

На правах рукописи

Чуркин Дмитрий Владимирович

**Стохастические режимы генерации непрерывного
волоконного ВКР-лазера**

01.04.05 “Оптика”

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Новосибирск — 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном
учреждении науки Институте автоматики и электрометрии
Сибирского отделения
Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН)

Официальные оппоненты: член-корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук
Буфетов Игорь Алексеевич
Научный центр волоконной оптики
Российской академии наук,

доктор физико-математических наук,
профессор
Жёлтиков Алексей Михайлович
Физический факультет Московского
государственного университета им.
М.В. Ломоносова,

доктор физико-математических наук,
Кобцев Сергей Михайлович
Новосибирский государственный
университет,

Ведущая организация Институт общей физики им. А.М. Про-
хорова Российской академии наук

Защита состоится «___» _____ 2015 г. в 10⁰⁰ часов на засе-
дании диссертационного совета Д 003.005.01 при Федеральном государ-
ственном бюджетном учреждении науки Институте автоматики и элек-
трометрии СО РАН по адресу: 630090, Новосибирск, проспект Акаде-
мика Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИАиЭ
СО РАН.

Автореферат разослан «___» _____ 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
д.ф.-м.н.

Ильичёв Л.В.

Общая характеристика работы

Актуальность

Волоконные ВКР-лазеры относятся к перспективным источникам лазерного излучения [1]. В ВКР-лазерах за счет эффекта вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) происходит преобразование излучения накачки в излучение стоксовых компонент [2]. Важной для применений является возможность генерации в широком диапазоне длин волн: в области 1.3 мкм [3] и 1.5 мкм [4], что позволяет использовать такие лазеры для накачки распределенных телекоммуникационных усилителей. Использование различных типов волокон позволяет существенно расширить их область достижимых длин волн до области более 2 мкм [5]. Был создан широкий набор различных волоконных ВКР-лазеров с различными техническими характеристиками, а именно многоволновые лазеры [6, 7], лазеры видимого диапазона [8, 9], лазеры для медицинских применений [10, 11].

К моменту начала наших исследований основной фокус работ был направлен на разработку новых конфигураций волоконных ВКР-лазеров с различными техническими характеристиками. Спектральные характеристики излучения волоконного ВКР-лазера в целом оставались без внимания. Лишь в работе [12] приводится феноменологическая модель формы спектра генерации, которая, однако, содержит не обоснованные предположения.

Более того, в литературе совершенно не рассматривались вопросы по достижению новых фундаментальных режимов генерации в волоконных ВКР-лазерах (за пределами генерации на новых длинах волн, что не затрагивает фундаментальных характеристик излучения). Действительно, волоконный ВКР-лазер имеет достаточно длинный резонатор, в котором могут быть существенны процессы дефазировки различных спектральных компонент ввиду достаточной суммарной нелинейности. Исходя из того, что спектр генерации волоконного ВКР-лазера достаточно широк (порядка 1 нм) и должен состоять из большого количества близко расположенных различных продольных мод (отметим, что доказательства существования различных продольных мод в длинных волоконных резонаторах также не было до начала данной работы), временная динамика его излучения должна иметь стохастическую природу на масштабах времени, обратно пропорциональных ширине спектра излучения. Временная динамика излучения таких лазеров также не изучалась. Лишь в работе [13] упоминается об измерении автокорреляционной функции интенсивности волоконного ВКР-лазера, ширина ко-

торой характеризуют типичную длительность флуктуаций излучения. Очевидно, что никак не рассматривались и вопросы создания новых режимов генерации с подавленными флуктуациями интенсивности и суженным спектром излучения, так как не известны были механизмы формирования самого спектра и механизмы возникновения флуктуаций интенсивности.

Далее, в последние годы резко возрос интерес к оптическим системам, в которых наблюдаются эффекты, изначально присущие системам совсем другого рода, например гидродинамическим системам. Так, в широко известной работе 2007 года [14] было продемонстрировано наблюдение так называемых оптических экстремальных волн, схожих с экстремальными волнами, возникающими на поверхности жидкости, что вызвало большой резонанс в научном сообществе [15]. Начиная с указанной работы, наблюдается взрывной интерес исследователей к данной области. Актуальные недавние обзоры области можно найти в работах [16–18]. Механизмы генерации экстремальных событий в различных системах могут сильно различаться, см., например, обзор [19]. Однако в целом возникающие аналогии между оптикой и гидродинамикой оказываются плодотворны и позволяют, с одной стороны, подходить к изучению оптических систем с помощью методов и подходов, развитых в гидродинамике, см, например, работы [20–22]. С другой стороны, некоторые актуальные вопросы гидродинамики могут быть адресованы в настольных волоконно-оптических экспериментах, которые достаточно просты по сравнению с гидродинамическими экспериментами, [23–25]. В целом, демонстрация новых волоконно-оптических систем, в которых можно было бы изучать классические вопросы, стоящие перед исследователями в области гидродинамики, представляет несомненный интерес.

Наконец, к моменту начала наших исследований были реализованы многочисленные конфигурации волоконных ВКР-лазеры, абсолютно все объединяющиеся тем, что лазер имеет стандартную схему, содержащую два ключевых элемента: усиливающая среда и оптический резонатор, который обеспечивает положительную обратную связь. Существует принципиально другая концепция генерации света в активной рассеивающей среде без каких-либо зеркал, образующих резонатор [26]. Тип лазеров, в которых отсутствуют определенные зеркала резонатора, и которые работают за счет многократных отражений излучения в сильно рассеивающей среде. Данная концепция не привлекала особого внимания, пока в работе [27] не была продемонстрирована генерация в красителе Родамин 640, в который были добавлены сильно

рассеивающие микрочастицы TiO_2 , обеспечивающие случайную обратную связь. Это позволило говорить о создании случайного лазера [28] и послужило отправной точкой к взрывному интересу исследователей к области лазерной генерации в случайных сильно рассеивающих средах и демонстрации огромного количества различных типов случайных лазеров, основанных на использовании самых различных сред, см., например, книгу [29] и обзор [30]. В целом, демонстрация новых типов случайных лазеров неизменно вызывает широкий интерес исследователей, и достижение новых режимов генерации волоконного ВКР-лазера, не имеющего резонатора фиксированной длины, в котором генерация осуществлялась бы за счет случайной обратной связи являлось на момент начала нами работ в данном направлении действительно актуальным.

Таким образом, поставленные вопросы по демонстрации и описанию различных стохастических режимов генерации непрерывных волоконных ВКР-лазеров являются актуальными и требуют проведения соответствующих экспериментальных исследований.

Цель работы

Основная цель настоящей диссертационной работы — получение и описание новых режимов генерации непрерывных волоконных ВКР-лазеров, связанных со случайными процессами дефазировки мод в длинных резонаторах и генерации за счёт случайной распределённой обратной связи в отсутствие резонатора фиксированной длины.

Задачи работы

1. Определение механизмов, ответственных за формирование формы спектра генерации непрерывного волоконного ВКР-лазера, излучающего в режиме одновременной генерации большого числа различных продольных мод со стохастической динамикой, и описание закона уширения спектра с ростом мощности в данном режиме.
2. Реализация ламинарного режима генерации непрерывного волоконного ВКР-лазера, обнаружение ламинарно-турбулентного перехода в излучении такого лазера и определение механизма такого перехода.
3. Достижение непрерывного режима генерации в волоконном ВКР-лазере за счёт случайной распределённой обратной связью на основе рэлеевского рассеяния.

