

На правах рукописи

Шандарова Ксения Владимировна

**ЛИНЕЙНАЯ И НЕЛИНЕЙНАЯ ДИСКРЕТНАЯ ДИФРАКЦИЯ
СВЕТА В ОПТИЧЕСКИ ИНДУЦИРОВАННЫХ ФОТОННЫХ
РЕШЕТКАХ В НИОБАТЕ ЛИТИЯ**

Специальность 01.04.05 – Оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

ТОМСК – 2008

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В последнее десятилетие проявляется повышенный интерес к эффектам взаимодействия и пространственного самовоздействия световых полей в нелинейных периодических структурах связанных оптических волноводов (ОВ) [1* - 3*]. В немалой степени это обусловлено уникальными возможностями оптики визуально наблюдать результаты таких эффектов, являющихся частными случаями взаимодействий волновых пакетов с нелинейными дискретными системами. Подобные взаимодействия встречаются в сложных системах любой физической природы (при движении электрона в поле периодического потенциала в твердом теле, в полупроводниковых сверхрешетках, в фотонных кристаллах, биологических системах и т.д.) [1*, 2*]. Кроме того, нелинейно-оптические эффекты в дискретных структурах могут явиться основой полностью оптических элементов для систем оптической памяти, обработки информации и связи.

К моменту начала данной работы основными объектами в нелинейной оптике дискретных систем являлись периодические канальные волноводные структуры на основе твердых растворов арсенида галлия и алюминия ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) [3*] и оптически индуцированные фотонные решетки (ФР) в кристаллах стронций-бариевого ниобата (SBN) [4*]. В таких системах наблюдался целый ряд эффектов нелинейного преобразования световых полей (формирование дискретных пространственных солитонов, щелевых пространственных солитонов, Флоке-блоховских солитонов и т.д.) [1* - 4*], однако их возможности ограничиваются следующим:

а) нелинейно-оптический отклик в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ обусловлен керровской нелинейностью и проявляется при интенсивности света более 10^9 Вт/см² [1*, 5*];

б) фоторефрактивная оптическая нелинейность SBN проявляется при интенсивности света в единицы Вт/см², но дрейфовый механизм фоторефрактивного отклика требует наличия внешнего электрического поля с напряженностью до 10 кВ/см, а размеры образцов SBN в настоящее время не превышают 10 – 15 мм [1*, 2*];

в) оптически индуцированные дефекты периодических структур имеют в данных системах время жизни от пикосекунд ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) до секунд (SBN), хотя во многих случаях желательны значительно большие времена «оптической памяти».

К материалам, перспективным для создания нелинейных волноводных систем, относится ниобат лития (LiNbO_3), обладающий сильным фотовольтаическим эффектом, благодаря чему его фоторефрактивный отклик не требует внешнего электрического поля. Время хранения фоторефрактивных ФР в LiNbO_3 может достигать месяцев

и даже лет, размеры образцов - до 120 мм, методы формирования в нем канальных волноводных структур хорошо развиты.

Цель работы

Целью диссертационной работы явилось исследование эффектов линейного и нелинейного распространения световых пучков в одномерных и двумерных фоторефрактивных ФР, оптически индуцированных в объемных образцах LiNbO_3 и в планарных волноводах на его основе.

Для достижения цели в работе решались следующие задачи:

- отработка методик оптического индуцирования одномерных и двумерных ФР, а также одномерных сверхрешеток в фоторефрактивном LiNbO_3 ; одномерных ФР и сверхрешеток в фоторефрактивных планарных волноводах на основе LiNbO_3 ;

- исследование эффектов линейной и нелинейной дискретной дифракции света в ФР и сверхрешетках в фоторефрактивном LiNbO_3 и в планарных волноводах на его основе.

Методы исследования

При решении поставленных задач использовался комплексный подход, сочетающий экспериментальные методы и методы компьютерного моделирования:

- при формировании ФР в объемных образцах LiNbO_3 использовался метод двухпучковой записи голографических решеток с периодической регистрацией интенсивности считывающего светового пучка при минимизации влияния внешних условий;

- при формировании малоэлементных ФР в объемных кристаллах изучалась временная эволюция картин светового поля на их выходной плоскости с помощью видеокамеры;

- при исследовании дискретной дифракции света в ФР и сверхрешетках изучались световые поля и их временная эволюция на выходной плоскости структур с помощью видеокамеры, при разных способах возбуждения ФР и световых мощностях менее 1 - 2 мкВт для линейного случая и более 5 мкВт для нелинейного;

- при формировании волноводных каналов темными пространственными солитонами в оптически индуцированных планарных ОВ изучалась временная эволюция поля считывающего пучка на выходной плоскости структуры, вводимого в неосвещенную область формирующего пучка на входной плоскости;

- при численном моделировании световых полей в структурах использовался метод распространяющегося луча в приложении к многоэлементным волноводным системам.

Научные положения, выносимые на защиту

1. В объемных образцах LiNbO_3 , легированного ионами Fe или Cu с их концентрацией до 0,01 – 0,02 весового процента, с помощью двухпучковой схемы голографической записи формируются:

а) при ширине световых пучков в направлении вектора ФР до 0,2 мм и длине волны света $\lambda=633$ нм, в $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ – одномерные ФР с числом элементов $5 \div 10$, пространственным периодом $\Lambda=15 \div 30$ мкм, изменением необыкновенного показателя преломления Δn_e в области ФР до $7 \cdot 10^{-5}$;

б) при последовательной записи базовой и модулирующей ФР с параллельными их векторами – одномерные фотонные сверхрешетки (ФР с гармонической модуляцией профиля в направлении вектора решетки) с отношением периодов модулирующей и базовой ФР до 4:1 и глубиной модуляции профиля базовой ФР до 100%;

в) при последовательной записи двух одномерных ФР с углом между их векторами $15^\circ \div 90^\circ$ в плоскости, содержащей оптическую ось кристалла – двумерные ФР с пространственным периодом $10 \div 20$ мкм и эллиптичностью поперечного сечения волноводных каналов **0,2 ÷ 5**.

2. В планарных ОБ $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}:\text{Ti}$ путем двухпучковой голографической записи формируются одномерные ФР с $\Lambda=10 \div 20$ мкм и величиной Δn_e до $7 \cdot 10^{-5}$, а также одномерные фотонные сверхрешетки путем оптической модуляции ФР и полученных диффузией Ti периодических канальных волноводных систем, с глубиной модуляции до 100% для оптически индуцированных и до 10% для диффузионных структур, когерентным излучением с длиной волны менее 532 нм и интенсивностью более 20 мВт/см².

