

На правах рукописи



Беднякова Анастасия Евгеньевна

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ  
РЕЖИМОВ ГЕНЕРАЦИИ ВОЛОКОННЫХ ВКР-ЛАЗЕРОВ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2014

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: Цветков Владимир Борисович,  
доктор физико-математических наук,  
ИОФ РАН, г. Москва,  
заведующий лаборатории  
активных сред твердотельных лазеров  
  
Денисов Владимир Иванович,  
кандидат физико-математических наук,  
ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск,  
зам. директора по научной работе

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
“Московский государственный университет  
имени М.В. Ломоносова”, г. Москва

Защита состоится «29» апреля 2014 г. в 10:15 на заседании диссертационного совета ДМ 003.046.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института 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.

Учёный секретарь  
диссертационного совета



Лебедев А.С.

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Волоконная оптика является одной из интенсивно развивающихся областей современной науки, её достижения в настоящий момент востребованы как во многих научных исследованиях, так и в практических приложениях [1]. Одним из наиболее ярких достижений волоконной оптики является создание волоконных лазеров, имеющих широкий круг различных применений, таких как волоконно-оптические линии связи, медицина, метрология, спектроскопия, промышленная обработка материалов и т.д.

Существует большое многообразие различных типов волоконных лазеров: от непрерывных лазеров до фемтосекундных импульсных лазеров, от систем с относительно низкой мощностью для сенсорных и телекоммуникационных приложений до мощных лазеров, имеющих военные и промышленные приложения [2, 3]. Постоянный прогресс в лазерных технологиях происходит благодаря достижениям в области материаловедения и улучшению понимания физических механизмов, лежащих в основе работы волоконных лазеров. Принципиальную роль здесь играют методы, направленные на описание нелинейных процессов, которые оказывают существенное влияние на свойства излучения в достаточно мощных лазерах. В частности, нелинейный эффект Керра приводит к уширению спектра излучения в непрерывных волоконных лазерах. Спектральное уширение может привести к уменьшению эффективности лазерной генерации, поэтому данный эффект является нежелательным для некоторых приложений. С другой стороны, эффект спектрального уширения имеет множество практических применений, например лежит в основе генерации суперконтинуума и служит для генерации излучения на нескольких длинах волн.

Особое внимание стоит уделить лазерам, принцип действия которых основан на нелинейном оптическом явлении в световоде — вынужденном комбинационном рассеянии (ВКР-лазеры). В настоящее время актуальной задачей является расширение спектрального диапазона генерации волоконных лазеров. Волоконные лазеры, работающие на различных длинах волн, могут применяться, например, в медицине или для накачки лазерных структур. Длины волн излучения волоконных лазеров на световодах, легированных редкоземельными элементами, не охватывают всего спектрального диапазона прозрачности световодов на основе кварцевого стекла. Поэтому для создания волоконных источников в области 1.6-1.7 мкм применяются ВКР-лазеры, которые позволяют эффективно преобразовывать лазерное излучение накачки в излучение на более низких частотах (стоксово излучение), используя явление ВКР в оптическом волокне. ВКР-лазеры и конвертеры используются для усиления сигнала в волоконно-оптических линиях связи и служат универсальными источ-

никами накачки волоконных усилителей для различных спектральных диапазонов. Также они применяются в медицине, обработке материалов, рамановской спектроскопии, системах наведения и оптической локации.

Таким образом, важной областью использования нелинейных оптических явлений является совершенствование современных и разработка перспективных оптоволоконных устройств. Исследование нелинейных оптических явлений в световоде и понимание их роли в генерации сигнала способствует дальнейшему развитию волоконных лазерных технологий. Стоит отметить, что современные волоконные лазеры являются сложными и дорогостоящими системами, состоящими из множества компонентов. Создание конкретных экспериментальных приборов требует длительного научного поиска, который зачастую нельзя реализовать в эксперименте в силу дороговизны или отсутствия необходимых компонентов, а также большого количества оптимизационных параметров. Другой проблемой является ограниченное разрешение экспериментальных измерительных приборов и отсутствие возможности напрямую измерить внутррезонаторные характеристики излучения. На этапе создания и оптимизации новых волоконных лазеров эффективным решением обозначенных проблем является использование методов математического моделирования. Математическое моделирование волоконных лазеров позволяет осуществлять объёмную оптимизацию параметров резонатора, а также выполнять детальное исследование влияния нелинейных процессов на свойства излучения. Учитывая этот факт, а также всё вышеизложенное, можно сделать вывод, что математическое моделирование нелинейных режимов генерации волоконных лазеров с различными конфигурациями резонатора и свойствами выходного излучения является сложной и актуальной задачей, требующей знания физических принципов работы лазеров.

**Цели работы.** Разработка и адаптация математических моделей, описывающих нелинейные режимы генерации волоконных лазеров с различными конфигурациями резонатора и характеристиками выходного излучения. Создание комплекса программ для моделирования распространения сигнала в волоконных лазерах с линейным и кольцевым резонатором. Исследование влияния нелинейных эффектов на спектральные и временные характеристики излучения в непрерывных лазерах на основе световодов, легированных редкоземельными элементами, и непрерывных ВКР-лазерах. Исследование влияния вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) на генерацию сигнала в мощных волоконных лазерах с синхронизацией мод.