4. Исследование основных генерационных характеристик непрерывного волоконного ВКР-лазера со случайной распределённой обратной связью и описание механизмов формирования его спектра генерации.
5. Исследование продольного распределения мощности генерации в непрерывном волоконном ВКР-лазере со случайной распределённой обратной связью и использование особенностей данного распределения для достижения новых режимов генерации с заданными спектральными характеристиками, а именно узкополосной и многоволновой генерации.
6. Определение роли случайной распределённой обратной связи за счет рэлеевского рассеяния на формирование безмодового спектра генерации в непрерывных волоконных ВКР-лазерах различной длины.

Научная новизна

Полученные в диссертационной работе экспериментальные результаты позволили построить достаточно полную картину новых стохастических режимов генерации волоконных непрерывных волоконных ВКР-лазеров. В частности, впервые выявлена модовая структура излучения в длинных волоконных лазерах впервые экспериментально показано, что внутрирезонаторный спектр генерации в случае большой дисперсии имеет форму гиперболического секанса, и описан закон уширения спектра. Показано, что совместная динамика большого количества продольных мод приводит к стохастической, турбулентной динамике полной интенсивности излучения.

Далее, впервые экспериментально реализован ламинарный режим генерации в излучении многочастотных непрерывных волоконных ВКР-лазеров и впервые экспериментально обнаружен переход из ламинарного в турбулентный режим генерации в излучении таких лазеров и описан механизм такого перехода.

Кроме того, впервые получена генерация в волоконном ВКР-лазере со случайной распределенной обратной связью за счет рэлеевского рассеяния на микронеоднородностях показателя преломления сердцевинны оптического волокна. Предложены, описаны и реализованы основные конфигурации лазеров такого типа. Кроме того, экспериментально определена форма спектра генерации такого лазера в виде гиперболического секанса в случае малой дисперсии и закон его уширения, и по-

казано, что они согласуются с предсказаниями в рамках нелинейной кинетической теории формирования спектра. На основе выявленных закономерностей продольного распределения мощности генерации в таких лазерах впервые реализованы новые режимы генерации таких лазеров с заданными спектральными свойствами, а именно продемонстрирована узкополосная и многоволновая генерация.

Наконец, впервые экспериментально продемонстрировано, что существует предел длины линейного резонатора волоконного ВКР-лазера, и что данный предел связан с существованием случайной распределенной обратной связи, которая определяет безмодовую структуру излучения при длине резонатора больше данного предела.

Практическая значимость

Практическая ценность полученных результатов определяется возможностью использованию волоконных ВКР-лазеров, излучающих в различных режимах генерации, в широком классе применений, в том числе в распределённых линиях телекоммуникационной передачи данных, распределённых сенсорных системах.

Защищаемые положения

1. Спектр излучения волоконного многочастотного непрерывного ВКР-лазера имеет форму гиперболического секанса в случае большой по сравнению с нелинейностью дисперсией и стохастический характер временной динамики, определяемые многочисленными четырехволновыми взаимодействиями различных флуктуирующих по амплитуде и фазе продольных мод. Режим генерации большого количества мод со случайной фазой и амплитудой может быть описан моделью слабой волновой турбулентности.
2. В многочастотном излучении непрерывных волоконных ВКР-лазеров существует ламинарный режим генерации с узким спектром с коррелированными модами и подавленными флуктуациями интенсивности излучения. Переход от ламинарного к турбулентному режиму осуществляется пороговым образом за счет кластеризации темных и серых солитонов.
3. Случайная распределённая обратная связь за счет рэлеевского рассеяния на микро-неоднородностях показателя преломления

сердцевины оптического волокна может обеспечивать непрерывный режим генерации в длинных оптических волокнах при наличии ВКР-усиления.

4. Волоконный ВКР-лазер с широкополосной случайной распределённой обратной связью имеет спектр, имеющий форму в виде гиперболического секанса в случае малой дисперсии и стохастическую временную динамику.
5. Сильная неоднородность продольного распределения мощности генерации в волоконном ВКР-лазере со случайной распределённой обратной связью позволяет получать новые режимы мощной генерации с помощью маломощных спектральных элементов, помещённых в точку минимума мощности, а именно узкополосный и многоволновый режимы.
6. При увеличении длины резонатора волоконного ВКР-лазера выше некоторого предела влияние случайной распределённой обратной связи за счет рэлеевского рассеяния становится сравнимым с обратной связью от точечных отражателей и определяет режим генерации такого лазера.

Апробация работы

Результаты работы были доложены на следующих 23 конференциях: Optical Fiber Communication Conference (Los Angeles, USA, 2004); International conference on Laser Optics (St. Petersburg, 2006); Всероссийская конференция по волоконной оптике (Пермь, 2007); Российский семинар по волоконным лазерам (Новосибирск, 2007); International Laser Physics Workshop (Leon, Mexico, 2007); International conference on Laser Optics (St. Petersburg, 2008); Photonics West (San Jose, USA, 2008); European Conference on Lasers and Electro-Optics (Munich, Germany, 2009); International conference on Laser Optics (St. Petersburg, 2010); Advanced Workshop on Anderson Localization, Nonlinearity and Turbulence: a Cross-Fertilization (Trieste, Italy, 2010); European Conference Optical Communication (Torino, Italy, 2010); Photonics West (San Francisco, USA, 2011); European Conference on Lasers and Electro-Optics (Munich, Germany, 2011); Optical Fiber Communication Conference (Los Angeles, USA, 2012); Nonlinear Photonics Topical Meeting (Colorado Springs, USA, 2012); SIAM Conference on Nonlinear Waves and Coherent Structures (Seattle, USA, 2012); Российский семинар по волоконным лазерам

(Новосибирск, 2012); European Conference and Exhibition on Optical Communication (Amsterdam, Netherland, 2012); Annual Symposium of the IEEE Photonics Society Benelux Chapter, (Mons, Belgium, 2012); Advanced Workshop on Nonlinear Photonics, Disorder and Wave Turbulence (Trieste, Italy, 2013); SPIE Photonics Europe (Brussels, Belgium, 2014); EuroMech EC565 Colloquium on Subcritical transition to turbulence (Cargèse, France, 2014); International Workshop “Rogue waves, dissipative solitons, plasmonics, supercontinuum and special fibers” (Barcelona, Spain, 2014).

Личный вклад автора

Диссертационная работа проводилась в лаборатории волоконной оптики ИАиЭ СО РАН и Астонском университете (г. Бирмингем, Англия) совместно с сотрудниками указанных организаций. Все указанные в диссертации результаты получены автором лично или под его научным руководством, а вклад в планирование и проведение экспериментов был определяющим.

Публикации

Основные результаты работы по тематике диссертации опубликованы в 19 статьях в рецензируемых журналах, определённых Высшей аттестационной комиссией, и 1 главе в коллективной монографии [A1–A20], а также в 27 статьях в сборниках трудов международных конференций [A21–A47]. Приоритетная работа по демонстрации ламинарной генерации и ламинарно-турбулентного перехода в волоконном лазере [A12], а также работа по демонстрации принципа и реализации волоконного лазера со случайной распределённой обратной связью [A14] опубликованы в журнале *Nature Photonics*. В список работ также входит глава в монографии по оптической турбулентности [A11] и обзор области случайных волоконных лазеров в журнале *Physics Reports* [A17].

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы, а также списка обозначений и сокращений. Диссертация изложена на 269 страницах текста, содержит 101 рисунок и 1 таблицу. Список литературы содержит 399 наименований.