3. Распределение интенсивности света на выходной плоскости оптически индуцированных фотонных решеток и сверхрешеток в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$, $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$, при заданной длине волны, целенаправленно модифицируется варьированием:

а) пространственного периода ($\Lambda=8 \div 20$ мкм) и изменения показателя преломления в волноводной области ($\Delta n_e=10^{-5} \div 2 \cdot 10^{-4}$) - в одномерных ФР;

б) величин Λ и Δn_e , поперечной симметрии системы и эллиптичности поперечного сечения волноводных каналов – в двумерных ФР ($\Lambda=10 \div 20$ мкм, $\Delta n_e=10^{-5} \div 2 \cdot 10^{-4}$, угол между векторами одномерных ФР от 5° до 90° при их симметричной ориентации относительно оптической оси кристалла и от 5° до 90° при ориентации одного из них вдоль этой оси);

в) параметров Λ ($8 \div 12$ мкм) и Δn_e ($10^{-5} \div 2 \cdot 10^{-4}$) базовой ФР, отношения периодов модулирующей и базовой ФР ($N=2 \div 4$), глубины модуляции профиля базовой ФР (до 100%), поперечного сдвига базовой и модулирующей ФР (до половины периода базовой ФР), возбуждаемого элемента – в одномерных фотонных сверхрешетках.

4. В одномерных ФР, оптически индуцированных в объеме $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$, при необыкновенной поляризации света и его интенсивности

более 2 Вт/см^2 для $\lambda=633 \text{ нм}$ и более 1 Вт/см^2 для $\lambda=532 \text{ нм}$, имеет место нелинейная локализация света в виде щелевых пространственных солитонов при возбуждении структуры:

а) световым пучком с расходимостью менее половины брэгговского угла, возбуждаемым в одном из брэгговских направлений;

б) двумя интерферирующими пучками с периодом интерференционной картины, равным периоду ФР;

в) двумя взаимно некогерентными пучками с расходимостью менее половины брэгговского угла, возбуждаемыми в двух брэгговских направлениях;

г) световым пучком в одном или двух волноводных элементах в направлении вперед, при величине Δn_e в волноводной области, превышающей $5 \cdot 10^{-5}$.

5. Одиночные волноводные каналы с эллиптичностью поперечного сечения $w_z/w_{y(x)} \approx 1/1.4$ или системы таких каналов формируются в кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ в режиме темных фотовольтаических пространственных солитонов в оптически индуцированном планарном волноводе или в системах таких волноводов, нормаль к плоскости которых параллельна оптической оси кристалла.

Достоверность научных положений и других полученных результатов

Достоверность первого и второго защищаемых положений базируется на многократном повторении экспериментов и формировании структур с прогнозируемыми параметрами, и подтверждается тем, что погрешности периода интерференционной картины и ориентации ее вектора относительно оптической оси кристалла не превышали 5% и $\pm 2^\circ$; погрешности измерения дифракционной эффективности одномерных ФР и определения величины Δn_e в волноводной области не превышали 5% и 20%. Полученные результаты не противоречат результатам других авторов (Song T. и др., Opt. Expr., 2006; Zhang P. и др., Chin. Phys. Lett., 2004).

Достоверность третьего защищаемого положения обеспечивается многократным повторением экспериментов, согласием (в пределах точности экспериментов до 7%) профилей интенсивности световых полей с результатами моделирования численным методом и с использованием аналитических выражений для одноэлементного возбуждения одномерных ФР; отсутствием противоречий полученных результатов для одномерных и двумерных ФР с результатами других авторов для структур на основе GaAs и SBN (Eisenberg H. S. и др., Phys. Rev. Lett., 1998; J. Fleischer и др., Nature, 2003).

Достоверность четвертого защищаемого положения подтверждается отсутствием противоречий экспериментальных результатов с результатами других авторов для канальных волноводных структур в LiNbO_3 (F.Chen и др., Opt. Expr., 2005; M. Matuszewski и др., Opt. Expr., 2006) и оптически

индуцированных ФР в LiNbO_3 (Т. Song и др., Opt. Expr., 2006) и SBN (Neshev D.N., и др., Phys. Rev. Lett., 2004).

Достоверность пятого защищаемого положения подтверждается отсутствием противоречий полученных экспериментальных результатов с теоретическими результатами о возможности формирования темных фотовольтаических солитонов в планарных ОБ на основе LiNbO_3 Z – среза (М.Н.Фролова и др., Квант. Электр., 2003).

Новизна защищаемых положений и других результатов

1. Новизна первого и второго защищаемых положений заключается в том, что предложены и впервые реализованы методики формирования:

а) одномерных ФР с малым числом волноводных элементов в кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$;

б) одномерных ФР в фоторефрактивных планарных ОБ в LiNbO_3 ;

в) фотонных сверхрешеток в объемных образцах $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$, $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ и в фоторефрактивных планарных ОБ в LiNbO_3 , в том числе на основе стационарных канальных волноводных структур;

г) двумерных ФР в объемных образцах $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ и $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$.

2. Новизна третьего защищаемого положения заключается в следующем:

а) доказана возможность управления величиной межэлементной связи и, соответственно, световыми полями в оптически индуцируемых одномерных и двумерных ФР и одномерных фотонных сверхрешетках;

б) впервые экспериментально показана возможность линейной локализации света при его возбуждении в некоторых элементах одномерных фотонных сверхрешеток в объемных образцах $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$, $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ и в фоторефрактивных планарных ОБ в LiNbO_3 ;

в) впервые продемонстрировано, что возбуждение двумерных ФР когерентным пучком с поперечным размером менее ширины волноводного канала позволяет визуализировать их зонную структуру.

4. Новизна четвертого защищаемого положения заключается в экспериментальной реализации режимов щелевых пространственных солитонов в одномерных ФР, оптически индуцированных в объемных образцах самодефокусирующего $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$, при разных способах возбуждения света в ФР, в том числе взаимно некогерентными световыми пучками.

5. Новизна пятого защищаемого положения заключается в том, что впервые экспериментально продемонстрирован эффект формирования темных фотовольтаических пространственных солитонов в планарных волноводах, оптически индуцированных в объеме $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$.

6. Новизна других результатов диссертации заключается в том, что в работе впервые экспериментально реализованы эффекты:

- частичной самофокусировки пучка при распространении света в области аномальной дифракции в одномерных ФР в кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$;

- формирования темных пространственных солитонов в оптически индуцированной одномерной ФР в объемном кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$;
- формирования щелевых пространственных солитонов в малоэлементной одномерной ФР с вытеканием света в кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$, при ее одноэлементном возбуждении;
- усиления дискретной дифракции света, либо его нелинейной локализации в одном из элементов структуры, либо нестационарной туннельной перекачки энергии между волноводами, разделенными одним или несколькими промежуточными элементами, при одноэлементном возбуждении одномерной фотонной сверхрешетки;
- формирования щелевых пространственных солитонов в запрещенной мини-зоне одномерной фотонной сверхрешетки, полученной оптической модуляцией параметров канальных волноводных структур в LiNbO_3 .