**Объектом исследования** диссертации являются характеристики оптического сигнала в волоконном лазере и нелинейные процессы в световоде, оказывающие существенное влияние на характеристики сигнала.

**Научная новизна и значимость** изложенных в диссертационной работе результатов заключается в следующем:

1. Впервые разработан итерационный метод моделирования нелинейных режимов генерации сигнала в непрерывных лазерах на световодах, легированных редкоземельными элементами, и непрерывных ВКР-лазерах.

2. Впервые предложена и реализована модель на базе нелинейного уравнения Шрёдингера и эффективной двухуровневой модели иттербия, позволяющая исследовать распространение сигнала в непрерывных волоконных лазерах с учётом нелинейного эффекта Керра и насыщения усиления.

3. Создан комплекс программ, предназначенный для моделирования нелинейных режимов генерации сигнала в волоконных лазерах с резонатором типа Фабри-Перо и кольцевым резонатором.

4. С использованием созданных программ и алгоритмов выполнен численный анализ нелинейного уширения спектра излучения в непрерывных волоконных лазерах. Продемонстрировано, что эффект спектрального уширения может быть использован для генерации излучения в ВКР-лазере на двух длинах волн.

5. Впервые выполнено теоретическое исследование генерации диссипативных солитонов (ДС) в присутствии сильного ВКР. Продемонстрировано, что эффект ВКР не приводит к разрушению стабильной генерации ДС в волоконном лазерном резонаторе, что подтверждается результатами натурального эксперимента. С помощью математического моделирования показано, что ВКР-импульс выполняет роль спектрального фильтра, повышая стабильность ДС.

6. С помощью математического моделирования лазерной системы обнаружено существование нового класса диссипативных солитонов — рамановских диссипативных солитонов (РДС). Найдены параметры волоконного резонатора, при которых возможна генерация устойчивого РДС. Установлено, что РДС распространяется в резонаторе совместно с ДС и образует с ним когерентный двухволновой комплекс.

7. В результате численной оптимизации определены параметры новых схем ВКР-усилителей, применение которых для усиления сигнала в волоконно-оптических линиях связи позволит улучшить качество передачи сигнала, сформировать более плоский и широкий спектр усиления и уменьшить мощность источников накачки по сравнению с применением стандартных схем ВКР-усилителей.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Разработанные методы моделирования генерации сигнала в непрерывных волоконных лазерах на световодах, легированных редкоземельными элементами, и ВКР-лазерах, а также реализующий их комплекс программ,

могут быть применены для проектирования, анализа и оптимизации современных волоконных лазеров и усилителей.

Материалы диссертационной работы использовались при выполнении государственных контрактов № 11.519.11.6038 «Теоретическое и экспериментальное исследование нелинейных волоконных лазерных систем» и № 11.519.11.4001 «Разработка новых методов повышения пропускной способности линий волоконно-оптической связи путём уплотнения частотных каналов в сочетании с технологиями фильтрации нелинейных оптических искажений и использованием когерентного приёма для различных форматов модуляции сигнала при его передаче» (ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007 – 2013 годы»)

**На защиту выносятся** следующие результаты, соответствующие четырём пунктам паспорта специальности 05.13.18 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» по физико-математическим наукам:

1. Итерационный метод моделирования нелинейных режимов генерации сигнала в непрерывных лазерах на световодах, легированных редкоземельными элементами, и непрерывных ВКР-лазерах.

2. Численная модель на базе нелинейного уравнения Шрёдингера и эффективной двухуровневой модели иттербия, позволяющая исследовать распространение сигнала в непрерывных волоконных лазерах с учётом нелинейного эффекта Керра и насыщения усиления.

3. Результаты сравнительного анализа различных реализаций метода расщепления по физическим процессам для решения нелинейного уравнения Шрёдингера с насыщающимся усилением.

4. Комплекс программ, предназначенный для моделирования нелинейных режимов генерации сигнала в волоконных лазерах с резонатором типа Фабри-Перо и кольцевым резонатором.

5. Результаты численного моделирования нелинейного уширения спектра излучения в непрерывных волоконных лазерах, которые демонстрируют уменьшение эффективности лазерной генерации в стандартных схемах непрерывных лазеров в результате эффекта спектрального уширения, а также возможность использования данного эффекта для генерации излучения в ВКР-лазере на двух длинах волн.

6. Результаты моделирования генерации диссипативных солитонов (ДС) в присутствии сильного ВКР, которые демонстрируют, что эффект ВКР не приводит к разрушению стабильной генерации ДС в волоконном лазерном резонаторе, а наоборот, стабилизирует ДС в результате спектральной фильтрации.

7. Результаты математического моделирования лазерной системы, свидетельствующие о существовании нового класса диссипативных солитонов — рамановских диссипативных солитонов (РДС). Параметры воло-

конного резонатора, при которых возможна генерация устойчивого РДС и свойства РДС, образующего с ДС когерентный двухволновой комплекс.

8. Результаты оптимизации новых схем ВКР-усилителей, свидетельствующие об улучшении качества передачи сигнала в волоконно-оптических линиях связи, формировании более плоского и широкого спектра усиления сигнала и уменьшении мощности источников накачки в новых схемах по сравнению со стандартными схемами ВКР-усилителей.

