

На правах рукописи



Яруткина Ирина Александровна

**Математическое моделирование распространения диссипативных
и дисперсионно управляемых солитонов в импульсных
волоконных лазерах**

05.13.18 – «Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Федорук Михаил Петрович

Официальные оппоненты: Курков Андрей Семенович,
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник ИОФ РАН

Дмитриев Александр Капитонович,
доктор физико-математических наук,
профессор, декан ФТФ НГТУ

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт автоматизи-
ки и электротехники Сибирского отделения
Российской академии наук

Защита состоится «29» апреля 2014 г. в 11:30 на заседании диссертационного совета ДМ 003.046.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 6, конференц-зал ИВТ СО РАН.

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ИВТ СО РАН: <http://ict.nsc.ru/sitepage.php?PageID=17>

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан «__» _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.ф.-м.н.



Лебедев А.С.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. По сравнению с традиционными лазерами волоконные лазеры обладают рядом преимуществ, к числу которых относятся следующие: высокое качество выходного излучения, высокие стабильность и надежность лазера, эффективность накачки, компактность конструкции и низкая цена. Эти преимущества позволяют волоконным лазерам не только находить свою нишу в ряде применений, но и в некоторых случаях заменять традиционные лазеры. Большое разнообразие существующих волоконных лазеров позволяет использовать их в самых разных областях науки и производства в зависимости от требуемых характеристик генерируемого излучения. Разрабатываемые надежные и обладающие невысокой стоимостью импульсные волоконные лазеры находят широкое применение в области телекоммуникаций, а также используются в качестве медицинских инструментов, для промышленной обработки материалов и во многих других областях. Число приложений в науке и промышленности, где применяются волоконные лазеры, продолжает расти [1].

Существует несколько направлений развития современных волоконных лазерных систем. В диссертационном исследовании решается ряд задач, относящихся к разработке лазеров, генерирующих высокоэнергетичные импульсы, а также к разработке фемтосекундных волоконных лазеров.

Поскольку увеличение длины лазерного резонатора с положительной дисперсией приводит к возможности генерации высокоэнергетичных импульсов, интерес представляет исследование диссипативных солитонных волоконных лазеров с длинными резонаторами. Особый интерес представляет исследование основных физических механизмов установления одноимпульсных режимов генерации и распространения импульса в волокне для подобных лазерных конфигураций. Данные исследования сопряжены с рядом проблем, например в таких системах велико влияние различных нелинейных эффектов, что может приводить к неустойчивостям. Исследования, включающие в себя математическое моделирование и направленные на изучение возможности контроля нелинейных эффектов, а также понимание механизмов генерации импульсов в длинных волоконных лазерах, способствуют дальнейшему развитию данного перспективного направления получения импульсов с высокой энергией.

Также за последнее десятилетие объектом активных научных исследований стали волоконные лазеры, генерирующие сверхкороткие

импульсы фемтосекундной длительности. Осуществлять генерацию таких импульсов позволяет техника дисперсионного управления, при использовании которой в волоконном лазере задействованы элементы с противоположной по знаку дисперсией, в результате чего импульс испытывает периодические изменения длительности и мощности во время обхода резонатора. Знак внутрирезонаторной дисперсии в таких системах меняется путем изменения параметров резонатора, что позволяет получать импульсы с необходимыми характеристиками. Решение оптимизационных задач с использованием математического моделирования позволяет разрабатывать конфигурации волоконных лазеров, генерирующих излучение, которое обладает свойствами, необходимыми для конкретного заданного приложения.

Существуют два подхода к математическому описанию волоконных лазеров. Первый подход, точечный, основан на точном сопоставлении каждому из элементов лазера своей математической модели и последовательном учете действия каждого из устройств резонатора. Этот подход, несмотря на свою большую точность, плохо применим к задачам оптимизации, когда среди многих параметров лазерной системы необходимо выбрать один набор, позволяющий получить необходимые характеристики излучения. Поскольку в таком случае необходимо проводить затратные по времени расчеты для каждого из наборов параметров, нахождение оптимальной конфигурации потребует значительных временных и вычислительных затрат. Поэтому также существует и второй подход к моделированию – распределенный, когда в одном уравнении учитываются все основные физические эффекты, оказывающие наиболее значительное влияние на формирование импульса. При реализации распределенного подхода существует возможность перехода к меньшему числу независимых параметров. Исследование особенностей использования распределенных моделей делает возможным решение сложных оптимизационных задач в многомерном пространстве параметров резонатора.

Примером упрощенной математической модели, способной значительно упростить процесс решения трудоемких оптимизационных задач, может служить система обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих «быструю» (т.е. внутрирезонаторную) динамику основных характеристик диссипативных солитонов в волоконных лазерах с дисперсионным управлением. Поэтому актуальной является разработка эффективного численного алгоритма для решения данной системы,

который бы позволял использовать произвольные начальные приближения, соответствовал реальному поведению оптического импульса в резонаторе с дисперсионным управлением, а также позволял решать поставленную задачу без значительных вычислительных затрат.

В диссертационной работе рассматриваются рассматриваются вопросы, охватывающие все перечисленные направления исследований. В целом актуальность диссертационной работы обусловлена как кругом решаемых задач, так и широким спектром практических применений волоконных лазерных систем.

Цели работы.

1. Исследование возможности генерации и анализ характеристик оптического импульса в лазерных резонаторах различных типов методами математического моделирования.

