

На правах рукописи

Смирнов Евгений Владимирович

**ДИСКРЕТНЫЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ СОЛИТОНЫ  
И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В ФОТОРЕФРАКТИВНЫХ СИСТЕМАХ  
СВЯЗАННЫХ ОПТИЧЕСКИХ КАНАЛЬНЫХ ВОЛНОВОДОВ  
В КРИСТАЛЛАХ НИОБАТА ЛИТИЯ**

Специальность 01.04.05 - Оптика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

ТОМСК – 2009

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

- Научный руководитель:** доктор физико-математических наук,  
профессор  
**Шандаров Владимир Михайлович**
- Научный консультант:** профессор, доктор  
**Детлеф Кип** (Технический университет, г. Клаустхаль, Германия)
- Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук,  
профессор  
**Давыдов Валерий Николаевич**
- кандидат физико-математических наук,  
доцент  
**Измайлов Игорь Валерьевич**
- Ведущая организация:** Московский государственный институт электронной техники (технический университет)

Защита состоится 12 февраля 2009 года в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.267.04 в ГОУ ВПО «Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского государственного университета по адресу: г. Томск, пр. Ленина, 34а.

Автореферат разослан \_\_\_\_ декабря 2008 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.267.04 \_\_\_\_\_ Б.Н. Пойзнер

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Нелинейное распространение света в дискретных волноводных структурах вызывает повышенный интерес в последние годы, как в плане практического использования нелинейно-оптических эффектов, так и в силу тесных аналогий распространения световых пучков в таких структурах и движения электрона в кристаллической решетке. Лежащие в основе физические явления наблюдаются и в других системах, таких как: полупроводниковые сверхрешетки, биологические молекулярные структуры и конденсат Бозе-Эйнштейна с периодическим потенциалом [1\*].

Пространственная модуляция коэффициента преломления кристалла обуславливает запрет на распространение в объеме материала излучения с длиной волны, сопоставимой с периодом структуры вследствие брэгговской дифракции. Указанное явление приводит к появлению в фотонном энергетическом спектре материала так называемых фотонных запрещенных зон, что дает уникальную возможность управления распространением света, подобно тому, как в полупроводниках можно управлять потоком электронов, и представляет огромный интерес для создания полностью оптических переключателей и элементов обработки информации.

Существенные дисперсионные свойства фотонных кристаллов (оптических материалов с искусственными периодическими структурами субмикронного масштаба) открывают возможности для изготовления суперпризм [2\*]. Явление отрицательного преломления [3\*] позволяет преодолеть дифракционный предел и фокусировать свет в точку размерами меньше длины волны (суперлинза). Среди нелинейных эффектов, полученных в фотонных кристаллах, можно отметить генерацию высших гармоник, вынужденное рассеяние и самовоздействие световых пучков.

Возможность нелинейной локализации света в периодических структурах связанных оптических волноводов была впервые теоретически обоснована в работе [4\*], опубликованной в 1988 г. Однако первое экспериментальное подтверждение существования таких пространственно локализованных состояний, названных дискретными солитонами, получено лишь десять лет спустя [5\*] в волноводных решетках на основе материала арсенида галлия (GaAs), который обладает положительной керровской нелинейностью. В последующий период эффекты взаимодействия световых пучков в нелинейных периодических структурах изучались весьма интенсивно.

Так, экспериментально исследованы нормальная и аномальная дискретная дифракция световых пучков, эффекты светлых и темных дискретных пространственных солитонов, а также щелевых солитонов в волноводных решетках на основе GaAs [5\*, 6\*]. Другим объектом исследования явились оптически индуцированные одномерные и двумерные периодические волноводные системы (фотонные решетки) в кристаллах стронций-бариевого ниобата (SBN) [7\*]. Фоторефрактивная оптическая нелинейность в SBN приводит к существенному изменению показателя преломления при мощностях микроваттного уровня, но дрейфовый механизм фоторефрактивного отклика

требует приложения к кристаллу электрического поля с напряженностью до 10 кВ/см. В керровских средах нелинейные эффекты самовоздействия света, как правило, связаны с большим уровнем интенсивности оптического излучения (более  $10^9$  Вт/см<sup>2</sup>).

В настоящей работе для изучения эффектов линейного и нелинейного распространения света в системах связанных волноводов был выбран кристалл ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ), обладающий дефокусирующей фоторефрактивной нелинейностью. Нелинейные оптические эффекты в ниобате лития проявляются в микроваттном диапазоне оптической мощности, и благодаря сильному фотовольтаическому эффекту не требуется приложения внешнего электрического поля. К достоинствам этого материала также можно отнести долгое время хранения оптически индуцированного изменения показателя преломления (до нескольких лет) и развитые методы создания на его основе канальных волноводных структур.

**Цель работы** состоит в выявлении эффектов формирования дискретных пространственных солитонов и их взаимодействия в фоторефрактивных канальных волноводных структурах на основе ниобата лития.

**Поставленная цель достигалась решением следующих задач:**

изготовление фоторефрактивных стационарных канальных волноводных структур высокотемпературной диффузией титана в подложку ниобата лития, в которых возможно формирование дискретных пространственных солитонов;

отработка методики оптической модуляции показателя преломления стационарных волноводных структур, и оптического индуцирования систем связанных канальных волноводов в фоторефрактивных планарных волноводах  $\text{LiNbO}_3:\text{Ti}:\text{Fe}$ ;

экспериментальное исследование линейных и нелинейных эффектов, сопровождающих распространение световых пучков в периодических и квазипериодических системах связанных канальных волноводов на основе  $\text{LiNbO}_3$ ;

экспериментальное исследование эффектов нелинейного взаимодействия однонаправленных и встречных световых пучков в стационарных волноводных структурах на основе  $\text{LiNbO}_3$ .

**Используемые методы исследований.**

В работе использовался комплексный подход, сочетающий известные экспериментальные методы и методы компьютерного моделирования.

Для изготовления экспериментальных образцов применялись технологические методы формирования волноводных структур в ниобате лития диффузией титана. При формировании оптически индуцированных канальных волноводных структур в планарных фоторефрактивных оптических волноводах (ОВ)  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}:\text{Ti}$  использовалась двухпучковая схема голографической записи когерентным излучением с длиной волны  $\lambda=532$  нм. При экспериментальном исследовании линейных и нелинейных эффектов, связанных с

распространением световых пучков в канальных волноводных структурах, применялся торцевой ввод излучения и метод регистрации распределения интенсивности светового поля на выходной плоскости с помощью анализатора лазерных пучков. Для численного моделирования распределения интенсивности светового поля в волноводных решетках использовался известный метод распространяющегося пучка (beam propagation method, BPM [8\*]) в приложении к многоэлементным нелинейным волноводным структурам.