**Обоснованность и достоверность** основных результатов, полученных в диссертации, основывается на согласованности результатов проведённых тестовых расчётов с экспериментальными данными, известными аналитическими решениями, а также с численными результатами, полученными другими авторами.

**Представление работы.** Основные результаты диссертации обобщались на объединённом научном семинаре ИВТ СО РАН «Информационно-вычислительные технологии (численные методы механики сплошной среды)» под руководством академика РАН Ю.И. Шокина и профессора В.М. Ковени, а также были представлены на всероссийских и международных научных конференциях: Всероссийская конференция по волоконной оптике (ВКВО-2013, Пермь, 2013); VI International Symposium “Modern problems of laser physics” (MPLP-2013, Novosibirsk, 2013); Conference on Lasers and Electro-Optics and European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC, Munich, Germany, 2011, 2013); Российский семинар по волоконным лазерам (Новосибирск, 2012); International Laser Physics Workshop (LPHYS, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2011, Prague, Czech Republic, 2013); XI всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (Красноярск, 2010, Новосибирск, 2007); Международной научная студенческая конференция (МНСК - XLVIII, XLVII, XLVI, Новосибирск, 2008-2010).

**Публикации.** По теме диссертации было опубликовано 17 работ, в том числе 6 статей в журналах, входящих в перечень ВАК в качестве изданий, рекомендуемых для опубликования основных научных результатов диссертации на соискание учёной степени кандидата и доктора наук, 11 — в трудах международных и всероссийских конференций.

**Личный вклад автора.** Проведённое в работе исследование является самостоятельным авторским исследованием. Во всех совместных работах личный вклад автора заключается в обсуждении постановок задач, создании и тестировании алгоритмов и компьютерных программ, проведении численных экспериментов с использованием разработанных программ, анализе точности и в интерпретации результатов численного моделирования. Все результаты в перечисленных публикациях, связанные с математическим моделированием волоконных лазеров, выполнением численных расчётов, анализом численных результатов, получены

автором лично.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка обозначений и сокращений и списка литературы из 134 наименований. Объём диссертации составляет 132 страницы, включая 6 таблиц и 48 рисунков.

## Содержание работы

**Во введении** к диссертации обоснована актуальность темы исследования, сформулированы основные цели и задачи диссертационной работы, перечислены положения, выносимые на защиту, а также приведено краткое содержание диссертации по главам.

**Глава 1** посвящена математическому моделированию генерации диссипативных солитонов в длинном (30—120 м) волоконном лазерном резонаторе в присутствии сильного ВКР.

**В параграфе 1.1** вводится понятие “диссипативный солитон”, обозначающее пространственно-локализованные волны в системах с усилением и потерями. Представлен краткий обзор литературы по вопросам генерации ДС в волоконных лазерах с пассивной синхронизацией мод. Далее в параграфе обоснована необходимость детального исследования влияния ВКР на генерацию ДС, которое может быть выполнено с помощью математического моделирования лазерной системы.

**В параграфе 1.2** излагается постановка задачи и описывается конфигурация экспериментальной схемы фемтосекундного волоконного лазера с кольцевым резонатором. В эксперименте было обнаружено, что распространение мощных ( $\sim 0.6$  кВт) ДС с большими длительностями ( $\sim 30$  пс) в резонаторе данного лазера происходит в присутствии сильного ВКР, при этом шумовой стоксов импульс не приводит к разрушению устойчивой генерации ДС.

**Параграф 1.3** посвящён математическим моделям и численным методам, которые применяются при моделировании генерации сигнала в волоконном лазерном резонаторе с учётом ВКР. Лазер состоит из участка волоконного световода и дискретных элементов, таких как поляризационный светоделитель и спектрально-селективный разветвитель, моделирование которых осуществляется точно на одном шаге вдоль эволюционной переменной  $z$ .

Распространение сигнала в одномодовом волоконном световоде под влиянием ВКР описывает обобщённое нелинейное уравнение Шрёдингера (ОНУШ) [4]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} + i\gamma \left( 1 + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial t} \right) \left( A(z, t) \int_0^{\infty} R(t') |A(z, t - t')|^2 dt' \right), \quad (1)$$



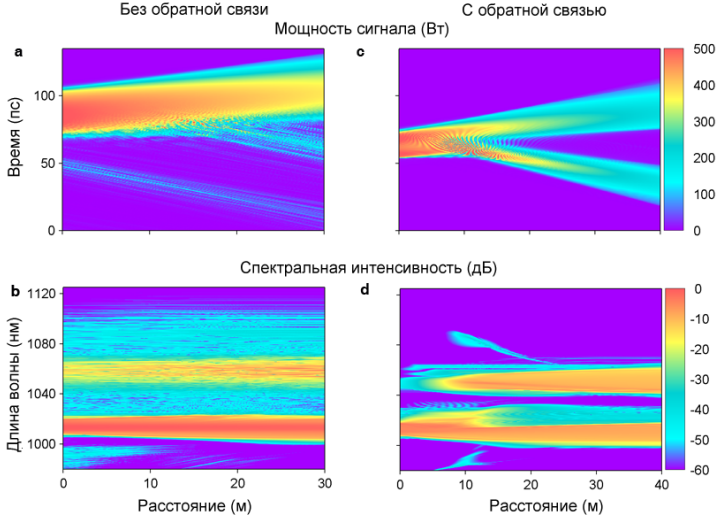


Рисунок 1 — Изменение формы и спектра сигнала при распространении в РМ-волокне в лазере без обратной связи и модифицированной схеме лазера с обратной связью.

