

ОТЗЫВ

официального оппонента 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 численному моделированию нелинейных волновых эффектов в многосердцевинных световодах с различными конфигурациями сердцевин для исследования нелинейного сжатия и сложения оптических импульсов с целью получения сверхкоротких лазерных импульсов большой мощности. Разработаны два эффективных численных методов моделирования нелинейной динамики оптических импульсов в многосердцевинных световодах произвольной структуры. Определены параметры оптических импульсов, для которых достигается наибольшее сжатие и максимальная эффективность сложения импульсов в таких световодах.

Актуальность работы. Проблема увеличения объема передаваемой информации по волоконно-оптическим линиям связи в настоящее время очень актуальна из-за ежегодного роста объема телекоммуникационных услуг. Недавно появившиеся многосердцевинные световоды обладают существенно большей пропускной способностью по сравнению со стандартными в использовании односердцевинными волокнами. В многосердцевинных световодах, используемых для передачи данных, отдельные сердцевинки обычно расположены на большом расстоянии для уменьшения их взаимодействия и исключения из-за этого возможных ошибочных данных. Однако последние исследования по уменьшению расстояния между сердцевинами демонстрируют возможность использования возникающие нелинейные взаимодействия при распространении световых импульсов в практически значимых задачах генерации сверхкоротких импульсов большой мощности. Поэтому проведенные исследования в диссертационной работе по нелинейному сложению и сжатию оптических импульсов в многосердцевинных световодах несомненно актуальны.

Содержание работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитируемой литературы из 133 наименований и приложения. Работа изложена на 117 страницах и содержит 34 рисунка и 6 таблиц.

Во введении описывается область исследований, обосновывается актуальность, определяются цели и задачи, формулируется новизна и значимость работы, излагается краткое содержание работы по главам, и формулируются защищаемые положения.

В Главе 1 представлены численные методы решения системы связанных нелинейных уравнений Шредингера (НУШ), описывающей эволюцию света в многосердцевинных волокнах, когда необходимо учитывать взаимодействие оптических импульсов друг с другом (также называемых дискретно-непрерывным нелинейным уравнением Шредингера). Вначале рассмотрен первый численный метод решения систем связанных НУШ – обобщение неявной компактной конечно-разностной схемы, имеющей порядок аппроксимации $O(h^2 + \tau^4)$, где h и τ – шаги равномерной сетки по пространственной переменной и времени соответственно. Далее был представлен второй численный метод – модификация широко известного метода расщепления по физическим процессам, обладающего высокой точностью расчета по временной переменной. Метод Фурье расщепления по физическим процессам был адаптирован автором для системы связанных НУШ с использованием аппроксимации Паде матричной экспоненты. На основе предложенной модификации компактной схемы и обобщения метода расщепления по физическим процессам был разработан программный комплекс расчета распространения оптических импульсов в многосердцевинных световодах с различной конфигурацией сердцевин. Были представлены результаты тестирования программного комплекса при расчете распространения фундаментального солитона и солитона Кузнецова-Ма. Был произведен сравнительный анализ производительности и точности обоих методов. Было показано, что компактная схема более предпочтительна для решения систем НУШ большого размера. В четвертом параграфе главы представлена методология распараллеливания предложенных численных алгоритмов с помощью технологии библиотеки OpenMP. Для обоих алгоритмов оказалось эффективным распараллеливание по обрабатываемым данным.

В Главе 2 представлены результаты теоретического исследования сжатия и сложения оптических импульсов, распространяющихся в световодах с расположенными по окружности (в поперечном сечении) сердцевинами, каждая из которых взаимодействует только с двумя ее ближайшими соседями. В первом параграфе главы детально обсуждается система уравнений, описывающая распространение световых импульсов такого типа световодах, полученная в приближении слабой связи, одинаковости сердцевин и рассматривая только взаимодействие между соседними сердцевинами. Второй параграф посвящен вопросу проведения численного моделирования и выбору критериев определения пространственных точек сжатия (сложения) световых импульсов. В третьем параграфе представлены результаты моделирования эволюции оптических импульсов в 7- и 19-сердцевидных световодах. Для анализа сжатия и сложения импульсов в кольцевых световодах в качестве начальных импульсов для каждой сердцевины использовались Гауссовские импульсы с немного возмущенными амплитудами для инициализации начальной неустойчивости. Показано, что условия для оптимального сложения существенно отличаются от оптимальных условий для сжатия импульсов. В 7-сердцевинном кольцевом MCF продемонстрировано сложение 83.5% энергии в пределах одной сердцевины и сжатие в 300 раз. Для 19-сердцевинного кольцевого MCF найдены режимы, при которых возможно сложение энергии с эффективностью 80%, а также сжатие в 720 раз. Было показано, что эффективность