### **Научные положения, выносимые на защиту:**

1. В планарных фоторефрактивных волноводах  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}:\text{Ti}$  при двухпучковой схеме голографической записи когерентным излучением с длиной волны  $\lambda=532$  нм и интенсивностью записывающих пучков более  $50 \text{ мВт/см}^2$  оптически индуцируются системы связанных канальных волноводов с пространственным периодом  $\Lambda=8\text{-}20$  мкм. В стационарных фоторефрактивных периодических канальных волноводных структурах, созданных диффузией титана в подложку  $\text{LiNbO}_3$  X-среза, оптическая гармоническая модуляция показателя преломления структуры с глубиной модуляции 5-10% приводит к формированию квазипериодических волноводных систем (сверхрешеток).
2. В канальных волноводных структурах, созданных диффузией титана в подложку  $\text{LiNbO}_3$  X-среза, с пространственным периодом  $\Lambda=5\text{-}15$  мкм и приращением показателя преломления в области канала  $\Delta n_m \sim 10^{-3}$  при микроваттном уровне мощности оптического излучения с длиной волны  $\lambda=532$  нм формируются светлые щелевые пространственные солитоны (при одноэлементном возбуждении волноводной решетки), темные дискретные солитоны (при возбуждении волноводной структуры широким световым пучком с изменением знака поля на обратный в его центре), а также поверхностные солитоны на границе волноводной решетки и подложки (при возбуждении крайнего волновода).
3. В волноводных решетках с периодом  $\Lambda=8\text{-}10$  мкм, созданных диффузией титана в подложку ниобата лития X-среза, при возбуждении световыми пучками ( $\lambda=532$  нм) мощностью в несколько микроватт соседних волноводных элементов, существуют устойчивые пространственно локализованные состояния в форме солитонов высокого порядка. При возбуждении двух волноводов периодической структуры, разделенных одним канальным волноводом, двумя синфазными световыми пучками с уровнем оптической мощности в единицы микроватт, в системе формируется оптическая неоднородность, приводящая к концентрации основной мощности лазерного излучения в центральном волноводе.
4. В канальных волноводных структурах с периодом  $\Lambda=8\text{-}10$  мкм, созданных диффузией титана в подложку  $\text{LiNbO}_3$  X-среза,

взаимодействие двух встречных щелевых солитонов одинаковой мощности приводит к их взаимному устойчивому пространственному сдвигу в соседние волноводы. Взаимодействие светлого щелевого или темного дискретного солитона с пробным пучком мощностью несколько нановатт, распространяющимся во встречном направлении и пересекающего ось солитона, ведет или к полному изменению направления распространения пробного пучка, или к его частичному отражению от оптически индуцированного блокирующим солитоном дефекта периодической структуры.

**Достоверность научных положений и других результатов** диссертационной работы базируется на современных способах экспериментальных исследований и известных методах математического моделирования.

Формирование оптически индуцированных структур в планарных волноводах  $\text{LiNbO}_3:\text{Ti}:\text{Fe}$  проводилось при следующих допущениях: погрешность периода интерференционной картины составляла не более 5%, а погрешность определения величины  $\Delta n_e$  в волноводной области не превышала 20 %. Профили интенсивности световых полей, полученные при многократном повторении экспериментов в проводимых исследованиях диссертационной работы, находятся в согласии (в пределах 10%) с результатами численного моделирования.

Достоверность второго защищаемого положения подтверждается также отсутствием противоречий с теоретическими исследованиями других авторов [9\*-11\*]. Достоверность третьего защищаемого положения подтверждается согласием полученных экспериментальных результатов с теоретическими результатами о возможности существования солитонов высших порядков в волноводных решетках с дефокусирующей насыщаемой нелинейностью [12\*].

Экспериментальные исследования, подобные тем, что представлены во второй главе, проводились независимо другими научными группами [13\*,14\*]. При этом также наблюдались эффекты формирования поверхностных солитонов и светлых щелевых солитонов в стационарных структурах  $\text{LiNbO}_3:\text{Ti}$ .

**Научная новизна защищаемых положений** состоит в следующем:

- продемонстрирована возможность формирования периодических систем связанных канальных волноводов с помощью оптической модуляции показателя преломления фоторефрактивных планарных ОБ  $\text{LiNbO}_3:\text{Ti}:\text{Fe}$ ;
- представлена методика формирования одномерных сверхрешеток с помощью оптической модуляции параметров стационарных волноводных структур  $\text{LiNbO}_3:\text{Ti}:\text{Fe}$ ;
- экспериментально наблюдалось формирование светлых щелевых пространственных солитонов в одномерных фотонных решетках, оптически индуцированных в планарных ОБ  $\text{LiNbO}_3:\text{Ti}:\text{Fe}$ ;

- экспериментально определены условия формирования темных дискретных солитонов в стационарных канальных волноводных структурах  $\text{LiNbO}_3:\text{Ti:Fe}$ ;
- экспериментально обнаружено формирование поверхностных щелевых солитонов на границе периодической системы связанных канальных волноводов и однородной среды;
- экспериментально установлена возможность стабильного распространения солитонов высокого порядка, состоящих из двух или трех синфазных дискретных щелевых солитонов в фоторефрактивных периодических структурах с насыщаемой дефокусирующей нелинейностью;
- экспериментально исследованы эффекты взаимодействия двух изначально параллельных, однонаправленных щелевых пространственных солитонов в стационарных волноводных решетках;
- экспериментально обнаружены эффекты частичного или полного отражения (блокировка) маломощного пробного пучка при взаимодействии с темным или светлым блокирующими солитонами в стационарных канальных волноводных структурах  $\text{LiNbO}_3:\text{Ti:Fe}$ ;
- выявлены эффекты встречного взаимодействия светлых щелевых солитонов, распространяющихся в системе связанных канальных волноводов  $\text{LiNbO}_3:\text{Ti:Fe}$ .

**Научная ценность и практическая значимость положений и других полученных результатов:**

- экспериментально подтверждена, предсказанная в теоретической работе [9\*], возможность существования поверхностных щелевых солитонов на границе однородной среды и периодической волноводной структуры с дефокусирующей нелинейностью;
- экспериментально подтверждена, предсказанная в теоретической работе [12\*], возможность стабильного распространения солитонов высших порядков в волноводных структурах с дефокусирующей насыщаемой нелинейностью;
- установленная возможность формирования в нелинейных системах связанных волноводов на основе  $\text{LiNbO}_3$  темных дискретных солитонов, поверхностных щелевых солитонов и светлых щелевых солитонов позволяет говорить о потенциальной применимости наблюдаемых явлений, в системах оптической памяти и оптической обработки информации;
- выявленные в ходе экспериментальных исследований эффекты управления световыми пучками при взаимодействии однонаправленных щелевых солитонов, солитонов, распространяющихся во встречных направлениях, а также при взаимодействии темного дискретного блокирующего солитона (либо светлого щелевого блокирующего солитона) с пробным пучком, предполагают возможность использования наблюдаемых явлений для создания оптических разветвителей, переключателей и устройств обработки информации;
- Представленные в работе методики оптического индуцирования канальных волноводных элементов в планарных волноводах  $\text{LiNbO}_3:\text{Ti:Fe}$ , а также оптической модуляции стационарных волноводных решеток, открывают

перспективы создания оптических структур со сложной топологией и возможностью их динамической реконфигурации, что имеет важное значение для фундаментальных исследований эффектов линейного и нелинейного распространения света.

**Апробация** Основные положения и другие результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях:

«Нелинейная оптика жидких и фоторефрактивных кристаллов» (Алушта, Украина, 2004); EOS Topical Meeting on Nonlinear Optics: “From Sources to Guided Waves”, Paris, France, October 2006; 4-ой международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики-2006», С.-Петербург, 2006г.; Всероссийских НТК «Научная сессия ТУСУР-2006», «Научная сессия ТУСУР-2007»; Int. Conf. CLEO/Europe 2007, July 2007, Munich, Germany; Int. Conf. on Coherent and Nonlinear Optics, Minsk; Int. Topical Meeting 2007“ Controlling Light with Light: Photorefractive Effects, Photosensitivity, Fiber Gratings, Photonic Materials and more (PR)”, October 2007, USA.

#### **Полнота изложения материалов диссертации**

Основное содержание работы представлено в 17 публикациях, включая 10 статей в центральных отечественных и зарубежных периодических изданиях, рекомендованных ВАК, а также 7 статей в сборниках научных трудов и материалах конференций.

#### **Личный вклад автора**

Диссертация является результатом обобщения исследований автора, выполненных непосредственно им в Томском университете систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) и Техническом университете г. Клаустхаль, Германия. Постановка задач исследований осуществлялась совместно с д.ф.-м.н., проф. В.М. Шандаровым и проф., д-р D. Kip (Германия).