где  $A(z, t)$  — медленно-меняющаяся огибающая электромагнитного поля,  $\beta_2$  и  $\beta_3$  — коэффициенты дисперсии второго и третьего порядков в окрестности несущей частоты  $\omega_0$ ,  $\gamma = n_2\omega_0/(cA_{eff})$  — коэффициент нелинейности с нелинейным показателем преломления  $n_2$  и эффективной площадью фундаментальной моды  $A_{eff}$ ,  $R(t)$  — функция электромагнитного отклика среды.

Численное решение уравнения (1) было найдено с помощью симметричного Фурье-метода с расщеплением по физическим процессам [5], в котором интегрирование на нелинейном шаге осуществлялось с помощью метода Рунге-Кутты второго порядка. Метод имеет второй порядок точности по пространственной переменной  $z$  и экспоненциальный порядок сходимости по временной переменной  $t$ .

**В параграфе 1.4** представлены результаты численного моделирования волоконного лазера, а также выполнено их сравнение с результатами натурных экспериментов. Продемонстрировано, что стоков импульс не разрушает ДС, а образует с ним устойчивый комплекс, выполняющая роль спектрального и временного фильтров. На рисунке 1 показана эволюция ДС в световоде и формирование стокова импульса из шума

усилителя.

Соответствующие расчётные и экспериментальные спектры ДС на длине волны 1015 нм и шумового стока импульса на длине волны 1055 нм изображены на рисунке 2 (справа). Согласие расчётных и экспериментальных измеренных спектров излучения подтверждает достоверность численных результатов. Форма сигнала на выходе из резонатора показана на рисунке 2 (слева).

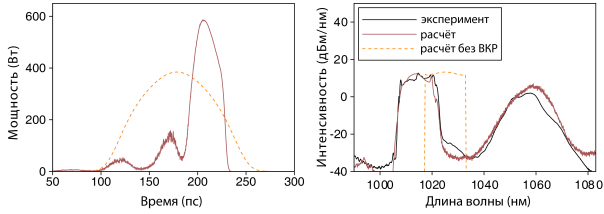


Рисунок 2 — Форма и спектр сигнала на выходе из резонатора

**Параграф 1.5** посвящён исследованию модифицированной схемы волоконного лазера, в которой реализуется слабая обратная связь для стока импульса. С помощью математического моделирования лазерной системы теоретически предсказано существование нового класса диссипативных солитонов — рамановских диссипативных солитонов (РДС). На основании результатов моделирования были проведены натурные эксперименты, подтвердившие существование нового теоретически предсказанного класса ДС. На рисунке 1 (справа) показана эволюция сигнала внутри световода в модифицированной схеме лазера. РДС распространяется в резонаторе совместно с ДС и образует с ним когерентный двухволновой комплекс. Спектры излучения на выходе из резонатора в расчёте и эксперименте приведены на рисунке 3.

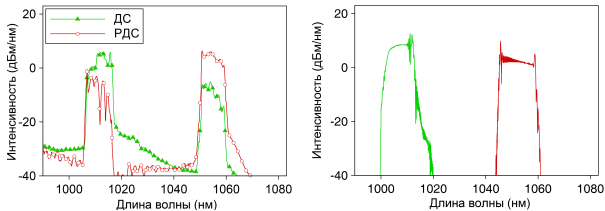


Рисунок 3 — Спектры излучения на выходе из резонатора в эксперименте (слева) и расчёте (справа)

**В главе 2** выполнено исследование нелинейных режимов генерации непрерывных волоконных лазеров с резонатором типа Фабри-Перо.

**В параграфе 2.1** перечислены особенности сигнала в непрерывных волоконных лазерах, которые необходимо учитывать при моделировании лазерной системы. Как правило, для описания мощностных характеристик сигнала в непрерывных волоконных лазерах используют квази-монохроматические модели, в которых пренебрегается эволюцией фазы оптического поля и временной динамикой излучения. Однако многие современные непрерывные лазеры высокой мощности генерируют выходное излучение, амплитуда и фаза которого испытывают случайные изменения во времени. Также в достаточно мощных лазерах на распространение сигнала в резонаторе оказывают влияние нелинейные эффекты, результат воздействия которых на сигнал не учитывается в стандартных квазимонохроматических моделях.

**В параграфе 2.2** представлены результаты экспериментального исследования характеристик сигнала в непрерывном лазере, активный световод которого легирован ионами иттербия (рисунок 4). По результатам натуральных экспериментов были определены основные свойства лазера и генерируемого излучения, которые должна описывать математическая модель, — это эффективность лазерной генерации, истощение волны накачки в волоконном резонаторе, нелинейное спектральное уширение и форма спектра генерируемого излучения.

