

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
федерального государственного
бюджетного образовательного
учреждения высшего профессионального
образования «Московский
государственный технический
университет радиотехники, электроники и
автоматики»
доктор технических наук


И.В. Соловьев

«26» сентября 2014 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Щербины Весты Вячеславовны «Нелинейно-оптические эффекты на периодически поляризованных структурах в оптических волноводах на ниобате лития» по специальности 01.04.05 – Оптика на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук.

В современной технике и в научных исследованиях широко используется преобразование частоты лазерного излучения методами нелинейной оптики. Диэлектрические волноводы в нецентросимметричных кристаллах, благодаря высокой интенсивности электромагнитных полей при заданной мощности, позволяют существенно увеличить эффективность нелинейно-оптических спектральных преобразований лазерного излучения, использующих квадратичную нелинейность. Квазисинхронное нелинейное взаимодействие световых волн в оптических волноводах на периодически поляризованных структурах, созданных в сегнетоэлектрических кристаллах, обладает большими потенциальными возможностями и может быть использовано для эффективной генерации второй гармоники. Одним из основных материалов для его реализации и использования в устройствах интегральной оптики представляются кристаллы ниобата лития, в которых

ВХ. № 310161602
ПОСТУПИЛ В ТГУ
* 14 * 10 * 2014

возможно создание оптических волноводов, а также возможно формирование периодически поляризованных структур с заданными параметрами методами электронно-лучевой литографии. Целью диссертационной работы В.В. Щербини является выявление особенностей периодически поляризованных структур, сформированных методом локальных дискретных облучений поверхности электронным пучком на Y - и X -срезах в кристаллах ниобата лития и в оптических волноводах на их основе, и нелинейно-оптических спектральных преобразований в планарных волноводах, реализуемых на поверхностных периодически поляризованных структурах. Учитывая вышесказанное, исследования, проводимые автором диссертации, являются весьма **актуальными**.

В первой главе выполнен обзор нелинейно-оптических эффектов в волноводных и периодических доменных структурах, сформированных в сегнетоэлектрических кристаллах ниобата лития, а также исследованиям по распространению света в планарных волноводах, формированию диффузионных оптических волноводов в кристаллах ниобата лития, визуализации периодических доменных структур. Подробно представлены результаты исследований, посвященных эффекту генерации второй гармоники на периодических доменных структурах в ниобате лития. Рассмотрены условия синхронизма и квазисинхронизма для ГВГ в объемных кристаллах и на ПДС, соответственно, и обсуждены преимущества квазисинхронизма по сравнению с обычным фазовым синхронизмом. Приведены сведения по работам, посвященным изготовлению периодических доменных структур в объемных образцах ниобата лития. Сделан вывод о перспективности использования ПДС для реализации нелинейно-оптических и модулирующих устройств как в объемных образцах ниобата лития, так и в оптических волноводах на его основе. Отмечено, что для развития представлений о сегнетоэлектричестве и для контроля записанных доменных структур, их визуализация представляется необходимой и важной задачей. Наиболее подробно рассмотрен метод микроскопии генерации второй гармоники, который является неразрушающим и просто реализуемым для визуализации доменных структур в кристаллах ниобата лития. Он не требует для своей реализации особого дополнительного оборудования и позволяет получить изображения доменных структур с высоким пространственным разрешением. На основе проведенного в первой главе анализа литературы сформулированы основные задачи диссертационной работы.

Во второй главе работы представлены результаты исследования оптических параметров и распределения концентрации Ti для планарного

оптического волновода Ti:LiNbO_3 , сформированного методом высокотемпературной диффузии в воздушной атмосфере в пластинах Y -среза из конгруэнтного ниобата лития, использованного далее для формирования в нем электронным пучком планарных периодических доменных структур. Автором получены аналитические выражения для распределения полей мод $TE_1 - TE_4$ в градиентном волноводе с профилем показателя преломления $\Delta n(x) \sim \text{ch}^{-2}(x/h)$. С использованием этих выражений и известного соотношения для мод TE_0 выполнены расчеты нормированных распределений световых полей для исследуемого планарного волновода Ti:LiNbO_3 на длинах волн 1053 и 526,5 нм. В главе представлен разработанный универсальный испытательный стенд для визуализации планарных ПДС методом микроскопии ГВГ. С его использованием проведены исследования по визуализации таких структур, сформированных электронным пучком в подложках LiNbO_3 и в планарных волноводах Ti:LiNbO_3 , а также экспериментальные исследования эффективности волноводной ГВГ на поверхностных ПДС, созданных электронным пучком в волноводе Ti:LiNbO_3 , сформированном на подложке Y -среза. Основным результатом главы является предложенная модель профиля распределения нелинейного коэффициента $d_{33}(y)$ для планарных ПДС, сформированных электронным пучком в волноводе Ti:LiNbO_3 . С использованием данной модели разработана методика анализа эффективности квазисинхронной волноводной ГВГ на поверхностных ПДС для различных процессов взаимодействия $TE_j + TE_j \rightarrow TE_p$, которая позволяет учесть влияние на неё параметров планарного диффузионного волновода и локализацию переполяризованной области на некоторой глубине в волноводном слое. Проведенные на её основе оценки показали, что эффективность нелинейного преобразования частоты в режиме квазисинхронизма на планарных ПДС в волноводах, сформированных диффузией титана в подложки Y -среза ниобата лития, может быть существенно повышена при оптимизации параметров волноводного слоя и пространственного периода ПДС для требуемого процесса взаимодействия мод $TE_j + TE_j \rightarrow TE_p$.

