

Пластун Александр Сергеевич

**ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ПОПЕРЕЧНОГО ПРОФИЛЯ НА
ПРОПУСКАНИЕ И ДИСПЕРСИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН И ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ
ВОЛНОВОДОВ**

Специальность: 01.04.21 - лазерная физика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Саратов 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»

- Научный руководитель:** **Конюхов Андрей Иванович**
кандидат физико-математических наук,
доцент
- Официальные оппоненты:** **Пулькин Сергей Александрович**
доктор физико-математических наук,
профессор кафедры Общей физики 1
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет»
- Горохов Александр Викторович**
доктор физико-математических наук,
профессор кафедры Общей и теоретической физики ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва»
- Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный университет»

Защита состоится «1» июля 2016 г. в _____ на заседании диссертационного совета Д 212.243.05 при Саратовском государственном университете имени Н.Г.Чернышевского по адресу: 410012, г.Саратов, ул.Астраханская, 83, корпус 3, ауд.34.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. В.А. Артисевич Саратовского государственного университета (Саратов, ул. Университетская, 42).

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
д.ф-м..н., профессор

А.Н. Павлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Одной из актуальных проблем современной оптики волноводов и фотоники является прогнозирование свойств волноведущих структур, имеющих сложное строение, оптические свойства и состав. Диссертационная работа посвящена исследованию воздействия ряда факторов, влияющих на дисперсионные и спектральные свойства подобных структур и явлений, появляющихся вследствие изменений волноведущей структуры сложного состава, например, волокон с изменяющимся диаметром, а также оптических структур, называемых фотонными кристаллами и фотонно-кристаллическими волноводами.

Фотонный кристалл состоит из чередующихся слоев или областей с различными показателями преломления (Joannopoulos J.D. *Molding the flow of light*). Такое чередование позволяет получить так называемые «фотонные запрещенные зоны» – области, где свет может распространяться с определенной частотой, а волны с другими частотами будут отражаться. Здесь можно увидеть аналогию с полупроводниковыми материалами, где наблюдаются разрешенные и запрещенные зоны для энергий носителя заряда. Таким образом, фотонный кристалл выступает своего рода фильтром для фотонов различной частоты. Такая концепция фотонного кристалла была выработана в работах Е. Яблоновича и С. Джона. Фотонные кристаллы делятся на 3 типа – одномерные (например, «зеркало Брегга»), где показатель преломления n меняется в одном направлении (их исследования проводили Nielsen M., Ergin T., Di Falco A., Vilson R., и др.), двумерные, где n изменяется по двум пространственным направлениям – например, фотонно-кристаллические волокна (ФКВ) (их исследовали Bise R.T., Kregan R.F., Schmidt M.A. и др.), и трехмерные, где n меняется по трём координатам. Обычно, такие структуры имеют форму сфер, кубов и других объёмных фигур. Наибольший интерес представляют фотонные кристаллы первых двух типов – планарная одномерная структура и ФКВ, состоящее из двух разных типов стекла и имеющее сложную структуру.

Важнейшим вопросом современной оптики фотонных кристаллов является управление свойствами подобных структур и их дисперсионными характеристиками, для чего необходима разработка методов, математических моделей и алгоритмов расчета дисперсионных свойств подобных структур. Существует большое количество работ, посвященных расчету пропускания фотонных кристаллов (Nielsen M., Brilland L., Lousteau J., Caillaud C., Li M-J., Bensen T.M. и др.). Однако в этих работах, как правило, не учитывается влияние потерь, связанных как с физическими свойствами материала структуры (рассеивание, поглощение и т.п.), так и потерь за счет связи мод высшего порядка с основными модами фотонно-кристаллического волокна. Однако одной из особенностей фотонных кристаллов является именно

высокий уровень потерь, поэтому задача разработки метода или модели, учитывающей влияние потерь в подобной структуре, является весьма актуальной.

С другой стороны, при разработке устройств на основе нелинейно-оптических эффектов актуальной является задача по управлению дисперсией групповых скоростей оптических импульсов в ИК диапазоне длин волн. Методы, применяемые в этой области (см., например, работы Fuerbach A., Lines M.E., Sanghera J.S., Troles J. и др.), в основном, затрагивают изменение состава основной среды распространения лазерного излучения за счёт процесса легирования стекла различными примесями. Подобный процесс называется допированием стекла. Одной из подобных допированных сред является халькогенидное стекло, обладающее большой нелинейностью третьего порядка. Однако, оно обладает большой материальной дисперсией, и поэтому для управления полной дисперсией структуры, изготовленной из подобного стекла, необходимо, чтобы в рассматриваемой спектральной области волноводная дисперсия была сравнима по величине с материальной.

Кроме того, при управлении лазерными импульсами и в ходе оптической обработки информации возникает проблема учёта взаимодействия оптических солитонов в волокнах, поскольку это взаимодействие оказывает значительное влияние на характеристики поля, распространяющегося в волноводе. В качестве решения подобного рода проблем используют волокна с переменной дисперсией, в которых поведение солитонов можно описать на основе неавтономного нелинейного уравнения Шредингера с переменными коэффициентами нелинейности и дисперсии. Большинство подходов к получению аналитических решений нелинейного уравнения Шредингера с периодически изменяющимися коэффициентами (например, в работах Маймистова А.И., Lu V., Yan Z., Эрнандес Т. С. и пр.) не учитывает резонансный характер распространения солитонов в среде с осциллирующей дисперсией (и/или нелинейностью), хотя в резонансном режиме амплитуды солитонов, их скорости и даже число солитонов могут изменяться, что делает задачи учёта влияния неупругого взаимодействия солитонов в оптическом волокне весьма актуальными.

Степень разработанности темы исследования.

Существует достаточное количество работ, посвященных изучению дисперсионных характеристик волноводов (Kregan R.F., Luan F., Joannopoulos J.D., Ergin T. и др.), в которых исследуются и описываются эффекты, наблюдающиеся в экспериментах (Saitoh K., Mak. W., Ablovitz M., Qianfan Xu, Sohler W. и др.) по пропусканию лазерного излучения с различными характеристиками через волноводные структуры, а также на основе математического моделирования с использованием различных численных методов расчета изучаются дисперсионные и спектральные свойства волноводных структур (Сысолятин А. А., Bauer R.G., Мельников Л.А.) и предсказывается поведение лазерного излучения в подобных структурах в различных условиях (Lopez-Dona J.M., Guobin R., Liao M.).