Основное содержание работы

Во введении описана область науки, в которой проводились исследования, приведен обзор публикаций, подтверждающий актуальность работы, сформулированы цели и задачи работы, а также приведено краткое содержание диссертации и сформулированы защищаемые положения.

Первая глава посвящена описанию базисных свойств волоконных ВКР-лазеров и методам характеристики временной стохастической временной динамики излучения волоконных ВКР-лазеров. Она имеет в основном методическое значение, однако содержит перечень оригинальных результатов. В параграфе 1.1 указаны основные свойства ВКР-усиления в оптических волокнах и описана схема резонатора каскадного волоконного ВКР-лазера. В параграфе 1.2 обсуждаются основные особенности поведения выходной мощности в волоконных ВКР-лазерах и описывается эффект последовательного насыщения мощностей при каскадной генерации в волоконных ВКР-лазерах. В параграфе 1.3 приводятся результаты экспериментальных исследований по определению характера и механизмов насыщения ВКР-усиления в фосфосиликатном волокне при больших мощностях накачки и генерации. Измерения проведены методом когерентной активной спектроскопии комбинационного рассеяния. Показано, что контур ВКР-усиления насыщается однородным образом, при этом насыщение обусловлено лишь истощением накачки при постоянном коэффициенте ВКР-усиления. Наконец, в параграфе 1.4 приводятся разработанные методики характеристики стохастической временной динамики непрерывных волоконных лазеров, в том числе экспериментальная методика измерения пространственно-временной эволюции излучения.

Вторая глава посвящена описанию спектра генерации волоконного ВКР-лазера, излучающего в турбулентном режиме. В параграфе 2.1 доказываются наличие различных продольных мод в генерации волоконных ВКР-лазеров. Это было сделано путем экспериментального измерения спектра радиочастотных биений выходного излучения волоконного ВКР-лазера, в котором обнаружены хорошо определенные пики межмодовых биений. Далее в параграфе 2.2 рассматриваются вопросы наличия флуктуаций фазы и интенсивности различных продольных мод и показывается, что статистика флуктуаций является гауссовой. Это позволяет провести описание механизмов формирования спектра генерации волоконного ВКР-лазера в параграфе 3.3 с помощью методов слабой волновой турбулентности, что позволяет говорить о турбулент-

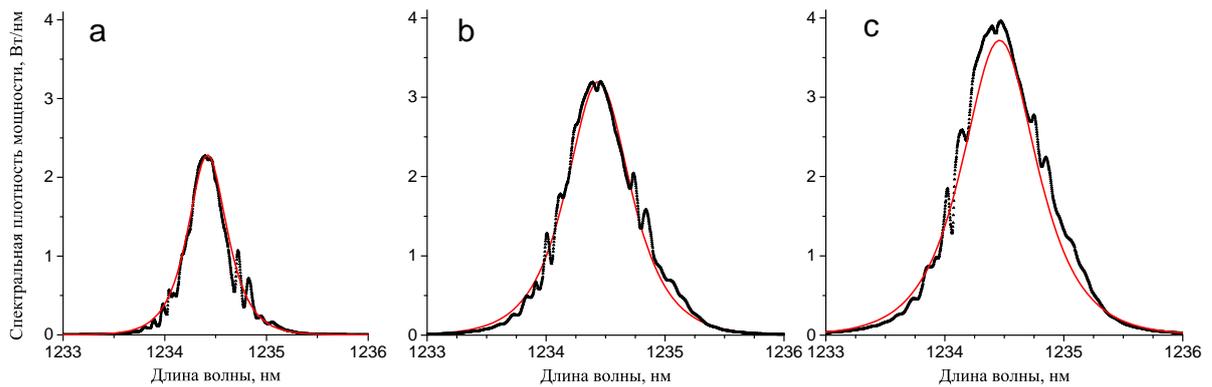


Рис. 1. Форма внутризонального спектра генерации волоконного ВКР-лазера, излучающего в турбулентном режиме при различных мощностях накачки: (а) 1 Вт, (б) 2 Вт, (с) 3 Вт. Показаны экспериментально измеренные (черные точки) и рассчитанные (гиперболический секанс) спектры.

ном режиме генерации лазера. В данном параграфе также проводится экспериментальное исследование формы спектра генерации и показано, что спектр генерации волоконного ВКР-лазера в турбулентном режиме в случае большой дисперсии по сравнению с нелинейностью имеет форму гиперболического секанса, что находится в хорошем согласии с теоретическими предсказаниями в рамках механизма формирования спектра за счет многочисленных процессов четырехволнового взаимодействия различными флуктуирующими по амплитуде и фазе продольных мод, Рис. 1. При этом реализуется корневой закон уширения спектра генерации с ростом мощности генерации как для внутризонального спектра генерации в плотном резонаторе, так и для выходного спектра генерации в практическом случае резонатора, имеющего пропускающее выходное зеркало, что рассмотрено в параграфе 3.4.

В третьей главе предложена концепция ламинарного режима генерации в волоконном ВКР-лазере и экспериментально продемонстрировано существование такого режима. Кроме того, обнаружен ламинарно-турбулентный переход в излучении таких лазеров. Концепция ламинарной генерации в многочастотных волоконных лазерах детально изложена в параграфе 3.1, где проводится отличие между одночастотной генерацией в лазерах, ламинарным режимом генерации в многочастотных лазерах и турбулентном режимом генерации в многочастотных лазерах. Далее, в параграфе 3.2 приводятся экспериментальные данные, доказывающие существование ламинарного режима генерации в многочастотном волоконном ВКР-лазере. Там же описа-

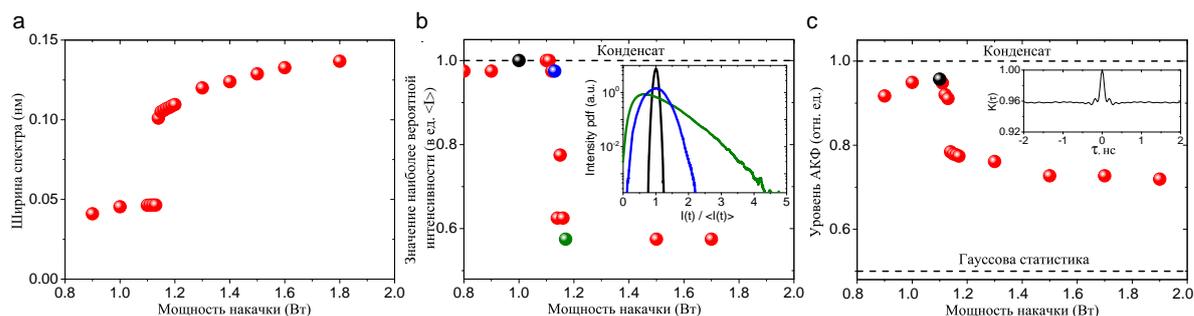


Рис. 2. Ламинарно-турбулентный переход в излучении волоконного ВКР-лазера. (а) Ширина спектра излучения (б) Значение наиболее вероятной интенсивности излучения. На вставке: функция распределения вероятности нахождения интенсивности с заданным значением. (с) Уровень автокорреляционной функции интенсивности.