2. Разработка численного алгоритма для решения системы нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих динамику диссипативных солитонов в волоконных лазерах с дисперсионным управлением и насыщением энергии.

3. Анализ свойств экспериментальных волоконных лазерных систем с пассивной синхронизацией мод на основе нелинейного вращения поляризации и насыщающегося поглотителя.

4. Разработка комплексов программ по моделированию волоконных лазеров с кольцевым и линейным резонаторами.

Научная новизна и значимость работы.

1. Впервые численно получены устойчивые режимы генерации в диссипативном солитонном волоконном лазере с длиной резонатора до 2 км. Найдена зависимость формы получаемых импульсов от длины резонатора.

2. Впервые проведен численный анализ устойчивости семейства аналитических решений модифицированного уравнения Гинзбурга-Ландау и установлено, что их форма и характеристики зависят от единственного параметра.

3. Впервые на основе численного решения векторного уравнения Гинзбурга-Ландау установлен характер зависимости максимально достижимой энергии импульса от длины резонатора и угла поворота пластинок поляризации в волоконном лазере с пассивной синхронизацией мод на основе эффекта нелинейного вращения поляризации.

4. Впервые разработан итерационный численный алгоритм для нахождения периодических решений системы нелинейных

дифференциальных уравнений, описывающих динамику характеристик одноимпульсных режимов генерации в дисперсионно управляемом волоконном лазере, что позволило провести исследование зависимости решений системы от ее параметров.

Научная и практическая значимость работы.

1. Разработанные комплексы программ позволяют проводить математическое моделирование распространения оптических импульсов в волоконных лазерах и могут быть применены для оптимизации волоконных лазеров различных конфигураций с целью получения лазерных импульсов с требуемыми характеристиками.

2. Предложенный итерационный численный алгоритм позволяет повысить производительность вычислений в ходе моделирования волоконных лазеров с дисперсионным управлением.

Материалы работы были использованы при выполнении государственных контрактов № 11.519.11.6038 от 19 июня 2012 г. и № 11.519.11.4001 от 18 августа 2011 г. (в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007-2013 годы»). В настоящее время исследования продолжаются в рамках договора № 14.В25.31.0003 «Физическая платформа нелинейных фотонных технологий и систем».

Достоверность результатов, полученных в работе, основана на верификации результатов исследований путем сравнения их с результатами натуральных экспериментов; достоверность теоретических положений основана на их строгом математическом обосновании.

На защиту выносятся:

1. Полученные на основе вычислительных экспериментов зависимости формы и характеристик диссипативного солитона от длины резонатора волоконного лазера.

2. Полученная в работе однопараметрическая зависимость формы аналитического и численного семейств диссипативных солитонных решений модифицированного уравнения Гинзбурга-Ландау.

3. Определенный на основе вычислительных экспериментов оптимальный набор параметров, максимизирующий энергию оптического импульса в волоконном лазере с пассивной синхронизацией мод на основе эффекта нелинейного вращения поляризации.

4. Методика получения узких дисперсионно управляемых солитонов с максимально возможной энергией путем изменения длины резонатора и

знака средней дисперсии в тулий-гольмиевых волоконных лазерах.

5. Итерационный численный алгоритм нахождения периодических решений системы обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих «быструю» динамику характеристик дисперсионно управляемых солитонов.

Представление работы. Основные результаты работы докладывались на объединенном семинаре ИВТ СО РАН, кафедры математического моделирования НГУ и кафедры вычислительных технологий НГТУ «Информационно-вычислительные технологии» под руководством академика Шокина Ю.И. и профессора Ковени В.М. (2013 г.), на научно-методическом семинаре ИВТ СО РАН «Информационно-вычислительные технологии в задачах поддержки принятия решений» под руководством академика Шокина Ю.И., профессора Чубарова Л.Б. и профессора Федорука М.П. (2010–2012 гг.), на конференции LPHYS'11 (20th International Laser Physics Workshop, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, July 11–15, 2011), на III-й Всероссийской конференции по волоконной оптике (ВКВО-2011, г. Пермь, 12–14 октября 2011 г.), на V-м Российском семинаре по волоконным лазерам (г. Новосибирск, 27–30 марта 2012 г.), на IV-й Всероссийской конференции по волоконной оптике (ВКВО-2013, г. Пермь, 16–18 октября 2013 г.).

Было получено два свидетельства о регистрации программ для ЭВМ в Федеральной службе по интеллектуальной собственности.

Публикации. По теме диссертации было опубликовано 4 статьи в журналах, входящих в перечень Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации в качестве изданий, рекомендуемых для опубликования основных научных результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата и доктора наук. Также имеются публикации в трудах конференций.

Личный вклад автора. Проведенное в работе исследование является самостоятельным авторским исследованием. Автором разработан итерационный численный алгоритм нахождения периодических решений системы обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих «быструю» динамику характеристик дисперсионно управляемых солитонов, проведено численное моделирование диссипативных и дисперсионно управляемых волоконных лазеров различных конфигураций, а также осуществлена программная реализация математических моделей.

Структура диссертации. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 37 рисунков и 3 таблицы,

количество источников в библиографическом списке равно 127. Объем диссертации – 124 страницы.

Содержание работы

Во **введении** сформулированы основные цели и задачи исследования и приведено краткое содержание работы по главам.

Глава 1 посвящена математическому моделированию распространения диссипативных солитонов в длинных волоконных лазерах с длиной резонатора до 2 км.

