

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе



 С.Д. Ваулин

» 05 2016 г.

**ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**  
**на диссертацию Нерадовского Максима Михайловича**  
**«Создание и исследование оптических волноводов**  
**с регулярной доменной структурой в ниобате лития»,**  
**представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических**  
**наук**  
**по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния**

**Актуальность темы работы.**

Монокристаллы семейства ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ , LN) рассматриваются в качестве основного материала для создания элементов интегрально-оптических схем (ИОС), благодаря уникальному сочетанию акустооптических, электрооптических, нелинейно-оптических, фотоупругих и фотоэлектрических свойств.

Распространение оптического излучения по канальным волноводам через регулярную доменную структуру (РДС) в LN позволит значительно усилить эффективность нелинейно-оптических процессов. Создание ИОС на основе волноводов с РДС в LN позволит перейти на качественно новый уровень управления сигналами, передаваемыми по оптическому волокну.

Обширный набор методов создания волноводов в LN позволяет с высокой точностью контролировать их параметры. К наиболее широко применяемым методам относятся: диффузия титана и протонный обмен, а также имплантация ионов высоких энергий и лазерная запись. Созданные методом мягкого протонного обмена (SPE) волноводы обладают малыми потерями, высокой степенью оптической локализации и применимы для лазерного излучения с длиной волны, лежащей в полосе пропускания телекоммуникационных систем.

Существует два альтернативных подхода к изготовлению волноводов с РДС: создание доменной структуры (ДС) в кристалле с канальными волноводами и создание волноводов в кристалле с РДС. Для реализации первого подхода нужно исследовать особенности кинетики ДС в кристалле с модифицированным поверхностным слоем. Второй подход требует изучения влияния протонного обмена на РДС.

Доменная инженерия является активно развивающейся отраслью науки и технологии по созданию в сегнетоэлектрических материалах стабильной ДС с заданными геометрическими параметрами. Основным методом создания РДС в LN является приложении внешнего электрического поля с помощью системы электродов, изготовленных с использованием фотолитографии. Этот метод позволяет формировать РДС с периодом до 4 мкм, однако для создания ряда нелинейно-оптических устройств и фотонных кристаллов нужны субмикронные периоды, что стимулирует разработку альтернативных методов. Кроме того, существенные отличия кинетики ДС в волноводах затрудняют использование классических методов создания РДС. Недавно показано, что использование сфокусированного электронного луча является одним из наиболее перспективных методов формирования РДС с субмикронными периодами.

Кинетика ДС при переключении поляризации в сегнетоэлектрических материалах под действием электрического поля может быть рассмотрена как аналог фазового перехода первого рода, и является важной фундаментальной задачей физики конденсированного состояния.

Таким образом, комплексное исследование воздействия процесса протонного обмена на РДС, а также на кинетику ДС при переключении поляризации при приложении внешнего электрического поля и при облучении сфокусированным электронным лучом актуально как для практического применения, так и для решения фундаментальных задач.

**Структура и содержание диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения, списков цитируемой литературы, условных обозначений и опубликованных работ. Общий объем работы составляет 136 страницы, включая 89 рисунков, 3 таблиц, список условных обозначений, опубликованных работ и библиографию из 140 наименований.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, ее разработанность, сформулированы цель и основные задачи исследований, описаны научная новизна результатов, теоретическая и практическая значимость, методологические основы и методы исследований, достоверность, вклад автора, апробация работы, ее связь с научными программами и проектами, перечислены положения, выносимые на защиту и показано соответствие диссертации паспорту специальности.

В первой главе представлен обзор современного состояния экспериментальных исследований по созданию регулярной доменной структуры (РДС) и волноводов в ниобате лития (LN). Рассмотрены методы исследования кинетики и статики доменной структуры в LN. Приведены основы нелинейно-оптических процессов, происходящих в LN с РДС. Описан эффект фазового квазисинхронизма, используемый для повышения эффективности преобразования длины волны лазерного излучения.

Вторая глава содержит основные характеристики исследуемых образцов, описание использованных приборов и установок, порядок проведения измерений и обработки результатов.

В третьей главе приводятся результаты исследования влияния процесса протонного обмена на РДС.