Результаты этих исследований позволяют создать феноменологическую базу для учёта влияния микроструктурных изменений поперечного профиля оптического волокна, а также могут служить основой для разработки математических моделей, позволяющих более широко учитывать эффекты, возникающие при изменении поперечного профиля волноведущей структуры, и использовать эти эффекты при решении различных задач нелинейной и волоконной оптики.

Таким образом, **целью работы является** выявление и исследование методами математического моделирования особенностей дисперсионных характеристик и пропускания оптических волокон и фотонно-кристаллических волноводов, вызванных изменениями их поперечного профиля.

Для достижения этой цели требуется выполнить следующие **основные задачи:**

1. Разработка математических моделей и вычислительных схем численного решения системы уравнений Максвелла, нелинейного уравнения Шредингера и волнового уравнения Гельмгольца, позволяющих учесть влияние деформаций сжатия, растяжения и сдвига поперечного профиля оптического волокна на изменение его дисперсионных и спектральных характеристик, а также рассчитать дисперсионные свойства волокна при микроструктурном изменении поперечного профиля волокна.
2. Создание программных комплексов на основе разработанных моделей и вычислительных схем, предназначенных для проведения численного моделирования распространения лазерного излучения в волноведущих структурах различного типа, способных управлять интенсивностью, дисперсией групповых скоростей распространяющихся импульсов и пучков, а также реализовывать режимы параметрического усиления.
3. Исследование явлений, возникающих при микроструктурном изменении параметров волноведущих структур, и выявление закономерностей в изменении оптических характеристик проходящего сквозь них лазерного излучения.

Научная новизна работы:

1. Предложена новая математическая модель для решения задач распространения лазерного излучения в маломодовых оптических волокнах с переменными диаметрами и формой элементов поперечного профиля, которая позволяет корректно учитывать векторный характер электромагнитного поля и интерференцию мод. Модель носит комплексный характер и основана на применении «широкоугольной» схемы и разложения в двумерный ряд Фурье поперечного распределения показателя преломления. Использование разложения в ряд Фурье позволяет учитывать масштабирование и сдвиг структуры в трехмерных задачах распространения лазерного излучения.
2. Впервые предложено использование фотонно-кристаллической оболочки для управления полем в волноводах с нанометровой (щелевой)

сердцевиной. Предложенный волновод с нанометровой сердцевиной и фотонно-кристаллической оболочкой вследствие локализации поля в сердцевине позволяет повысить плотность мощности в несколько раз и компенсировать нормальную дисперсию материала, что дает возможность создания ближнепольного оптического микроскопа с зондом на основе подобного волокна.

3. Впервые показано, что деформация формы и размера поперечной структуры элементов фотонно-кристаллического волокна до 15% от их линейного размера вызывает сдвиг полос пропускания и изменение их ширины, при этом общий уровень потерь меняется незначительно

4. Впервые показано, что увеличение диаметров отдельных элементов структуры на величину, сравнимую с их радиусом, вызывает появление дополнительных линий поглощения на длинах волн, соответствующих фотонным запрещенным зонам.

5. Впервые обнаружено, что периодическое изменение диаметра оптического волокна приводит к неупругому взаимодействию солитонов, вызывающему изменения несущей частоты импульсов, их амплитуд и групповых скоростей, что является востребованным в оптических информационных технологиях.

Методология и методы исследования

Решение задач, поставленных в диссертационной работе, проводилось на основе методов математического моделирования, включающих численное решение начально-краевых задач для дифференциальных уравнений в частных производных (система уравнений Максвелла, волновое уравнение Гельмгольца, нелинейное уравнение Шредингера с переменными коэффициентами нелинейности и дисперсии) и вычислительные эксперименты с помощью разработанных программных средств.

Для реализации программных комплексов использовался язык программирования «FORTRAN».

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием апробированных математических методов и моделей и следует из сравнения расчётных и экспериментальных данных, сопоставления результатов, полученных различными численными методами, совпадения результатов расчётов с предсказаниями более простых приближений.

Практическая значимость работы.

- Полученные в ходе выполнения диссертационного исследования результаты могут найти применение в областях науки, связанных с оптической обработкой информации, при изготовлении и проектировании нелинейных оптических устройств, фотонно-кристаллических структур и волокон, например, преобразователей частоты, фотонно-кристаллических фильтров.

- Программный комплекс на основе предложенной математической модели позволяет рассчитывать потери при распространении излучения в

маломодовых волокнах с фотонной запрещенной зоной, что даёт возможность по заданной конфигурации торца оптического фотонно-кристаллического волновода получить данные о пропускании и дисперсионных и характеристиках волокна. При изготовлении ФКВ методом вытяжки эти данные позволяют оптимизировать структуру волокна при изготовлении оптических фильтров и параметрических усилителей на основе ФКВ.

- Предложенное в диссертации использование фотонно-кристаллической оболочки для управления полем в волноводах с нанометровой (целевой) сердцевиной позволяет добиться управления дисперсией ТМ-волн, что может найти применение при создании зондов для ближнепольной оптической микроскопии, нелинейных оптических устройств и волоконных лазеров.
- Обнаруженные в ходе диссертационного исследования сдвиги полос пропускания фотонно-кристаллического волокна и изменение их ширины без увеличения общего уровня потерь должны быть учтены при разработке и изготовлении оптических фильтров. При этом деформации, сравнимые с радиусами элементов структуры, вызывают появление полос поглощения внутри фотонных запрещенных зон и существенное изменение их ширины. Предложенный в диссертации механизм формирования полос пропускания внутри запрещенных зон волокна может найти свое применение при изготовлении фильтров на основе ФКВ, обладающих низким уровнем потерь.
- Неупругое взаимодействие оптических солитонов может быть использовано для изменения несущей частоты импульсов, их амплитуд и групповых скоростей. Для неупругого взаимодействия оптических солитонов предложено использовать среду с периодическим изменением дисперсии или нелинейности. Показано, что такое взаимодействие может возникать в волокнах с переменным диаметром. Выявленные эффекты могут быть использованы в оптических линиях связи, при оптической обработке сигналов и изготовлении усилителей.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 11 международных и 2 всероссийских конференциях, научных школах и семинарах: International School for Young Scientists on Optics, Laser Physics and Biophysics, Saratov Fall Meeting (SFM) (Saratov, Russia, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015), 14 Международной Молодежной научной Школы по оптике, лазерной физике и биофотонике (Саратов, 2010), Международного форума «Ломоносов-2011» (Москва, 2011), Всероссийской научной конференции с международным участием «Проблемы критических ситуаций в точной механике и управлении» (Саратов, 2013), International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL'2013) (Sudak, Crimea, Ukraine, 2013), XXI International School-Seminar «Spectroscopy of Molecules and Crystals» (Beregove, Ukraine, 2013), International Conference on Laser Optics and Photonics (St. Petersburg, Russia, 2014).