сложения и сжатия импульсов с помощью кольцевых световодов возрастает с увеличением числа сердцевин, но результаты становятся чувствительными к начальным условиям. Кроме того, требуемая длина световода растет с числом сердцевин. В четвертом параграфе сделаны выводы по данной главе.

Третья глава посвящена изучению сжатия и сложения оптических импульсов с помощью световодов с двумерным расположением сердцевин в поперечном сечении. Были рассмотрены световоды с расположением сердцевин в узлах треугольной (гексагональные МСФ) и квадратной решеток, у которых каждая сердцевина взаимодействует с б'ольшим числом соседей (по сравнению с кольцевыми световодами), что обеспечивает более сильное нелинейное взаимодействие. В первом параграфе обсуждается математическая модель для описания распространения оптических импульсов вдоль таких световодов в виде системы линейно связанных НУШ. Второй параграф посвящен исследованию процессов сжатия и сложения световых импульсов в гексагональных и квадратных световодах. Было проведено сравнение эффективности 7 и 19-сердцевинных гексагональных МСФ, а также 21-сердцевинного квадратного МСФ. Эффективность сложения и коэффициент сжатия определялись для параметров начальных Гауссовых импульсов P , τ . Было выяснено, что максимальная эффективность сложения импульсов с помощью 7-сердцевинного гексагонального световода равняется 91.6%. В отличие от кольцевых световодов, здесь существует широкая область параметров (P , τ), при которых возможно сложение импульсов с эффективностью выше 70%. Увеличение числа сердцевин до 19 не меняет качественно картину. Максимальная эффективность сложения равняется 80.9%. Используя 7-сердцевинный гексагональный световод, можно достичь сжатия в 256 раз. Также было исследовано влияние модуляции начальных импульсов на процессы сложения и сжатия. При рассмотрении процессов сжатия и сложения импульсов в 21-сердцевинного квадратного МСФ расчеты показали, что между данным световодом и 19-сердцевинным гексагональным световодом нет принципиальной разницы. В третьем параграфе было исследовано влияние флуктуаций фаз начальных импульсов на эффективность сжатия и сложения. 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. Рассматривались 7, 19 и 37-сердцевинные гексагональные световоды. Выявлено, что добавление чирпа к начальным импульсам и радиальная модуляция фазы существенно увеличивают эффективность сложения импульсов. В пятом параграфе демонстрируется принципиальная возможность создания на основе гексагонального многосердцевинного световода устройства для нелинейного сложения импульсов, способного выдавать мощные оптические импульсы, каждый из которых выходит из последовательно выбранной сердцевины многосердцевинного световода. Было исследовано два

подхода к определению параметров Гауссовых импульсов, при которых сложенный импульс может быть получен в одной из периферийных сердцевин 7-сердцевинного световода. Первый подход - подбор величины амплитуды каждого оптического импульса в отдельности. Второй подход - у всех вводимых импульсов с одинаковой амплитудой, шириной и с одинаковым чирпом подбирать фазу каждого импульса в отдельности. 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 работ.

К наиболее интересным и практически важным результатам, изложенным в диссертации, следует отнести:

1. Для решения систем линейно связанных нелинейных уравнений Шредингера (НУШ), описывающих динамику оптического поля в многосердцевинных световодах, предложено обобщение метода расщепления по физическим процессам, включающее вычисление матричной экспоненты в частотной области с помощью аппроксимации Паде. Данный метод превосходит конечно-разностные схемы в скорости и точности вычислений при малом размере системы связанных НУШ. Также разработано обобщение компактной диссипативной схемы с итерациями на случай систем линейно связанных НУШ. Обобщенная разностная схема имеет повышенный порядок аппроксимации и обладает абсолютной устойчивостью. Предложенные численные алгоритмы позволяют решать системы связанных НУШ с линейными связями любого вида.

