

На правах рукописи

Смирнов Сергей Валерьевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ
ГЕНЕРАЦИИ СУПЕРКОНТИНУУМА
В МИКРОСВЕТОВОДАХ
ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ В ОБЛАСТИ
АНОМАЛЬНОЙ ДИСПЕРСИИ**

01.04.05 “Оптика”

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск — 2006

Работа выполнена в Новосибирском государственном университете

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Кобцев Сергей Михайлович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Бабин Сергей Алексеевич
доктор физико-математических наук,
профессор Мешалкин Юрий Петрович

Ведущая организация: Институт вычислительных технологий
СО РАН

Защита состоится “5” декабря 2006 г. в 11¹⁵ часов на заседании диссертационного совета К 003.005.01 при Институте автоматики и электрометрии СО РАН, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института автоматики и электрометрии СО РАН.

Автореферат разослан “2” ноября 2006 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
к.т.н.



Косых В.П.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Одним из самых ярких и интересных явлений современной нелинейной оптики является эффект генерации суперконтинуума (СК), который состоит в существенном увеличении ширины спектра излучения возбуждения (накачки) при распространении в нелинейной среде. Исследования генерации СК представляют как фундаментально-научный, так и большой практический интерес, что связано с уникальным набором свойств, которыми может обладать СК: широкий спектр, высокий уровень спектральной плотности мощности и когерентность излучения.

История исследований эффекта генерации СК берет свое начало еще в конце 1960-х гг., когда Альфано и Шапиро наблюдали уширение спектра 4-пс лазерных импульсов при их прохождении через объемные образцы различных сортов стекол и кристаллов [1]. Впоследствии генерация СК наблюдалась в большом количестве сред, однако наиболее бурный рост интереса к исследованиям данного эффекта был связан с разработкой фотонно-кристаллических, или микроструктурированных волокон (МВ). Возможность управления дисперсией таких волокон на стадии их изготовления, наличие в них только одной пространственной моды с относительно низким затуханием в видимой области спектра и высокая нелинейность МВ открыли новые горизонты как в нелинейно-оптических исследованиях, так и в различных областях применения СК (см. обзор [2]). Так, например, за счет смещения длины волны нулевой дисперсии в видимую область в МВ удалось получить беспрецедентно широкие спектры СК, перекрывающие более двух октав от фиолетовой до ИК-области [3].

Альтернативой для достаточно сложных в изготовлении и дорогостоящих МВ являются биконические волокна (БВ) или волокна с перетяжкой. Они могут быть изготовлены в лабораторных условиях вытягиванием обычного телекоммуникационного волокна в пламени газовой горелки, что обуславливает их низкую себестоимость. Подобно другим типам *микросветоводов* — специальных оптических волокон с диаметром сердцевины несколько микрометров, — БВ обладают высокой нелинейностью, которая, наряду с длиной волны нулевой дисперсии, лежащей в видимой области спектра, позволила получить в БВ генерацию СК с шириной более двух октав [4]. Вместе с тем волокна данного типа использовались в значительно меньшем числе исследований СК по

сравнению с МВ. В частности, до последнего времени в БВ не наблюдался эффект самодвига частоты солитонов, который является, по сути, одной из возможных форм генерации СК и представляет большой интерес с точки зрения создания на его основе импульсных источников оптического излучения с перестройкой по длине волны. Также до последнего времени в литературе не сообщалось об изучении динамики спектрального уширения в БВ, тогда как результаты соответствующих исследований с МВ неоднократно публиковались.

На протяжении практически всей истории исследований генерации СК, изучение механизмов спектрального уширения и свойств СК шло параллельно с развитием приложений этого эффекта. Так, генерация СК без преувеличения совершила настоящую революцию в метрологии, существенно упростив процедуру прецизионного измерения оптических частот, до этого требовавшую построения сложных цепочек синтеза (см. обзор [5]). Эффект генерации СК нашел свое применение и в оптической когерентной томографии, где благодаря его использованию стало возможным увеличение продольного разрешения получаемых изображений более чем на порядок величины (см. обзор [6]). Также следует отметить использование различных режимов спектрального уширения для генерации ультракоротких импульсов [7–10] и в телекоммуникациях [11].