Публикации. Результаты диссертационной работы опубликованы в 17 печатных работах, включающих 8 статей в периодических изданиях,

входящих в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов ВАК РФ, и в иностранных периодических изданиях, входящих в системы Scopus и Web of Science, а также получены 2 авторских свидетельства Роспатента о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад соискателя заключается в том, что все представленные численные результаты получены лично автором. Обсуждение полученных результатов проводилось автором при участии научного руководителя и соавторов работ. Автором разработаны программные комплексы численного решения системы уравнений Максвелла, нелинейного уравнения Шредингера и волнового уравнения Гельмгольца, предназначенные для расчета спектров пропускания, дисперсионных характеристик ФКВ и расчета взаимодействия солитонов в волноводах.

На защиту выносятся следующие положения и результаты:

- 1) Разработанная и используемая в диссертационном исследовании комплексная математическая модель и соответствующая ей расчетная схема, основанные на разложении поперечного распределения поля в двумерный ряд Фурье и методе распространяющихся пучков, позволяют учесть влияние деформаций сжатия, растяжения и сдвига на распространение лазерного излучения в волокнах с фотонной запрещенной зоной.
- 2) Фотонно-кристаллические волноводы с нанометровой (щелевой) сердцевиной можно применять для локального повышения интенсивности и управления дисперсией ТМ-волн. В таком волноводе в сердцевине возможно повышение пиковой интенсивности в несколько раз. Фотонно-кристаллическая оболочка позволяет компенсировать нормальную дисперсию материала порядка 100 пс/нм/км.
- 3) Изменение отдельных поперечных элементов структуры фотонно-кристаллического волокна, сравнимые по величине с их радиусами, вызывают появление дополнительных полос поглощения на длинах волн, находящихся в пределах фотонных запрещенных зон.
- 4) Периодическая модуляция диаметра оптического волокна вызывает неупругое взаимодействие оптических солитонов, проявляющееся как: связанное состояние двух солитонов, объединение солитонной пары или разделение солитонной пары. Эффекты неупругого взаимодействия могут быть использованы для управления несущими частотами импульсов, их амплитудами и групповыми скоростями.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, состоящего из 140 наименований. Общий объём диссертации составляет 138 страниц текста, включающего 34 рисунка.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы цели и задачи диссертационной работы, проведено обоснование актуальности темы, приведены результаты, выносимые на защиту

Глава 1 посвящена эффектам, связанным с параметрическим усилением оптического сигнала в фотонно-кристаллических волноводах. С использованием подходящей конфигурации ФКВ можно достичь параметрического усиления сигнала в заданном диапазоне длин волн. Использование фотонно-кристаллической оболочки для управления дисперсией позволяют изменять дисперсионные свойства волокна в широком диапазоне параметров. В данной главе произведен расчет параметрического усилителя с одночастотной накачкой.

Сделан обзор параметрических эффектов, возникающих в фотонно-кристаллических волноводах. ФКВ из оптического стекла обладают на порядок большей нелинейностью, чем сопоставимые волокна, изготовленные из плавленого кварца, что позволяет эффективно использовать их в качестве параметрического усилителя.

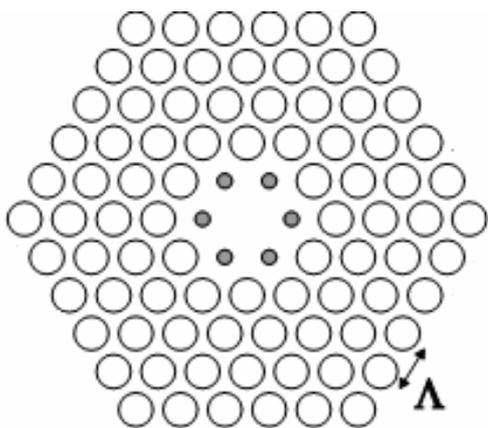


Рис.1 Схема поперечного сечения ФКВ. Тёмными окружностями показаны воздушные отверстия радиуса $R1$, другие окружности показывают воздушные отверстия радиуса $R2$. Λ – период

Проведено математическое моделирование параметрического усиления в ФКВ из оптического стекла с использованием векторной численной модели, основанной на методе плоских волн. На рис. 1 приведено поперечное сечение ФКВ, используемое в расчетах. Постоянная распространения β основной моды рассчитывается из векторных уравнений Максвелла для магнитного поля.

Параметрическое усиление возможно при выполнении условий фазового синхронизма между волной накачки и сигнальной волной. На рисунках 2а и 2б показана фазовая расстройка и соответствующая величина усиления слабого сигнала. Таким образом, путем подбора периода структуры и радиусов отверстий было минимизировано значение дисперсии в диапазоне длин волн 0.4мкм – 1.6мкм.

Для расширения спектрального диапазона параметрического усиления было предложено использовать структуру, имеющую центральный ряд воздушных отверстий с уменьшенным диаметром.

Подобные ФКВ с оптимизированными параметрами позволяют усиливать оптические сигналы на длинах волн 1.2–2.1 мкм.