Научная ценность защищаемых положений и других результатов заключается в том, что:

1) предложенные методики и проведенные экспериментальные исследования позволили выявить возможности LiNbO_3 по оптическому индуцированию в нем волноводных структур со сложной топологией за счет фотовольтаического эффекта, и возможности прогнозирования влияния параметров экспериментальных схем на характеристики формируемых волноводных структур;

2) результаты исследований линейной дифракции света в оптически индуцированных ФР и сверхрешетках позволили выявить условия управления межэлементной связью в таких структурах, а также условия линейной локализации света в одномерных фотонных сверхрешетках;

3) результаты экспериментальных исследований нелинейной дифракции света в оптически индуцированных ФР подтвердили предложенную методику использования взаимно некогерентных световых пучков, возбуждаемых в противоположных брэгговских направлениях, для реализации режима щелевых пространственных солитонов в одномерных ФР на основе материала с самодефокусирующей фоторефрактивной оптической нелинейностью;

4) показана возможность нелинейного преобразования структуры световых полей при их фоторефрактивном самовоздействии в оптически индуцированных волноводных элементах и системах в $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$;

5) результаты экспериментальных исследований нелинейного распространения света в одномерных фотонных сверхрешетках указывают на возможность принципиальных различий проявления в них эффекта пространственного самовоздействия света при возбуждении разных элементов, и на возможность прогнозирования характеристик световых полей в структуре, исходя из параметров сверхрешеток (отношение периодов базовой и модулирующей ФР, глубина модуляции, номер возбуждаемого канала).

Практическая значимость защищаемых положений и других результатов

1. Практическая значимость первого и второго защищаемых положений заключается в том, что разработанные методики оптического индуцирования ФР и сверхрешеток пригодны для создания волноводных элементов и устройств оптической памяти, обработки информации и оптических межсоединений на основе LiNbO_3 , обладающего фотовольтаическим эффектом, что позволяет формировать ФР без электрических дрейфовых полей (в отличие от SBN). *Долговременная оптическая память* LiNbO_3 позволяет создавать сложные голографические структуры путем последовательной записи элементарных ФР. Все это существенно упрощает экспериментальные методики формирования волноводных структур в LiNbO_3 , преимущество которого перед SBN и GaAs заключается и в коммерческой доступности образцов с размерами до 12 см в направлениях, перпендикулярных оптической оси, благодаря его производству в промышленных масштабах.

2. Практическая значимость третьего и четвертого защищаемых положений. В экспериментах других авторов волноводные структуры, полученные в LiNbO_3 оптическим индуцированием, представляли собой одиночные элементы либо системы, в которых туннельная связь между соседними элементами отсутствовала, поскольку период Λ и поперечные размеры волноводов составляли около 100 мкм. Выявленные в *данной* работе эффекты линейной дискретной дифракции и нелинейной локализации света в оптически индуцированных ФР и сверхрешетках с малыми периодами и заметной межволноводной связью, вместе с долговременной оптической памятью LiNbO_3 (в отличие от SBN и GaAs) и его сильным фотовольтаическим эффектом (в отличие от SBN), дают возможность создания на их основе волноводно-оптических элементов и устройств (оптических разветвителей, преобразователей структуры световых полей) с заданными характеристиками.

3. Практическая значимость пятого защищаемого положения заключается в том, что выявленные эффекты индуцирования волноводных каналов в $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ в режиме темных пространственных солитонов в оптически индуцированных планарных ОВ, дают возможность создания элементов и устройств на основе канальных волноводных систем с заданной поперечной структурой в объемных образцах $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$, для устройств и систем оптической памяти и оптической обработки информации, что невозможно реализовать на основе других материалов.

Внедрение результатов работ и рекомендации по их дальнейшему использованию

Результаты диссертационной работы используются на кафедре Сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, в

учебном процессе в виде лабораторной работы «Исследование дифракции светового пучка в среде с периодической модуляцией показателя преломления» по курсу «Основы физической и квантовой оптики», а также в курсовом и дипломном проектировании студентов. Разработанные экспериментальные методики используются в исследованиях нелинейно-оптических эффектов в периодических фотонных структурах в фоторефрактивных кристаллах и оптических волноводах. Акт внедрения приведен в Приложении к диссертации. Результаты диссертации целесообразно использовать в Московском институте электронной техники и Кемеровском госуниверситете.

Апробация работы

Результаты исследований докладывались на VI Всероссийской и VII Международной школах-семинарах молодых ученых «Современные проблемы физики, технологии и инновационного развития» (Томск), февраль и декабрь 2005 г.; XIIth Europ. Conf. on Integrated Optics, Grenoble, France, April 2005; Int. Conf. “Bragg Gratings: Poling and Photosensitivity, BGGP 2005”, Sydney, Australia, July 2005; Int. Conf. on Coherent and Nonlinear Optics “ICONO/LAT 2005” (St. Petersburg, May 2005); Int. Workshop “Lithium Niobate: from material to device, from device to system”, Metz, France (May 2005); 10th Int. Conf. on Photorefractive Effects, Materials, and Devices (PR-05), Sanya, Hainan, China, July 2005; Int. Conf. on Laser and Fiber-Optic Networks Modeling, LFNМ`2005, Sept. 2005, LFNМ 2006, June 2006, Ukraine; 4-ой международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2005», С.–Петербург, 2005 г.; Международной НПК «Электронные средства и системы управления», Томск, Октябрь 2005; 6-й и 8-й Всероссийских НТК молодых ученых и студентов «Современные проблемы радиоэлектроники», 2005 и 2006 гг., Красноярск; Всероссийских НТК «Научная сессия ТУСУР-2005», «Научная сессия ТУСУР-2006», «Научная сессия ТУСУР-2007», Томск, 2005 – 2007 гг.; Двенадцатой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых «ВНКСФ-12», Новосибирск, март 2006; Десятой научной студенческой конференции по физике твердого тела, 2006 г., Томск; EOS Top. Meet. on Nonlinear Optics: From Sources to Guided Waves, Paris, France, October 2006; Int. Conf. “Micro- to Nano-Photonics- ROMOPTO 2006”, August 2006, Sibiu, Romania; 15th Int. Laser Physics Workshop, Lausanne, Switzerland, July 2006; Int. Conf. CLEO/Europe 2007, July 2007, Munich, Germany; Int. Topical Meeting “2007 Controlling Light with Light: Photorefractive Effects, Photosensitivity, Fiber Gratings, Photonic Materials and More (PR)”, October 2007, USA.

Публикации

Основные результаты исследования изложены в 29 работах, включая 6 статей в реферируемых журналах.

Личный вклад автора

Большинство результатов получено лично автором либо при его непосредственном участии. Автором проводились экспериментальные исследования и численное моделирование, анализ и обобщение полученных результатов. Вклад основных соавторов заключается в участии в постановке задач на начальном этапе исследований (В.М.Шандаров), помощи в проведении отдельных экспериментов (В.М.Шандаров, Е.В.Смирнов), подготовке отдельных экспериментальных образцов (Ch. Rüter), обсуждении результатов исследований (D.Kip).

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка цитируемой литературы из 116 наименований, включая работы автора. Работа содержит 102 рисунка, 3 таблицы; полный объем работы - 192 страницы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, формулируются цель работы и научные положения, выносимые на защиту. Определена новизна, научная и практическая ценность полученных результатов.