Развитие этих и других важных с практической точки зрения приложений требует поиска оптимальных режимов генерации СК. При этом в каждой области предъявляется свой набор требований к излучению СК, что наряду с многообразием используемых на сегодняшний день оптических волокон и источников возбуждения обуславливает приоритетность исследований механизмов спектрального уширения, которые бы позволили сделать общие выводы относительно путей оптимизации СК для приложений. В частности, большой интерес представляют остававшиеся до последнего времени не изученными вопросы о механизмах уменьшения межимпульсной когерентности СК, определяющей применимость СК в оптической метрологии, а также выяснение связи степени когерентности СК с величиной спектрального уширения и параметрами импульсов возбуждения.

Актуальность исследований генерации СК при непрерывном возбуждении обусловлена востребованностью спектрального уширения непрерывного излучения в задаче об уменьшении спектральной неравномерности коэффициента усиления волоконных ВКР-усилителей [11],

являющихся важным звеном современных линий связи. Вместе с тем до недавнего времени в литературе не сообщалось об адекватном моделировании генерации широкополосного СК при непрерывном возбуждении. Более того, в работе [12] было получено существенное качественное расхождение результатов численного моделирования, основанного на обобщенном нелинейном уравнении Шрёдингера, и спектров СК, зарегистрированных в эксперименте.

Цели работы, исходя из вышесказанного, были сформулированы следующим образом:

1. Исследование зависимости сдвига частоты оптических солитонов в биконических волокнах от мощности возбуждения.
2. Изучение динамики спектрального уширения в биконических волокнах.
3. Исследование межимпульсной когерентности СК и солитонов, генерируемых в микроструктурированных и биконических волокнах.
4. Исследование механизмов генерации СК в высоконелинейных волокнах при непрерывном возбуждении.

Новизна работы: Полученные в диссертации результаты численного моделирования позволили построить детальную картину уширения спектра импульсов возбуждения различной длительности и непрерывного излучения при распространении в микросветоводах. При этом впервые был исследован эффект самосдвига частоты солитонов в БВ и получено соответствие результатов моделирования и экспериментальных наблюдений. Впервые исследовалась динамика генерации СК в БВ и указаны механизмы, определяющие эволюцию импульсов возбуждения на разных этапах распространения по волокну. Исследована зависимость степени межимпульсной когерентности СК от длительности, мощности, параметра частотной модуляции импульсов возбуждения и длины волокна, при этом впервые установлена связь степени когерентности и сдвига частоты солитонов в спектре СК. Для объяснения уменьшения степени когерентности СК предложена модель, на основе которой впервые получено аналитическое выражение, связывающее длительность и мощность импульсов возбуждения, соответствующих фиксированной степени когерентности СК. Проведены численные исследования моделирования генерации СК при непрерывном возбуждении.

Впервые получено согласие результатов численного моделирования с экспериментами по генерации широких спектров СК.

Практическая значимость: Практическая ценность полученных результатов определяется в первую очередь тем, что в диссертации описаны основные механизмы спектрального уширения и уменьшения когерентности импульсов возбуждения при распространении в микросветоводах, что открывает возможность для оптимизации эффекта генерации СК для различных приложений. Особое внимание в диссертации уделено оптическим солитонам на длинноволновой границе спектра СК, которые ввиду относительно высокого уровня спектральной мощности могут представлять большой интерес как при разработке перестраиваемых источников излучения, так и, например, для использования в схеме оптических часов. Построение адекватной эксперименту модели и объяснение механизмов генерации СК при непрерывном возбуждении является необходимым условием для эффективной оптимизации ВКР-усилителей, являющихся важной частью современных телекоммуникационных линий.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. При введении фемтосекундных импульсов в перетяжку биконического волокна в области аномальной дисперсии наблюдается генерация СК, длинноволновая часть спектра которого содержит обособленные пики, соответствующие оптическим солитонам. Несущая частота солитонов уменьшается с ростом мощности и длительности импульсов возбуждения, а также с уменьшением модуля параметра их частотной модуляции.
2. Основное спектральное уширение фемтосекундных импульсов возбуждения происходит на начальном этапе их распространения в перетяжке биконического волокна, который характеризуется временной компрессией и распадом импульсов возбуждения. На данном этапе эволюция импульсов определяется, в основном, эффектами фазовой самомодуляции и модуляционной неустойчивости, обусловленными керровской нелинейностью и дисперсией групповых скоростей.
3. Степень когерентности СК уменьшается с ростом мощности и длительности импульсов возбуждения, причем эта зависимость приближенно описывается функцией от произведения пиковой мощности на квадрат длительности импульсов накачки.