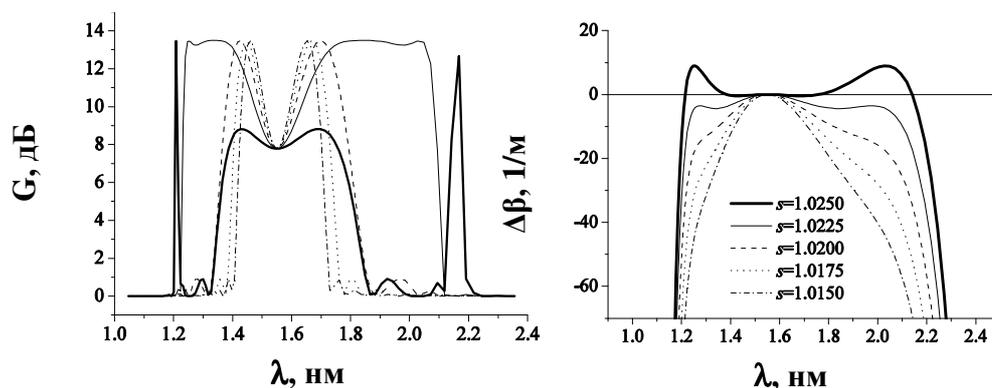


Рис. 2 Линейная фазовая расстройка (а) и спектр усиления (б), рассчитанные для волокна с длиной $L=1$ м, пиковая мощность импульсной накачки $P_p=10$ Вт, длина волны накачки $\lambda_p=1.55$ мкм. Период структуры и радиусы отверстий даны масштабным фактором s .

Вторая глава посвящена применению фотонно-кристаллических волноводов для задач управления дисперсией групповой скорости и локальному повышению интенсивности импульсов. В главе рассмотрен случай фотонно-кристаллического волновода с активной сердцевиной, приводятся расчеты полей ТЕ и ТМ мод планарной структуры с фотонно-кристаллической оболочкой, анализируется селективное усиление мод.

Дано краткое описание основных подходов, используемых для описания дисперсионных и нелинейных эффектов, возникающих при распространении интенсивных лазерных импульсов в прозрачных средах. применение планарных структур при создании нелинейных интегрально-оптических устройств, даны примеры применения различных материалов, из которых изготавливаются подобные устройства.

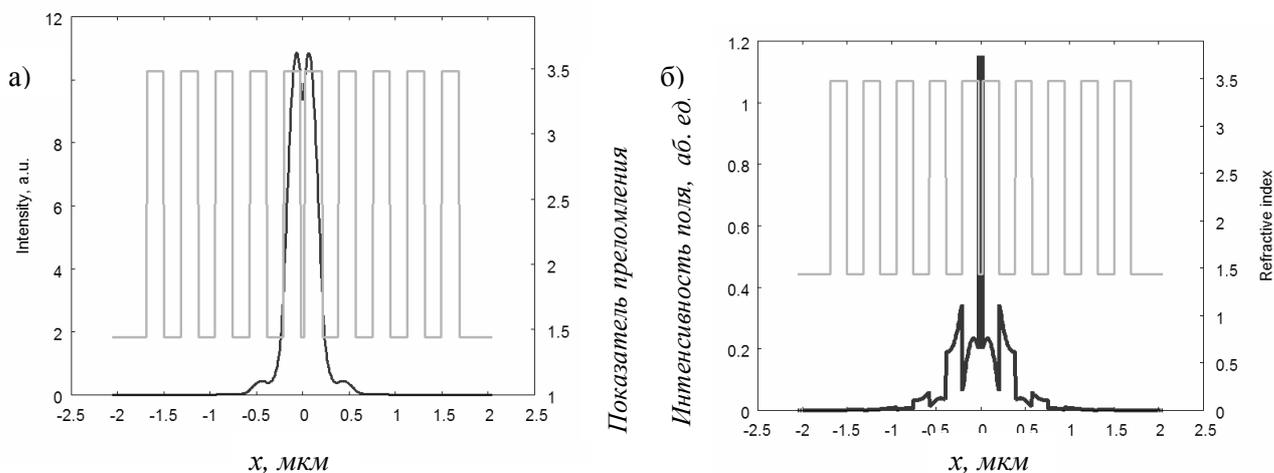


Рис.3. Поперечное распределение напряженности магнитного (а) и электрического (б) поля моды целевого ФКВ и показателя преломления (серым цветом)

Предлагается использование планарного ФКВ для управления дисперсионными свойствами щелевых волноводов с нанометровой сердцевиной.

На рис. 3 приведены результаты расчета дисперсионных свойств фотонно-кристаллической структуры с нанометровым волноведущим слоем, полученные методом плоских волн для ТЕ и ТМ мод. Проведено сравнение этих результатов с данными расчета методом матриц передачи.

Подобные структуры можно рассчитать двумя методами – методом матриц передачи и методом плоских волн для одномерных волноводов.

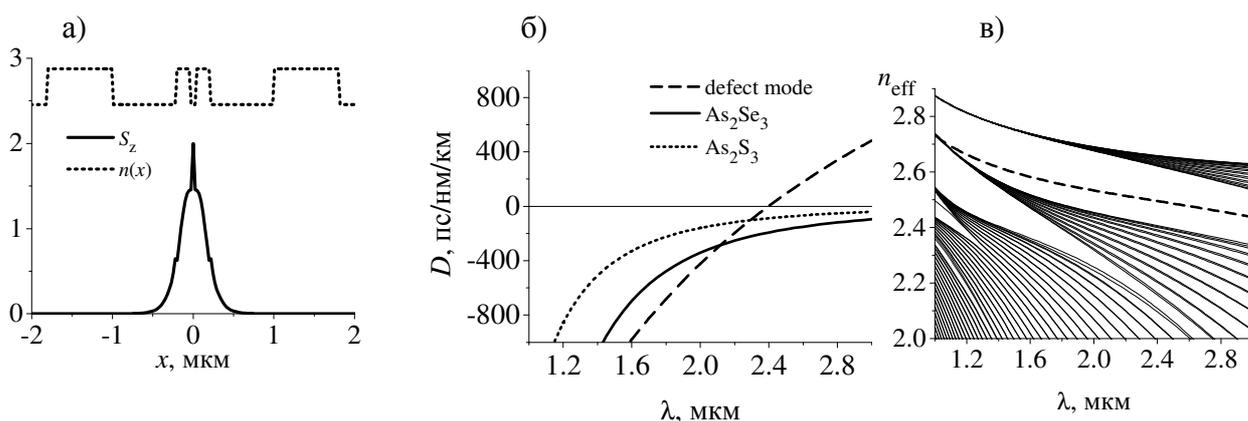


Рис. 4. Распространение ТМ моды в сердцевине волокна. а) Интенсивность в отн. ед. и показатель преломления структуры (пунктир). б) Дисперсии различных материалов и дефектная мода щелевого ФКВ. в) пунктиром выделена мода, распространяющаяся в дефекте

На рис. 4а представлены поперечное распределение интенсивности основной моды щелевого фотонно-кристаллического волновода, составленного из слоев халькогенидных стекол. Данные расчеты показали, что щелевой фотонно-кристаллический волновод позволяет компенсировать дисперсию материала с одновременным увеличением локальной интенсивности.