Первая глава посвящена анализу состояния исследований линейной и нелинейной дифракции света в периодических волноводных структурах на момент начала работ по теме диссертации и обоснованию необходимости исследований таких эффектов в оптически индуцированных ФР в LiNbO_3 .

Вторая глава посвящена отработке методик оптического индуцирования одномерных и двумерных ФР в объемных образцах LiNbO_3 .

В п. 2.1 обсуждаются достоинства LiNbO_3 как среды для оптического индуцирования ФР, в пп. 2.2 и 2.3 - механизм и результаты формирования одномерных ФР в кристаллах LiNbO_3 . В пп. 2.3.1 и 2.3.2 даны основные соотношения и схема экспериментальной установки для записи одномерных ФР в фоторефрактивных кристаллах. Такая ФР является системой связанных планарных ОВ и индуцируется в кристалле LiNbO_3 за счет фоторефрактивного эффекта стационарной интерференционной картиной с ее вектором, параллельным оптической оси кристалла (ось Z).

Изменение показателя преломления Δn в области ФР находится из ее дифракционной эффективности η .

Многоэлементные ФР формировались в образцах $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ (0,015 вес.%) и $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ (0,01 вес.%) излучением He-Ne лазера ($\lambda=633$ нм, $P=1$ мВт) или непрерывного твердотельного $\text{YVO}_4:\text{Nd}^{3+}$ лазера с удвоением частоты ($\lambda=532$ нм, $P=2$ Вт). Размер ФР в направлении оси Z менялся от ~ 2 мм ($\lambda=633$ нм, средняя интенсивность света ~ 5 мВт/см²) до 6 мм ($\lambda=532$ нм, интенсивность света 30 мВт/см²), а их пространственный период Λ составлял от 10 до 20 мкм. Поляризация формирующего излучения соответствовала обыкновенной волне в кристалле. Время формирования ФР в кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ составляло 60÷80 минут ($\lambda=633$ нм) при $\eta=65\%$ и ~ 2 минуты ($\lambda=532$ нм) при $\eta=92\%$. Величины Δn для волн с обыкновенной и необыкновенной поляризацией оценивались при этом в $\Delta n_o \approx 2 \cdot 10^{-5}$ и $\Delta n_e \approx 7.2 \cdot 10^{-5}$, соответственно [1 - 7].

В образцах $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ многоэлементные ФР с $\Lambda=(12\div 20)$ мкм формировались излучением с $\lambda=532$ нм и интенсивностью от 50 мВт/см² до 5 Вт/см². Величина $\eta=85\%$ достигалась за время ~ 40 минут и 3 минуты при интенсивностях света 50 мВт/см² и 5 Вт/см². Дифракция света в ФР изучалась при их возбуждении коллимированным или фокусированным световым пучком, по картинам светового поля на выходной плоскости ФР, с помощью видеокамеры.

В п. 2.3.3 предложена методика формирования одномерных ФР с числом элементов от 5 до 10 при интерференции узких световых пучков, полученных из лазерного луча с помощью экрана с парой прямоугольных щелей. Экран размещался в передней фокальной плоскости цилиндрической линзы, образец $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ – в области задней фокальной плоскости. Продемонстрировано формирование таких ФР излучением He-Ne лазера и показано, что для них характерны эффект вытекания света и продольная неоднородность поперечного профиля из-за индуцирования нелинейной линзы в освещенной области постоянной составляющей светового поля [8, 9].

В п. 2.4 предложена методика формирования двумерных ФР в объеме LiNbO_3 при последовательной записи двух одномерных ФР, основанная на большом времени хранения в нем фоторефрактивных ФР. Векторы одномерных ФР отклонены на углы γ_1, γ_2 от оси Z в плоскости YOZ , при обыкновенной поляризации записываемых пучков. В «симметричной» схеме $\gamma_1=\gamma_2$, в «несимметричной» $\gamma_1 \neq \gamma_2$. Реализованы двумерные ФР с соотношением периодов одномерных ФР от 1:1 до 1:2 и с разной ориентацией векторов одномерных ФР в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ и $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$. Показано, что периодическая модуляция показателя преломления в направлении оси Z делает возможным формирование на следующем этапе одномерной ФР с вектором, ориентированным перпендикулярно оси Z , что невозможно в однородной области кристалла

[10 - 12]. Примеры световых полей на выходной плоскости полученных двумерных ФР с разными параметрами показаны на рис. 1.

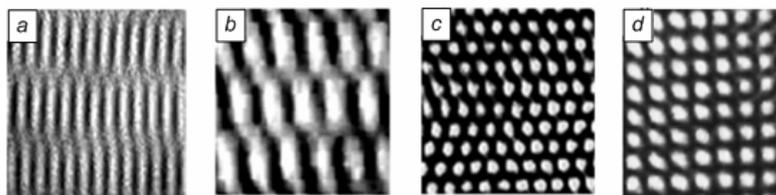


Рис. 1. Световые поля на выходной плоскости двумерных ФР:
 а) $2\gamma = 15^\circ$, $\Lambda = 18$ мкм; б) $2\gamma = 30^\circ$, $\Lambda = 15$ мкм; в) $2\gamma = 44^\circ$, $\Lambda = 15$ мкм; д) $\gamma_1 = 0^\circ$,
 $\gamma_2 = 90^\circ$, $\Lambda = 15$ мкм.

В п. 2.5 предложена методика формирования в кристаллах LiNbO_3 одномерных фотонных сверхрешеток при последовательной записи двух одномерных ФР с разными периодами Λ , но параллельными векторами. На первом этапе формировалась базовая ФР с периодом Λ_6 , затем она модулировалась интерференционной картиной с периодом $\Lambda_m > \Lambda_6$. В образцах $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ и $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ получены сверхрешетки с $\Lambda_m/\Lambda_6 = (2:1 \div 4:1)$, $\Lambda_6 = 10 \div 13$ мкм, с величиной Δn_e до 10^{-4} , глубиной модуляции профиля базовой ФР от 10% до 50% [13].

Третья глава посвящена голографическому формированию одномерных канальных волноводных структур в фоторефрактивных планарных ОБ в LiNbO_3 .

В пп. 3.1 и 3.2 обсуждаются достоинства планарных ОБ в LiNbO_3 и методика экспериментов. В п. 3.3 периодические канальные волноводные структуры индуцировались в ОБ $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}:\text{Ti}$ излучением с $\Lambda = 532$ нм. Образец с ОБ вводился в интерференционную картину так, чтобы вектор ФР был параллелен оси Z кристалла, а биссектриса угла пересечения световых пучков перпендикулярна плоскости ОБ. Интенсивность обыкновенно поляризованного излучения менялась от 50 до 200 мВт/см², а время экспозиции - от 10 до 120 мин [13, 14]. Рис. 2а показывает световое поле на выходном торце ОБ до индуцирования ФР. Изображения на рис. 2 б, в, д получены для канальных структур с $\Lambda = (12, 15$ и $13)$ мкм.