Третья глава диссертации посвящена исследованию периодических доменных структур, сформированных электронным лучом в планарных волноводах Zn:LiNbO_3 Y - и X -ориентации, представляющих интерес для реализации нелинейных и управляющих элементов, в связи с их потенциально высокой стабильностью параметров. Автором представлены результаты разработки защищенной патентом на изобретение технологии формирования волноводных систем Zn:LiNbO_3 , использующей нанесение

пленок ZnO на подложку LiNbO₃ методом синтеза из пленкообразующих растворов, разработанный С.А. Кузнецовой и В.В. Козиком, и процесс высокотемпературной диффузии, технологические параметры которого исследовались автором совместно с С.А. Смычковым, Н.И. Буримовым и М.В. Бородиным. В главе также представлены результаты отработки технологии формирования волноводных структур Zn:LiNbO₃ методом высокотемпературной диффузии из пленок ZnO, полученных на подложках Y- и X-срезов синтезом из пленкообразующих растворов, защищенная патентом на изобретение. Автором описывается процесс изготовления образцов волноводных структур Zn:LiNbO₃ на подложках Y- и X-срезов ниобата лития, в которых методом локальных дискретных облучений поверхности электронным пучком были сформированы планарные ПДС с пространственными периодами от 4,7 до 7,25 мкм, предназначенные для реализации волноводной ГВГ при накачке на длине волны 1053 нм. В главе предложен новый метод определения спектра эффективных показателей преломления волноводных мод на частоте накачки и второй гармоники при призмном возбуждении волновода лазерным пучком на длине волны накачки, заключающийся в измерении углов ввода, при которых в нем генерируется излучение второй гармоники как за счет волноводного несинхронного преобразования вида $TE_j + TE_j \rightarrow TE_p$, так и благодаря наведенной вследствие туннельной связи нелинейной поляризации, синхронной с волноводными модами TE_p для излучения второй гармоники. А также представлены результаты оценки качества методом микроскопии ГВГ, сформированных в волноводах Zn:LiNbO₃ электронным пучком планарных ПДС, и показана возможность их использования в волноводных устройствах преобразования спектральных характеристик лазерного излучения.

В **четвёртой** главе представлены полученные аналитические выражения, описывающие поперечное распределение электрического поля для четных TE -мод ТГц диапазона в симметричной щелевой волноводной структуре, состоящей из двух пластин Y-среза Ti:LiNbO₃ с толщиной b , разделенных воздушным зазором с размером $a = 3$ мкм. А также получено выражение для эффективности синхронного нелинейного преобразования в TE -волну разностной частоты ТГц диапазона при распространении оптических TE -волн накачки в волноводах Ti:LiNbO₃ щелевой симметричной структуры. Проведен численный анализ эффективности преобразования η при взаимодействии в рассматриваемой структуре TE_0 -мод.

Таким образом, в ходе проведения исследований автором диссертационной работы получены новые теоретические и экспериментальные результаты, среди которых можно выделить следующие наиболее значимые из них:

1. Проведены экспериментальные исследования эффективности волноводной ГВГ на поверхностных ПДС, созданных электронным пучком в волноводе Ti:LiNbO_3 , сформированном на подложке Y -среза.

2. Предложена модель профиля распределения нелинейного коэффициента $d_{33}(y)$ для планарных ПДС, сформированных электронным пучком в волноводе Ti:LiNbO_3 . С использованием данной модели разработана методика анализа эффективности квазисинхронной волноводной ГВГ на поверхностных ПДС для различных процессов взаимодействия $TE_j + TE_j \rightarrow TE_p$, которая позволяет учесть влияние на неё параметров планарного диффузионного волновода и локализацию реполяризованной области на некоторой глубине в волноводном слое.