Глава 3 посвящена описанию свойств ФКВ и исследованию влияния дефектов формы и размеров поперечной структуры, возникающих при изготовлении волокна, на пропускание и дисперсионные характеристики ФКВ.

В результате численного моделирования было показано, что для точного расчета характеристик ФКВ необходим корректный учет влияния различных потерь: на отражение, рассеяние и прочих, вызванных материалом волновода. Кроме того, необходимо учитывать увеличение потерь в высших модах. Исследование было направлено на создание модели, учитывающей вклад всех источников в общую картину потерь волокна.

Для выявления вклада потерь, возникающих при изготовлении волокна, были рассчитаны характеристики и проанализированы свойства фотонной запрещенной зоны для ФКВ с деформациями и для волокна без структурных деформаций.

На рис. 5 показана дисперсионная диаграмма ФКВ, рассчитанная методом плоских волн.

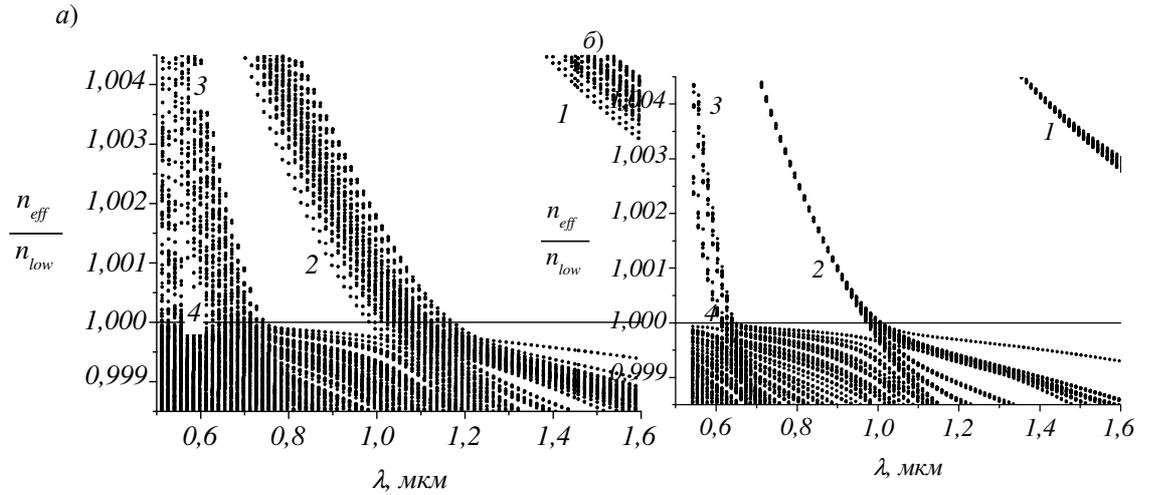


Рис.5. Дисперсионная диаграмма ФКВ: а) со структурными деформациями; б) с гексагональной решеткой. Цифры 1,2,3,4 показывают различные группы мод волокна.

При расчёте был использован подход, позволяющий построить ортогональную систему мод волновода и при этом учесть зависимость показателя преломления материала от длины волны $n_{high}=n_{high}(\lambda)$, $n_{low}=n_{low}(\lambda)$, где n_{high} , n_{low} - показатели преломления стекол, из которых состоит ФКВ.

Фотонные запрещенные зоны волокон лежат в диапазонах длин волн $\lambda > 1,0$ мкм, $0,67 < \lambda < 1$ мкм и $\lambda \approx 0,65$ мкм. Как видно из сравнения рис.5а и рис.5б, ширина запрещённой зоны и её границы, например, на уровне $n_{eff}/n_{low}=1$ (где n_{eff} - эффективный показатель преломления) сильно зависят от наличия деформации поперечной структуры волокна

Из уравнений Максвелла можно получить векторные уравнения распространения для поперечных компонент вектора магнитного поля $\mathbf{H}=(H_x, H_y, H_z)$:

$$\begin{aligned} \left(1 - \frac{i}{2\beta} \frac{\partial}{\partial z}\right) \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{i}{2\beta} (P_{xx} H_x + P_{xy} H_y) &= 0, \\ \left(1 - \frac{i}{2\beta} \frac{\partial}{\partial z}\right) \frac{\partial H_y}{\partial z} - \frac{i}{2\beta} (P_{yx} H_x + P_{yy} H_y) &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где z - направление распространения (x, y) - поперечные координаты, β - постоянная распространения.

В расчётах использовалась $\beta = k n_{low}$, где $k = 2\pi/\lambda$ - волновое число. Операторы P_{xx} , P_{xy} , P_{yx} , P_{yy} записываются в виде:

$$\begin{aligned} P_{xx} H_x &= \nabla_{\perp}^2 H_x + (k^2 n^2 - \beta^2) H_x - \frac{\partial \ln(n^2)}{\partial y} \frac{\partial H_x}{\partial y}, P_{xy} H_x = \frac{\partial \ln(n^2)}{\partial y} \frac{\partial H_y}{\partial x}, \\ P_{yy} H_y &= \nabla_{\perp}^2 H_y + (k^2 n^2 - \beta^2) H_y - \frac{\partial \ln(n^2)}{\partial x} \frac{\partial H_y}{\partial x}, P_{yx} H_y = \frac{\partial \ln(n^2)}{\partial x} \frac{\partial H_x}{\partial y}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $n(x,y)$ – поперечное распределение показателя преломления.