Большинство представленных в диссертации экспериментальных результатов получено автором лично. Автором осуществлялся выбор отдельных направлений исследования, разработка и усовершенствование экспериментальных установок и методик проведения экспериментов. Подготовка схемы эксперимента для записи оптически индуцированных канальных волноводов в планарных ОВ  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}:\text{Ti}$  и экспериментальные исследования проводились под руководством д.ф.-м.н., проф. В.М. Шандарова. Исследования по формированию сверхрешеток оптической модуляцией показателя преломления стационарных канальных волноводных структур выполнялись совместно с К.В. Шандаровой. Помощь в изготовлении экспериментальных образцов оказывал Ch. Reuter (Германия). Численное моделирование, анализ и обобщение полученных результатов проводилось совместно с Я. Карташовым (Испания), Ch. Reuter и M. Stepic (Сербия).



### Структура и объём диссертационной работы.

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, основных результатов и выводов по работе, содержит 165 страниц машинописного текста, 67 рисунков и список литературы в количестве 110 наименований.

## Содержание работы

**Во введении** дается обоснование актуальности темы диссертации, формулируются цель работы и выносимые на защиту основные научные положения. Определена научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

**В первой главе** рассматриваются методы формирования периодических систем связанных канальных волноводов в кристаллах  $\text{LiNbO}_3$  и SBN.

В подразделе 1.1 рассмотрены основные явления, которые могут наблюдаться в фотонных кристаллах, и показаны перспективы их применения.

В подразделе 1.2 представлен метод изготовления стационарных канальных волноводных структур термической диффузией титана в подложку ниобата лития.

Системы связанных канальных волноводов, исследуемые в настоящей работе, изготавливались диффузией титана на поверхности пластин ниобата лития производства фирмы “Crystal Technology”. При использовании данного метода можно варьировать время диффузии, температуру отжига и толщину нанесенной пленки титана, что дает возможность формировать планарные волноводы и системы связанных канальных волноводов с наперед заданными свойствами. В ходе исследований была отработана методика формирования стационарных фоторефрактивных канальных волноводных структур с пространственным периодом  $\Lambda=5-15$  мкм и глубиной модуляции показателя преломления подложки  $\Delta n \sim 10^{-3}$ .

В подразделе 1.3 обсуждаются методы формирования оптически индуцированных систем связанных канальных волноводов в кристаллах  $\text{LiNbO}_3$  и SBN.

В подразделе 1.3.1 рассмотрены вопросы феноменологии фоторефрактивного эффекта в кристаллах ниобата лития. Приведены основные соотношения, описывающие явление фоторефрактивного отклика в рамках двухуровневой модели. Дано представление о современном состоянии проблем в исследованиях природы и механизмов фоторефракции в легированном примесями переходных металлов, и нелегированном ниобате лития с учетом имеющихся сведений о собственной и примесной дефектной структуре кристалла.

В подразделе 1.3.2 изложены результаты оптического индуцирования одномерных периодических канальных волноводных структур с пространственным периодом  $\Lambda=8-20$  мкм в фоторефрактивных планарных ОВ  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}:\text{Ti}$  X-среза при помощи двухпучковой схемы голографической

записи непрерывным излучением  $\text{YVO}_4:\text{Nd}^{3+}$  лазера с длиной волны  $\lambda=532$  нм [9, 16]. Вектор интерференционной решетки совпадал с осью  $Z$  кристалла. Интенсивность записывающих пучков могла меняться в пределах от 50 до 200 мВт/см<sup>2</sup>, а время экспозиции от 10 до 60 мин. Полученные системы связанных канальных волноводов считывались зондирующим пучком (см. рисунок 1). При этом использовался торцевой ввод излучения в волноводные элементы и метод регистрации изменения картины распределения интенсивности светового поля на выходной плоскости с помощью анализатора лазерного пучка.

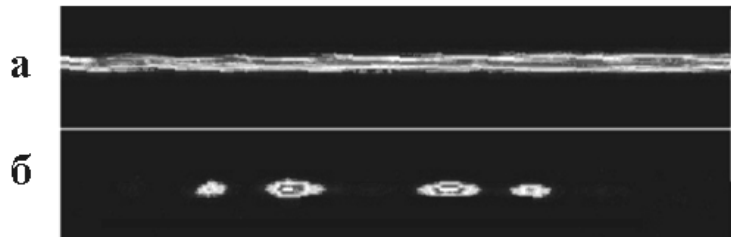


Рис. 1 - Распределение интенсивности света на выходной плоскости:  
а – для планарного волновода; б - картина дискретной дифракции света  
в оптически модулированном планарном волноводе с  $\Lambda=13\text{мкм}$

На рисунке 1а показано распределение интенсивности светового пучка на выходной плоскости планарного волновода. На рисунке 1б пробный пучок распространяется в слоях фотонной решетки, которая сформировалась при оптическом модулировании планарного волновода. Благодаря эффекту туннелирования, происходит обмен световой энергией между соседними элементами, поэтому полученную структуры можно рассматривать как периодическую систему связанных канальных волноводов.

Для периодической модуляции показателя преломления волноводной области использовалась также другая методика. С этой целью на поверхность кристалла накладывалась амплитудная маска, состоящая из чередующихся темных и прозрачных полос, ширина и период которых могли меняться от 2 до 10 мкм (на разных участках маски). Затем маска засвечивалась мощным равномерным излучением от ультрафиолетовой лампы Novacure N2001-A1. Время экспозиции составляло  $t=30$  с при интенсивности излучения  $\approx 300$  мВт/см<sup>2</sup>. Полученные системы связанных канальных волноводов также сканировались узким зондирующим пучком. Таким образом были сформированы одномерные фотонные решетки для разной ширины каналов ( $a = 5, 7\text{мкм}$ ) и расстоянием между соседними элементам ( $b = 5, 6, 7$  и  $8\text{мкм}$ ) [17].

В подразделе 1.3.3 реализована методика формирования одно- и двухмерных волноводных структур в фоторефрактивном кристалле SBN:61 световым пучком с частичной пространственной когерентностью ( $\lambda=514$  нм) в системе с обратной связью, созданной кольцевым оптическим резонатором (см. рисунок 2).

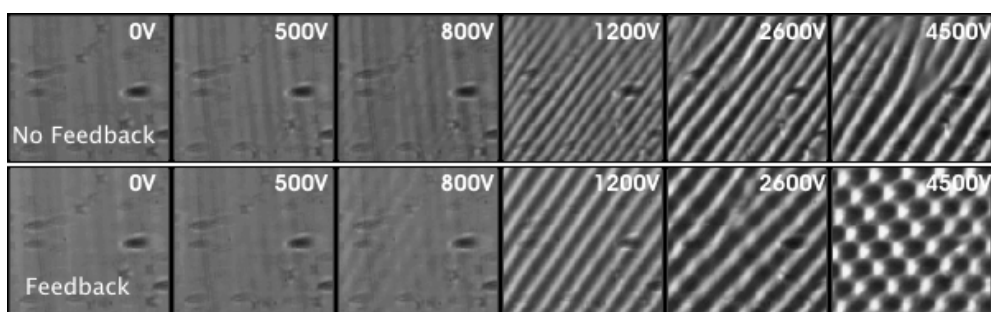


Рис. 1 – Фотографии выходной плоскости кристалла, демонстрирующие модуляционную неустойчивость оптического пучка с низкой пространственной когерентностью в зависимости от внешнего прикладываемого напряжения (верхней ряд – при открытом резонаторе, нижний – при закрытом)

Формирование периодической структуры изменения показателя преломления вследствие явления модуляционной неустойчивости носило пороговый характер при изменении прикладываемого к кристаллу напряжения от 0 до 4.5 кВ. При значении напряжения  $U=750$  В для открытого резонатора и  $U=800$  В, в случае, когда резонатор был заблокирован, наблюдалось появление в некоторых областях кристалла упорядоченной квазирегулярной структуры на изображении распределения интенсивности. Такую структуру можно рассматривать как одномерную периодическую систему, состоящую из параллельных планарных волноводов. В случае открытого резонатора, начиная с величины прикладываемого напряжения  $U=3$  кВ, полосы становились неустойчивыми и начинали распадаться на упорядоченный набор двумерных пятен, что свидетельствует о формировании в кристалле двумерной фотонной решетки [3].