Раздел 1.1 первой главы посвящен постановке задачи и обоснованию актуальности задачи моделирования волоконных лазеров с длинным резонатором. Описаны основные типы внутррезонаторной динамики оптических импульсов в импульсном волоконном лазере с синхронизацией мод: распространение классических, дисперсионно управляемых и диссипативных солитонов. Отмечены основные направления исследования волоконных лазерных систем: создание лазеров, генерирующих импульсы с максимально возможной энергией, и лазеров, с помощью которых возможно получить импульсы фемтосекундной длительности. Диссипативные солитонные волоконные лазеры с длинным резонатором позволяют получать импульсы с высокой энергией (порядка десятков наноджоулей). Такой волоконный лазер с пассивной синхронизацией мод на основе насыщающегося поглотителя и является объектом численного моделирования.

В **разделе 1.2** описывается использованная при моделировании математическая модель активного и пассивного волокон, основанная на комплексном нелинейном уравнении Шредингера, а также модели, применяемые для описания прохождения импульса через дискретные элементы, такие как насыщающийся поглотитель и ответвитель.

Прохождение излучения в активном световоде описывается обобщенным нелинейным уравнением Шредингера с входным полем $A(t, z = 0) = A_{in}(t)$ (которое определяется предыдущим обходом резонатора, за исключением первого обхода, когда используется начальное распределение поля) [2]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -i\frac{\beta_2}{2}\frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{\beta_3}{6}\frac{\partial^3 A}{\partial t^3} + i\gamma|A|^2A + \hat{g}A. \quad (1)$$

Здесь β_2 – дисперсия второго порядка, β_3 – дисперсия третьего порядка, γ – коэффициент нелинейности. При моделировании прохождения импульса по активному волокну в лазере с синхронизацией мод должно учитываться

насыщение усиления. Неравномерность усиления в операторе \hat{g} описывается в частотной области с использованием лоренцева профиля:

$$g(\omega) = \frac{1}{1 + \frac{E}{E_{satG}}} \times \frac{g_0}{1 + \left(\frac{\omega - \omega_0}{\Omega_g}\right)^2}, \quad (2)$$

где ω_0 – несущая частота, Ω_g – частотная ширина профиля усиления, $E = \int |A|^2 dt$ – энергия импульса, E_{satG} – энергия насыщения.

Распространение импульса по пассивному волокну также описывается обобщенным нелинейным уравнением Шредингера, но без учета усиления. Для обоих типов волокон уравнение Шредингера было решено с использованием симметричного варианта метода расщепления по физическим процессам.

Основные результаты исследований приведены в **разделе 1.3**. В частности, представлены впервые полученные устойчивые режимы генерации для длины резонатора 2 км, исследована зависимость результирующей формы импульса от начального распределения (гауссов импульс гладкой формы, белый гауссов шум). Представлены зависимости энергии результирующего импульса и его среднеквадратических (root-mean square, RMS) характеристик от длины резонатора (рисунок 1). Предложена формула, качественно описывающая зависимость энергии от усиления, потерь в резонаторе и длины волокна:

$$E = a \cdot L \frac{g_0 \cdot L_{AF} - (R_{in} + \alpha \cdot L_{PF})}{R_{in} + \alpha \cdot L_{PF}}, \quad (3)$$

где a – некоторая константа, L_{AF} и L_{PF} – длина активного и пассивного волокна соответственно, L – общая длина резонатора, α – потери в волокне, R_{in} – потери на выходе из резонатора, g_0 – коэффициент усиления.

В **главе 2** речь идет о моделировании устойчивых режимов генерации диссипативных солитонов на основе комплексного нелинейного уравнения Гинзбурга-Ландау.

Глава 2 состоит из двух разделов. В **разделе 2.1** дана постановка задачи. При помощи уравнения Гинзбурга-Ландау реализуется распределенный подход к моделированию, когда все ключевые физические эффекты, отвечающие за генерацию оптических импульсов в волоконных лазерах с синхронизацией мод, учитываются в одном уравнении. Этот подход к моделированию сокращает время счета, что позволяет быстро и эффективно решать задачи оптимизации лазерных конструкций.

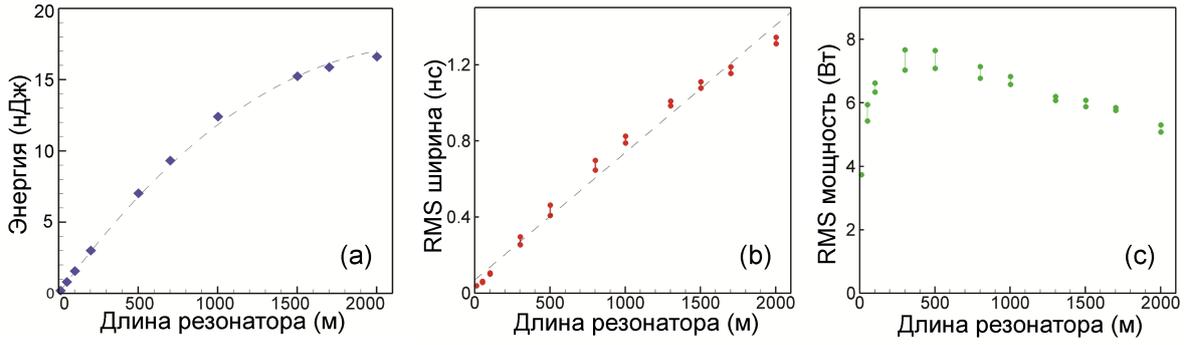


Рисунок 1 — Зависимость характеристик импульса от длины резонатора

Комплексное обобщенное уравнение Гинзбурга-Ландау для огибающей электромагнитного поля может быть записано в виде:

$$\frac{dA}{dz} = i\left(\beta \frac{d^2}{dt^2} - \gamma |A|^2\right)A + \left(-\sigma + \alpha \frac{d^2}{dt^2} + \kappa |A|^2(1 - \zeta |A|^2)\right)A. \quad (4)$$