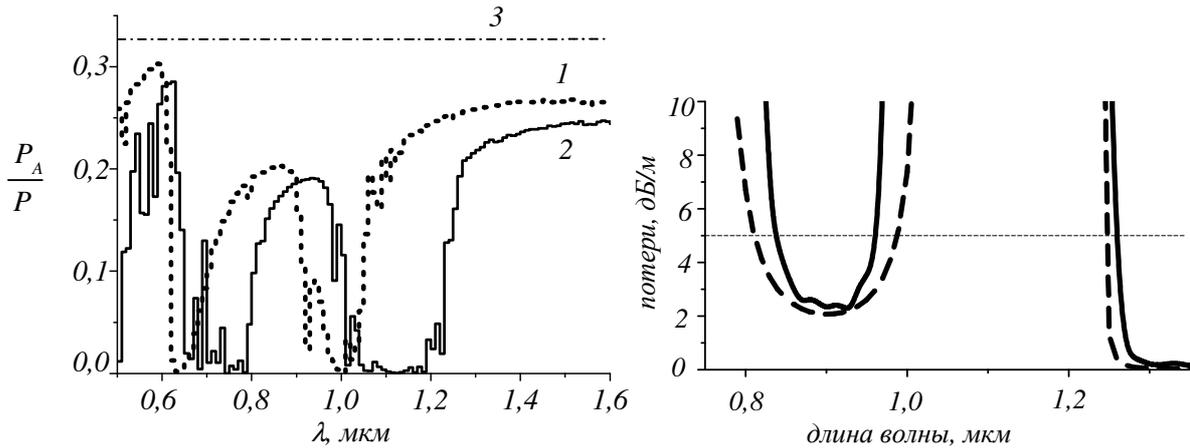


Рис.6 а) Спектр пропускания ФКВ с идеальной гексагональной решеткой (1) и ФКВ со структурными деформациями (2). Штрихпунктирная линия показывает уровень, соответствующий собственному поглощению стекла (3). б) Потери ФКВ с дефектами периодической структуры, рассчитанные для основной моды фотонной запрещенной зоны (пунктирный график) и полного поля (сплошной график). Пунктирная линия показывает уровень 5 дБ/м.

Уравнения (1) решаются путем разложения вектора (H_x, H_y) и комплексного показателя преломления в двумерные ряды Фурье. В расчётах применялось приближение Паде и схема Кранка-Николсон. Предложенная математическая модель позволяет рассчитать распределение поля на заданной длине волны, и, таким образом, рассчитать поглощение волокна. Используемый подход позволяет учесть высшие моды фотонно-кристаллической структуры при расчёте пропускания волокна. В качестве начального поля использовался линейно поляризованный гауссов пучок.

Из рис.6а видно, что субмикронная деформация поперечной структуры элементов фотонно-кристаллического волокна приводит к сдвигу полос

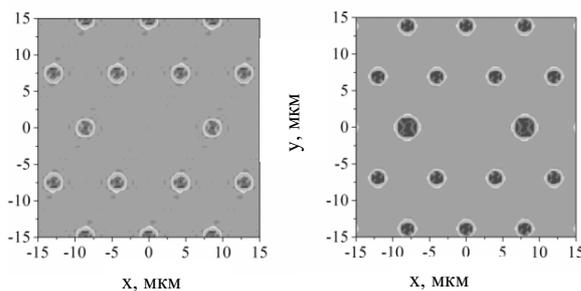


Рис.7 Поперечное распределение показателей преломления ФКВ с гексагональной структурой (слева) и ФКВ со стержнями увеличенного диаметра (ФКВ 2го типа).

диапазоне длин волн (рис. 8б). Данный эффект может использоваться для создания спектральных селективных фильтров.

пропускания, изменению их ширины. При наличии связи между основной модой и модами стержней часть излучения будет переходить из центра на периферию, что вызовет увеличение потерь. На рис. 6б показано, что при учете высших мод полоса пропускания (сплошная линия) сужается.

При увеличении размеров отдельных элементов структуры (рис.7) появляются дополнительные моды в пределах фотонных запрещенных зон (рис 8а). Появление данных мод приводит к повышению потерь в определенном

В главе 4 описываются особенности распространения оптических солитонов в волноводе с изменяющимся диаметром. Используемая математическая модель основана на решении нелинейного уравнения Шредингера с переменными коэффициентами дисперсии и нелинейности. Нелинейные эффекты, связанные с результатом взаимодействия оптических солитонов, являются актуальной проблемой как волоконной, так и нелинейной оптики.

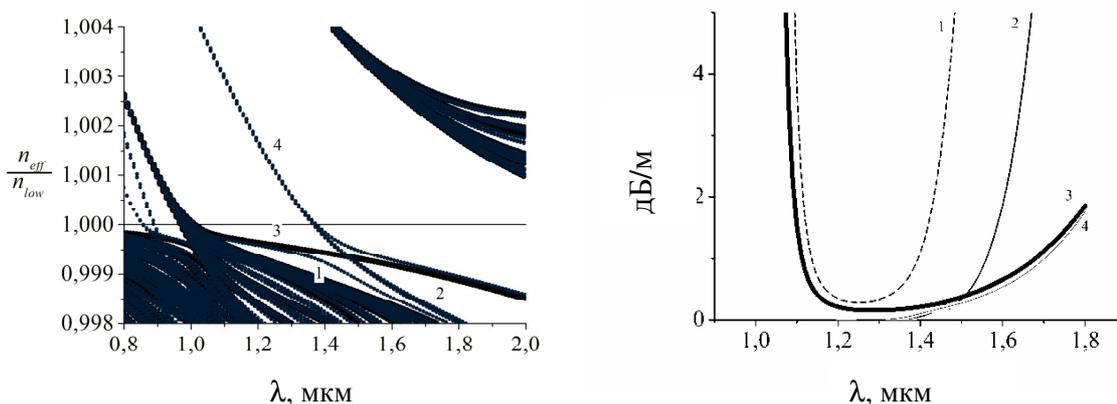


Рис.8 а) Дисперсионная диаграмма ФКВ показанных на рис. 3. б) Спектр затухания для основной моды ФКВ, показанного на рис. 3а (линия 3) и мод ФКВ, показанного на рис 3б (1,2 и 4 линии)

В оптических волокнах наблюдаются различные эффекты в результате взаимодействия солитонов. Они существенно ограничивают их применение в оптических линиях связи. Для снижения межсолитонного взаимодействия было предложено множество методов использования нелинейности усиления, однако, каждый из этих методов имеет определенные недостатки. Приведены расчеты эффектов взаимодействия солитонов в волокне, и для управления ими в работе предложено использовать волокно с изменяемым диаметром.