**Вторая глава** посвящена исследованию линейного распространения световых пучков и формирования дискретных пространственных солитонов в системах связанных канальных волноводов на основе  $\text{LiNbO}_3$ .

В подразделе 2.1 рассматриваются эффекты линейной дискретной дифракции в одномерных канальных волноводных структурах, созданных диффузией титана в подложку  $\text{LiNbO}_3$  X-среза.

При возбуждении маломощным световым пучком ( $P_{in}=10-20$  нВт,  $\lambda=532$  нм) стационарных волноводных решеток ( $\Lambda=8.4$  мкм) в линейном режиме наблюдался эффект нормальной дискретной дифракции, аномальной дискретной дифракции и бездифракционного распространения светового пучка [4] (см. рисунок 3).

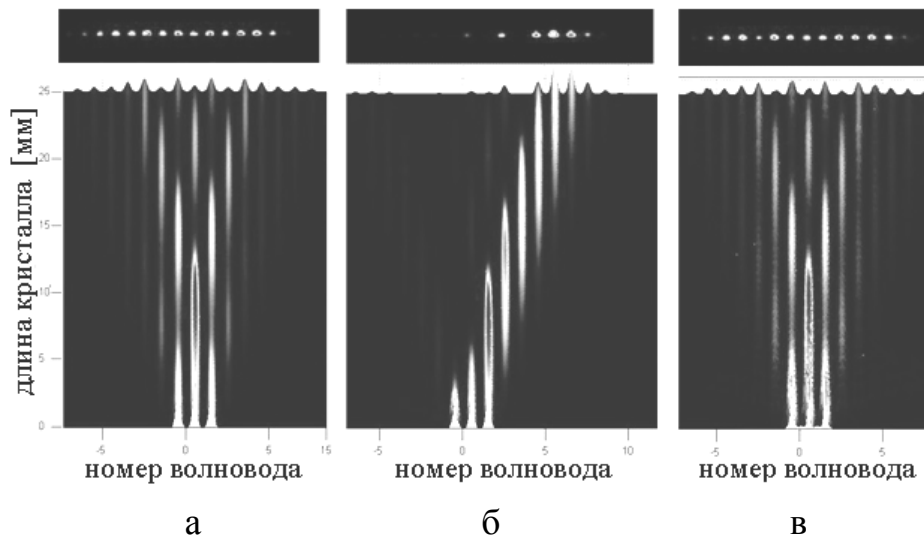


Рис.3 – Распределение интенсивности света на выходной плоскости канальной волноводной структуры (вверху) при возбуждении трех волноводных каналов: а - вдоль каналов; б - под углом нулевой дифракции (равного половине брэгговского); в - под углом Брэгга. Внизу - результаты численного моделирования

При распространении пучка вдоль волноводов (режим нормальной дискретной дифракции) благодаря эффекту туннелирования его мощность рассеивается в большое число соседних каналов. При этом на выходе структуры наблюдается симметричное распределение интенсивности. Режим аномальной дифракции был получен при наклоненном волновом фронте входного пучка, который вводился в волноводную решетку под углом Брэгга, определяемого соотношением:  $\sin \varphi_B = \lambda / 2\Lambda$ , где  $\Lambda$  – период волноводной решетки. В этом случае разность фаз в соседних волноводах равна  $\pi$ .

Существенным свойством распространения оптических волн в периодической структуре является наличие одной или нескольких запрещенных зон в спектре пропускания. Любой падающий свет полностью отражается, если его частота попадает в одну из этих зон. Поэтому в подразделе 2.1.1 показано избирательное возбуждение волноводных мод первой и второй полосы спектра пропускания системы, а также пространственное разделение волноводных мод первой и второй полосы при их одновременном возбуждении на входе системы связанных канальных волноводов с пространственным периодом  $\Lambda=8.4$  мкм.

В подразделе 2.1.2 представлены результаты исследования особенности распространения света в квазипериодических волноводных структурах, полученных оптической модуляцией параметров стационарных волноводных решеток  $\text{LiNbO}_3:\text{Ti}:\text{Fe}$ . Оптическая гармоническая модуляция проводилась с помощью двухпучковой голографической схемы. Когерентные световые пучки ( $\lambda=532$  нм) с обыкновенной поляризацией формировали на поверхности кристалла с системой канальных волноводов интерференционную картину с периодом ( $\Lambda_m$ ), превышающим период базовой структуры ( $\Lambda_b=8.4$  мкм) в 2 – 5 раз. Благодаря фоторефрактивной чувствительности приповерхностной области, в ней формировалась фотонная решетка, модулирующая величину

приращения показателя преломления от волновода к волноводу. Интенсивность записывающих пучков равнялась  $100 \text{ мВт/см}^2$ , в время экспозиции менялось в экспериментах от 3 до 30 минут. Сканирование полученных подобным образом квазипериодических канальных волноводных структур проводилось узким световым пучком (шириной  $\approx 13 \text{ мкм}$ ,  $\lambda=532 \text{ нм}$ ,  $P_{in}=20 \text{ нВт}$ ) при торцевом возбуждении элементов вдоль оси  $Y$ . На рисунке 4 показано распределение интенсивности пробного пучка на выходной плоскости кристалла для разного времени экспозиции записывающих пучков.

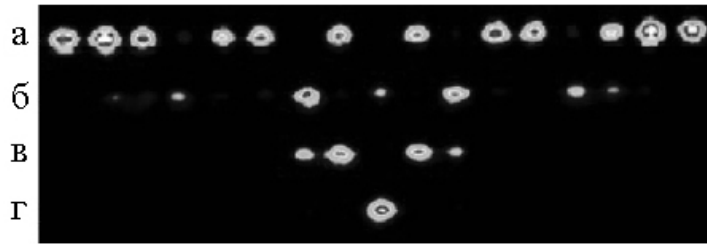


Рис. 4 – Картины дискретной дифракции света на выходной плоскости квазипериодической структуры с соотношением периодов модулирующей и базовой структур ( $N=3$ ) при одноэлементном возбуждении и разным времени экспозиции  $t$  модулирующего излучения:  
а -  $t=0$  мин.; б -  $t=3$  мин.; в -  $t=5$  мин.; г -  $t=15$  мин.

В экспериментах по распространению света в квазипериодических структурах выявлено существенное отличие дискретной дифракции света от такового для исходных стационарных структур [9, 11, 12, 14].

В подразделе 2.1.3 экспериментально продемонстрирован эффект пространственной локализации светового пучка в линейном режиме при распространении в положительных и отрицательных дефектах периодической канальной волноводной структуры на основе  $\text{LiNbO}_3$  (см. рисунок 5).