В п. 3.4 демонстрируется формирование в планарных ОБ одномерных сверхрешеток путем оптической модуляции оптически индуцированных ФР и канальных волноводных структур, полученных в LiNbO_3 диффузией Ti . Интенсивность света менялась от 50 до 100 мВт/см², время экспозиции - от 3 до 30 минут, Λ_m/Λ_6 - от 2:1 до 5:1. Глубина модуляции профиля базовой ФР зависит от интенсивности света и времени экспозиции. Вместе с периодом Λ_6 и поперечным сдвигом базовой ФР относительно модулирующей, она определяет величину связи между соседними каналами и картину светового поля на выходе структуры [13,

14]. Пример таких картин при разном времени экспозиции приведен на рис. 3 для $\Lambda_6=8.4$ мкм, $\Lambda_M=25.2$ мкм.

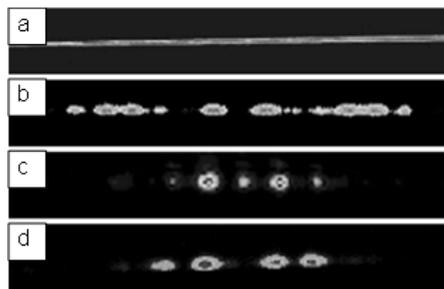


Рис. 2. Световые поля на выходном торце ОВ при его возбуждении пучком с шириной ~ 5 мкм до формирования канальной структуры (а), и для ФР с $\Lambda=12$ мкм (b), 15 мкм (c), 13 мкм (d).

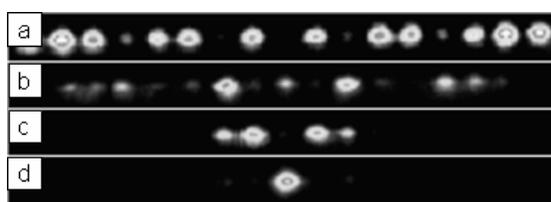


Рис. 3. Световые поля в базовой (а) и оптически модулированных канальных структурах: b) $t=3$ мин, c) $t=5$ мин, d) $t=15$ мин.

В четвертой главе исследуется линейная дифракция света в одномерных и двумерных ФР. В п. 4.1 изложены общие положения о линейной дифракции света в периодических системах и результаты численного моделирования, показывающие возможность управления межэлементной связью и световыми полями на выходе ФР путем изменения параметров Λ , λ и Δn_e .

Дискретная дифракция в многоэлементных одномерных ФР в кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ исследовалась при $\lambda=633$ нм и $P < (1 \div 2)$ мВт. При возбуждении одного из элементов ФР изучались световые поля на ее выходной плоскости. Показано, что в плоскости волновода свет дифрагирует так же, как в однородной области, а дифракция в направлении вектора ФР носит дискретный характер и существенно зависит от величин Λ и Δn_e (рис. 4) [1 - 5].

В п. 4.2, при исследовании малоэлементных ФР, сформированных при распространении света под малыми углами к оси Y в плоскости YOZ , и считываемых в направлении оси X , показано, что при возбуждении ФР в центральной области, вытекание света не приводит к значительным его потерям на длине ФР до 10 мм при $\Lambda=(15 \div 18)$ мкм, $\Delta n_e=7 \cdot 10^{-5}$ [8, 9].

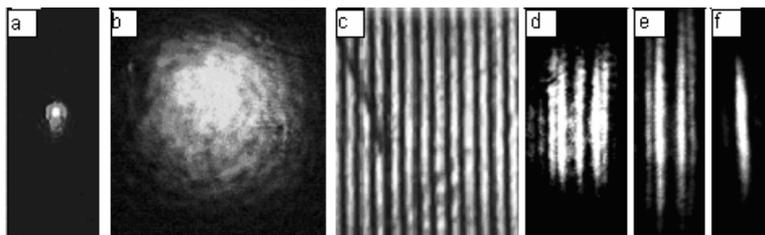


Рис. 4. Световые поля: а) и б) - на входной и выходной плоскостях кристалла в однородной области; с) - на выходной плоскости при считывании ФР параллельным пучком; д) – ф) – на выходных плоскостях ФР с параметрами $\Delta n_e=6 \cdot 10^{-5}$, $\Lambda=15$ мкм (д), $\Delta n_e=2 \cdot 10^{-4}$, $\Lambda=15$ мкм (е); $\Delta n_e=2 \cdot 10^{-4}$, $\Lambda=20$ мкм (ф).

В п. 4.3 исследуется линейная дифракция света в двумерных ФР при их считывании параллельным и фокусированными световыми пучками. Показано, что для ФР, полученных при $2\gamma < 20^\circ$, дискретная дифракция наблюдается преимущественно в направлении оси Z кристалла, а при $2\gamma > 20^\circ$ она проявляется достаточно сильно и в ортогональном оси Z направлении. Возбуждение двумерной ФР световым пучком ($\lambda=633$ нм) с диаметром меньше размера волноводного канала (~ 6 мкм) позволило визуализировать направления, в которых распространение света запрещено из-за брэгговского отражения, т.е. зонную структуру ФР [11, 12].

В п. 4.4 исследуется дифракция света в одномерной ФР, индуцированной в ОБ $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}:\text{Ti}$. В п. 4.5.1 показано, что угловые зависимости оптического пропускания сверхрешеток в объемных образцах дают информацию о законе модуляции показателя преломления в структуре, а картины светового поля на ее выходе, в отличие от случая периодических ФР, зависят от номера возбуждаемого элемента. Так, при возбуждении некоторых элементов наблюдалось полное подавление дискретной дифракции света, что иллюстрирует рис. 5 для сверхрешетки с $\Lambda_6=12$ мкм, $\Lambda_M=36$ мкм в кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$, при $\lambda=532$ нм.

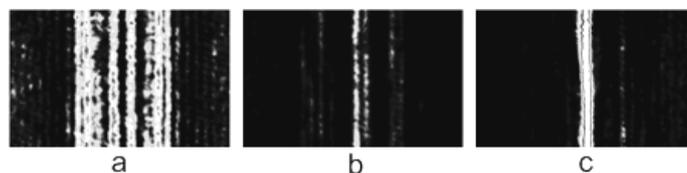


Рис. 5. Световые поля на выходе сверхрешетки при одноэлементном возбуждении: а – для базовой ФР; б, с – возбуждение разных элементов сверхрешетки.

В сверхрешетках в планарных ОБ (п. 4.5.2) и в оптически модулированных канальных волноводных структурах (п. 4.5.3) наблюдался такой же эффект [13, 14]. Рис. 6 для сверхрешетки с $\Lambda_6=12$ мкм и $\Lambda_M=36$ мкм в ОБ $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}:\text{Ti}$ демонстрирует локализацию света на ее выходной

плоскости в двух (а) или одном (с) элементах, а также сильную дискретную дифракцию (b), при возбуждении разных каналов ($\lambda=532$ нм).