Динамика солитонов в рассматриваемом волокне подчиняется нелинейному уравнению Шредингера с переменными коэффициентами:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + i \frac{\beta_2(z)}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial \eta^2} = i\gamma(z) |A|^2 A(z, \eta), \quad (4)$$

где $A(z, \eta) = (cn\epsilon_0 S_{eff}/2)^{1/2} E(z, \eta)$, c – скорость света в вакууме, n – показатель преломления, ϵ_0 – диэлектрическая постоянная, S_{eff} – эффективная площадь основной моды волокна, $E(z, \eta)$, – комплексная амплитуда напряженности электрического поля, z – длина распространения, η – время в бегущей системе координат ($z=z, \eta=t-z/u$), где u – групповая скорость импульса. Алгоритм расчета параметров солитонов состоит из трех шагов:

1) Находим решение уравнения (4) в плоскости z_s , $E(\eta)=E(z_s, \eta)$; 2) Для функции $E(\eta)$ рассчитываем матрицу рассеяния нелинейного уравнения Шредингера с фиксированными коэффициентами дисперсии $\beta_2 = \beta_2(z_s)$ и нелинейности $\gamma = \gamma(z_s)$ 3) Используя метод Ньютона, находим комплексные числа (спектральные параметры) λ_j , которые соответствуют нулю коэффициента матрицы рассеяния $a^*(\lambda_j) = 0$. Амплитуда солитона, длительность и его групповая скорость определяются через спектральные параметры λ_j . Основное преимущество метода, изложенного выше, заключается в возможности исследования динамики солитонов в процессе их взаимодействия.

В результате моделирования взаимодействия солитонов в волокне с изменяемым диаметром при помощи модели, основанной на решении нелинейного уравнения Шредингера, были исследованы три типа режимов: связанное состояние солитонов, разделение солитонной пары и объединение двух солитонов (рис.9). Реализация определенного режима осуществляется за счет выбора периода модуляции диаметра волокна. Обнаруженные при реализации этих режимов изменения несущей частоты импульсов, их амплитуд и групповых скоростей могут найти практическое применение в области управления лазерными импульсами и при оптической обработке сигналов.

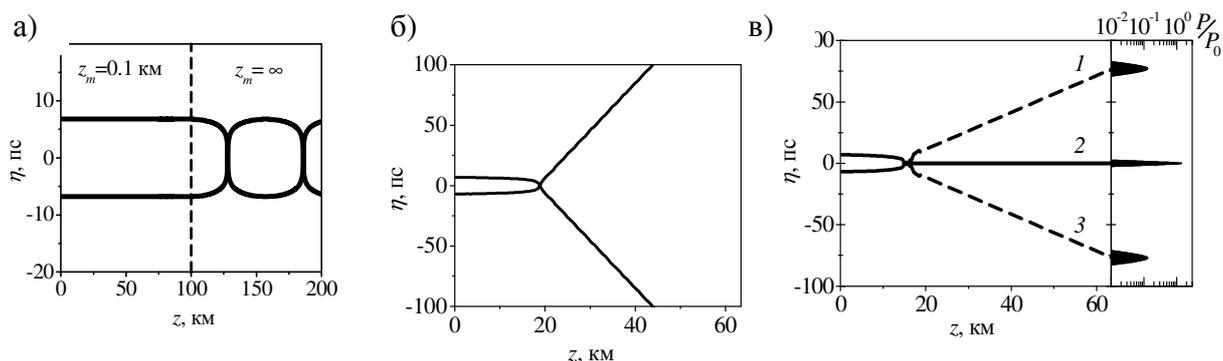


Рис.9 Взаимодействия солитонов в волокне с переменным диаметром: а) связанное состояние солитонов при наличии модуляции ($z_m = 0.1$ км) и переход к периодическому решению при отмене модуляции. б) разделение солитонной пары в волокне с периодическим изменением дисперсии ($z_m = 0.1$ км) в) объединение двух солитонов ($z_m = 2$ км)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны программные комплексы для численного моделирования распространения лазерного излучения в фотонно-кристаллическом волокне (ФКВ), предназначенные для расчёта спектров пропускания и дисперсионных характеристик двумерных ФКВ различных типов. Данные комплексы, основанные на векторном методе распространяющихся пучков с реализацией «широкоугольной» численной схемы, строящейся на пространственном преобразовании Фурье поперечного распределения полей, позволяют учесть влияние высших мод и деформаций структуры волокна на его пропускание, дисперсионные и спектральные характеристики.

2. Моделирование параметрического усиления в ФКВ на основе оптического стекла позволило подобрать оптимальные характеристики ФКВ, при которых минимизируется влияние дисперсии и расширяется спектральный диапазон параметрического усиления. Для этого предложено использовать структуру, имеющую центральный ряд воздушных отверстий с уменьшенным диаметром. ФКВ с оптимизированными параметрами позволяет усиливать оптические сигналы на длинах волн 1.2–2.1 мкм.

3. Показано, что субмикронная деформация поперечной структуры элементов фотонно-кристаллического волокна приводит к сдвигу полос пропускания и изменению их ширины.

4. Предложен механизм формирования полос пропускания внутри запрещенных зон ФКВ за счет изменений диаметров элементов поперечного профиля структуры, прилегающих к сердцевине волокна. Такой механизм может применяться при изготовлении оптических фильтров на основе ФКВ

5. Предложено использовать фотонно-кристаллическую оболочку для управления полем в щелевых волноводах. Показано, что щелевые волноводы с фотонно-кристаллической оболочкой могут направлять ТМ-волны, локализованные в нанометровом зазоре, и их можно использовать для локального повышения интенсивности и управления дисперсией.