Здесь β — дисперсия, γ — фазовая самомодуляция, σ — разность между потерями и усилением, α — спектральная фильтрация, κ — амплитудная самомодуляция, ζ — насыщение амплитудной самомодуляции.

В разделе 2.2 описаны результаты исследования аналитического решения комплексного уравнения Гинзбурга-Ландау, полученного в работе [3] при большом параметре фазовой модуляции. В ходе данного исследования было проведено численное моделирование распространения импульсов в диссипативном солитонном волоконном лазере при помощи комплексного нелинейного уравнения Гинзбурга-Ландау с целью определения устойчивости двух веток аналитического решения и сравнения данного аналитического решения с результатами численного моделирования. Для устойчивой ветки аналитического решения было проведено исследование зависимости формы спектра и импульса от параметров волоконного лазера.

В области существования устойчивой ветки установлено соответствие результатов расчетов с аналитическим решением. Показано, что форма импульса и его спектра определяются только одним параметром R , являющимся комбинацией шести параметров уравнения Гинзбурга-Ландау.

Третья глава, посвященная математическому моделированию диссипативного солитонного волоконного лазера с пассивной синхронизацией мод на основе эффекта нелинейного вращения поляризации, включает в себя три раздела.

В разделе 3.1 обосновывается актуальность проведения моделирования импульсного волоконного лазера с пассивной синхронизацией мод на

основе нелинейного вращения поляризации. Наряду с использованием насыщающегося поглотителя, нелинейное вращение поляризации является еще одним распространенным методом пассивной синхронизации мод за счет использования нелинейного элемента. В разделе описан принцип действия подобных волоконных лазеров и приведена краткая история их разработки. Моделирование проводилось с целью лучшего понимания механизмов, задействованных в формировании импульсов, и дальнейшей оптимизации параметров таких систем для получения излучения с необходимыми характеристиками.

Раздел 3.2 посвящен описанию схемы экспериментальной установки, которая была объектом моделирования. Главную роль в формировании импульсов играют активное волокно, пассивное волокно и поляризатор, выступающий также в качестве ответвителя. Далее в разделе описана использованная математическая модель. Для описания распространения оптического импульса в волоконном лазере с пассивной синхронизацией мод на основе эффекта нелинейного вращения поляризации необходимо одновременное рассмотрение взаимодействия двух ортогонально поляризованных компонент оптического поля — A_+ и A_- . Поэтому для описания эволюции поляризации используют систему связанных уравнений Гинзбурга-Ландау для амплитуды электромагнитного поля (см., например, [4]).

После прохождения через поляризатор эллиптически поляризованные компоненты медленно меняющейся амплитуды A_+ и A_- принимают вид:

$$\begin{cases} A_+ = A_1 \cos(\chi - \frac{\pi}{4})e^{i\psi} \\ A_- = A_1 \cos(\chi + \frac{\pi}{4})e^{-i\psi} \end{cases} \quad (5)$$

где A_1 — входное поле, χ и ψ — углы поворота двух пластинок поляризации (четвертьволновой и полуволновой соответственно), при этом $0 < \chi < \frac{\pi}{4}$.

Для прямого описания эволюции вектора поляризации в данном случае используется система связанных уравнений Гинзбурга-Ландау для амплитуды электромагнитного поля $A(z, t)$:

$$\begin{cases} \frac{\partial A_+}{\partial z} = \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_+}{\partial t^2} + \hat{g}A_+ + \frac{i\gamma}{3}(|A_+|^2 - |A_-|^2)A_+ - i\gamma|A|^2 A_+ \\ \frac{\partial A_-}{\partial z} = \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_-}{\partial t^2} + \hat{g}A_- - \frac{i\gamma}{3}(|A_+|^2 - |A_-|^2)A_- - i\gamma|A|^2 A_- \end{cases} \quad (6)$$

Здесь $|A|^2 = |A_+|^2 + |A_-|^2$, β_2 — дисперсия второго порядка, γ — коэффициент

нелинейности. Эффект насыщения усиления и фильтрации в операторе \hat{g} описывается в частотной области с использованием лоренцева профиля.

После прохождения по световоду компонент оптического поля A_+ и A_- (правая и левая круговые поляризации электрического поля) происходит их обратная поляризация по правилу

$$A_1 = \frac{A_+ + A_-}{\sqrt{2}}, \quad A_2 = \frac{A_+ - A_-}{\sqrt{2}}. \quad (7)$$

Составляющая поля A_2 выходит из резонатора, а A_1 снова попадает в резонатор и поляризуется согласно системе уравнений (5). Здесь компоненты A_1 и A_2 являются двумя линейно поляризованными компонентами.