4. Учет случайного шума на входе в волокно и усреднение по нему полученных результатов позволяет использовать обобщенное нелинейное уравнение Шрёдингера для адекватного моделирования генерации широкополосного СК при непрерывном возбуждении. Наблюдаемые в эксперименте широкие непрерывные спектры СК, полученные при непрерывном возбуждении, являются результатом усреднения большого числа спектров отдельных солитонов, разделенных во времени и отличающихся по энергии и частоте, а также несолитонного излучения в коротковолновой части спектра.

Апробация работы. Результаты были доложены на 5 международных конференциях: 13 и 14 Международная конференция по оптике лазеров, LO'03 и LO'06 (Санкт-Петербург, 2003 и 2006), 4 Летняя школа по современной оптической нанофотонике, POWAG'04 (Бат, Великобритания, 2004), 4 Международный симпозиум "Современные вопросы лазерной физики", MPLP'04 (Новосибирск, 2004), Международная конференция по когерентной и нелинейной оптике совместно с Международной конференцией по применению лазеров и лазерным технологиям, ICONO/LAT'05 (Санкт-Петербург, 2005). Результаты также докладывались на семинарах Института автоматики и электрометрии СО РАН, Института химической кинетики и горения СО РАН.

Авторский вклад. Результаты данной диссертации были получены в ходе совместной работы автора с научным руководителем и другими соавторами — см. список публикаций в конце автореферата. При этом автор самостоятельно выполнил все численные расчеты и аналитические оценки, входящие в диссертацию, принимал активное участие в постановке задач, обсуждении полученных результатов и их сопоставлении с экспериментальными наблюдениями, а также в подготовке и представлении статей и докладов на конференциях. Кроме того, автором был сделан значительный вклад в экспериментальное исследование когерентных свойств СК, генерируемого в МВ.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, в котором сформулированы защищаемые положения, пяти глав с изложением материала диссертации и заключения, в котором перечислены основные результаты. Общий объём диссертации составляет 134 страницы и включает 34 рисунка и список литературы из 143 наименований.

Содержание работы

Во Введении кратко рассмотрена история исследований генерации СК, начиная с первых экспериментов в объемных средах и заканчивая недавними работами по генерации СК в МВ. Далее описано современное состояние исследований в данной области, а также рассмотрены основные применения СК. На основании этого показана актуальность темы данной диссертационной работы и сформулированы ее цели. В конце приведено краткое содержание диссертации и сформулированы защищаемые положения.

Материал диссертации разбит на пять глав, первая из которых является методической, а остальные четыре посвящены изложению материала исследований в соответствии с этапами работы.

Первая глава посвящена методике моделирования эффекта генерации СК. Так, в §1 перечисляются основные нелинейные эффекты, обуславливающие уширение спектров возбуждения в нелинейных средах, и приводится описывающее их обобщенное нелинейное уравнение Шрёдингера, использованное в данной работе для моделирования генерации СК. В §2 детально рассмотрен способ математического описания дисперсии групповых скоростей. Суть примененного в работе метода численного интегрирования обобщенного нелинейного уравнения Шрёдингера кратко излагается в §3, а использованные при этом начальные условия рассматриваются в §4.