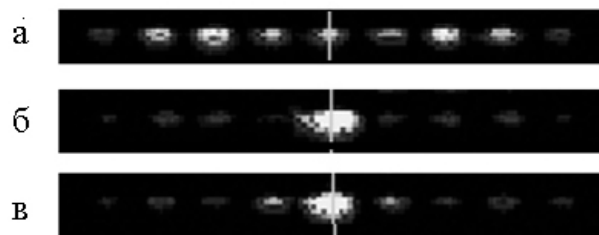


Рис.5 - Распределение интенсивности света на выходной плоскости канальной волноводной структуры при возбуждении света:  
а - в однородной части системы (ширина волноводов  $a=4 \text{ мкм}$ , расстояние между волноводами  $b=4.4 \text{ мкм}$ ); б - в положительном дефекте ( $a=4.2 \text{ мкм}$ ); в - в отрицательном дефекте ( $a=3.8 \text{ мкм}$ )

В периодической волноводной структуре существует возможность полностью подавить эффект дискретной дифракции (см. рисунок 5а) и получить бездифракционное распространение светового пучка в линейном режиме, если один из волноводов имеет пониженный (отрицательный дефект)

или повышенный (положительный дефект) показатель преломления относительно других волноводов системы. Положительный дефект системы способен поддерживать локализованную волноводную моду в режиме полного внутреннего отражения (см. рисунок 5б). В случае ввода излучения на входе в отрицательный дефект, оптический пучок также сильно локализован в волноводной решетке, но распространяется в режиме брэгговского отражения (см. рисунок 5в).

В нелинейной периодической структуре подобный эффект пространственной локализации светового пучка может быть получен оптическим индуцированием дефекта системы световым пучком при распространении вдоль волноводов (формирование пространственного солитона).

В подразделе 2.2 представлены результаты исследования формирования темных дискретных солитонов в одномерных волноводных решетках ( $\Lambda=8.4$  мкм) при микроваттном уровне входной мощности оптического излучения ( $\lambda = 532$  нм) [5]. В проведенных исследованиях получены два типа темных дискретных солитонов: один с центром симметрии темного провала интенсивности, совпадающим с центром канального волновода (мода А). Для второго типа темного солитона центр симметрии находился между волноводами (мода В). Картина распределения интенсивности светового пучка при формировании пространственно локализованной моды с центром симметрии между волноводами иллюстрируется рисунком 6.

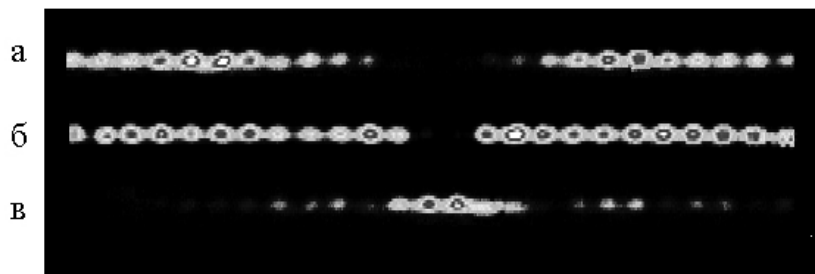


Рис.6- Распределение интенсивности света на выходной плоскости канальной волноводной структуры: а - при малой мощности входного пучка ( $P_{in} = 10$  нВт); б - после формирования темного дискретного солитона ( $P_{in} = 100$  мкВт); в - каналирование пробного пучка в оптически индуцированном дефекте

Результаты численного моделирования с использованием метода распространяющегося пучка показали, что стабильность распространения моды В в периодической среде с насыщающейся нелинейностью сохраняется при малом отклонении от симметрии условий входного возбуждения в отличие от среды с керровской нелинейностью, где при тех же входных условиях происходит преобразование моды В в моду А.

В подразделе 2.3 рассмотрена возможность формирования светлых щелевых пространственных солитонов при одноканальном возбуждении на входе волноводных структур с пространственным периодом 7.6 и 8.4 мкм, сформированных диффузией титана в подложку  $\text{LiNbO}_3$ . Мощность входного

пучка ( $\lambda=532$  нм) могла меняться в пределах от 10 нВт до 100 мкВт. Исследования показали наличие порога для значения мощности на входе ( $P_{in} = 35$  мкВт для решетки с пространственным периодом  $\Lambda = 7.6$  мкм и  $P_{in} = 10$  мкВт для решетки с  $\Lambda = 8.4$  мкм), при превышении которого в системе формировались пространственно локализованные состояния.

В образце, легированном железом, наблюдалось формирование щелевых пространственных солитонов в диапазоне входной мощности  $P_{in} = 0.9 - 40$  мкВт [8]. При этом время выхода на стационарное состояние изменялось от 40 часов ( $P_{in} = 0.9$  мкВт) до нескольких секунд ( $P_{in} = 40$  мкВт). Картины распределения интенсивности светового пучка на выходе волноводной решетки в линейном режиме и после формирования пространственного щелевого солитона, а также соответствующие результаты численного моделирования представлены на рисунке 7.

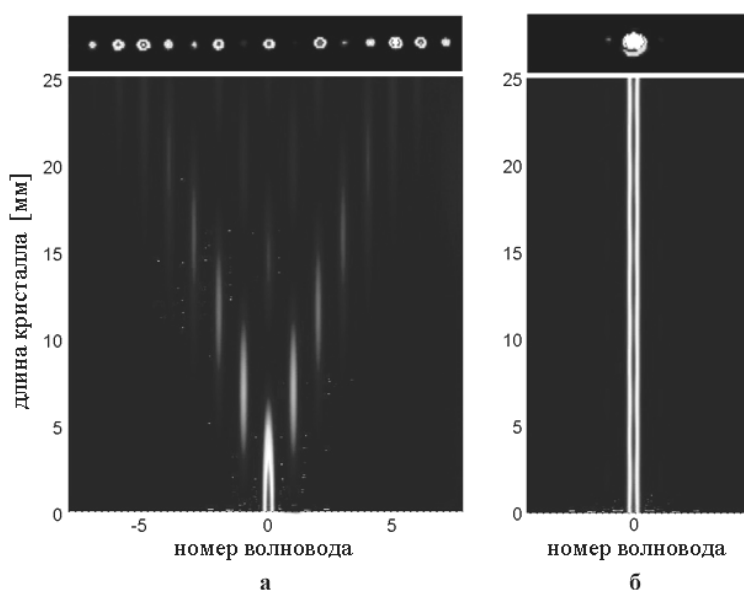


Рис.7 – Распределение интенсивности света на выходной плоскости каналной волноводной структуры при одноканальном возбуждении (вверху): а - картина линейной дискретной дифракции ( $P_{in} = 10$  нВт); б - формирование пространственного щелевого солитона ( $P_{in} = 20$  мкВт). Внизу представлены результаты численного моделирования

В подразделе 2.3 также приведены результаты формирования светлых щелевых солитонов в оптически индуцированных периодических структурах в планарном волноводе  $\text{LiNbO}_3:\text{Ti}:\text{Fe}$  с пространственным периодом  $\Lambda=10-18$  мкм, сформированных при помощи двухпучковой голографической схемы [9].

В подразделе 2.4 рассматривается экспериментальная реализация режимов поверхностных щелевых солитонов (нелинейных состояний Тамма) при возбуждении излучением  $\text{YVO}_4:\text{Nd}^{3+}$  лазера крайнего волновода на границе однородной среды и стационарной волноводной решетки  $\text{LiNbO}_3:\text{Ti}:\text{Cu}$  с периодом  $\Lambda=8.4$  мкм (см. рисунок 8) [1].