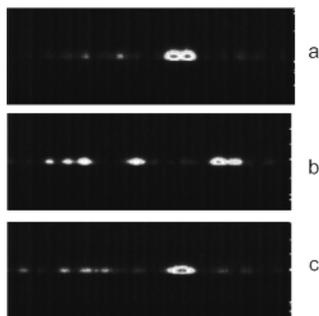


Рис. 6. Световые поля на выходе сверхрешетки в планарном ОВ $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}:\text{Ti}$ при возбуждении разных элементов.

В пятой главе исследуются эффекты пространственного самовоздействия световых пучков в оптически индуцированных ФР. В п. 5.1.1 излагаются общие положения о пространственном самовоздействии света в периодических структурах. В п. 5.1.2 демонстрируется эффект самодефокусировки необыкновенно поляризованного пучка ($\lambda=633$ нм, $P=5$ мкВт) в области нормальной дифракции, при возбуждении 3 – 5 элементов, а в п. 5.1.3 - частичная самофокусировка пучка с $P=10$ мкВт, диаметром 90 мкм, при его возбуждении в области аномальной дифракции (в направлении $\theta \approx \pm 0.75\theta_6$, где θ_6 – угол Брэгга) одномерной ФР ($\Lambda=15$ мкм) в кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ [2, 15 - 21].

В п. 5.1.4 демонстрируются эффекты самовоздействия света в двумерных ФР с параметрами $2\gamma=44^\circ$, $\Lambda=15$ мкм; $2\gamma=90^\circ$, $\Lambda=15$ мкм; $2\gamma=44^\circ$, $\Lambda=20$ мкм в кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ [11, 22]. Первая ФР возбуждалась в прямом направлении световым пучком с диаметром 70 мкм и $P=20$ мкВт, во второй возбуждался один элемент ($P=10$ мкВт, $\lambda=532$ нм), третья возбуждалась пучком с диаметром ~ 10 мкм и $P=5$ мкВт. Эффект самовоздействия проявлялся в самодефокусировке пучка в первой ФР и в слабой, но заметной локализации света вблизи границы первой зоны Бриллюэна во второй и третьей.

В п. 5.1.5 исследуется пространственное самовоздействие света ($\lambda=532$ нм, $P=5$ мкВт) в одномерных сверхрешетках в кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$. При возбуждении света в разных элементах самовоздействие проявлялось в усилении дискретной дифракции, локализации света в одном элементе, либо в нестационарной туннельной перекачке энергии между ОВ, разделенными одним или несколькими промежуточными элементами [13, 23].

В п. 5.2 исследуются режимы дискретных пространственных солитонов в оптически индуцированных ФР. В п. 5.2.1 обсуждаются условия достижения солитонных режимов, а в п. 5.2.2 реализован режим темного дискретного солитона в одномерной ФР ($\Lambda=15$ мкм) в кристалле

$\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$, при ее возбуждении в прямом направлении фазированным световым пучком с $\lambda=633$ нм, $P=15$ мкВт [20]. В п. 5.2.3 обсуждаются способы возбуждения одномерных ФР в LiNbO_3 , позволяющие реализовать режим щелевых пространственных солитонов при нелинейном взаимодействии световых волн, распространяющихся во встречных брэгговских направлениях. В п. 5.2.4 и 5.2.5 режимы щелевых пространственных солитонов реализованы в одномерных ФР ($\Lambda=15$ мкм) при возбуждении слабо расходящегося светового пучка ($P=20$ мкВт, $\lambda=633$ нм) в брэгговском направлении и при возбуждении ФР интерференционной картиной, полученной при делении светового пучка на два с помощью амплитудной маски в виде узкой полоски [2, 17-21]. В обоих случаях в ФР наблюдалась нелинейная локализация света, соответствующая щелевым пространственным солитонам.

В п. 5.2.6 предложена методика формирования щелевых пространственных солитонов в одномерных ФР взаимно некогерентными световыми пучками, возбуждаемыми в двух брэгговских направлениях [24, 25]. Рис. 7 иллюстрирует эффект нелинейной локализации света, при возбуждении 5 – 6 элементов ФР в брэгговских направлениях излучением двух He-Ne лазеров. Состояние нелинейной локализации сохранялось в течение более двух часов, однако при более продолжительной экспозиции солитон разрушался.

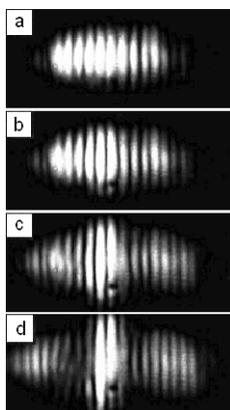


Рис. 7. Световые поля на выходе ФР при ее возбуждении двумя взаимно некогерентными пучками а) $t=0$; б) $t=30$ мин; в) $t=60$ мин; д) $t=120$ мин.

В п. 5.2.7 демонстрируется формирование светлых щелевых солитонов в одномерных ФР ($\Lambda=12\div 18$ мкм, $\Delta n_e \approx 10^{-4}$) в образце $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$, при их одноэлементном возбуждении [26]. В экспериментах с течением времени световое поле локализовалось в возбуждаемом элементе, как показано на рис. 8 для ФР с $\Lambda=15$ мкм и $\Lambda=13$ мкм. Похожие результаты получены и при возбуждении двух элементов данных ФР, однако эффект нелинейной локализации не наблюдался в ФР с $\Delta n_e < 5 \cdot 10^{-5}$.

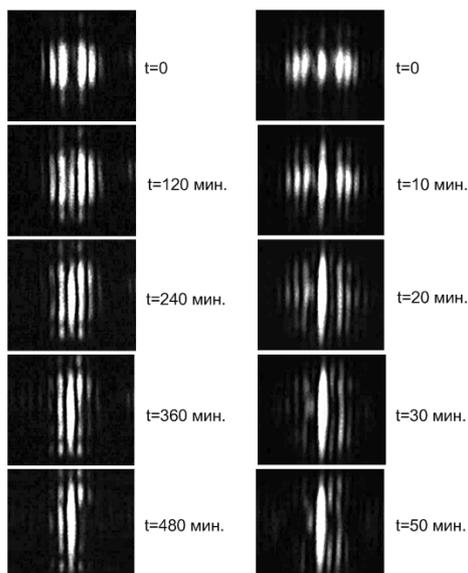


Рис. 8. Световые поля на выходе одномерных ФР: $\Lambda=15$ мкм, $P=1$ мкВт – слева; $\Lambda=13$ мкм, $P=5$ мкВт – справа.

В п. 5.3 режим светлых щелевых солитонов при одноэлементном возбуждении ($P=10$ мкВт) реализован и в одномерных малоэлементных ФР из 5 – 6 ОВ с периодом от 15 до 20 мкм в образце $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ [8, 9]. При формировании солитона эффект вытекания света усиливался, однако близкий к солитонному режим сохранялся в течение времени, большего, чем время развития нелинейной локализации. В п. 5.4 демонстрируется формирование светлого щелевого солитона в двумерной ФР ($\Lambda=15$, $2\gamma=18^\circ$) световым пучком с диаметром ~ 50 мкм, возбуждаемым в направлении, близком к брэгговским для обоих одномерных ФР.