Во второй главе рассматривается эффект самосдвига частоты оптических солитонов в БВ при возбуждении фемтосекундными импульсами. В §5 описывается экспериментальная установка и полученные на ней результаты — спектры излучения на выходе из волокна при различных уровнях средней мощности. В §6 представлены результаты численного моделирования с параметрами, соответствующими экспериментальным. При малых мощностях возбуждения спектр излучения на выходе из БВ состоит из одиночного пика вблизи длины волны накачки. С ростом мощности спектр расщепляется, при этом уединенный пик на его длинноволновой границе соответствует оптическому солитону. По мере дальнейшего увеличения мощности возбуждения солитон сдвигается в длинноволновую область за счет вынужденного комбинационного саморассеяния (ВКСР). Этот процесс сопровождается также появлением новых спектральных компонент в коротковолновой области, которые при достаточно больших мощностях возбуждения образуют широкий спектр

СК. Полученные в численном моделировании результаты качественно и количественно — по величине сдвига частоты солитона — согласуются с экспериментальными наблюдениями. Небольшие различия при этом могут быть обусловлены, в частности, спектрально-селективными потерями при распространении излучения в БВ. Далее в §6 с помощью численного моделирования показывается, что ширина диапазона перестройки частоты солитонов на выходе из БВ увеличивается с ростом длительности и с уменьшением параметра частотной модуляции импульсов возбуждения. Данный результат объясняется на основе анализа механизмов спектрального уширения излучения накачки в БВ.

Третья глава посвящена детальному исследованию динамики генерации СК в БВ. В §7 приводятся результаты численного моделирования начальной фазы распространения импульсов возбуждения по волокну, в ходе которой происходит их распад во времени и основное спектральное уширение. Данный процесс рассматривается как результат совместного действия эффектов фазовой самомодуляции (ФСМ) и модуляционной неустойчивости (МН), обусловленных керровской нелинейностью и дисперсией групповых скоростей. Указанная модель позволяет оценить длину волокна, на которой происходит распад импульсов возбуждения. Полученная оценка согласуется с результатами численного моделирования, проведенного для импульсов накачки различной мощности и длительности. Далее в §7 рассматривается распространение излучения после распада импульса накачки. Установлено, что при этом происходит сравнительно медленный рост ширины спектра, обусловленный, в основном, ВКСР. Наиболее заметные изменения в структуре импульса связаны на данном этапе генерации СК с существенным увеличением длительности волнового пакета СК, временная задержка различных спектральных компонент которого хорошо описывается аналитическим выражением, полученным исключительно на основании рассмотрения дисперсии групповых скоростей волокна. На фоне анализируемой в работе зависимости временной задержки от частоты излучения отчетливо выделяются оптические солитоны, не приобретающие частотной модуляции под действием дисперсии групповых скоростей и не увеличивающие потому свою длительность при распространении по волокну.

После выхода излучения из перетяжки в выходной невытянутый участок БВ дальнейшего спектрального уширения не происходит, что обусловлено большой эффективной площадью сечения моды и, как следствие, слабой нелинейностью невытянутого волокна. При этом про-

должается разбегание различных спектральных компонент СК во времени за счет дисперсии. Поскольку весь наблюдаемый спектр СК лежит в области нормальной дисперсии невытянутого волокна, солитоны, существовавшие в перетяжке, распространяются там как обычные импульсы, приобретая положительную частотную модуляцию и увеличивая соответственно свою длительность.

В §8 проводится сопоставление полученных в ходе численного моделирования результатов с экспериментальными наблюдениями — спектром и зависимостью интенсивности излучения на выходе из БВ от времени. Полученное при этом хорошее качественное соответствие результатов на выходе из волокна (см. Рис. 1) дает основания полагать, что проведенное численное моделирование адекватно эксперименту также и в промежуточных точках, где непосредственные измерения затруднены.