Основные результаты исследований изложены в **разделе 3.3**. Было получено качественное соответствие экспериментальных и численных результатов для обеих ортогонально поляризованных компонент оптического поля. На рисунке 2 приведен результат численного моделирования для следующего набора параметров: $\chi = \pi/40$, $\psi = -\pi/4$, коэффициент усиления $g_0 = 150$ дБ. Справа показана форма спектра, слева – форма импульса. Пунктирной линией отмечена часть оптического поля A_1 , сплошной линией – часть оптического поля A_2 . Спектры компонент поля A_1 и A_2 имеют характерные для диссипативных солитонов с большим параметром фазовой модуляции резкие спады [1] вплоть до уровня -30 дБ.

Была исследована зависимость максимально достижимой энергии резонатора и полного угла поворота эллипса поляризации на одном обходе резонатора от длины волокна и угла поворота пластинок поляризации. При этом для каждого набора параметров резонатора энергия максимизировалась путем варьирования коэффициента усиления. Исследования позволили определить оптимальный набор параметров, при котором достигалась максимально возможная энергия выходного импульса для каждой из длин резонатора.

В **главе 4** численно моделировалось распространение дисперсионно управляемых солитонов в волоконных лазерах в рамках нелинейного уравнения Шредингера. Объектом моделирования в этой главе был тулий-гольмиевый волоконный лазер, генерирующий излучение на длине волны 2 мкм.

Глава состоит из трех разделов. Особенности и основные типы конструкций волоконных лазеров с дисперсионным управлением, позволяющих генерировать сверхкороткие импульсы фемтосекундной длительности, рассмотрены в **разделе 4.1**. Метод дисперсионного

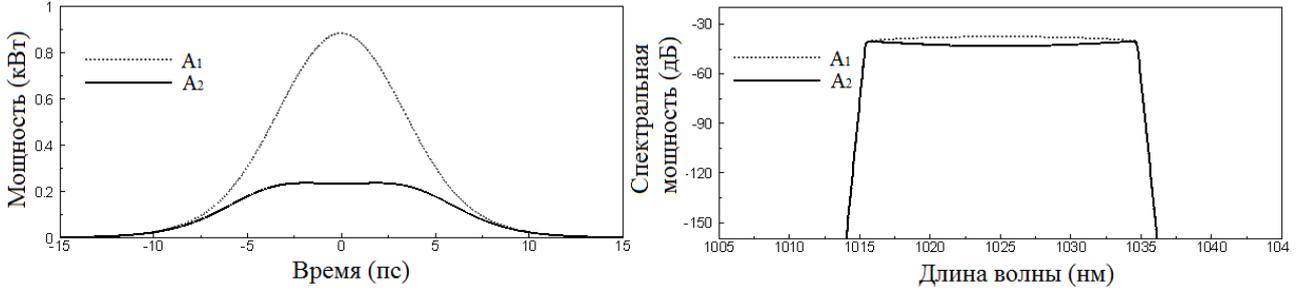


Рисунок 2 — Результаты численных расчетов. Значения параметров: $\chi = \pi/40$, $\psi = -\pi/4$, $g_0 = 150$ дБ

управления в волоконном лазере заключается в чередовании участков резонатора с отрицательной и положительной дисперсией групповых скоростей, что обеспечивается использованием различных устройств и методов. В случае, рассмотренном в главе, дисперсионное управление обеспечивалось с помощью chirпованной брэгговской решетки.

В **разделе 4.2** дается постановка задачи, а также описывается экспериментальная установка, которая была объектом моделирования. Линейный резонатор тулий-гольмиевого лазера состоял из активного и пассивного волокна с отрицательной дисперсией, ответвителя и брэгговской решетки с положительной дисперсией, выполнявшей роль компенсатора дисперсии. Таким образом, за счет изменения длины пассивного волокна средняя дисперсия резонатора могла быть как положительной, так и отрицательной. Также в разделе описаны математические модели каждого из задействованных в эксперименте элементов лазера.

Подробно описана полная математическая модель насыщающегося поглотителя. Насыщающийся поглотитель описывается упрощенной передаточной функцией $T(t) = [1 - q(t, |A_{in}(t)|^2)]$, при этом функция $q(t, |A_{in}(t)|^2)$ может быть найдена из уравнения:

$$\frac{dq}{dt} = -\frac{q - q_0}{\tau_A} - \frac{q|A_{in}(t)|^2}{\tau_A P_{sat}}. \quad (8)$$

Решение дифференциального уравнения (8) можно записать в интегральном виде:

$$q(t) = q_0 k(t) \left[\frac{k(T_R)}{1 - k(T_R)} \int_0^{T_R} \frac{dx}{\tau_A k(x)} + \int_0^t \frac{d\xi}{\tau_A} \exp \left(\int_0^\xi \frac{dx}{\tau_A} \left(1 + \frac{|A_{in}(x)|^2}{P_{sat}} \right) \right) \right]. \quad (9)$$

Здесь P_{sat} — мощность насыщения, q_0 — глубина модуляции, τ_A — время восстановления, T_R — время обхода резонатора, функция $k(t)$ имеет вид:

$$k(t) = \exp \left[- \int_0^t \frac{ds}{\tau_A} \left(1 + \frac{|A_{in}(s)|^2}{P_{sat}} \right) \right]. \quad (10)$$

Результаты математического моделирования тулий-гольмиевого лазера с дисперсионным управлением приводятся в **разделе 4.3**, а именно: проведено сравнение численного и натурального экспериментов, а также исследование зависимости характеристик импульса от длины резонатора и средней дисперсии. Удалось получить хорошее качественное соответствие экспериментальных и численных результатов.