ны основные экспериментальные условия и параметры системы, необходимые для достижения ламинарного режима генерации. В лами-

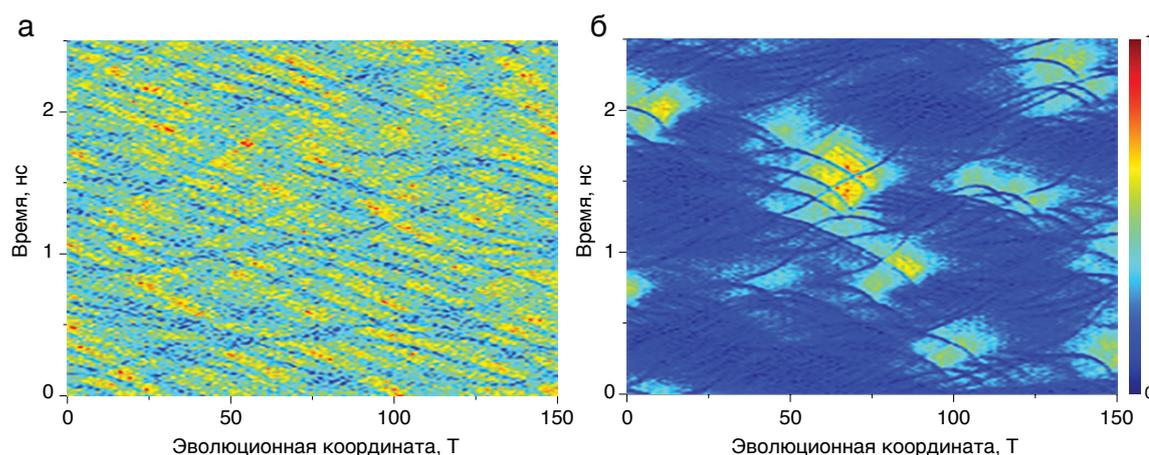


Рис. 3. Экспериментально измеренная пространственно-временная динамика излучения в различных режимах. (а) Ламинарный режим (б) Турбулентный режим. Измерения сделаны при мощности чуть меньше (ламинарный режим) и чуть больше (турбулентный режим) критической мощности перехода. Цветовая шкала кодирует значения интенсивности.

нарном режиме генерации спектр генерации оказывается суженным, по сравнению со спектром в турбулентном режиме, а флуктуации интенсивности излучения оказываются подавлены, Рис. 2. Переход из ламинарного в турбулентный режим осуществляется пороговым образом по мощности генерации. Параграф 3.3 посвящён идентификации ме-

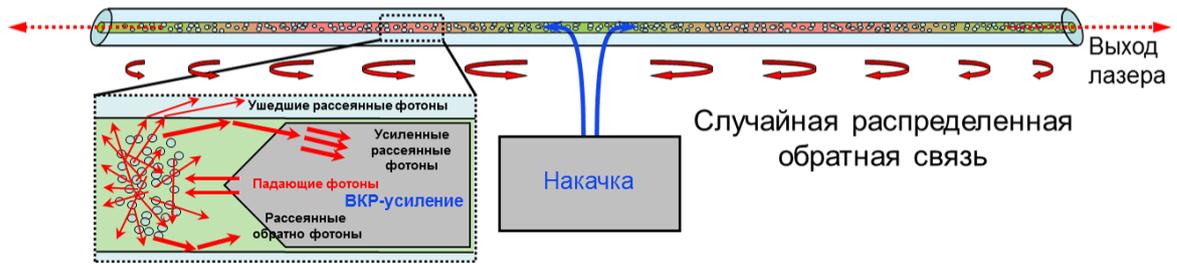


Рис. 4. Концепция волоконного ВКР-лазера со случайной распределенной обратной связью. При распространении по оптическому волокну фотону испытывают рэлеевское рассеяние на микро неоднородностях показателя преломления. Большая часть рассеянных фотонов выходит из сердцевины волокна. Только 10^{-3} их часть рассеивается в направлении, противоположном падающим фотоном, и захватывается волноводной модой сердцевины. В волокно также заводится излучение накачки при $z = 0$, которое обеспечивает распределенное ВКР-усиление вдоль волокна. Рассеянные обратно фотоны могут быть усилены, если локальное усиление превышает локальные линейные потери. Усиленной распределенной обратной связью оказывается достаточно, для инициации лазерной генерации при достаточном уровне накачки.

ханизмов ламинарно-турбулентного перехода в излучении волоконных лазеров. Проведённые экспериментальные измерения пространственно-временной динамики излучения в ламинарном и турбулентном режиме позволили выявить наличие когерентных структур в стохастическом излучении, Рис. 3. С помощью численного моделирования было показано, что данные структуры являются тёмными и серыми солитонами, а их кластеризация приводит к потере когерентности и разрушению ламинарного режима генерации.

В четвёртой главе вводится концепция генерации в волоконном ВКР-лазере за счет случайной распределенной обратной связи на основе рэлеевского рассеяния на микро-неоднородностях показателя преломления сердцевины оптического волокна и обсуждаются основные свойства излучения таких лазеров. Концепция достижения случайной генерации в волоконном ВКР-лазере описана в параграфе 4.1, Рис. 4.

Параграф 4.2 посвящён описанию экспериментальной демонстрации генерации в волоконном ВКР-лазере за счет случайной распределенной обратной связи. Здесь же приводятся основные параметры данного режима генерации — линейное поведение выходной мощности, генерация достаточно узкого (по сравнению с линией усиления) спектра гладкой формы, вводится понятие длины усиления в таких лазерах. Также про-

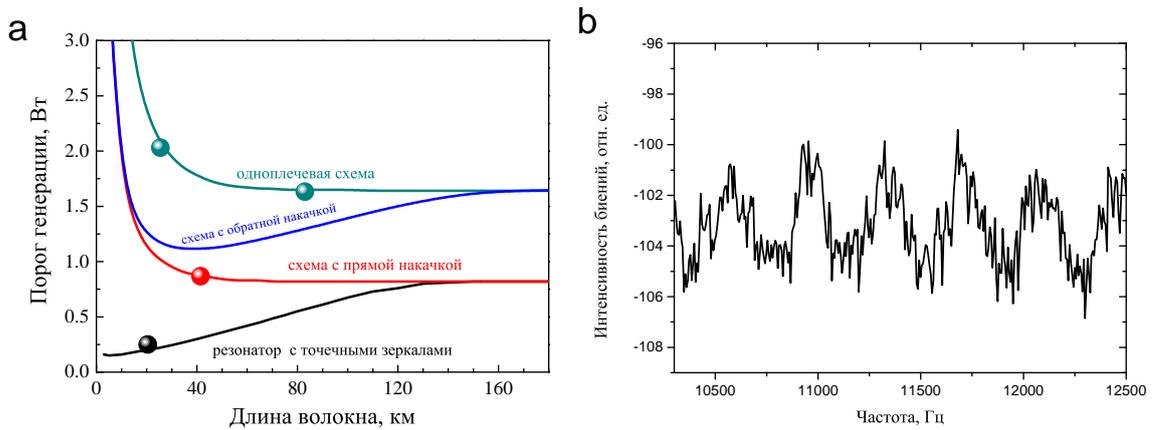


Рис. 5. Влияние случайной распределенной обратной связи за счет рэлеевского рассеяния на режим генерации волоконного ВКР-лазера. (а) Зависимость порога от длины лазера для лазеров различной конфигурации. Сплошные линии — численный расчет на основе системы балансных уравнений, точки — экспериментальные данные. (б) Радиочастотный спектр межмодовых биений в сверх-длинном волоконном ВКР-лазере длиной 270 км. Данные приведены для генерации около 1550 нм в волокне типа SMF 28.

