

«Утверждаю»

Директор Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Научный центр волоконной оптики  
Российской академии наук

С.Л. Семенов

«30» *сентября* 2018 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Чеховского Игоря Сергеевича «Численное моделирование нелинейных волновых эффектов в связанных волноводах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Диссертация Игоря Сергеевича Чеховского посвящена исследованию нелинейного сжатия и сложения оптических импульсов с помощью многосердцевидных световодов, а также разработке численных алгоритмов для решения систем уравнений, описывающих динамику оптического поля в многосердцевидных световодах. В диссертации представлены результаты применения разработанного комплекса программ для моделирования распространения оптических импульсов в световодах, сердцевинны в поперечном сечении которых расположены в кольцевой, гексагональной и квадратной симметрии. Определены параметры оптических импульсов, для которых достигается наибольшее сжатие и максимальная эффективность сложения импульсов в этих многосердцевидных световодах. Исследовано влияние флуктуаций различных параметров начальных импульсов на исследуемую схему нелинейного сжатия и сложения.

**Актуальность работы.** В настоящее время в мире наблюдается постоянный рост объема передаваемой информации по волоконно-оптическим линиям связи, в связи с чем разрабатываются новые виды оптических световодов. Недавно появившиеся многосердцевидные световоды,

представляющие собой набор индивидуальных волноводов, расположенных под одной общей оболочкой, обладают существенно большей пропускной способностью по сравнению с односердцевинными. В многосердцевинных световодах, используемых для передачи данных, отдельные сердцевинки обычно расположены на большом расстоянии для уменьшения их взаимодействия. Однако нелинейные эффекты, возникающие в многосердцевинных световодах с близко расположенными сердцевинами, могут быть использованы в задачах лазерной физики. В этом плане предлагаемый в диссертационной работе способ нелинейного сложения и сжатия оптических импульсов, открывающий новые возможности для генерации сверхкоротких лазерных импульсов большой мощности, безусловно актуален. Применение данного метода вместо линейных способов сложения оптических пучков позволит значительно повысить качество получаемых результирующих импульсов.

**Содержание работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, библиографии и приложения. Во введении обоснована актуальность и научная новизна проведенного исследования, сформулированы основные цели исследования, а также положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена численным методам решения систем связанных нелинейных уравнений Шредингера (НУШ), используемых при моделировании распространения оптических импульсов вдоль многосердцевинных световодов. Вначале излагается используемая в диссертационной работе система линейно связанных НУШ, часто называемая в литературе дискретно-непрерывным НУШ. В следующем параграфе представлено описание предложенного автором обобщения компактной диссипативной схемы с итерациями, а также обобщен метод расщепления по физическим процессам, основанный на вычислении матричной экспоненты в спектральной области. Третий параграф посвящен сравнительному анализу производительности и точности обоих методов. Показано, что компактная схема более предпочтительна для решения систем НУШ большого размера. В заключительной части главы представлены методологические рекомендации для эффективного распараллеливания обоих алгоритмов на вычислительных системах с общей памятью с помощью библиотеки OpenMP.

Во второй главе численным моделированием продемонстрировано, что световоды с кольцевой симметрией расположения сердцевин в поперечном сечении могут быть использованы для эффективного когерентного сложения и сжатия оптических импульсов. В первом параграфе обсуждается система

линейно связанных НУШ, используемая для математического моделирования распространения оптических импульсов вдоль световодов с кольцевой структурой сердцевин. Второй параграф посвящен организации численного моделирования. В частности, обсуждается критерий определения расстояния вдоль многосердцевинного световода, на котором генерируется сжатый (сложенный) импульс. Далее приведены основные результаты моделирования, среди которых продемонстрированная возможность сжатия Гауссовских импульсов в несколько сотен раз, а также их когерентного сложения с эффективностью более 80%.

Третья глава посвящена изучению сжатия и сложения оптических импульсов с помощью световодов с двумерным расположением сердцевин в поперечном сечении. В ней показано, что в случае гексагональной симметрии их расположения эффективность сложения импульсов оказывается выше, чем при использовании световодов с кольцевой симметрией. В первом параграфе обсуждается математическая модель для описания распространения оптических импульсов вдоль световодов с гексагональной и квадратной структурами в виде системы линейно связанных НУШ. Во втором - представлены результаты проведенного математического моделирования. Путем оптимизации ширины и амплитуды начальных Гауссовских импульсов найдены режимы, при которых оказывается возможным нелинейное сложение импульсов с эффективностью около 92%, а также их сжатие вплоть до 256 раз. В следующем параграфе для волокон с гексагональной конфигурацией сердцевин представлены результаты исследования влияния случайного расхождения фаз и временных задержек между вводимыми импульсами на режимы эффективного сложения и сжатия. В четвертом параграфе рассмотрены различные способы увеличения эффективности сложения импульсов с помощью гексагональных световодов. Рассматривается влияние добавления к начальным Гауссовским импульсам положительного чирпа, а также радиальной фазовой модуляции. Пятый параграф демонстрирует возможность эффективного сложения оптических импульсов с помощью 7-сердцевинного гексагонального световода в одной из его периферийных сердцевин. С использованием генетического алгоритма определены режимы, обеспечивающие максимальную эффективность сложения при заданных ограничениях на характеристики начальных импульсов. В шестом параграфе обсуждаются вопросы практического применения многосердцевинных волокон в качестве основы устройства для сложения и сжатия оптических импульсов, а также обсуждаются характерные физические характеристики данного

устройства.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы. Список цитируемой литературы составляет 133 наименования, что свидетельствует о большом объеме работы, выполненной соискателем по изучению материала, относящегося к теме диссертации.