Было проведено исследование зависимости характеристик импульса от длины резонатора и от средней дисперсии. На рисунке 3(а) можно видеть отсутствие устойчивой одноимпульсной генерации в районе нулевой средней дисперсии резонатора, а также падение энергии импульсов в этой окрестности. Вставка к рисунку 3(а), иллюстрирующая зависимость спектральной ширины импульса от длины резонатора, показывает, что при ширине спектра меньше 10 нм происходит восстановление линейной зависимости энергии от длины резонатора. Из-за спектральной ограниченности режимов с нормальной дисперсией зависимость энергии от длины носит линейный характер для режимов с более широким, чем в случае резонатора с аномальной средней дисперсией, спектром.

Рисунок 3(б) иллюстрирует зависимость ширины автокорреляционной функции от нормированной средней дисперсии. На вставке более подробно показан характер зависимости ширины автокорреляционной функции для режимов с отрицательной средней дисперсией резонатора. Ширина автокорреляционной функции оптического импульса на выходе из резонатора с нормальной средней дисперсией на порядок больше ширины автокорреляции для резонатора с аномальной средней дисперсией.

Пятая глава посвящена математическому моделированию распространения дисперсионно управляемых солитонов в волоконных лазерах в рамках системы обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений. В этой главе предлагается итерационный алгоритм решения системы уравнений, описывающей динамику основных характеристик импульса (ширина τ , пиковая мощность P , параметр фазовой модуляции C) внутри резонатора, в предположении, что импульс имеет гауссову форму.

Раздел 5.1 посвящен обоснованию актуальности разработки

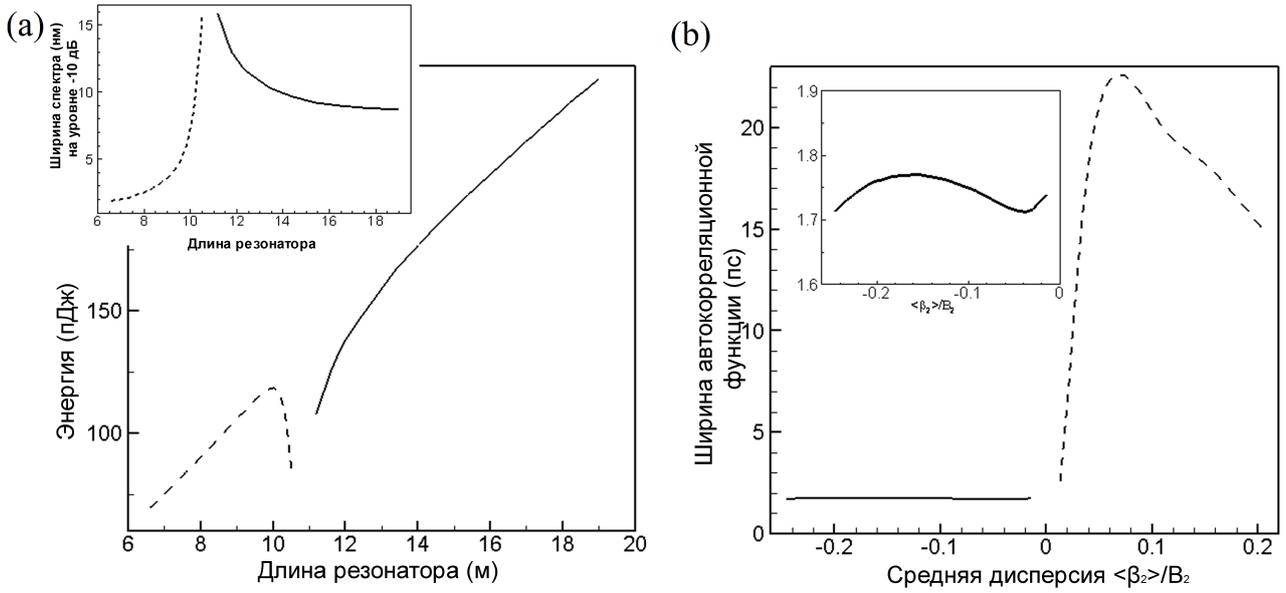


Рисунок 3 — Зависимость характеристик импульса от длины резонатора и нормированной средней дисперсии

эффективных численных алгоритмов для решения упрощенных математических моделей. Для задач, в которых необходимо проводить оптимизацию в многомерном пространстве параметров резонатора, более эффективным является использование моделей с распределенным учетом действия устройств, включенных в резонатор лазера, а также численных методов, требующих минимальных вычислительных и временных затрат. Данная задача может быть сведена к поиску периодических решений системы обыкновенных дифференциальных уравнений [5]

$$\tau_z = 2d(z) \frac{C}{\tau} - \nu g \frac{1}{\tau} (C^2 - 1), \quad (11)$$

$$C_z = (2d(z) - 2\nu g C) \frac{1 + C^2}{\tau^2} - \frac{\varepsilon}{\sqrt{2}} P, \quad (12)$$

$$P_z = -2d(z) \frac{CP}{\tau^2} + 2(g - l_0) P - 2\nu g \frac{P}{\tau^2}, \quad (13)$$

где

$$g = g(\tau, P) = \frac{g_0}{1 + P\tau\sqrt{\pi}/\varepsilon_0},$$

с периодическими краевыми условиями:

$$\tau(0) = \tau(1), \quad C(0) = C(1), \quad P(0) = P(1). \quad (14)$$

Или в векторном виде:

$$\frac{d\vec{V}(z)}{dz} = \vec{F}(z, \vec{V}(z)), \quad z \in (0, 1); \quad (15)$$

$$\vec{V}(0) = \vec{V}(1), \quad (16)$$

где $\vec{V}(z) = (\tau(z), C(z), P(z))^T$, $\vec{F}(z, \vec{V}(z))$ – нелинейный от $\vec{V}(z)$ вектор-столбец.