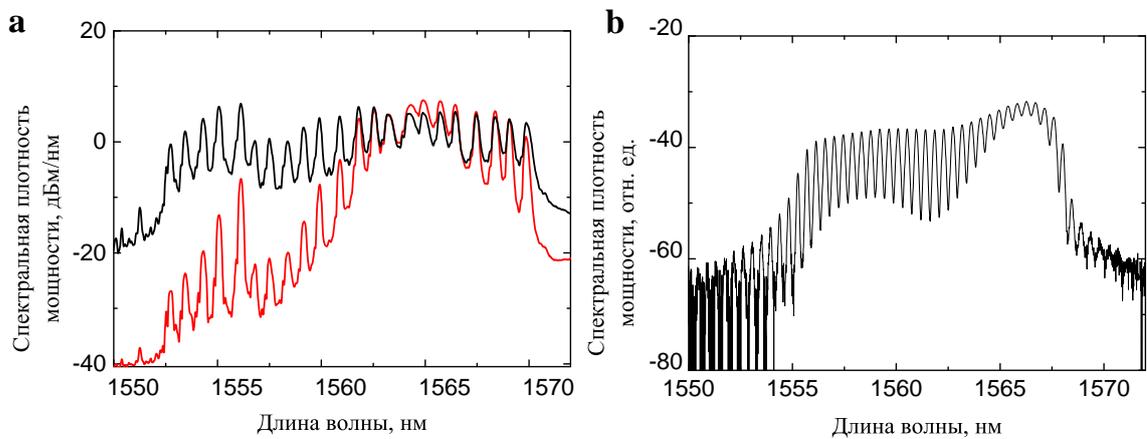


Рис. 6. Спектр генерации многоволнового волоконного ВКР-лазера со случайной распределенной обратной связью. (а) Режим, полученный с помощью набора волоконных брэгговских решеток. Черная кривая — наличие лишь случайной распределенной обратной связи, красная кривая — при наличии френелевского отражения в 4% на одном из концов лазера. Данные приведены для мощности накачки 1.35 Вт. (б) Режим, полученный с помощью волоконного фильтра Лию. Мощность накачки 1.5 Вт.

ведены измерения радиочастотного спектра излучения и показано, что в спектре генерации волоконного ВКР-лазера со случайной распределенной обратной связью отсутствуют определенные продольные моды, что позволяет рассматривать спектр его генерации как безмодовый, и что отличает его от спектра излучения стандартных волоконных ВКР-лазеров с регулярным резонатором, образованным точечными зеркалами, в котором продольные моды хорошо определены. При этом измеренная временная динамика излучения случайного волоконного лазера является стохастической как и в волоконных ВКР-лазерах с регулярным резонатором. В параграфе 4.3 предлагаются и описываются различные базисные конфигурации волоконных ВКР-лазеров со случайной распределенной обратной связью.

Далее в параграфе 4.4 экспериментально показано, что существует предел длины линейного резонатора волоконного ВКР-лазера. А именно, выше некоторого предела длины резонатора, равного 270 км при осуществлении генерации в стандартных оптических волокнах в области длин волн около 1.5 мкм, случайная распределенная обратная связь определяет генерацию излучения даже при наличии традиционного резонатора, образованного точечными зеркалами. При этом генерация осуществляется со спектром, не имеющим определенной модовой структуры. При длине резонатора меньше данного предела преобладает обратная связь за счет точечных отражателей, что приводит к наличию модовой структуры в спектре генерации, Рис. 5.

Наконец, в параграфе 4.5 проводится детальная характеристика продольного распределения мощности генерации в волоконном ВКР-лазере со случайной распределенной обратной связью с прямой накачкой и указываются основные особенности продольного распределения мощности в таких лазерах, а именно наличие существенной неоднородности распределения мощности (по сравнению с распределением в лазере с регулярным резонатором) с максимумом мощности, достигаемым в точке, в которой локальное усиление равно локальным потерям, а минимумом — в точке ввода излучения накачки, что позволяет продемонстрировать новые режимы генерации в таких лазерах с управляемым спектром излучения.

Пятая глава посвящена спектру генерации волоконного ВКР-лазера со случайной распределенной обратной связью. В параграфах 4.1 и 4.2 описываются подходы по достижению режимов генерации в таких лазерах с заданными спектральными свойствами. Использование существенно неоднородного распределения продольной мощности генерации позволяет с помощью маломощных спектральных элементов,

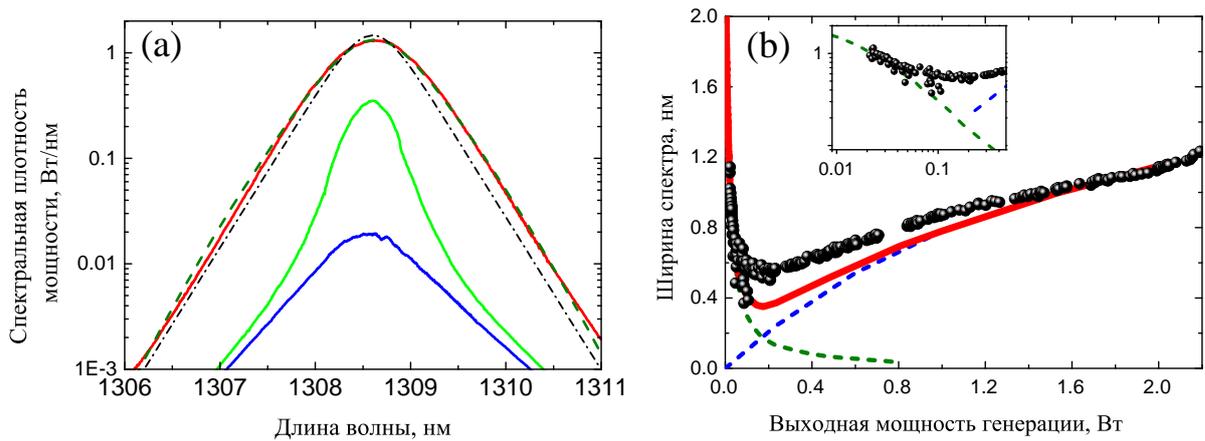


Рис. 7. Спектр генерации волоконного ВКР-лазера со случайной распределенной обратной связью и его уширение. (а) Экспериментально измеренные спектры генерации около порога генерации (синяя кривая, мощность генерации 0.025 Вт), при небольшом превышении порога генерации (зелёная кривая, 0.2 Вт) и высоко над порогом генерации (красная кривая, 1.5 Вт). Численно рассчитанный спектр генерации из локального волнового кинетического уравнения показан красной линией (расчет сделан при мощности генерации 1.5 Вт). (б) Зависимость ширины спектра генерации от мощности генерации. Экспериментальные данные показаны черными символами. Численно рассчитанная ширина спектра генерации показана пунктирной синей линией. Также показано численно рассчитанное сужение спектра генерации на основе модифицированного подхода Шавлова-Таунса, пунктирная зеленая линия. Красная линия есть сумма нелинейного кинетического вклада (синяя линия) и линейного кинетического вклада (зеленая линия). На вставке показана область спектрального сужения в логарифмическом масштабе.

помещённых в точку минимума мощности, управлять спектральными свойствами мощной генерации. В частности, в параграфе 4.1 описаны генерационные свойства волоконного ВКР-лазера с узкополосной генерацией, достигнутой за счет применения узкополосной волоконной брэгговской решетки, помещенной в точку минимума мощности. Также описывается другой способ получения узкополосного режима генерации — с помощью волоконного интерферометра Фабри-Перо. В параграфе 4.2 описываются многоволновые режимы генерации, достигаемые за счёт использования набора различных волоконных брэгговских решеток, а также за счет применения волоконного фильтра Лио, Рис. 6.