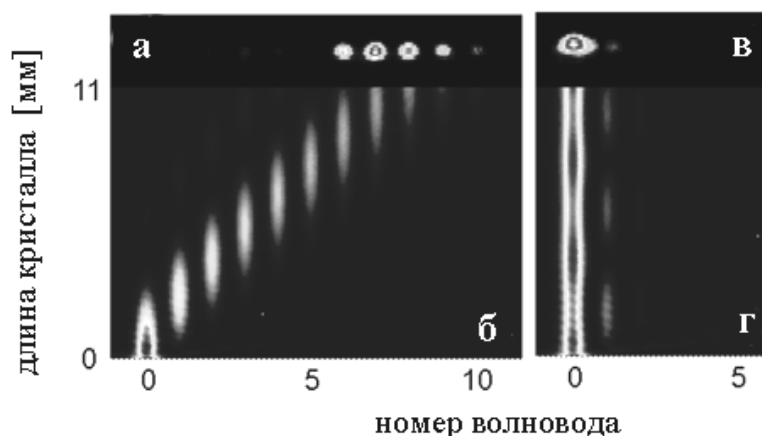


Рис.8- Распределение интенсивности света на выходной плоскости (вверху) при возбуждении световым пучком крайнего элемента волноводной структуры: а - картина линейной дискретной дифракции ( $P_{in}=10$  нВт); в - формирование поверхностного солитона ( $P_{in}=20$  мкВт); (б, г) –результаты численного моделирования

Вследствие эффекта туннелирования световой пучок испытывает дискретную дифракцию в линейном режиме и расширяется при распространении вдоль волноводов. Так, при уровне мощности на входе  $P_{in}=0.5$  мкВт ширина распределения светового поля на выходе волноводной структуры равнялась  $\approx 95$  мкм, а центр распределения интенсивности находился около пятого канала. Увеличение мощности на входе ведет к самовоздействию светового пучка благодаря дефокусирующей фоторефрактивной нелинейности кристалла. При этом ширина пучка на выходе уменьшается, а центр распределения интенсивности смещается к границе волноводной решетки. При формировании дискретного поверхностного щелевого солитона в среде с дефокусирующей нелинейностью проявляются два различных механизма локализации. Со стороны однородной среды пучок испытывает полное внутреннее отражение, в то время как в волноводной решетке за локализацию отвечает брэгговское отражение.

**Третья глава** посвящена изучению взаимодействия однонаправленных световых пучков в периодической фоторефрактивной системе связанных канальных волноводов на основе ниобата лития.

В подразделе 3.1 исследуется нелинейное взаимодействие двух синфазных изначально параллельных пучков ( $\lambda=532$  нм), которые вводились торцевым методом в фоторефрактивную систему связанных канальных волноводов с пространственным периодом  $\Lambda=8.4$  мкм [2] (см. рисунок 9).



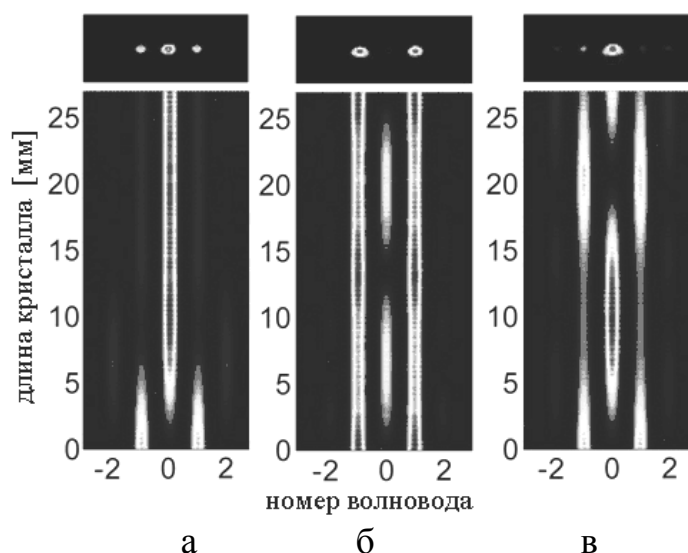


Рис.9 - Распределение интенсивности света на выходной плоскости канальной волноводной структуры при синфазном возбуждении на входе двух канальных волноводов для разного уровня мощности:

а -  $P_{in}=0.5$  мкВт; б -  $P_{in}=7$  мкВт; в -  $P_{in}=25$  мкВт.

Внизу - результаты численного моделирования

Для низкой мощности входных пучков ( $P_{in}=0.5$  мкВт) наблюдалось формирование оптической неоднородности с преимущественной локализацией светового излучения в центральном волноводе. Для среднего уровня входной мощности ( $P_{in}=7$  мкВт) узкие солитоноподобные пучки на выходе системы обладали шириной, сравнимой с шириной на входе. При высоком уровне входной мощности ( $P_{in}=25$  мкВт) вследствие сильного насыщения фоторефрактивной нелинейности пучок на выходе системы уширился.

При сканировании оптически индуцированного двумя параллельными синфазными пучками ( $P_{in}=7$  мкВт) дефекта пробным световым пучком обнаружена возможность значительного изменения распределения интенсивности на выходе периодической канальной волноводной структуры.

В подразделе 3.2 представлены результаты исследования нелинейного взаимодействия щелевых пространственных солитонов, которые распространялись в соседних элементах волноводной структуры  $\text{LiNbO}_3:\text{Ti:Fe}$  с периодом  $\Lambda=7.6$  мкм [10]. На основании полученных результатов была экспериментально доказана возможность стабильного распространения солитонных групп, состоящих из двух или трех синфазных дискретных щелевых солитонов в фоторефрактивной системе связанных канальных волноводов, обладающей дефокусирующей насыщающейся нелинейностью.

**Четвертая глава** посвящена изучению взаимодействия встречных оптических пучков в периодической фоторефрактивной системе связанных канальных волноводов на основе ниобата лития.

В подразделе 4.1 исследовалось нелинейное взаимодействие маломощного пробного пучка ( $P_{in}=10$  нВт) с блокирующим солитоном в системе связанных канальных волноводов ( $\Lambda=8.4$  мкм), созданной диффузией титана в легированную железом подложку  $\text{LiNbO}_3$  [4]. В качестве блокирующего мог использоваться темный дискретный или светлый щелевой солитон, которые

распространялись вдоль канальных волноводов. Второй пучок (пробный) одновременно возбуждал семь элементов системы и вводился в волноводную структуру под углом, равным половине Брэгговского, и распространялся практически без дифракции, пересекая ось блокирующего солитона. Взаимодействие пробного пучка со светлым блокирующим солитоном иллюстрируется рисунком 10.

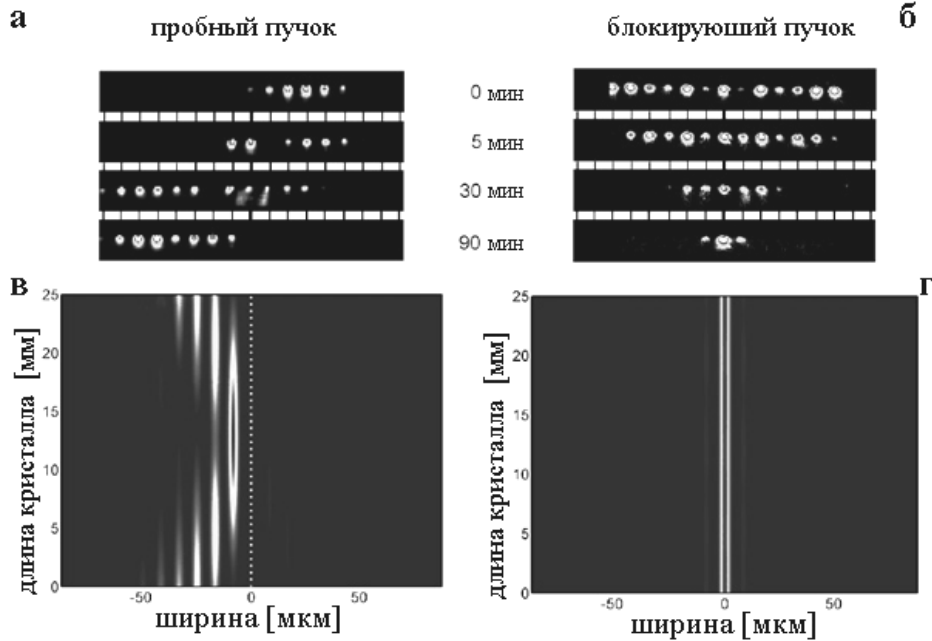


Рис.10 - Полное отражение пробного пучка (блокировка) от светлого блокирующего солитона: а - распределения интенсивности на выходе волноводной структуры для пробного ( $P_{in,pr}=10$  нВт) и б - блокирующего ( $P_{in,bl}=6$  мВт) пучков; (в, г) – результаты численного моделирования

Проведенные исследования обнаружили эффекты частичного или полного отражения (блокировку) пробного пучка от положительного и отрицательного оптически индуцированного дефекта фоторефрактивной периодической системы связанных волноводов, что предполагает потенциальную возможность использования наблюдаемых явлений для создания оптических разветвителей, и переключателей.