Дается обзор методов, применяемых для решения систем подобного вида.

В **разделе 5.2** описан разработанный итерационный численный алгоритм, обладающий рядом достоинств в сравнении с перечисленными в предыдущем разделе методами, а именно: быстрой скоростью счета для данного приложения, а также практической нечувствительностью к выбору начального приближения при нахождении периодических решений систем. Таким образом, периодические решения краевой задачи, соответствующие параметрам системы, могут быть получены путем применения итерационного алгоритма уточнения приближенных начальных данных для задачи Коши на основании многократного обхода резонатора.

В качестве апробации алгоритма в разделе приведено сравнение результатов моделирования, полученных путем использования предложенного алгоритма решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений, а также путем численного решения уравнения Шредингера (рисунок 4). На графике представлена динамика пиковой мощности и ширины импульса внутри лазерного резонатора, состоящего из волоконного сегмента с положительной дисперсией второго порядка и волоконного сегмента с отрицательной дисперсией. Видно, что приведенные результаты хорошо согласуются, несмотря на распределенный учет действия оптических устройств в лазере и применение ряда аналитических приближений, использованных в модели на основе системы обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений. Максимальное различие двух представленных на графике решений наблюдается для пиковой мощности импульса и составляет 10% в центре лазерного резонатора; данная точка соответствует середине участка волокна с положительной дисперсией.

В **заклучении** сформулированы основные результаты работы:

1. Проведено математическое моделирование импульсных волоконных лазеров с пассивной синхронизацией мод на основе насыщающегося поглотителя и длиной резонатора 2 км. Получена устойчивая импульсная

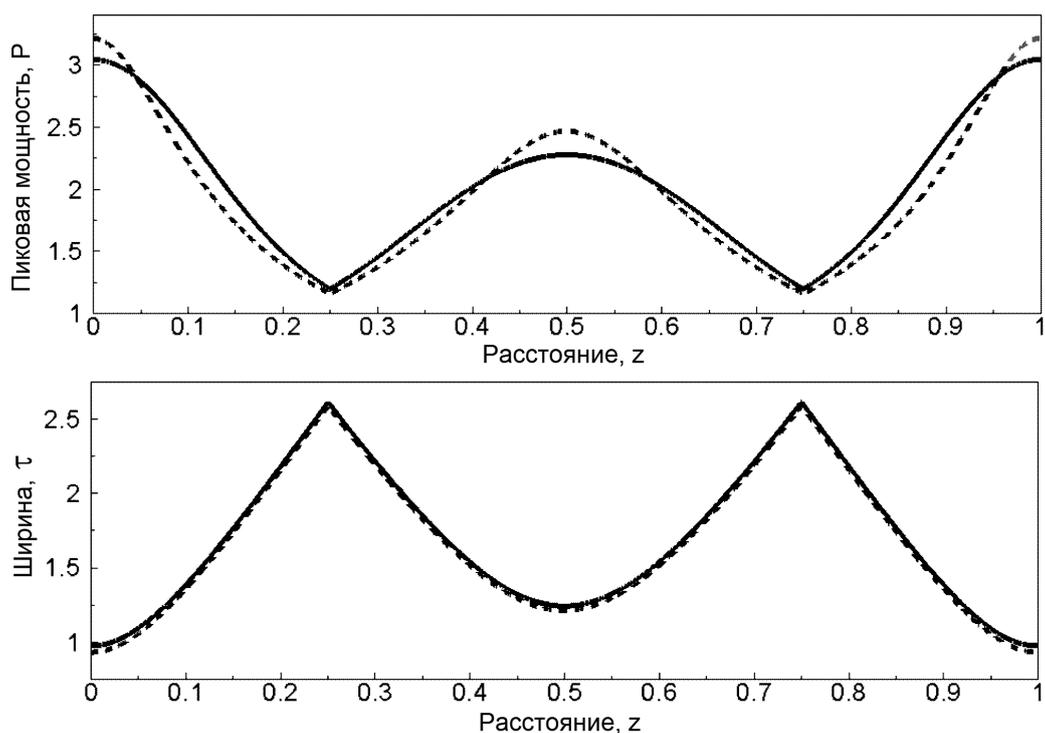


Рисунок 4 — Динамика пиковой мощности и ширины внутри резонатора. Пунктирная линия — результаты моделирования при помощи уравнения Шредингера. Сплошная линия — результаты моделирования при помощи системы нелинейных дифференциальных уравнений

генерация при длине резонатора до 2 км. Определен характер зависимости энергии диссипативных солитонов от длины лазерного резонатора.

2. Проведено исследование аналитического решения семейства диссипативных солитонов модифицированного уравнения Гинзбурга-Ландау, в ходе которого была установлена зависимость формы и характеристик диссипативного солитона от единственного параметра.