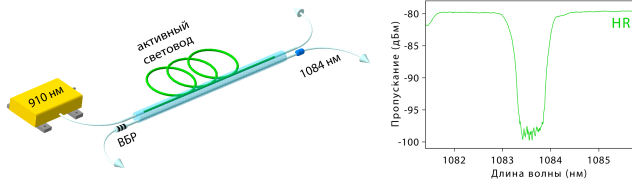


Рисунок 4 — Схема непрерывного волоконного лазера

**Параграф 2.3** посвящён построению и реализации численной модели, позволяющей исследовать свойства непрерывного сигнала, распространяющегося в резонаторе волоконного лазера под влиянием нелинейных эффектов.

Ключевым моментом при моделировании непрерывных лазеров с резонатором Фабри-Перо является корректное описание взаимодействия между волнами, которые отражаются от зеркал и распространяются в резонаторе в противоположных направлениях. Для описания распространения встречных волн в лазере с резонатором типа Фабри-Перо, изобра-

жённом на рисунке 4, в работе предложена итерационная модель:

$$\frac{\partial A^{+(n)}}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A^{+(n)}}{\partial t} + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A^{+(n)}}{\partial t^2} - i\gamma \left( |A^{+(n)}|^2 + 2|A^{-(n-1)}|^2 \right) A^+ = \frac{g(A^{+(n)}, A^{-(n-1)}, P_p^{+(n)})}{2} A^{+(n)} - \frac{\alpha}{2} A^{+(n)} \quad (2)$$

$$-\frac{\partial A^{-(n)}}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A^{-(n)}}{\partial t} + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A^{-(n)}}{\partial t^2} - i\gamma \left( |A^{-(n)}|^2 + 2|A^{+(n)}|^2 \right) A^- = \frac{g(A^{+(n)}, A^{-(n)}, P_p^{+(n)})}{2} A^{-(n)} - \frac{\alpha}{2} A^{-(n)} \quad (3)$$

$$\frac{\partial P_p^{+(n)}}{\partial z} = g_p(A^{+(n)}, A^{-(n-1)}, P_p^{+(n)}) P_p^{+(n)} - \alpha_p P_p^{+(n)}, \quad (4)$$

где верхние индексы “+” и “-” обозначают волны, распространяющиеся в прямом и обратном направлении, индекс “n” обозначает номер полного обхода сигналом резонатора,  $P_p$  – мощность накачки, эволюционная переменная  $z$  изменяется от 0 до  $2L \times N$ . Коэффициенты усиления  $g(A^+(z, t), A^-(z, t), P_p(z))$  и  $g_p(A^+(z, t), A^-(z, t), P_p(z))$  вычисляются из двухуровневой модели иттербия.

Воздействие зеркал на амплитуду сигнала в точках с координатами  $z = (2n)L$  и  $z = (2n + 1)L$ ,  $n = 0, \dots, N - 1/2$ , описывают уравнения:

$$\tilde{A}^{+(n)}(2L, \omega) = \sqrt{R_L(\omega)} \tilde{A}^{-(n-1)}(2L, \omega) \quad (5)$$

$$\tilde{A}^{-(n)}(L, \omega) = \sqrt{R_R(\omega)} \tilde{A}^{+(n)}(L, \omega) \quad (6)$$

Интегрирование уравнений вдоль эволюционной переменной  $z$  осуществляется итерационным образом: на каждом проходе сигнала вдоль резонатора интегрируем уравнения для волн сигнала  $A^+(z, t)$  и накачки  $P^+(z)$ , бегущих вперёд, используя уже известное распределение поля  $A^-(z, t)$ , вычисленное на предыдущем проходе сигнала вдоль резонатора. Затем аналогичным образом вычисляем  $A^-(z, t)$ , используя уже известные значения полей  $A^+(z, t)$  и  $P^+(z)$ . Для установления решения необходимо выполнить  $10^2 - 10^3$  обходов резонатора, в зависимости от мощности накачки.

Поиск численного решения уравнений (2)-(4) осуществляется с помощью Фурье-метода с расщеплением по физическим процессам. В параграфе выполнен сравнительный анализ различных реализаций Фурье-метода расщепления по физическим процессам для решения нелинейного уравнения Шрёдингера с насыщающимся усилением.

**В параграфе 2.4** представлены основные результаты численного моделирования генерации сигнала в непрерывном иттербиевом лазере, а также выполнено их сравнение с результатами натурального эксперимента.

На рисунке 5 изображены экспериментальный и расчётный графики зависимости выходной мощности непрерывного иттербиевого лазера от мощности накачки.

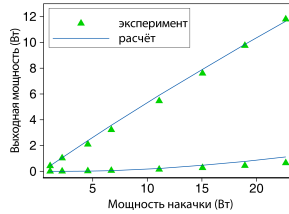


Рисунок 5 — Мощность выходного излучения в расчёте и эксперименте

В параграфе 2.5 с помощью разработанной математической модели выполнено теоретическое исследование спектральных характеристик и временной динамики излучения узкополосного иттербиевого волоконного лазера. Экспериментальные и расчётные спектры согласуются во всём мощностном диапазоне квази-непрерывного лазерного излучения (рисунок 6). Спектр на выходе из резонатора имеет форму гиперболического секанса, ширина спектра излучения линейно растёт с ростом мощности накачки под влиянием фазовой самомодуляции сигнала (ФСМ).