3. Получены аналитические выражения, описывающие поперечное распределение электрического поля для четных TE -мод ТГц диапазона в симметричной щелевой волноводной структуре, состоящей из двух пластин Y -среза Ti:LiNbO_3 с толщиной b , разделенных воздушным зазором с размером $a = 3$ мкм. Получено выражение для эффективности синхронного нелинейного преобразования в TE -волну разностной частоты ТГц диапазона при распространении оптических TE -волн накачки в волноводах Ti:LiNbO_3 щелевой симметричной структуры. Проведен численный анализ эффективности преобразования η при взаимодействии в рассматриваемой структуре TE_0 -мод.

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации В.В. Щербины, являются хорошо обоснованными.

Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций обсуждается автором в тексте диссертации, она подтверждается их сравнением с известными из литературы теоретическими и экспериментальными результатами, и **не вызывает сомнений.**

Результаты диссертационной работы в достаточной степени опубликованы в отечественных и зарубежных рецензируемых журналах, докладывались и обсуждались на представительных всероссийских и международных конференциях. В целом список основных публикаций по теме диссертации состоит из 14 работ, в том числе **7 статей в научных журналах, которые включены в Перечень рецензируемых научных**

изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации для опубликования основных научных результатов диссертаций (из них 3 статьи в зарубежных журналах, включенных в библиографическую базу Web of Science, 1 статья в российском научном журнале, переводная версия которого включена в библиографическую базу Web of Science), 1 патент, 6 публикаций в материалах международных и всероссийских научных конференций. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

По работе и тексту диссертации можно сделать следующие замечания:

1. В диссертации не приведено сравнение стабильности параметров волноводов, сформированных в ниобате лития, при легировании Zn и Ti, хотя при описании актуальности исследования указывается на повышение стойкости волновода к оптическому излучению при легировании нефоторефрактивными примесями (Zn) по сравнению с фоторефрактивными (Ti).
2. В работе не приведено сравнение теоретических и экспериментальных данных по эффективности квазисинхронной генерации второй гармоники в периодических доменных структурах волновода на основе кристалла ниобата лития, а также отсутствует сравнение результатов эксперимента с литературными данными.
3. В третьем защищаемом положении не приведены значения частот излучения накачки ω_1 и ω_2 , хотя рассчитанное значение эффективности нелинейного квазисинхронного преобразования приведено для конкретных параметров щелевой симметричной структуры.
4. По результатам работы сделано 10 полных и значимых выводов, а на защиту выносятся лишь 3 положения. Некоторые из выводов можно было бы представить в качестве самостоятельных защищаемых положений.

Указанные недостатки не снижают общей **положительной оценки диссертационной работы, выполненной на высоком научном уровне и представляющей завершённое научное исследование.** Результаты и выводы, представленные в диссертации, являются новыми и, несомненно, имеют как научную ценность в части развития представлений о физике волноводных взаимодействий в средах с пространственной модуляцией нелинейного коэффициента оптической восприимчивости второго

порядка, так и практическую значимость для разработки приборов оптоэлектроники и фотоники различного назначения.

В соответствии со сказанным выше можно заключить, что **диссертация Щербины В.В. удовлетворяет требованиям пункта 7 Положения ВАК РФ о порядке присуждения ученых степеней**, а её автор, Щербина Веста Вячеславовна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика.

Диссертационная работа и отзыв были рассмотрены и одобрены на заседании научно-технического семинара кафедры физики конденсированного состояния федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики» (МГТУ МИРЭА) (протокол № 9 от 25 сентября 2014 г.).

Отзыв подготовлен заведующей лабораторией
«Фемтосекундная оптика для нанотехнологий»
кафедры физики конденсированного
состояния МГТУ МИРЭА

доктор физ.-мат. наук, профессор

Е.Д. Мишина

Заведующий кафедрой
физики конденсированного
состояния МГТУ МИРЭА
академик РАН

А.С. Сигов

Мишина Елена Дмитриевна, заведующая лабораторией «Фемтосекундная оптика для нанотехнологий» кафедры физики конденсированного состояния федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики» (МГТУ МИРЭА),

119454 г. Москва, Проспект Вернадского, д.78, тел.: 8(495)-434-80-29

email: mishina_elena57@mail.ru

Сигов Александр Сергеевич, президент, заведующий кафедрой физики конденсированного состояния федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики», 119454 г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78, тел.: 8(495)-433-00-44, email: sigov@mirea.ru