Четвертая глава содержит результаты исследования особенностей кинетики доменной структуры при переключении поляризации в монокристаллах конгруэнтного LN с поверхностным слоем, модифицированным различными вариантами протонного обмена.

В пятой главе приведены результаты создания доменной структуры сфокусированным электронным лучом в образцах ниобата лития с поверхностным слоем модифицированным методом протонного обмена.

Шестая глава посвящена исследованию генерации второй гармоники в градиентных канальных волноводах с РДС, полученной при облучении сфокусированным электронным лучом  $Z^-$  полярной поверхности, покрытой слоем резиста.

#### **Теоретическая значимость.**

1. Исследован процесс формирования приповерхностной нанодоменной структуры при создании градиентных волноводов.
2. Выявлены стадии формирования доменной структуры при облучении сфокусированным электронным лучом ниобата лития, покрытого слоем резиста.
3. Обнаружено гигантское уменьшение порогового поля, вызванное наличием внутреннего поля смещения в приповерхностных слоях с градиентом спонтанной поляризации, созданным протонным обменом.

#### **Практическая значимость.**

1. Полученные результаты будут использованы для создания оптических волноводов с регулярной доменной структурой в ниобате лития.
2. Изученные особенности кинетики доменной структуры в ниобате лития с волноводами, созданными методами протонного обмена, при переключении поляризации приложением внешнего электрического поля позволят оптимизировать методы создания регулярной доменной структуры.

3. Разработанный способ формирования регулярной доменной структуры при воздействии фокусированного электронного луча в ниобате лития с градиентными канальными волноводами будет использован для изготовления интегрально-оптических устройств.

По диссертации имеются следующие **замечания**:

Практическая значимость работы, указанная в тексте диссертации, сформулирована недостаточно четко – пункты 1 и 2 практически повторяют друг друга, а в пункте 3 не уточняется, каким образом, в каких интегрально-оптических элементах может быть использован разработанный соискателем способ. Автором разработан способ, впервые позволяющий получать домены произвольной формы. При всей очевидной важности данного результата, это в работе отдельно не подчеркивается. Также в тексте диссертации присутствует большое количество англоязычных аббревиатур, присутствуют опечатки.

Указанные замечания, без сомнения, не снижают высокой оценки представленной диссертационной работы и представляют собой скорее пожелания для проведения последующих научных исследований.

Основные результаты были представлены на 20 Всероссийских и международных конференциях и симпозиумах, опубликованы 35 печатных работах (в том числе в пяти статьях в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК и в 30 тезисах Всероссийских и международных конференций).

Автореферат диссертации правильно отражает ее основное содержание, научную новизну, выводы и другие ключевые моменты.

**Заключение.** Диссертационная работа Нерадовского Максима Михайловича «Создание и исследование оптических волноводов с регулярной доменной структурой в ниобате лития» является законченным научным исследованием по актуальной теме. В работе представлены результаты, имеющие важное научное и практическое значение для специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния. Результаты исследований, представленные в диссертации, делают существенный вклад в решение актуальной проблемы создания регулярной доменной структуры в волноводах, полученных методом протонного обмена в ниобате лития.

Диссертационная работа соответствует критериям, установленным пп.9-14 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор М.М. Нерадовский, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Отзыв подготовил д.ф.-м.н., доцент физического факультета ЮУрГУ Микляев Юрий Владимирович.

Диссертация и отзыв обсуждены на заседании кафедры оптики и спектроскопии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет) (Протокол №\_5\_от «5 мая» 2016\_г.).

Кундикова Наталья Дмитриевна  
Декан / Заведующий кафедрой оптики и спектроскопии /  
д.ф.-м.н., профессор  
тел (351) 267-91-37  
e-mail: [kundikovand@susu.ru](mailto:kundikovand@susu.ru)



Н.Д. Кундикова

Микляев Юрий Владимирович  
Доцент кафедры оптики и спектроскопии  
д.ф.-м.н.,  
тел (351) 267-91-60  
e-mail: [mikliaevyv@susu.ru](mailto:mikliaevyv@susu.ru)



Ю.В. Микляев