В п. 5.5 исследуется возможность режимов щелевых солитонов в ФР в планарном ОВ $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}:\text{Ti}$, а также в сверхрешетках, полученных оптической модуляцией периодических канальных структур. Режим щелевых солитонов в оптически индуцированной планарной ФР с $\Lambda=13$ мкм, $\Delta n_e \approx 10^{-4}$, достигался за время от 5 до 10 минут при $P=75$ мкВт, $\lambda=532$ нм. В сверхрешетке с $\Lambda_m/\Lambda_b=3$ и глубиной модуляции канальной системы около 10% впервые реализован режим щелевого солитона запрещенной мини-зоны структуры при возбуждении световым пучком ($\lambda=532$ нм, $P=5$ мкВт) волноводного канала с максимальным значением Δn_e [14].

В шестой главе исследуется эффект индуцирования канальных ОВ в кристалле LiNbO_3 в режиме темных пространственных солитонов в оптически индуцированных планарных ОВ с плоскостью, перпендикулярной оси Z кристалла. В п. 6.1 эффект формирования одиночных волноводных каналов реализуется в ОВ – элементе одномерной ФР, в п. 6.2 - в планарном ОВ, индуцированном темным пространственным солитоном, в п. 6.3 группа волноводных каналов формируется в режиме

темных солитонов, одновременно формируемых в нескольких планарных ОБ – элементах одномерной ФР [27-29].

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Отработаны методики оптического индуцирования одномерных многоэлементных и малоэлементных ФР, двумерных ФР и одномерных фотонных сверхрешеток в объемных кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ и $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$.

2. Отработаны методики оптического индуцирования одномерных ФР и формирования фотонных сверхрешеток путем оптической модуляции таких ФР и полученных диффузией титана периодических канальных волноводных структур, в фоторефрактивных планарных ОБ $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}:\text{Ti}$.

3. Экспериментально исследована линейная дискретная дифракция света в двумерных оптически индуцированных ФР с разными параметрами в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ и $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$. Показано, что их возбуждение когерентным световым пучком с диаметром менее ширины волноводного канала позволяет визуализировать зонную структуру ФР.

4. Экспериментально и путем численного моделирования показаны возможность полного подавления эффекта дискретной дифракции и реализации режима полного обмена мощностью в группах волноводных элементов в оптически индуцированных сверхрешетках в объемных кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$, $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ и планарных ОБ $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}:\text{Ti}$.

5. Экспериментально продемонстрировано, что для слаборасходящихся световых пучков в оптически индуцированных многоэлементных одномерных и двумерных ФР в объемных кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ наблюдается их самодефокусировка в области нормальной дифракции и частичная самофокусировка в области аномальной дифракции.

6. Экспериментально продемонстрировано, что при одноэлементном возбуждении одномерных фотонных сверхрешеток в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$, в зависимости от возбуждаемого элемента, в нелинейном режиме возможны усиление дискретной дифракции света, локализация светового поля в одном из элементов структуры, либо нестационарная туннельная перекачка энергии между элементами, разделенными одним или несколькими промежуточными элементами.

7. Экспериментально продемонстрировано формирование темных пространственных солитонов в одномерной ФР, оптически индуцированной в объемном образце $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$, при ее возбуждении фазированным световым пучком He-Ne лазера.

8. Впервые экспериментально продемонстрировано формирование светлых щелевых пространственных солитонов в оптически индуцированных одномерных ФР в кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$, при возбуждении света одиночным пучком в брэгговском направлении, фазированным пучком с противофазными полями в соседних элементах, двумя взаимно

некогерентными пучками в противоположных брэгговских направлениях, а также в схеме одноэлементного и двухэлементного возбуждения света в прямом направлении.

9. Экспериментально продемонстрировано формирование светлого щелевого пространственного солитона в малоэлементной одномерной ФР в кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$, при ее одноэлементном возбуждении, и в двумерной ФР при возбуждении света в брэгговских направлениях образующих ее одномерных ФР.

10. Впервые реализованы режимы светлых щелевых пространственных солитонов в ФР, оптически индуцированных в планарных ОБ $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}:\text{Ti}$; и в запрещенной мини-зоне в сверхрешетках, полученных оптической модуляцией стационарных канальных волноводных структур в LiNbO_3 .

11. Впервые экспериментально продемонстрировано формирование темных пространственных солитонов в оптически индуцированных планарных волноводах и волноводных каналов или канальных волноводных систем этими солитонами, в кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1*. Кившарь Ю.С., Агравал Г.П. Оптические солитоны - от волоконной оптики до фотонных кристаллов. - М.: Физматлит, 2005. - 648 с.

2*. Christodoulides D.N., Lederer F., and Silberberg Y. Discretizing light behaviour in linear and nonlinear waveguide lattices // Nature. – 2003. – Vol. 424. – P. 817.

3*. Eisenberg H.S., Silberberg Y., Morandotti Y., Boyd R., and Aitchison J.S. Discrete spatial optical solitons in waveguide arrays // Phys. Rev. Lett. – 1998. – Vol. 81. – P. 3383–3386.

4*. Fleischer J.W., Carmon T., Segev M., Efremidis N.K., Christodoulides D.N. Observation of discrete solitons in optically-induced real time waveguide arrays // Phys. Rev. Lett. – 2003. - Vol. 90. - P. 023902.

5*. Fleischer J.W., Bartal G., Cohen O., Schwartz T., Manela O., Freedman B., Segev M., Buljan H., Efremidis N.K. Spatial photonics in nonlinear waveguide arrays // Optics Express. – 2005. - Vol. 13, No. 6. - P. 1780.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА

1. Shandarov V., Shandarova K., Kip D. Self-action of light beams in photorefractive photonic lattices in lithium niobate // Proc. of 12th European Conf. on Integrated optics, ECIO'05, Grenoble, France, 6-8 April, 2005. - 4 p.

2. Shandarov V., Shandarova K., Kip D. Discrete diffraction of light beams within photorefractive photonic lattices in lithium niobate // OSA Trends in Optics and Photonics (TOPS) Vol. 99. Photorefractive Effects, Materials and Devices, Proceedings Volume (Optical Society of America, Washington, DC 2003), 2005. - P. 499-504.

3. Шандаров В.М., Шандарова К.В., Кип Д. Дискретная дифракция и пространственное самовоздействие световых пучков в одномерных фотонных решетках в ниобате лития // Письма в ЖТФ. Т. 31, вып. 20, 2005. - С. 88-94.

4. Шандарова К.В. Формирование одномерных и двумерных фотонных решеток в фоторефрактивном ниобате лития // Материалы Десятой научной студенческой конференции «Физика твердого тела», Томск: Томский Государственный Университет, 2006. - С. 269-272.

5. Шандарова К.В., Шандаров В.М. Распространение световых пучков в фотонных решетках в ниобате лития // Известия вузов. Физика. Приложение, 2005. - № 6 - С. 57-59.