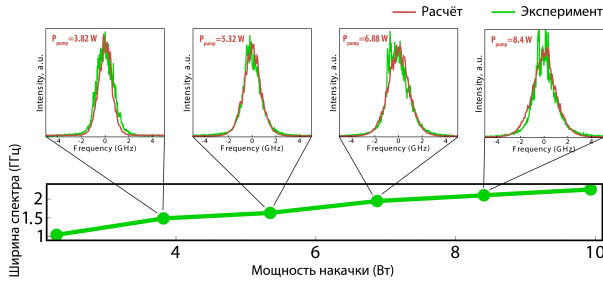


Рисунок 6 — Спектры выходного излучения в расчёте и эксперименте

**Глава 3** посвящена численному моделированию генерации сигнала в волоконных ВКР-лазерах на основе двух моделей: стандартной квазимонохроматической модели и модели на базе нелинейного уравнения Шрёдингера.

В параграфе 3.1 приведён краткий обзор основных типов волоконных ВКР-лазеров, а также перечислены их области применения. Актуальность темы исследования, выполненного в данной главе, связана с важностью подобных лазерных систем для ряда применений и их широким практическим использованием.

В параграфе 3.2 излагается постановка задачи и описывается конфигурация стандартного ВКР-лазера с числом каскадов  $N$  (рисунок 7). Лазерный резонатор состоит из волоконного световода и набора брэгговских решёток, записанных на длинах волн, соответствующих стоксовым сдвигам в материале световода.

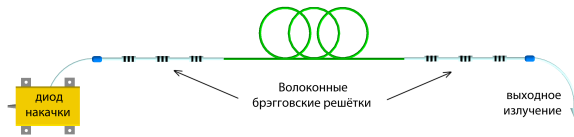


Рисунок 7 — Схема  $N$ -каскадного ВКР-лазера

Далее в параграфе приводится описание математических моделей, которые применяются для исследования ВКР-генерации в волоконном световоде. Стандартная квазимонохроматическая модель представляет собой систему балансных уравнений на среднюю мощность с граничными условиями, описывающими отражение от волоконных брэгговских решёток и ввод накачки в резонатор. Модель на базе нелинейного уравнения Шрёдингера представляет собой систему связанных НУШ с граничными условиями и описывает распространение сигнала в нелинейной среде с дисперсией. Интегрирование системы НУШ вдоль эволюционной переменной  $z$  осуществляется итерационным способом, описание которого приведено в Главе 2.

Параграф 3.3 посвящён моделированию оригинальной схемы волоконного ВКР-лазера, генерирующего излучения на двух длинах волн. Генерация сигнала в рассматриваемом лазере становится возможной благодаря эффекту нелинейного спектрального уширения, поэтому квазимонохроматические модели неприменимы для исследования характеристик сигнала. Для описания нелинейной динамики излучения внутри резонатора применяется итерационная модель на базе НУШ. Модель описывает преобразование излучения накачки в стоксово излучение в волоконном лазерном резонаторе, нелинейное спектральное уширение в результате четырёхволнового взаимодействия между продольными модами, а также взаимодействие полей, распространяющихся в противоположных направлениях, под влиянием эффектов ВКР и ФСМ.

На рис. 8 изображены расчётные (справа) и экспериментальные (слева) спектры выходного излучения. На выходе из резонатора наблюдается излучение на двух длинах волн с расстоянием между максимумами около 0.5 нм. При распространении сигнала вдоль волоконного световода происходит уширение его спектра, в результате часть излучения покидает резонатор на ВБР, формируя двухволновой спектр выходного излучения.

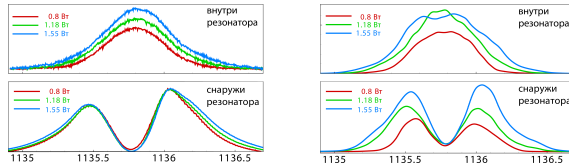


Рисунок 8 — Спектры выходного излучения в расчёте и эксперименте

**В параграфе 3.4** выполнено моделирование непрерывного двухкаскадного ВКР-лазера с выходным излучением в области 1265 нм, активным световодом для которого служит стандартное телекоммуникационное волокно. Особенностью схемы лазера является отсутствие брэгговских решеток на выходе из резонатора, что позволяет устранить неопределенность, связанную с потерями энергии в результате спектрального уширения сигнала. Для анализа эффективности лазерной генерации сигнала применима стандартная квазимонохроматическая модель.

**Глава 4** посвящена оптимизации новых схем ВКР-усилителей, которые могут применяться для усиления сигнала в современных волоконно-оптических линиях связи.

**В параграфе 4.2** выполнено теоретическое исследование схемы с распределённым рамановским усилением второго порядка. Отличительной особенностью схемы усилителя является наличие дополнительной пары волоконных брэгговских решёток внутри резонатора, что позволяет эффективнее использовать излучение накачки. С помощью математического моделирования продемонстрирована возможность уменьшения энергозатрат в такой системе более чем на 50% при сохранении высокого качества передачи сигнала.