Наконец, в параграфе 5.3 проведено экспериментальное исследова-

ние формы спектра генерации генерации волоконного ВКР-лазера со случайной распределенной обратной связью. Показано, что в случае малой (по сравнению с усилением) нелинейности и малой же дисперсии спектр генерации такого лазера имеет форму гиперболического секанса, сходную с формой спектра излучения в волоконном ВКР-лазере с регулярным резонатором. С помощью концепции волновой кинетики активных циклических систем оказывается возможным описать спектр генерации случайного волоконного лазера кинетическим образом. Экспериментально наблюдаемая форма спектра генерации в виде гиперболического секанса хорошо согласуется с результатами такого кинетического описания, Рис. 7.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Основные результаты

1. Экспериментально показано, что внутриврезонаторный спектр генерации непрерывного многомодового волоконного ВКР-лазера в случае большой по сравнению с нелинейностью дисперсии имеет форму гиперболического секанса, а уширение спектра происходит по корневому закону с ростом мощности генерации. Спектр генерации состоит из большого числа продольных мод, амплитуды которых флуктуируют со статистикой, близкой к гауссовой, а фазы случайны. Спектр генерации формируется за счет многочисленных четырехволновых взаимодействий продольных мод между собой, что описывается моделью слабой волновой турбулентности. Совместная динамика большого количества продольных мод приводит к стохастической динамике полной интенсивности излучения.
2. Реализован ламинарный режим генерации в излучении многочастотных волоконных непрерывных волоконных ВКР-лазеров, который характеризуется узким спектром, состоящим из большого количества коррелированных мод, и подавленными флуктуациями интенсивности излучения. Обнаружен переход из ламинарного в турбулентный режим генерации в излучении таких лазеров, который совершается пороговым образом по мощности накачки. Обнаружено, что в ламинарном режиме осуществляется генерация темных и серых солитонов, кластеризация которых является причиной переход из ламинарного в турбулентный режим генера-

ции.

3. Реализована генерация в волоконных ВКР-лазерах за счет случайной распределённой обратной связи на основе рэлеевского рассеяния. Данный режим генерации характеризуется локализованным спектром излучения, не имеющим определённой модовой структуры, стохастической динамикой интенсивности излучения, пороговым поведением мощности генерации в зависимости от мощности накачки. Предложены, описаны и реализованы основные конфигурации лазеров такого типа.
4. Экспериментально показано, что спектр генерации непрерывного волоконного ВКР-лазера со случайной распределённой обратной связью в случае пренебрежимой дисперсии имеет форму гиперболического секанса, схожую с формой спектра генерации волоконного ВКР-лазера с регулярным резонатором на основе точечных отражателей. Экспериментальная форма спектра и закон его уширения с ростом мощности согласуются с предсказаниями в рамках нелинейной кинетической теории формирования спектра, рассматривающей установление равновесных спектральных и статистических свойств излучения в процессе циклической кинетической эволюции.
5. Экспериментально измерено распределение мощности генерации вдоль длины волоконного ВКР-лазера со случайной распределённой обратной связью с прямой накачкой и обнаружена существенная неоднородность данного распределения. А именно, максимум мощности генерации наблюдается в точке, в которой локальное усиление равно локальным потерям, а минимум мощности генерации достигается в центральной точке, в которой вводится излучение накачки в резонатор. Наличие минимума продольного распределения мощности генерации позволяет использовать маломощные (до 100 мВт) спектральные компоненты для достижения новых режимов генерации волоконных ВКР-лазеров со случайной распределённой обратной связью с заданными спектральными характеристиками, а именно продемонстрирована генерация с суженным спектром шириной до 0.02 нм при использовании волоконных фильтров Фабри-Перо и многоволновая генерация в при использовании волоконного фильтра Лио или набора волоконных брэгговских решёток.
6. Экспериментально показано, что существует предел длины линей-

ного резонатора волоконного ВКР-лазера, выше которого случайная распределённая обратная связь определяет генерацию излучения со спектром, не имеющим определённой модовой структуры, тогда как при длине меньше данного предела преобладает обратная связь за счёт точечных отражателей, что приводит к наличию модовой структуры в спектре генерации. Величина данного предела равна 270 км при осуществлении генерации в стандартных оптических волокнах в области длин волн около 1.5 мкм.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

- [A1] *Babin S., Churkin D., Podivilov E.* Intensity interactions in cascades of a two-stage Raman fiber laser // *Optics communications.* — 2003. — Vol. 226, no. 1. — Pp. 329–335.
- [A2] *Babin S., Churkin D., Kablukov S., Podivilov E.* Raman gain saturation at high pump and stokes powers // *Optics express.* — 2005. — Vol. 13, no. 16. — Pp. 6079–6084.
- [A3] *Babin S. A., Churkin D. V., Kablukov S. I., Podivilov E. V.* Homogeneous Raman gain saturation at high pump and Stokes powers // *JOSA B.* — 2006. — Vol. 23, no. 8. — Pp. 1524–1530.
- [A4] *Vatnik I., Gorbunov O., Churkin D.* Narrow-band generation and mode correlations in a short raman fibre laser // *Laser Physics.* — 2014. — Vol. 24, no. 2. — P. 025103.
- [A5] *Babin S., Churkin D., Fotiadi A. et al.* Relative intensity noise in cascaded Raman fiber lasers // *Photonics Technology Letters, IEEE.* — 2005. — Vol. 17, no. 12. — Pp. 2553–2555.
- [A6] *Babin S., Churkin D., Ismagulov A. et al.* Spectral broadening in Raman fiber lasers // *Optics letters.* — 2006. — Vol. 31, no. 20. — Pp. 3007–3009.
- [A7] *Babin S. A., Churkin D. V., Ismagulov A. E. et al.* Broadening of the intracavity and output spectra of a Raman fiber laser with a low-Q cavity // *Laser Phys.* — 2007. — Vol. 17, no. 11. — Pp. 1279–1285.

- [A8] *Babin S. A., Churkin D. V., Ismagulov A. E. et al.* Four-wave-mixing-induced turbulent spectral broadening in a long Raman fiber laser // *JOSA B*. — 2007. — Vol. 24, no. 8. — Pp. 1729–1738.
- [A9] *Babin S. A., Churkin D. V., Ismagulov A. E. et al.* Turbulence-induced square-root broadening of the Raman fiber laser output spectrum // *Opt. Lett.* — 2008. — Vol. 33, no. 6. — Pp. 633–635.
- [A10] *Churkin D. V., Smirnov S. V., Podivilov E. V.* Statistical properties of partially coherent CW fiber lasers // *Optics letters*. — 2010. — Vol. 35, no. 19. — Pp. 3288–3290.
- [A11] *Turitsyn S., Babin S., Turitsyna E. et al.* Optical wave turbulence // *Advances in Wave Turbulence* / Ed. by V. Shrira, S. Nazarenko. — World Scientific Publishing, 2013. — Pp. 113–164.
- [A12] *Turitsyna E., Smirnov S., Sugavanam S. et al.* The laminar-turbulent transition in a fibre laser // *Nature Photonics*. — 2013. — Vol. 7, no. 10. — Pp. 783–786.
- [A13] *Turitsyn S. K., Ania-Castañón J. D., Babin S. et al.* 270-km ultralong Raman fiber laser // *Physical review letters*. — 2009. — Vol. 103, no. 13. — P. 133901.
- [A14] *Turitsyn S. K., Babin S. A., El-Taher A. E. et al.* Random distributed feedback fibre laser // *Nature Photonics* — 2010. — Vol. 4, no. 4. — Pp. 231–235.
- [A15] *Churkin D. V., Babin S. A., El-Taher A. E. et al.* Raman fiber lasers with a random distributed feedback based on Rayleigh scattering // *Phys. Rev. A*. — 2010. — Vol. 82, no. 3. — P. 033828.
- [A16] *Churkin D. V., El-Taher A. E., Vatnik I. D. et al.* Experimental and theoretical study of longitudinal power distribution in a random dfb fiber laser // *Optics express*. — 2012. — Vol. 20, no. 10. — Pp. 11178–11188.
- [A17] *Turitsyn S. K., Babin S. A., Churkin D. V. et al.* Random distributed feedback fibre lasers // *Physics Reports*. — 2014. — Vol. 542, no. 2. — Pp. 133–193.
- [A18] *El-Taher A. E., Harper P., Babin S. A. et al.* Effect of Rayleigh-scattering distributed feedback on multiwavelength Raman fiber laser generation // *Opt. Lett.* — 2011. — Vol. 36, no. 2. — Pp. 130–132.