В подразделе 4.2 представлены результаты исследования взаимодействия встречных щелевых пространственных солитонов, распространяющихся в волноводной решетке  $\text{LiNbO}_3:\text{Ti:Fe}$  ( $\Lambda=8.4$  мкм) [8].

При моделировании распространения световых пучков во встречных направлениях численно решалась система нелинейных волновых уравнений в параксиальном приближении:

$$\begin{aligned} i \frac{\partial E_1}{\partial y} + \frac{1}{2k} \frac{\partial^2 E_1}{\partial z^2} + k \frac{n(z) + \Delta n}{n_e} E_1 &= 0, \\ -i \frac{\partial E_2}{\partial y} + \frac{1}{2k} \frac{\partial^2 E_2}{\partial z^2} + k \frac{n(z) + \Delta n}{n_e} E_2 &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

где  $E_{1,2}$  – амплитуды электрических полей оптических пучков;  $y$  – пространственная координата, вдоль которой распространяются световые пучки;  $z$  – поперечная пространственная координата, которая совпадает с направлением вектора волноводной решетки;  $n_e=2.234$  – необыкновенный показатель преломления  $\text{LiNbO}_3$  ( $\lambda=532$  нм).

Уравнения (1) связаны между собой через оптически индуцированное обоими пучками изменение показателя преломления в фоторефрактивной дефокусирующей среде:

$$\Delta n = \Delta n_s(t) \cdot \frac{I_1 + I_2}{I_1 + I_2 + I_d} = \Delta n_s(t) \cdot \frac{2 \cdot r}{2r + 1}, \quad (2)$$

где  $r = I/I_d$ ,  $I = I_1 = I_2$  – амплитуда интенсивности световых пучков,  $I_d$  – темновая интенсивность. Поскольку отклик фоторефрактивной нелинейности  $\text{LiNbO}_3$  не является мгновенным, при моделировании учитывалась временная зависимость величины оптически индуцированного изменения показателя преломления, которая увеличивалась с каждым шагом, пока не достигала стационарного значения. Зависимость изменения показателя преломления от времени имела следующий вид:

$$\Delta n_s(t) = \Delta n_{\max} [1 - \exp(-t/\tau)] \quad (3)$$

В расчетах использовалось большое количество итераций, при этом каждый новый цикл соответствовал малому временному интервалу  $-\tau/N$ , где  $\tau$  – константа, определяющая, насколько быстро увеличивается нелинейная добавка к показателю преломления со временем,  $N$  – целое положительное число. В расчетах максимальная амплитуда изменения показателя преломления ограничивалась значением  $|\Delta n_{\max}| = 4 \times 10^{-4}$ . Длительность временного интервала, для которого проводилось наблюдение встречного нелинейного взаимодействия световых пучков, равнялась  $10\tau$ . При значении параметра  $N=20$  каждое вычисление состояло из 200 итераций.

Проведенные экспериментальные исследования и результаты численного моделирования выявили следующие эффекты: стабильное распространение дискретных щелевых солитонов для низкого уровня мощности ( $P_{in}=2$  мкВт), для среднего уровня мощности ( $P_{in}=6$  мкВт) обнаружен эффект пространственной неустойчивости, который в режиме насыщения фоторефрактивной нелинейности может приводить к взаимному стационарному боковому сдвигу встречных солитонов в соседние волноводы, и для высокого уровня мощности ( $P_{in}>12$  мкВт) наблюдалась как временная, так и пространственная неустойчивость при распространении световых пучков без формирования стационарных локализованных состояний.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Показана возможность оптического индуцирования одномерных периодических канальных волноводных структур в фоторефрактивных

планарных ОВ  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}:\text{Ti}$  при помощи двухпучковой схемы голографической записи.

2. Экспериментально продемонстрирована возможность формирования одно- и двухмерных волноводных структур в фоторефрактивном кристалле  $\text{SBN}:\text{61}$  световым пучком аргонового лазера ( $\lambda=514$  нм) с низкой пространственной когерентностью в системе с обратной связью, созданной кольцевым оптическим резонатором.

3. Экспериментально показана возможность линейной локализации оптического пучка (полного подавления линейной дискретной дифракции) при его возбуждении в элементах одномерных сверхрешеток, созданных оптической модуляцией стационарных канальных волноводных структур в ниобате лития.

4. Экспериментально наблюдалось формирование темных дискретных солитонов в одномерных волноводных решетках с дефокусирующей фоторефрактивной насыщающейся нелинейностью.

5. Экспериментально определены условия формирования светлых щелевых пространственных солитонов при одноканальном возбуждении волноводных структур, сформированных диффузией титана в подложку ниобата лития. Показано наличие порога для значения мощности входного пучка, при превышении которого в системе наблюдалось формирование пространственно локализованного состояния.

6. Экспериментально наблюдалось формирование щелевых солитонов в оптически индуцированных периодических структурах в планарном волноводе  $\text{LiNbO}_3:\text{Ti}:\text{Fe}$ .

7. Экспериментально реализован режим поверхностных щелевых солитонов при возбуждении крайнего элемента на границе однородной среды и периодической системы связанных канальных волноводов, сформированных диффузией титана в подложку ниобата лития.

8. Экспериментально исследованы эффекты взаимодействия двух однонаправленных щелевых пространственных солитонов в фоторефрактивных периодических системах связанных волноводов с насыщающейся дефокусирующей нелинейностью.

9. Экспериментально обнаружены эффекты частичного или полного отражения (блокировка) маломощного пробного пучка при взаимодействии с темным или светлым блокирующими солитонами в фоторефрактивной периодической системе связанных канальных волноводов на основе ниобата лития.

10. Экспериментально показана возможность стабильного распространения групп солитонов, состоящих из двух или трех синфазных дискретных щелевых солитонов в фоторефрактивных периодических системах связанных волноводов с насыщающейся дефокусирующей нелинейностью.

11. Обнаружены эффекты взаимодействия встречных щелевых пространственных солитонов, распространяющихся в периодической системе связанных канальных волноводов, созданной диффузией титана в легированную железом подложку ниобата лития.

**СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

- 1\*. Nonlinear optics and light localization in periodic photonic lattices / D. N. Neshev, A. A. Sukhorukov, W. Krolikowski, and Yu. S. Kivshar // *J. Nonlinear Opt. Phys. Mater.* – 2007. - Vol. 16. - P. 1-25.
- 2\*. Superprism phenomena in photonic crystals: Toward microscale lightwave circuits / H. Kosaka, T. Kawashima, A. Tomita, M. Notomi, T. Tamamura, T. Sato and S. Kawakami, J. // *Journ. Of Lightwave Technology.* -1999. - Vol. 17. - P. 2032–2038.
- 3\*. Cubukcu, E. Negative refraction by photonic crystals / E. Cubukcu, K. Aydin, E. Ozbay, S. Foteinopoulou and C. M. Soukoulis // *Nature.* – 2003. - Vol. 423. - P. 604–605.
- 4\*. Christodoulides D. N. Discrete self-focusing in nonlinear arrays of coupled wave-guides // D. N. Christodoulides and R. I. Joseph / *Opt. Lett.* - 1988, - Vol. 13. - P. 794–796.
- 5\*. Discrete spatial optical solitons in waveguide arrays / H. S. Eisenberg, Y. Silberberg, R. Morandotti, A. R. Boyd and J. S. Aitchison // *Phys. Rev. Lett.* - 1998, - Vol. 81. - P. 3383–3386.
- 6\*. Optical Bloch oscillations in temperature tuned waveguide arrays / T. Pertsch, P. Dannberg, W. Elflein, A. Bräuer, and F. Lederer // *Phys. Rev. Lett.* - 1999. - Vol. 83. - P. 4752-4755.
- 7\*. Fleischer J.W. Observation of two-dimensional discrete solitons in optically induced nonlinear photonic lattices / J. W. Fleischer, M. Segev, N. K. Efremidis and D. N. Christodoulides // *Nature.* – 2003. - Vol. 422. - P. 147–150.
- 8\*. Hadley G.R. Wide-angle beam propagation using Pade approximant operators - *Optics Letters.* – 1992. - Vol. 17. - P. 1426.
- 9\*. Kartashov Y.V. Surface gap solitons / Y. V. Kartashov, V. A. Vysloukh and L. Torner // *Phys. Rev. Lett.* – 2006. - Vol. 96. - P. 073901–4.
- 10\*. Kivshar Yu. S. Self-localization in arrays of defocusing wave-guides - *Optics Letters.* – 1993. - Vol. 18. - P. 1147–1149.
- 11\*. Kivshar Y. Dark solitons in discrete lattices / Y. Kivshar, W. Krolikowski and O. Chubykalo // *Physical Review E.* – 1994. - Vol. 50. - P. 5020-5032.
- 12\*. Kartashov Y.V. Soliton trains in photonic lattices / Y. V. Kartashov, V. A. Vysloukh and L. Torner // *Optics Express.* – 2004. - Vol. 12. - P. 2831.
- 13\*. Crossover from self-defocusing to discrete trapping in nonlinear waveguide arrays / M. Matuszewski, C. R. Rosberg, D. N. Neshev, A. A. Sukhorukov, A. Mitchell, M. Trippenbach, M. W. Austin, W. Krolikowski and Yu. S. Kivshar // *Optics Express.* – 2006. - Vol. 14. - P. 254–259.
- 14\*. Observation of surface gap solitons in semi-infinite waveguide arrays / C. R. Rosberg, D. N. Neshev, W. Krolikowski, A. Mitchell, R. A. Vicencio, M. I. Molina and Yu. S. Kivshar // *Phys. Rev. Lett.* – 2006. - Vol. 9. – P. 83901.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА

1. Observation of staggered surface solitary waves in one-dimensional waveguide arrays / **E. Smirnov**, M. Stepic, C.E. Rüter, D. Kip, V. Shandarov // *Opt. Lett.* – 2006. - Vol. 31, No 15. - P. 2338-2340.
2. Beam interactions in one-dimensional saturable waveguide arrays / M. Stepic, **E. Smirnov**, C. E. Rüter, L. Pronneke, D. Kip, V. Shandarov // *Physical Review E.* – 2006. - Vol. 74. - P. 046614.
3. Pattern formation by spatially incoherent light in a nonlinear ring cavity / **E. Smirnov**, M. Stepic, V. M. Shandarov and D. Kip // *Appl. Phys. B.* – 2006. - Vol. 85. - P. 135.
4. Dark and bright blocker soliton interaction in defocusing waveguide arrays / **E. Smirnov**, C. E. Rueter, M. Stepic, V. Shandarov and D. Kip // *Optics Express.* – 2006. - Vol. 14, No 23. – P. 11248-11255.
5. Formation and light guiding properties of dark solitons in one-dimensional waveguide arrays / **E. Smirnov**, M. Stepic, C. E. Rüter, D. Kip and V. Shandarov // *Physical Review E.* - 2006, - Vol. 74. - P. 65601.
6. Особенности самодефокусировки световых пучков в фоторефрактивных одномерных периодических волноводных структурах в ниобате лития / К.В. Шандарова, В.М. Шандаров, **Е.В. Смирнов**, Д. Кип, М. Степич, Х.Рютер // Труды 4-й международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики-2006». Санкт-Петербург. - 2006. – 3 С.
7. Tamm oscillations in nonlinear waveguide arrays / M. Stepic, **E. Smirnov**, C. E. Rüter, D. Kip, A. Maluckov and Lj. Hadzievski // *Opt. Lett.* - 2007. - Vol. 32, No 7. - P. 823.
8. Interaction of counterpropagating discrete solitons in a nonlinear waveguide array / **E. Smirnov**, M. Stepic, C. E. Rüter, V. Shandarov and D. Kip // *Opt. Lett.* – 2007. - Vol. 32, No.5. - P. 512-514.
9. Light propagation in double-periodic nonlinear photonic lattices in lithium niobate / **E. Smirnov**, C. E. Rüter, D. Kip, K. Shandarova and V. Shandarov // *Appl. Phys. B.* – 2007. - Vol. 88, No.3. - P. 359-362.
10. Observation of higher-order solitons in one-dimensional waveguide arrays with defocusing saturable nonlinearity / **E. Smirnov**, C. E. Rüter, D. Kip, Y. V. Kartashov and L. Torner // *Opt. Lett.* – 2007. - Vol. 32, No 13. - P. 1950-1953.
11. Дискретная дифракция света в квазипериодических канальных волноводных структурах в ниобате лития / К.В. Шандарова, **Е.В. Смирнов**, В.М. Шандаров, Д. Кип, Х. Рютер. // Матер. Докл. Всероссийской НТК «Научная сессия ТУСУР-2007», ч. 1. – 2007. - С. 227 – 229.
12. Suppression of discrete diffraction within modulated one-dimensional photorefractive photonic lattices in lithium niobate / V. Shandarov, K. Shandarova, **E. Smirnov**, D. Kip, C. Rüter // In Conf. Abstr., IEEE Cat. Numb.:07TH8942C, ISBN: 1-4244-0931-4, CD, - 2007. - P. 2-5.
13. Novel type of one-dimensional discrete vector solitons / R. A. Vicencio, **E. Smirnov**, V. Shandarov, C.E. Rüter, D. Kip, M. Stepic // In Conf. Abstr., IEEE Cat. Numb.: 07TH8942C, ISBN: 1-4244-0931-4, CD, pap. IE-2121.

14. Suppression of Discrete Diffraction and Formation of Mini-Gap Solitons in Double-Periodic Nonlinear Photonic Lattices / **E. Smirnov**, C. E. Rueter, K. Shandarova, V. M. Shandarov, D. Kip // In Conf. Abstr., IEEE Cat. Numb.: 07TH8942C, ISBN: 1-4244-0931-4. CD. - P. 25.

15. Linear and nonlinear propagation of light within modulated 1D photonic lattices in lithium niobate / V.Shandarov, K.Shandarova, **E.Smirnov**, D.Kip, Ch.Rüter // Tech. Dig. Of Int. Conf. on Coherent and Nonlinear Optics, Minsk. – 2007. - 1 P.

16. Projection optical induction of periodic structures in photorefractive lithium niobate / A.Kanshu, G.Surkova, K.Shandarova, V.Shandarov, **E.Smirnov**, D.Kip, Ch.Rueter // Tech. Dig. Of Int. Conf. on Coherent and Nonlinear Optics, Minsk. – 2007. - 1 P.

17. Дискретная дифракция света объемных и планарных фотонных сверхрешетках, оптически индуцированных в фоторефрактивном ниобате лития / А.В. Гусев, А.В. Каншу, К.В. Шандарова, В.М.Шандаров, **Е.В. Смирнов**, Д. Кип, Х. Рютер, Я. Тан, Ф. Чен // Известия вузов. Физика, - 2008. - №. 9. - С. 57-62.