6. Для управления солитонным взаимодействием предложено использовать периодическую модуляцию диаметра волокна. Рассмотрены три типа режимов: образование связанного состояния двух солитонов, разделение и объединение солитонной пары. Реализация определенного режима осуществляется за счет выбора периода модуляции. Эффекты, возникающие при взаимодействии солитонов, могут найти практическое применение в области управления лазерными импульсами и при оптической обработке сигналов

7. В ходе численного моделирования показано, что разделение солитонной пары в волокне с периодическим изменением дисперсии позволяет создать последовательность пикосекундных импульсов с двумя несущими частотами, а объединение двух солитонов позволяет получить импульс со сравнительно высокой пиковой мощностью. Этот эффект можно использовать для преобразования последовательности близко расположенных импульсов (цуга импульсов) в новые импульсы с повышенной пиковой мощностью.

8. Предложено использовать волокно с периодическим изменением дисперсии для увеличения дистанции, на которой происходит столкновение солитонов, что приводит к реализации связанных состояний двух солитонов и позволяет предотвращать их столкновения в случае солитонов, распространяющихся на небольшом расстоянии друг от друга

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи в периодических изданиях, включённых в список ВАК РФ,
и в иностранных периодических изданиях*

1. Пластун, А.С. Расчет параметрического усиления в фотонно-кристаллическом волокне /А.С. Пластун, А.И. Конюхов, Л.А. Мельников, Ю.А. Мажирин // Известия Саратовского университета, Новая серия, Серия «Физика». – 2012. – Т. 12. – №2. – С.49-52.
2. Пластун, А.С. Конструктивная интерференция оптических солитонов в волокне с периодическим изменением дисперсии / М. А.Дорохова, А. И. Конюхов, Л. А. Мельников, А. С. Пластун // Известия Саратовского университета, Новая серия, Серия «Физика». – 2014. – Т. 14 – №1. – С.25-32.
3. Пластун, А.С. Расчет дисперсионной характеристики направляемых мод щелевого фотонно-кристаллического волновода / А.С. Пластун, А.И. Конюхов // Известия Саратовского университета, Новая серия, Серия «Физика».– 2014. – Т. 14. – №2. – С.38-42.
4. Пластун, А.С. Управление взаимодействием оптических солитонов при помощи периодического изменения дисперсии в волоконном световоде / А.И. Конюхов, М.А. Дорохова, Л.А. Мельников, А.С. Пластун // «Квантовая электроника». – 2015. – Т. 45. – № 11. – С.1018-1022.
5. Plastun, A. Spectral dependence of all-solid photonic bandgap fiber transmittance/ A.Plastun, A. Konyukhov, E. Romanova, T. Benson, G. Athanasiou, J. Lousteau, G. Scarpignato, E. Mura, N. Boetti, D. Milanese // IEEE Conference Publication, CAOL (2013, September 9-13, Sudak). – 2013. – P.71-73.
6. Plastun, A.S. Inelastic collision and fusion of optical solitons in dispersion oscillating fiber / A.S. Plastun, A.I. Konyukhov, M.A. Dorokhova, L.A. Melnikov // Laser Physics Letters – 2015. – Vol.12 – pp.5
7. Plastun, A.S. Dispersion compensation in slot photonic crystal waveguide / A.S. Plastun, A.I. Konuykhov // Proceedings of SPIE. – 2014. – Vol. 9448. – P. 22.
8. Plastun, A.S. Design of transmission bands in all-solid photonic bandgap fibre / A.S. Plastun, A.I. Konuykhov // Proceedings of SPIE. – 2016. – Vol.9917 - P. 37.

Статьи в сборниках трудов научных конференций и других изданиях

9. Plastun, A.S. Gain properties of 1D photonic crystal waveguides / A.S. Plastun, A.I. Konuykhov // Papers from the conference for young scientists «РААТWO». – Saratov: Saratov University Press, 2010. – P.103-108.
10. Пластун А.С. Усиление «дефектных» мод планарных волноводов с фотонно-кристаллической оболочкой / Пластун А.С. / Материалы международного молодежного научного форума «Ломоносов-2011» (11-15 апреля 2011г., Москва) [Электрон. ресурс]. – 2011.

11. Пластун, А.С. Усиление направляемых мод планарного активного волновода с фотонной запрещенной зоной / А.С. Пластун, А.И. Конюхов // Проблемы оптической физики и биофотоники: Материалы 14-ой Междунар. Молодежной научной Школы по оптике, лазерной физике и биофотонике. (Саратов, 5 - 8 октября 2010 года.). – Саратов: изд-во «Новый ветер». – 2010. – С. 165-168.
12. Пластун, А.С. Спектральная зависимость пропускания стеклянного фотонно-кристаллического волокна / А.С. Пластун, А.И. Конюхов, Е.А., Романова, Т. Бенсон // Проблемы оптической физики и биофотоники. SFM-2013: материалы 17-й Междунар. молодежной научной школы по оптике, лазерной физике и биофотонике под ред. Г. В. Симоненко, В. В. Тучина. (Саратов, 24 - 28 октября 2013 года.). – Саратов: Изд-во «Новый ветер». – 2013. – С. 99-102.
13. Пластун, А.С. Расчет затухания мод в фотонно-кристаллических волокнах / А.С. Пластун, А.И. Конюхов // Проблемы критических ситуаций в точной механике и управлении. Материалы Всероссийской научной конференции с междунар. участием. Саратов. – Саратов: ООО Издательский Центр «Наука». – 2013. – С.215-218.
14. Plastun, A.S., Beer Lambert law in photonic crystal spectroscopic study / A.S. Plastun, A.I. Konyukhov / XXI ISSSMC Proceedings 2013, (Beregove, Ukraine). –2013. – P. 250-253.
15. Plastun, A.S., Beer Lambert law in photonic crystal spectroscopic study/ A.S. Plastun, A.I. Konyukhov / Представляем научные достижения миру. Естественные науки: материалы научной конференции молодых ученых «Presenting Academic Achievements to the World». – Саратов : Изд-во Сарат. ун-та.– 2013. – Вып. 4. – С. 33-36.

Патентные документы

16. Пластун, А.С. Расчет спектров пропускания фотонно-кристаллического волокна / А.С. Пластун, А.И. Конюхов, М.А. Юдаков // Свидетельство Роспатента о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015612362 от 18.02.2015.
17. Пластун, А.С. Расчет дисперсионных характеристик фотонно-кристаллического волокна / А.С. Пластун, А.И. Конюхов, М.А. Юдаков // Свидетельство Роспатента о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015612361 от 18.02.2015