6. Shandarov Vladimir, Shandarova Kseniya, Kip Detlef. Discrete diffraction and spatial self-action of a light beam within optically induced photonic lattice in lithium niobate // ICONO 2005: Nonlinear Space-Time Dynamics edited by Nikolai Rosanov, Stephano Trillo, Proceedings of SPIE Vol. 6255, (SPIE, Bellingham, WA, 2006), 2006. - P. 30-35.

7. Shandarova Kseniya, Shandarov Vladimir, Kip Detlef. Observation of bright discrete gap solitons in one-dimensional photonic lattices in lithium niobate // Photonics, Devices, and Systems III, edited by Pavel Tomanek, Miroslav Hrabovsky, Miroslav Miler, Dagmar Senderakova, Proceedings of SPIE Vol. 6180 (SPIE, Bellingham, WA, 2006), 2006.

8. Черкашина А.С., Шандарова К.В., Шандаров В.М. Формирование фоторефрактивных голографических решеток в кристалле LiNbO_3 световыми пучками с бesselе - подобными профилями // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР – 2006». Томск, 2006. - С. 249-252.

9. Shandarov V., Shandarova K., Smirnov E., Kip D., Milutin Stepic, Rüter C.: Photorefractive self-action of light beams within optically induced few-element photonic lattice in lithium niobate // Abstr. of 8th European Conference on Applications of Polar Dielectrics, Metz, France, 2006. - P. 278.

10. Shandarov Vladimir, Shandarova Kseniya, Shandarov Stanislav, Burimov Nikolai. Two-dimensional photorefractive photonic lattices in lithium niobate // Proc of Int. Conf. on Laser and Fiber-Optic Networks Modeling LFNМ 2005, Yalta, Ukraine, 2005. - P. 125–127.

11. Шандарова К.В., Шандаров В.М., Смирнов Е.В., Кип Д., Степич М., Рютер Х. Линейное и нелинейное распространение световых пучков в двумерных фоторефрактивных фотонных решетках в ниобате лития // Известия вузов. Физика. 2006. - №9. - С. 58-62.

12. Vladimir Shandarov, Kseniya Shandarova, Detlef Kip: Formation of two-dimensional nonlinear photonic lattices in photorefractive lithium niobate // CD Tech. Dig. of Workshop "Lithium Niobate from material to device, from device to system", Metz, France, 2005. - P. 167-168.

13. Шандарова К.В., Смирнов Е.В., Шандаров В.М., Кип Д., Рютер Х. Дискретная дифракция света в квазипериодических канальных волноводных структурах в ниобате лития // Матер. Докл. Всероссийской НТК «Научная сессия ТУСУР-2007». Т. 1, 2007 - С. 227 – 229.

14. Smirnov E., Rüter C.E., Kip D., Shandarova K., Shandarov V. Light propagation in double-periodic nonlinear photonic lattices in lithium niobate // Appl. Phys. B, 2007. - Vol. 88. No. 3. - P. 359-362.

15. Shandarova Kseniya, Shandarov Vladimir, Kip Detlef. Photorefractive self-action of a light beam within 1D photonic lattice in $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ // CD Tech. Dig. of Workshop "Lithium Niobate from material to device, from device to system", Metz, France, 2005. - P. 157-158.

16. Shandarova Kseniya, Shandarov Vladimir, Kip Detlef. Formation of bright discrete gap solitons in one-dimensional photonic lattices in lithium niobate // Proc of Int. Conf. on Laser and Fiber-Optic Networks Modeling LFNM 2005. Yalta, Ukraine, 2005. - P. 122-124.

17. Shandarov Vladimir M., Shandarova Kseniya V., Kip Detlef. Observation of Transient Bright Gap Solitons in Photorefractive Photonic Lattices in Lithium Niobate // Techn. Dig. of Top. Meet. on Bragg Gratings, Poling & Photosensitivity (BGPP), Sydney, Australia, 2005. - 3 p.

18. Шандарова К.В., Шандаров В.М. Особенности дифракции и самовоздействия света в одномерных фотонных решетках в ниобате лития // Материалы 7-ой всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Современные проблемы радиоэлектроники», Красноярск, Россия, 2005. - С. 596-599.

19. Шандарова К.В., Шандаров В.М. Формирование щелевых пространственных солитонов в одномерной фотонной решетке в ниобате лития // Материалы всероссийской научно-технической конференции «Научная сессия ТУСУР – 2005». Т. 1, Томск, 2005. - С. 340-343.

20. Шандарова К.В., Шандаров В.М. Темные и светлые дискретные солитоны в одномерных фотонных решетках в ниобате лития // Материалы четвертой международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика 2005». Санкт-Петербург, Россия, 2005. - С. 15-16.

21. Шандарова К.В., Шандаров В.М. Дискретные пространственные солитоны в фоторефрактивных фотонных решетках в ниобате лития (LiNbO_3) // Известия вузов. Физика. Приложение, 2006. - №3 - С. 174 – 175.

22. Shandarov V., Shandarova K., Smirnov E., Kip D., Stepic M., Rüter Ch. Self-action of light beams in two-dimentional photorefractive photonic lattices in lithium niobate // EOS Annual Meeting 2006. Paris, France, 2006, vol. 6. - P. 232-233.

23. Shandarov V., Shandarova K., Smirnov E., Kip D., Rüter Ch. Suppression of discrete diffraction within modulated one-dimensional photorefractive photonic lattices in lithium niobate // In Conf. Abstr., IEEE Cat. Numb.: 07TH8942C, ISBN: 1-4244-0931-4, CD, pap. CC2-5.

24. Shandarova K.V., Shandarov V.M. “Incoherent” Generation of Spatial Gap Solitons within One-Dimensional Photorefractive Photonic Lattices in Lithium Niobate // Laser Physics, 2007, vol. 17. - No. 2. - P. 152–156.

25. Shandarova K., Shandarov V. Generation of spatial gap solitons within one-dimensional photonic lattices in lithium niobate by mutually incoherent light beams // Proc. of International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (LFNM 2006), Kharkov, Ukraine, 2006. - P. 180-182.

26. Шандарова К.В., Шандаров В.М. Формирование светлых пространственных солитонов при одноканальном возбуждении фотонной решетки в LiNbO_3 // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР – 2006». Томск, 2006. - С. 285-288.

27. Шандаров В.М., Шандарова К.В. Формирование волноводных каналов темными пространственными солитонами в планарном волноводе, оптически индуцированном в кристалле ниобата лития // Квантовая электроника. 35, 2005. - № 10. - С. 921-922.

28. Шандарова К.В., Шандаров В.М. Формирование волноводных каналов темными пространственными солитонами в одномерной фотонной решетке в ниобате лития // Материалы третьей международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». Т. 1. – Томск, 2005. - С. 223-226.

29. Шандарова К.В., Шандаров В.М. Формирование канальных волноводных структур темными фоторефрактивными пространственными солитонами в кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ // Материалы 8-ой всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Современные проблемы радиоэлектроники». - Красноярск, Россия, 2006. - С. 241-243.