3. Получен оптимальный набор параметров, позволяющий получать импульсы с максимальной энергией в волоконном лазере с пассивной синхронизацией мод на основе эффекта нелинейного вращения поляризации в зависимости от длины волокна и угла поворота пластинок поляризации.

4. Определен характер зависимости параметров импульса от длины резонатора и знака средней дисперсии в тулий-гольмиевых волоконных лазерах с дисперсионным управлением.

5. Разработан итерационный численный алгоритм, позволяющий находить периодические решения системы обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих «быструю» динамику основных характеристик солитонов в волоконном лазере с дисперсионным управлением.

Опубликованные по теме диссертации работы из списка ВАК

1. Kharenko, D.S. Highly chirped dissipative solitons as a one-parameter family of stable solutions of the cubic–quintic Ginzburg–Landau equation / D.S. Kharenko, O.V. Shtyrina, I.A. Yarutkina, E.V. Podivilov, M.P. Fedoruk, S.A. Babin // Journal of the Optical Society of America B.— 2011.— V. 28(10).— P. 2314–2319.

2. Kharenko, D.S. Generation and scaling of highly-chirped dissipative solitons in an Yb-doped fiber laser / D.S. Kharenko, O.V. Shtyrina, I.A. Yarutkina, E.V. Podivilov, M.P. Fedoruk, S.A. Babin // Laser Physics Letters.— 2012.— V. 9(9).— P. 662–668.

3. Yarutkina, I.A. Numerical modeling of fiber lasers with long and ultra-long ring cavity / I.A. Yarutkina, O.V. Shtyrina, M.P. Fedoruk, S.K. Turitsyn // Optics Express.—2013.— V. 21(10).— P. 12942–12950.

4. Яруткина, И.А. Математическое моделирование тулий-гольмиевых волоконных лазеров с дисперсионным управлением / И.А. Яруткина, О.В. Штырина // Квантовая электроника.— 2013.— Т. 43.— № 11.— С. 1019–1023.

Публикации в трудах конференций

1. Харенко, Д.С. Генерация сильночирпованных диссипативных солитонов в волоконном резонаторе без спектральных фильтров / Д.С. Харенко, С.А. Бабин, Е.В. Подивилов, О.В. Штырина, И.А. Яруткина, М.П. Федорук // Фотон-экспресс (Спецвыпуск: 3 Всероссийская конференция по волоконной оптике, г. Пермь, 12-14 октября 2011 г.).— 2011.— Т. 6.— № 94.— С. 58–59.

2. Kharenko, D.S. Highly-chirped dissipative solitons generated in the normal-dispersion fiber oscillator without spectral filtering / D.S. Kharenko, S.A. Babin, E.V. Podivilov, O.V. Shtyrina, I.A. Yarutkina, M.P. Fedoruk // Technical Digest of 20th International Laser Physics Workshop – LPHYS'11 (Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, July 10–15, 2011).— 2011.— paper 8.4.4 (on CD-ROM).

3. Харенко, Д.С. Экспериментальная проверка аналитической модели генерации сильночирпованных диссипативных солитонов в волоконном лазере / Д.С. Харенко, С.А. Бабин, Е.В. Подивилов, О.В. Штырина, И.А. Яруткина, М.П. Федорук // Материалы Российского семинара по волоконным лазерам (г. Новосибирск, 27–30 марта 2012 г.).— 2012.— С. 117–118.

4. Яруткина, И.А. Математическое моделирование длинных волоконных лазеров с кольцевым резонатором / И.А. Яруткина, О.В. Штырина, М.П. Федорук, С.К. Турицын // Фотон-экспресс (Спецвыпуск: 4 Всероссийская конференция по волоконной оптике, г. Пермь, 16–18 октября 2013).— 2013.— Т. 6.— № 110.— С. 211–212.

Государственная регистрация программ для ЭВМ

1. Яруткина И.А., Штырина О.В., Федорук М.П. Свидетельство № 2013613641 о государственной регистрации программного комплекса для моделирования лазерных систем «SALaserModel-1», М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, 2013.

2. Яруткина И.А., Штырина О.В., Федорук М.П., Скидин А.С. Свидетельство № 2013614746 о государственной регистрации программного комплекса для моделирования волоконных лазерных систем «CFiberLaser-1», М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, 2013.

Список цитируемой литературы

- [1] Wise, F.W. High-energy femtosecond fiber lasers based on pulse propagation at normal dispersion / F.W. Wise, A. Chong, W.H. Renninger // Laser Photonics Review.— 2008.— V. 2(1–2).— P. 58–73.
- [2] Agrawal, G.P. Nonlinear Fiber Optics / G.P. Agrawal.— 3rd edition. — Academic Press, 2001.
- [3] Podivilov, E. Heavily-chirped solitary pulses in the normal dispersion region: new solutions of the cubic-quintic complex Ginzburg–Landau equation / E. Podivilov, V.L. Kalashnikov // JETP Letters.— 2005.— V. 82(8).— P. 524–528.
- [4] Tang, D.Y. Mechanism of multisoliton formation and soliton energy quantization in passively mode-locked fiber lasers / D.Y. Tang, L.M. Zhao, B. Zhao, A.Q. Liu // Physics Review A.— 2005.— V. 72(4).— P. 043816–043825.
- [5] Turitsyn, S.K. Dispersion-managed solitons in fibre systems and lasers / S.K. Turitsyn, B. Bale, M.P. Fedoruk // Physics Reports.— 2012.— V. 521(4).— P. 135–203.