- [A19] *Sugavanam S., Tarasov N., Shu X., Churkin D. V.* Narrow-band generation in random distributed feedback fiber laser // *Optics express*. — 2013. — Vol. 21, no. 14. — Pp. 16466–16472.
- [A20] *Sugavanam S., Yan Z., Kamynin V. et al.* Multiwavelength generation in a random distributed feedback fiber laser using an all fiber lyot filter // *Optics express*. — 2014. — Vol. 22, no. 3. — Pp. 2839–2844.
- [A21] *Babin S., Churkin D., Podivilov E., Kurkov A.* Spectral broadening and intensity interactions in cascades of a raman fiber laser: Analytical model and experimental test. // *Optical Fiber Communication Conference / Optical Society of America*. — 2004. — P. WB6.
- [A22] *Babin S., Churkin D., Kablukov I., Podivilov E.* Homogeneous raman gain saturation at high pump and stokes powers in a phosphosilicate fiber // *Proc. of SPIE*. — Vol. 6612. — 2006. — Pp. 661204–11.
- [A23] *Бабин С. А., Исмагулов А. Е., Каблуков С. И. et al.* Турбулентное уширение внутрирезонаторного и выходного спектра волоконного ВКР-лазера // *Труды Всероссийской конференции по волоконной оптике*. — 2007. — Pp. 97–98.
- [A24] *Babin S., Churkin D., Ismagulov A. et al.* Turbulence-induced raman fiber laser output spectrum formation and broadening [6725-32] // *Proc. SPIE / International Society for Optical Engineering*. — Vol. 6725. — 2007. — Pp. 67251G–10.
- [A25] *Бабин С.А., Исмагулов А. Е., Каблуков С. И. et al.* Турбулентное уширение выходного спектра волоконного ВКР-лазера // *Труды Российского семинара по волоконным лазерам*. — 2007. — Pp. 57–58.
- [A26] *Babin S. A., Churkin D. V., Ismagulov A. E. et al.* Square-root spectral broadening in low-q cavity raman fiber lasers // *International Laser Physics Workshop*. — 2007. — P. 276.
- [A27] *Babin S. A., Churkin D. V., Podivilov E. V.* Weak wave turbulence in fiber lasers and systems // *International conference on Laser Optics*. — 2008. — Pp. WeR3–08.
- [A28] *Babin S., Churkin D., Ismagulov A. et al.* Square-root law of turbulence-induced spectral broadening in raman fiber lasers // *Proc. of SPIE*. — Vol. 6873. — 2008. — Pp. 68731O–8.

- [A29] *Babin S., El-Taher A., Harper P. et al.* Ultra-long raman laser with a feedback based on the rayleigh scattering // European Conference on Lasers and Electro-Optics / IEEE. — 2009. — P. CJ5.6.THU.
- [A30] *Churkin D., Turitsyn S. K., Babin S. A. et al.* Random distributed feedback fibre lasers // International conference on Laser Optics. — 2010. — Pp. ThW-3.
- [A31] *Churkin D.* Advanced workshop on anderson localization, nonlinearity and turbulence: a cross-fertilization // Advanced Workshop on Anderson Localization, Nonlinearity and Turbulence: a Cross-Fertilization. — 2010.
- [A32] *El-Taher A., Churkin D., Harper P. et al.* Multi-wavelength ultra-long raman fibre laser based on rayleigh-scattering feedback // European Conference Optical Communication / IEEE. — 2010. — P. P1.21.
- [A33] *El-Taher A., Harper P., Babin S. et al.* Effect of rayleigh-scattering distributed feedback on multiwavelength raman fiber laser generation // Proc. SPIE / International Society for Optics and Photonics. — Vol. 7914. — 2011. — Pp. 791433–791433–6.
- [A34] *Churkin D. V., Smirnov S. V., Podivilov E. V.* Statistical properties of partially coherent cw fiber lasers // Proc. of SPIE. — Vol. 7917. — 2011. — Pp. 79171X–1.
- [A35] *Churkin D., Gorbunov O., Smirnov S.* Control of spectral and statistical properties of raman fiber lasers // European Conference on Lasers and Electro-Optics / Optical Society of America. — 2011. — P. CJ.P25.
- [A36] *Churkin D., El-Taher A., Vatnik I. et al.* Longitudinal distribution of generated power in random distributed feedback fiber lasers // Optical Fiber Communication Conference. — 2012. — P. JW2A.34.
- [A37] *Churkin D. V., El-Taher A., Vatnik I. et al.* Longitudinal power distribution in a random dfb fiber laser // Nonlinear Photonics / Optical Society of America. — 2012. — Pp. NW1C–4.
- [A38] *Churkin D.* Four-wave-mixing and optical wave turbulence in fiber lasers // SIAM Conference on Nonlinear Waves and Coherent Structures. — 2012.

- [A39] *Чуркин Д. В., Смирнов С. В., Горбунов О. А. et al.* Ламинарный и турбулентный режим генерации в непрерывных волоконных лазерах // Труды Российского семинара по волоконным лазерам. — 2012. — Pp. 159–160.
- [A40] *Sugavanam S., Tarasov N., Churkin D., Turitsyn S. K.* Narrow-band radiation in the random distributed feedback fiber laser // European Conference and Exhibition on Optical Communication / Optical Society of America. — 2012. — Pp. P7–01.
- [A41] *Sugavanam S., Tarasov N., Churkin D. V., Turitsyn S. K.* Narrow-band random dfb fiber laser // Annual Symposium of the IEEE/LEOS Benelux Chapter, 2012 / IEEE-LEOS. — 2012. — Pp. 337–340.
- [A42] *Churkin D. V., El-Taher A. E., Vatnik I. D. et al.* Longitudinal power distribution in random dfb raman fiber laser // Annual Symposium of the IEEE/LEOS Benelux Chapter, 2012 / IEEE-LEOS. — 2012. — Pp. 333–336.
- [A43] *Churkin D.* Laminar-turbulent transition in fibre laser // Advanced Workshop on Nonlinear Photonics, Disorder and Wave Turbulence. — 2013.
- [A44] *Sugavanam S., Yan Z., Kamynin V. et al.* Lyot-filter-based multiwavelength random distributed feedback fiber laser // Proc. SPIE, Photonics Europe / International Society for Optics and Photonics. — Vol. 9135. — 2014. — Pp. 91351C–91351C–6.
- [A45] *Vatnik I., Gorbunov O., Churkin D.* Nonlinear mixing and mode correlations in a short raman fiber laser // Proc. SPIE, Photonics Europe. — Vol. 9136. — 2014. — Pp. 913612–913612–6.
- [A46] *Churkin D.* Laminar-turbulent transition in fibre laser // EuroMech EC565 Colloquium on Subcritical transition to turbulence. — 2014. — P. 19.
- [A47] *Churkin D.* Laminar-turbulent transition in fibre laser // International Workshop “Rogue waves, dissipative solitons, plasmonics, supercontinuum and special fibers”. — 2014. — P. 38.

