силовой микроскопии (АСМ), методов растровой и векторной литографии АСМ; метода пьезоэлектрического отклика (PFM), электронно-лучевой записи в РЭМ, метода конфокальной микроскопии на отражение. Для обработки данных

по доменным структурам был использован компьютерный программный пакет SPIP. Достоверность представленных результатов также подтверждается широким представлением и обсуждением результатов на научных мероприятиях разного уровня, а также их опубликованием в рецензируемых научных международных и российских журналах.

В качестве замечаний по рецензируемой диссертационной работе можно указать следующее:

1. Автор мог бы уделить больше внимания обсуждению причин смещения петель пьезоэлектрического гистерезиса, полученных по измерениям АСМ. Данный вопрос может быть связан с наличием внутренних электрических и механических полей, в то время как наличием внутренних электрических полей в работе объясняется ряд особенностей поведения доменных структур исследованных материалов.

2. Часть литературного обзора, включенная в главу 4, могла бы быть размещена в основном литературном обзоре диссертации в главе 1 без ущерба содержанию. Это дало бы возможность сохранения традиционного порядка изложения подобных работ.

Отмеченные замечания не снижают общую положительную оценку работы и ее научную и практическую значимость. Диссертация логично построена, ее структура и содержание соответствуют цели и задачам исследования. Положительной стороной диссертации является грамотный язык ее изложения, владение автором научной терминологией и его хорошая научная эрудиция. Личный вклад автора в диссертационную работу не вызывает сомнений. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертация Боднарчук Ядвиги Викторовны «Особенности формирования сегнетоэлектрических доменов в условиях пространственно неоднородных полей атомно-силового микроскопа и электронного облучения» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой получены новые результаты, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области экспериментальных исследований динамики доменной структуры и механизмов формирования микродоменов и микродоменных комплексов с заданной конфигурацией в сегнетоэлектрических кристаллах под действием электрических полей зонда атомно-силового микроскопа (АСМ) и локального облучения электронными пучками в растровом электронном микроскопе (РЭМ).

По актуальности темы исследования, научной новизне, практической значимости и достоверности полученных результатов, обоснованности выводов и положений, представленная диссертационная работа удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Боднарчук Ядвига Викторовна, заслуживает присуждения степени

кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния.

Отзыв рассмотрен и одобрен после обсуждения диссертационной работы Боднарчук Ядвиги Викторовны на заседании кафедры физики конденсированного состояния Тверского государственного университета (Протокол № 10 от 24 мая 2016 г.).

Заведующий кафедрой физики конденсированного состояния доктор физико-математических наук, профессор



Пастушенков Юрий Григорьевич

170100 , г. Тверь, ул. Желябова д. 33
Телефон: (4822) 34-24-52; 32-15-50
Факс: (4822) 32-12-74
e-mail: rector@tversu.ru, yupast@mail.ru

Подпись *Пастушенков Ю.Г.*
УДОСТОВЕРЯЮ
Ученый секретарь Совета Тверского
государственного университета
Сердитов