#### **Научная новизна работы.**

- Проведено исследование нелинейных волновых эффектов, возникающих в многосердцевинных световодах при распространении по ним оптических импульсов. Впервые с помощью математического моделирования продемонстрирована возможность использования многосердцевинных световодов в качестве основы устройства для сокращения временной длительности оптических импульсов, а также для нелинейного сложения мощности импульсов, вводимых в каждую сердцевину. Предложенная технология открывает новые перспективы для генерации сверхкоротких лазерных импульсов большой мощности.

- Разработано обобщение метода расщепления по физическим процессам, включающее вычисление матричной экспоненты в частотной области с помощью аппроксимации Паде для решения систем линейно-связанных нелинейных уравнений Шредингера (НУШ), которые используются для моделирования распространения света вдоль многосердцевинных волокон. Данный метод превосходит конечно-разностные схемы в скорости и точности вычислений при малом размере системы связанных НУШ.

- Обобщена компактная диссипативная схема с итерациями для решения систем линейно связанных НУШ. Данная разностная схема имеет повышенный порядок аппроксимации и обладает абсолютной устойчивостью.

- Предложенные численные алгоритмы позволяют решать системы связанных НУШ с линейными связями любого вида.

- Предложена программная реализация на основе библиотеки Intel MKL представленных численных методов, распараллеленная с помощью технологии OpenMP.

**Практическая ценность работы.** Предложенный способ сложения и сжатия оптических импульсов открывает новые возможности для генерации сверхкоротких лазерных импульсов большой мощности. В перспективе он позволит значительно повысить качество получаемых импульсов по сравнению с существующими методами, основанными на линейном сложении оптических пучков. Результаты, изложенные в диссертации, могут быть использованы, например, для создания перспективных станков лазерной резки, позволяющих

получать узкиерезы с минимальной зоной термического влияния.

Предложенные обобщения численных методов позволяют находить решения систем связанных НУШ, использующихся при моделировании нелинейной динамики оптического поля в связанных световодах. Среди возможных потребителей результатов можно отметить телекоммуникационные компании, разрабатывающие оптические линии связи, и производителей оптоволоконных лазеров.

**Публикации и соответствие автореферата диссертационной работе.** Основные результаты работы опубликованы в 14 печатных работах, в том числе, 4 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Имеется свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Автореферат с достаточной полнотой отражает содержание диссертации.

#### **Замечания по диссертации.**

- 1) Думается, диссертация заметно выиграла бы, если бы сравнение численных методов было проведено на большем числе сеток, а не только на специально подобранной их последовательности.
- 2) В работе отсутствуют результаты исследования устойчивости процесса сжатия к флуктуациям фаз начальных импульсов и временных задержек между ними для световодов с кольцевой симметрией расположения сердцевин.
- 3) Недостаточно полно исследовано влияние неоднородности геометрии как в поперечном, так и продольном направлениях, рассматриваемых многосердцевинных световодов на схему сжатия и сложения.

**Заключение.** В целом диссертация Чеховского И.С. содержит новые научные положения и имеет практическую значимость. Основные результаты проведенных исследований обсуждались на всероссийских и международных конференциях, и опубликованы в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК. Высказанные замечания не являются существенными, носят рекомендательный характер и не влияют на общую положительную оценку диссертации Чеховского И.С. Выводы диссертации достаточно обоснованы, обладают научной новизной и представляют теоретическую и практическую значимость.

Диссертация Чеховского И.С. «Численное моделирование нелинейных волновых эффектов в связанных волноводах» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком уровне и содержащей новые обоснованные научные результаты.

Содержание диссертационной работы полностью соответствует паспорту специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», а также отвечает всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Соискатель Чеховской Игорь Сергеевич заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18.

Диссертация была обсуждена и получила положительную оценку на научном семинаре НЦВО РАН под руководством академика Е.М. Дианова (протокол № 636 от 19.12.2017 г.). Отзыв составил заведующий теоретическим сектором Научного центра волоконной оптики РАН, д.ф.-м.н., профессор Бирюков Александр Сергеевич.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Научный центр волоконной оптики Российской академии наук  
(НЦВО РАН)

Web-сайт организации: <http://www.fibopt.ru/>

119333, г. Москва, ул. Вавилова, 38


Телефон: +7 (499) 783 56 21

Адрес электронной почты: [post@fo.gpi.ru](mailto:post@fo.gpi.ru)

Заведующий теоретическим сектором  
НЦВО РАН, д.ф.-м.н., профессор  
21.12.2017

  
А.С. Бирюков

Подпись А.С. Бирюкова заверяю  
Ученый секретарь НЦВО РАН,  
к.ф.-м.н.

  
В.М. Машинский