В четвертой главе исследуется уменьшение межимпульсной степени когерентности излучения при генерации СК. При этом рассматриваются важные с точки зрения метрологических применений квантовые шумы (в частности, обусловленные спонтанным комбинационным рассеянием), тогда как технические шумы остаются за рамками проводимых исследований. Это обусловлено тем, что влияние технических шумов может быть устранено за счет стабилизации спектра СК путем привязки отдельных линий или частоты биений между ними к эталонам частоты, что и используется на практике при проведении прецизионных измерений.

В §9 приводятся полученные в численном моделировании зависимости степени межимпульсной когерентности от частоты для импульсов возбуждения с различными параметрами. Данные результаты свидетельствуют о том, что когерентность СК ухудшается с ростом длительности, мощности и параметра частотной модуляции импульсов накачки, а также с увеличением длины волокна. Однако уменьшение степени когерентности сопровождается при этом увеличением ширины спектра СК, что ставит задачу о поиске оптимальных параметров генерации для использования в таких областях, как метрология оптических частот, где требуются одновременно и широкие спектры, и высокая степень когерентности излучения. Решению данной задачи посвящен §10, где результаты проведенного численного моделирования представлены в виде зависимостей когерентности наиболее длинноволнового солитона в спектре СК от сдвига его несущей частоты. Кроме того, в §10 предло-

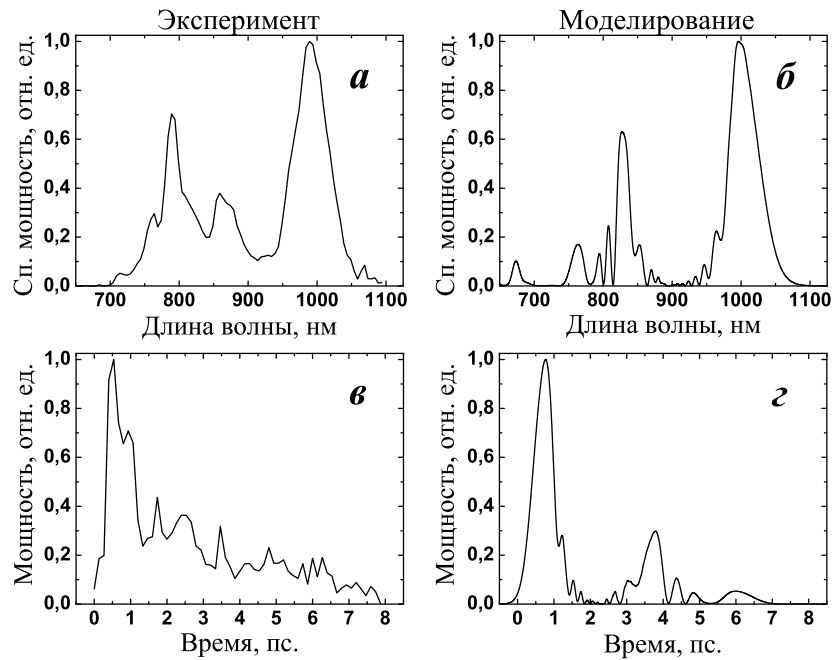


Рис. 1. Результаты экспериментов (а, в) и численного моделирования (б, г) генерации СК в БВ.

жена феноменологическая модель снижения когерентности излучения в процессе генерации СК, основанная на обсуждавшемся в §7 механизме спектрального уширения. С помощью этой модели установлено, что степень когерентности СК можно приближенно рассматривать как функцию от PT^2 , где P — пиковая мощность, а T — длительность импульсов накачки, что согласуется с результатами проведенного численного моделирования — см. Рис. 2.

Для экспериментальной проверки выводов, сделанных на основании проведенного численного моделирования, в работе исследовалась генерация СК в МВ при различных параметрах частотной модуляции импульсов возбуждения. Полученные при этом результаты качественно согласуются с численным моделированием: с ростом модуля параметра частотной модуляции импульсов возбуждения происходит уменьшение степени когерентности и ширины спектра СК.