**В параграфе 4.3** предложена гибридная схема рамановского усиления, идея которой заключается в совместном использовании источников накачки первого и второго порядков. С помощью численного моделирования и оптимизации лазерной системы показано, что предложенная схема позволяет получить широкий и плоский спектр усиления, а также существенно уменьшить колебания средней мощности сигнала при его

распространении вдоль волоконного световода по сравнению со стандартными схемами ВКР-усилителей. Графики зависимости мощности сигнала от координаты вдоль световода в спектральном окне от 1520 нм до 1594 нм, соответствующие трём различным конфигурациям ВКР-усилителей, представлены на рисунке 9. Гибридная схема для распределённого ВКР-усиления (рисунок 9, нижний график) демонстрирует наименьшие колебания амплитуды сигнала в двумерной области размером 60 км × 80 нм.

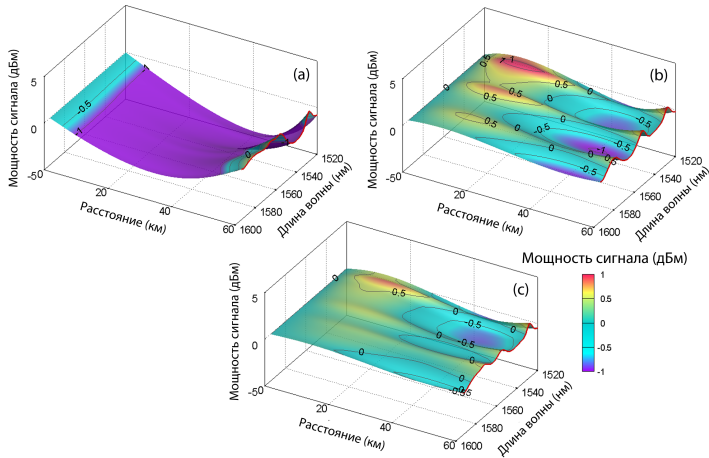


Рисунок 9 — Зависимость мощности сигнала от координаты вдоль световода и длины волны. Сравнение схем распределённого рамановского усиления: схемы с встречной накачкой первого порядка (а), схемы с двунаправленной накачкой первого порядка (б) и гибридной схемы с двунаправленной накачкой (с).

**В заключении** сформулированы основные результаты работы:

1. Разработан итерационный метод моделирования нелинейных режимов генерации сигнала в непрерывных лазерах на световодах, легированных редкоземельными элементами, и непрерывных ВКР-лазерах.
2. Построена численная модель на базе нелинейного уравнения Шрёдингера и эффективной двухуровневой модели иттербия, позволяющая исследовать распространение сигнала в непрерывных волоконных лазерах с учётом нелинейного эффекта Керра и насыщения усиления. Выполнен сравнительный анализ различных реализаций метода расщепления по физическим процессам для решения нелинейного уравнения Шрёдингера с насыщающимся усилением.



3. Создан комплекс программ, предназначенный для моделирования нелинейных режимов генерации сигнала в волоконных лазерах с резонатором типа Фабри-Перо и кольцевым резонатором.

4. С использованием созданных программ и алгоритмов выполнен численный анализ нелинейного уширения спектра излучения в непрерывных волоконных лазерах. Продемонстрировано, что эффект спектрального уширения приводит к уменьшению эффективности лазерной генерации в стандартных схемах непрерывных лазеров, а также может быть использован для генерации излучения в ВКР-лазере на двух длинах волн.

5. Выполнено теоретическое исследование генерации диссипативных солитонов (ДС) в присутствии сильного ВКР. Продемонстрировано, что эффект ВКР не приводит к разрушению стабильной генерации ДС в волоконном лазерном резонаторе, что подтверждается результатами натурального эксперимента. С помощью математического моделирования показано, что ВКР-импульс выполняет роль спектрального фильтра, повышая стабильность ДС.

6. С помощью математического моделирования лазерной системы обнаружено существование нового класса диссипативных солитонов — рамановских диссипативных солитонов (РДС). Найдены параметры волоконного резонатора, при которых возможна генерация устойчивого РДС. Установлено, что РДС распространяется в резонаторе совместно с ДС и образует с ним когерентный двухволновой комплекс. На основании результатов численного моделирования реализованы натурные эксперименты, в которых подтвердилось существование нового класса диссипативных солитонов.

7. В результате численной оптимизации определены параметры новых схем ВКР-усилителей, применение которых для усиления сигнала в волоконно-оптических линиях связи позволит улучшить качество передачи сигнала, сформировать более плоский и широкий спектр усиления и уменьшить мощность источников накачки по сравнению с применением стандартных схем ВКР-усилителей.

### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК**

1. Bednyakova A.E., Fedoruk M.P., Harper P., Turitsyn S.K. Hybrid gain-flattened and reduced power excursion scheme for distributed Raman amplification // Optics Express.-2013.-V. 21(24).-P.29140-29144.

2. Bednyakova A.E., Babin S.A., Kharenko D. et al. Evolution of dissipative solitons in a fiber laser oscillator in the presence of strong Raman scattering // Optics Express.-2013.- V.21(16).-P.20556-20564.

3. Bednyakova A.E., Gorbunov O.A., Politko M.O. et al. Generation dynamics of the narrowband Yb-doped fiber laser // Optics Express.-2013.-V. 21(7).-P.8177-8182.

4. Bednyakova A.E., Fedoruk M.P. Spatially Cascaded Cavities for Power Saving Distributed Raman Amplification // Optics Communications.-2012.-V.291.-P. 274–278.