2. На основе представленных численных алгоритмов разработан программный комплекс моделирования многосердцевинных световодов. Комплекс позволяет проводить численное моделирование распространения оптического поля в многосердцевинных световодах с кольцевыми, гексагональными и квадратными конфигурациями сердцевин.

3. В работе с помощью математического моделирования показана возможность сжатия оптических импульсов с помощью многосердцевинных световодов в несколько сотен раз, а также когерентного сложения нечирпованных импульсов с эффективностью более 80%. В случае гексагональных световодов добавлением положительного чирпа и радиальной модуляции фаз начальных импульсов оказалось возможным повысить эффективность сложения на величину до 20%. Также показано, что предложенная нелинейная схема сжатия и сложения устойчива

по отношению к флуктуациям фаз начальных импульсов и временных задержек между импульсами.

4. В работе продемонстрирована возможность эффективного сложения оптических импульсов с помощью 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.

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 узкие резы 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.

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. Желательно было бы провести сравнение обоих численных методов по минимальному времени достижения заданной точности вне зависимости от заданной сетки.
2. При выборе критерия определения точек сжатия (сложения) импульсов в разделе 2.в на стр. 55 фигурирует множитель M , подбираемый опытным путем от значения 0.2 до 1. В тоже время на стр. 57 вводится коэффициент модуляции импульса, также обозначенный M . При этом его значение выбирается 0.3. Однако если учесть эту опечатку и, подставив численные значения в критерий 2.в ($M=0.2$ -минимальное значение), а коэффициент модуляции = 0.3, то простые оценки показывают, что критерий 2.в возможно необходимо ужесточить и минимальное значение M брать > 0.2 .
3. Очень интересными являются исследования возможности нелинейного сложения оптических импульсов с помощью 7-сердцевинного гексагонального волокна в одной из периферийных сердцевин. Однако для практического применения в устройстве для пространственно-временного мультиплексирования не хватает детального анализа влияния как флуктуаций фаз начальных импульсов, так и учета временных задержек между импульсами.

Заключение. Диссертационная работа Чеховского И.С. является законченной научно-квалификационной работой по актуальной теме и вносит существенный вклад в разработку и адаптацию математических моделей и создание комплекса программ для моделирования, расчета и исследования нелинейной динамики оптических импульсов в многосердцевинных световодах произвольной структуры. Отмеченные замечания не снижают общей высокой оценки диссертации. Результаты работы имеют практическую значимость и могут быть рекомендованы к применению в ФГБУН Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, ФГБУН НЦВО РАН, ФГБУН ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, ФГБУН ИЛФ СО РАН и других организациях как в научных, так и в прикладных целях.

Положения, выносимые на защиту, сформулированы отчётливо. Полученные результаты, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, в достаточной мере обоснованы, являются новыми и их достоверность не вызывает сомнений. В ходе работы над диссертацией И.С. Чеховской опубликовал 14 печатных работ, из них четыре статьи опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК, десять – в трудах международных и всероссийских конференций. Получено одно свидетельство о регистрации программы для ЭВМ в Федеральной службе по интеллектуальной собственности. В данных публикациях материалы диссертации изложены достаточно полно. Следует отметить хорошее оформление диссертации. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертация Чеховского И.С. «Численное моделирование нелинейных волновых эффектов в связанных волноводах» удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям в п. 9-11, 13-14 Положения о порядке присуждения учёных степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а сам соискатель Чеховской Игорь Сергеевич заслуживает присуждения ему учёной степени кандида-

та физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук
(ИЛФ СО РАН)
630090, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 15Б
Web-сайт организации: <http://www.laser.nsc.ru/>
Телефон: +7 (383) 333-29-67
Адрес электронной почты: info@laser.nsc.ru

Официальный оппонент
Зам. директора по научной работе
ИЛФ СО РАН
к.ф.-м.н.
12 февраля 2018 г.



Денисов Владимир Иванович

Подпись В.И. Денисова заверяю
Ученый секретарь
Института лазерной физики СО РАН
к.ф.-м.н.



Покасов Павел Викторович