Список цитированной литературы

- [1] *Дианов Е.М.* Волоконные лазеры // Успехи физических наук. — 2004. — Vol. 174, no. 10. — Pp. 1139–1142.
- [2] *Курков А. С., Дианов Е. М., Парамонов В.М. et al.* Мощные волоконные ВКР-лазеры в диапазоне 1,22-1,34 мкм // Кв. электр. — 2000. — Vol. 30, no. 9. — Pp. 791–793.
- [3] *Дианов Е. М., Фурса Д. Г., Абрамов А. А. et al.* Волоконно-оптический ВКР-усилитель сигналов на длине волны 1,3 мкм // Кв. электр. — 1994. — Vol. 21, no. 9. — Pp. 807–809.
- [4] *Innis D., DiGiovanni D. J., Stasser T. A. et al.* Ultrahigh-power single-mode fiber lasers from 1.065 to 1.472 μm using Yb-doped cladding-pumped and cascaded Raman lasers // Conference on Lasers and Electro-Optics. — 1997. — Pp. paper CPD–31.
- [5] *Дианов Е. М., Буфетов И. А., Машинский В. М. et al.* Волоконные ВКР-лазеры с длиной волны генерации более 2 мкм // Квантовая электроника. — 2004. — Vol. 34, no. 8. — Pp. 695–697.
- [6] *Mermelstein M. D., Horn C., Bouteiller J.-C. et al.* Six wavelength Raman fiber laser for C + L-band Raman amplification // Conference on Lasers and Electro-Optics. — 2002. — Pp. 478, paper CThJ1.
- [7] *Han Y.-G., Kim C.-S., Kang J. U. et al.* Multiwavelength raman fiber-ring laser based on tunable cascaded long-period fiber gratings // Photonics Technology Letters, IEEE. — 2003. — Vol. 15, no. 3. — Pp. 383–385.
- [8] *Georgiev D., Gapontsev V., Dronov A. et al.* Watts-level frequency doubling of a narrow line linearly polarized raman fiber laser to 589nm // Optics express. — 2005. — Vol. 13, no. 18. — Pp. 6772–6776.
- [9] *Kablukov S., Babin S., Churkin D. et al.* Frequency doubling of a broadband raman fiber laser to 655 nm // Optics Express. — 2009. — Vol. 17, no. 8. — Pp. 5980–5986.
- [10] *Hsiung P.-L., Chen Y., Ko T. et al.* Optical coherence tomography using a continuous-wave, high-power, raman continuum light source // Optics express. — 2004. — Vol. 12, no. 22. — Pp. 5287–5295.

- [11] *Yusupov A., Goncharov S., Zalevskii I. et al.* Raman fiber laser for the drug-free photodynamic therapy // *Laser Physics*. — 2010. — Vol. 20, no. 2. — Pp. 357–359.
- [12] *Bouteiller J.-C.* Spectral modeling of raman fiber lasers // *Photonics Technology Letters, IEEE*. — 2003. — Vol. 15, no. 12. — Pp. 1698–1700.
- [13] *Vanholsbeeck F., Martin-Lopez S., González-Herráez M., Coen S.* The role of pump incoherence in continuous-wave supercontinuum generation // *Optics express*. — 2005. — Vol. 13, no. 17. — Pp. 6615–6625.
- [14] *Solli D., Ropers C., Koonath P., Jalali B.* Optical rogue waves // *Nature*. — 2007. — Vol. 450, no. 7172. — Pp. 1054–1057.
- [15] *Garrett C., Gemmrich J.* Rogue waves // *Physics Today*. — 2009. — Vol. 62, no. 6. — P. 62.
- [16] *Ruban V., Kodama Y., Ruderman M. et al.* Rogue waves—towards a unifying concept?: Discussions and debates // *The European Physical Journal-Special Topics*. — 2010. — Vol. 185, no. 1. — Pp. 5–15.
- [17] *Akhmediev N., Dudley J., Solli D., Turitsyn S.* Recent progress in investigating optical rogue waves // *Journal of Optics*. — 2013. — Vol. 15, no. 6. — P. 060201.
- [18] *Dudley J. M., Dias F., Erkintalo M., Genty G.* Instabilities, breathers and rogue waves in optics // *Nature Photonics*. — 2014. — Vol. 8, no. 10. — Pp. 755–764.
- [19] *Onorato M., Residori S., Bortolozzo U. et al.* Rogue waves and their generating mechanisms in different physical contexts // *Physics Reports*. — 2013. — Vol. 528, no. 2. — Pp. 47–89.
- [20] *Kibler B., Hammani K., Michel C. et al.* Rogue waves, rational solitons and wave turbulence theory // *Phys. Lett. A*. — 2011. — Vol. 375, no. 35. — Pp. 3149–3155.
- [21] *Hammani K., Kibler B., Finot C., Picozzi A.* Emergence of rogue waves from optical turbulence // *Phys. Lett. A*. — 2010. — Vol. 374, no. 34. — Pp. 3585–3589.

- [22] *Genty G., De Sterke C., Bang O. et al.* Collisions and turbulence in optical rogue wave formation // *Physics Letters A.* — 2010. — Vol. 374, no. 7. — Pp. 989–996.
- [23] *Wabnitz S., Finot C., Fatome J., Millot G.* Shallow water rogue wavetrains in nonlinear optical fibers // *Physics Letters A.* — 2013. — Vol. 377, no. 12. — Pp. 932–939.
- [24] *Chabchoub A., Hoffmann N., Akhmediev N.* Rogue wave observation in a water wave tank // *Physical Review Letters.* — 2011. — Vol. 106, no. 20. — P. 204502.
- [25] *Wabnitz S.* Optical tsunamis: shoaling of shallow water rogue waves in nonlinear fibers with normal dispersion // *Journal of Optics.* — 2013. — Vol. 15, no. 6. — P. 064002.
- [26] *Летохов В. С.* Генерация света рассеивающей средой с отрицательным резонансным поглощением // *ЖЭТФ.* — 1967. — Vol. 53. — Pp. 1442.
- [27] *Lawandy N. M., Balachandran R., Gomes A., Sauvain E.* Laser action in strongly scattering media // *Nature.* — 1994. — Vol. 368, no. 6470. — Pp. 436–438.
- [28] *Wiersma D. S., van Albada M. P., Lagendijk A.* Random laser? // *Nature.* — 1995. — Vol. 373. — Pp. 203–204.
- [29] *Noginov M.*, Solid-state random lasers. — Springer, 2005. — Vol. 105.
- [30] *Wiersma D. S.* The physics and applications of random lasers // *Nature Physics* — 2008. — Vol. 4, no. 5. — Pp. 359–367.

Подписано к печати “7” ноября 2014 г.
Формат бумаги 60x84 1/16. Объём 1 печ. л.
Тираж 100 экз. Заказ № 5470.

Отпечатано “Документ-Сервис”, 630090 Новосибирск, ул. Институт-
ская 4/1.