5. Bednyakova A.E., Fedoruk M.P., Kurkov A.S. et al. Raman Laser Based on a Fiber with Variable Mode Structure // Laser Physics.-2011.-V. 21(2).-P.290–293.

6. Turitsyn S.K., Bednyakova A.E., Fedoruk M.P. et al. Modeling of CW Yb-doped fiber lasers with highly nonlinear cavity dynamics // Optics Express.-2011.-V. 19(9).-P.8394–8405.

### **Публикации в трудах международных и всероссийских конференций**

1. Беднякова А.Е., Федорук М.П., Турицын С.К. Гибридная схема для распределённого рамановского усиления в волоконно-оптических линиях связи // Всероссийская конференция по волоконной оптике (ВКВО-2013), Пермь.-2013.-A10-3.

2. Kharenko D.S., Babin S.A., Podivilov E.V., Bednyakova A.E. et al. Influence of the Raman effect on formation and scaling of dissipative solitons in a fiber laser cavity // Proc. of the VI International Symposium “Modern problems of laser physics” (MPLP 2013), Novosibirsk.–2013.–B15.

3. Babin S.A., Podivilov E.V., Kharenko D.S., Bednyakova A.E., Fedoruk M.P. et al. Formation of a chirped dissipative soliton – Raman pulse complex in a fiber laser oscillator // Proc. of the 22th International Laser Physics Workshop (LPHYS'13), Prague, Czech Republic.–2013-P.53.

4. Bednyakova A.E., Fedoruk M.P., Podivilov E.V., Kharenko D.S. et al. Simulation of Dissipative Solitons in a Fiber Laser Oscillator at Presence of Strong Raman Scattering // Proc. of the Conference on Lasers and Electro-Optics and 13th European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC 2013), Munich, Germany.–2013.–CF/IE-P.8.

5. Bednyakova A.E., Gorbunov O.A., Politko M.O. et al. Temporal and Statistical Properties of the Ytterbium Doped Fiber Laser // Proc. of the Conference on Lasers and Electro-Optics and 12th European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC 2013), Munich, Germany.–2013.–CJ-P.10.

6. Беднякова А.Е., Турицын С.К., Федорук М.П., Фотиади А.А. Анализ эффективных рамановских источников с импульсной накачкой // Материалы российского семинара по волоконным лазерам, Новосибирск.–2012.–С.165.

7. Bednyakova A.E., Fedoruk M.P., Turitsyn S.K., Kurkov A.S., Medvedkov O.I. On two-wavelength Raman fibre laser based on spectral broadening // Proc. of the Conference on Lasers and Electro-Optics and 12th European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC 2011), Munich, Germany.–2011.–CJ.P.7.

8. Bednyakova A.E., Fedoruk M.P., Kurkov A.S., Turitsyn S.K., Medvedkov O.I. Modeling of CW Raman lasers with highly nonlinear cavity dynamic // Proc. of the 20th International Laser Physics Workshop (LPHYS'11), Sarajevo, Bosnia and Herzegovina.–2011.–P.20.

9. Беднякова А.Е. Математическое моделирование и оптимизация выходных характеристик волоконного ВКР-лазера // Сб. трудов XI все-российской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям, Красноярск.– 2010.–С.18.

10. Беднякова А.Е. Спектральное уширение и потери энергии в волоконных ВКР-лазерах // Сб. трудов XLVIII Международной научной студенческой конференции (МНСК-XLVIII),Новосибирск.–2010.–С.236-237.

11. Беднякова А.Е. Математическое моделирование волоконного лазера с пассивной синхронизацией мод // Сб. трудов XLVI Международной научной студенческой конференции (МНСК- XLVI), Новосибирск.–2008.–С. 116-117.

## Список цитируемой литературы

- [1] Дианов, Е.М. Волоконная оптика: сорок лет спустя / Е.М. Дианов // Квантовая электроника. – 2010. – Т.40. – № 1. – С. 1-6.
- [2] Курков, А.С. Непрерывные волоконные лазеры средней мощности / А. С. Курков, Е. М. Дианов // Квантовая Электроника. – 2004. – Т. 34. – № 10. – С. 881–900.
- [3] Bale, B.G. Modeling and Technologies of Ultrafast Fiber Lasers / B.G. Bale, O.G. Okhotnikov, S.K. Turitsyn // in Fiber Lasers (ed O. G. Okhotnikov) – Weinheim:Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012.
- [4] Агравал, Г. Нелинейная волоконная оптика / Г. Агравал. – Москва:Мир, 1996. – 324 с.
- [5] Hardin, R.H. Application of the split-step Fourier method to the numerical solution of nonlinear and variable coefficient wave equations / R.H. Hardin, F.D. Tappert // SIAM Review Chronicle. – 1973. – V.15. – P. 423.

Беднякова Анастасия Евгеньевна

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ  
РЕЖИМОВ ГЕНЕРАЦИИ ВОЛОКОННЫХ ВКР-ЛАЗЕРОВ

Автореферат диссертации  
на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

---

Подписано в печать _____	Формат 60 x 84 1/16
Печать офсетная	Усл. печ. л. 1.0
Заказ №	Тираж экз.

---

Отпечатано ЗАО РИЦ «Прайс-курьер»  
ул. Кутателадзе, 4г, т. 330-7202