Поскольку, как было показано, учет в моделировании случайного шума на уровне всего $10^{-9} \dots 10^{-8}$ способен привести к существенному снижению степени когерентности излучения на выходе из волокна, крайне важным является вопрос о проверке точности выполненных численных расчетов. Детальному исследованию этого вопроса посвящен

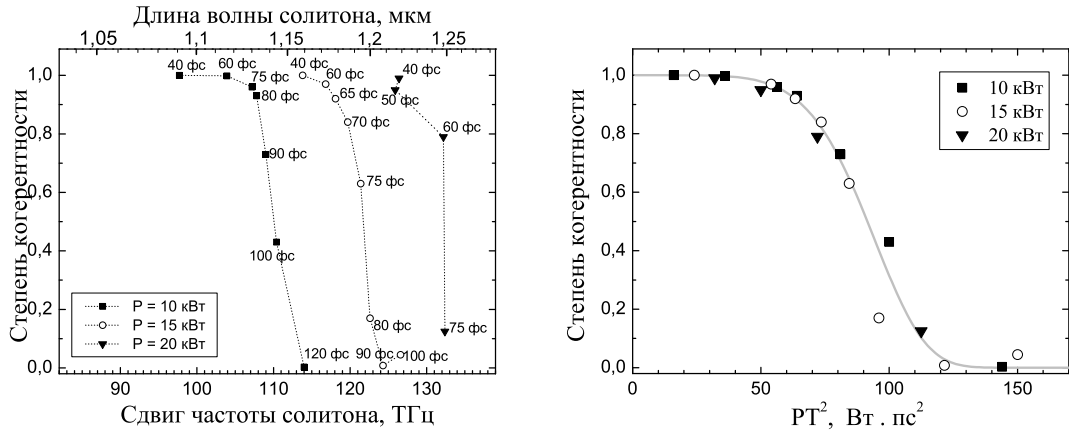


Рис. 2. Степень когерентности наиболее длинноволнового солитона в спектре СК в зависимости от сдвига его частоты (слева) и от произведения мощности и квадрата длительности импульсов возбуждения (справа).

§11, где рассмотрены три различных способа проверки корректности численного моделирования. С их помощью была установлена независимость результатов расчетов от шага численного интегрирования, а также получено дополнительное подтверждение данного в §10 объяснения наблюдаемого в моделировании уменьшения когерентности СК.

В пятой главе исследуются механизмы спектрального уширения при непрерывном возбуждении. Исследование проведено с помощью численного моделирования с параметрами, взятыми из экспериментальной работы [13], где в высоконелинейных волокнах наблюдалась генерация СК со спектром, перекрывающим диапазон от 1,2 до 1,77 мкм.

В §12 кратко излагаются полученные в [13] результаты и приводится постановка задачи. В §13 исследуется динамика генерации СК при непрерывном возбуждении. Показано, что инициирующим генерацию СК процессом является в данном случае МН, приводящая к усилению шума в двух спектральных полосах по бокам от линии возбуждения. По мере роста спектральной плотности мощности шума до уровня возбуждения происходит распад непрерывного излучения накачки на последовательность импульсов, из которых затем формируются оптические солитоны. По мере распространения по волокну, они испытывают смещение в длинноволновую область спектра за счет ВКСР. При этом, поскольку солитоны были сформированы из усиленного за счет МН шума, их параметры — энергия и длина волны — являются случайными величинами, которые наблюдаются в эксперименте не непосредствен-

но, а лишь после усреднения по очень большому (по сравнению с интервалом между солитонами) времени. После выполнения усреднения полученных в расчетах спектров по случайному шуму в накачке, результаты численного моделирования обнаруживают очень хорошее качественное и количественное согласие с экспериментом [13]. Небольшое несоответствие положения коротковолновой границы спектров, а также различная зависимость спектров от мощности возбуждения объясняется предпороговым режимом генерации в моделировании и устраняются при учете конечности ширины линии накачки.

В Заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Основные результаты

1. Исследован эффект самосдвига частоты солитонов в БВ и его зависимость от мощности возбуждения. Показано, что диапазон перестройки частоты солитонов увеличивается с ростом длительности импульсов возбуждения и с уменьшением модуля параметра их частотной модуляции.
2. Установлено, что при введении в БВ фемтосекундных импульсов возбуждения в области аномальной дисперсии основное спектральное уширение происходит на начальном этапе их распространения в перетяжке и может быть объяснено совместным действием ФСМ и МН. Показано, что зависимость временной задержки различных спектральных компонент СК на выходе из БВ обусловлена, в основном, дисперсией групповых скоростей.
3. Показано, что степень межимпульсной когерентности СК уменьшается с ростом длительности, мощности и параметра частотной модуляции импульсов накачки, а также с увеличением длины волокна. Установлено, что увеличение степени когерентности излучения на выходе из волокна за счет уменьшения длины волокна, а также за счет длительности и мощности входных импульсов связано с уменьшением ширины спектра СК. Предложена модель, качественно объясняющая зависимость степени когерентности от мощности и длительности импульсов возбуждения. Показано, что данная зависимость может быть приближенно рассмотрена как функция произведения мощности и квадрата длительности импульсов накачки.

4. Получено соответствие результатов численного моделирования и экспериментов по генерации широкополосного СК при непрерывном возбуждении. Установлено, что спектральное уширение обусловлено распадом непрерывного излучения накачки на последовательность импульсов за счет МН, с последующим формированием из них солитонов и уменьшением их несущей частоты за счет ВКСР. Показано, что широкие непрерывные спектры СК, наблюдаемые в эксперименте, являются результатом усреднения большого количества спектров отдельных солитонов и генерируемого вместе с ними несолитонного излучения в коротковолновом крыле спектра. Выявлена важность учета полихроматичности непрерывного возбуждения для корректного моделирования эффекта генерации СК.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. *Kobtsev S. M., Kukarin S. V., Fateev N. V., Smirnov S. V.* Generation of self-frequency-shifted solitons in tapered fibers in the presence of femtosecond pumping // *Las. Phys.* – 2004. – V. 14, N. 5. – P. 748–751.
2. *Багаев С. Н., Денисов В. И., Захарьяш В. Ф., Клементьев В. М., Кобцев С. М., Корель И.И., Кузнецов С. А., Кукарин С. В., Пивцов В. С., Смирнов С. В., Фатеев Н. В.* Спектральные и временные характеристики суперконтинуума в оптических волокнах с перетяжкой // *Кв. Эл.* – 2004. – V. 34, N. 12. – P. 1107–1115.
3. *Kobtsev S. M., Smirnov S. V.* Optimization of temporal characteristics of supercontinuum generated in tapered air-clad fibers. In: *Proc. SPIE (Laser Optics 2003: Diode Lasers and Telecommunication Systems)*, eds. *Rozanov N. N., Gurevich S. A.* – V. 5480. – P. 64–71, Bellingham, WA. 2004.
4. *Kobtsev S. M., Smirnov S. V.* Super-continuum generation in tapered and cobweb fibres with two-pulse picosecond pump. In: *Proc. 4th Intern. Symp. Modern Problems of Laser Physics*, eds. *Bagayev S. N., Pokasov P. V.* – P. 525–528, Novosibirsk, 2005.
5. *Kobtsev S. M., Kukarin S. V., Fateev N. V., Smirnov S. V.* Coherent, polarization and temporal properties of self-frequency shifted solitons

- generated in polarization-maintaining microstructured fibre // Appl. Phys. B – 2005. – V. 81, N. 2–3. – P. 265–269.
6. *Kobtsev S. M., Smirnov S. V.* Modelling of high-power supercontinuum generation in highly nonlinear, dispersion shifted fibers at CW pump // Opt. Expr. – 2005. – V. 13, N. 18. – P. 6912-6918.
 7. *Kobtsev S. M., Smirnov S. V.* Coherent properties of super-continuum containing clearly defined solitons // Opt. Expr. – 2006. – V. 14, N. 9. – P. 3968-3980.

Список цитированной литературы

- [1] *Alfano R. R., Shapiro S. L.* Emission in the region 4000 to 7000 Å via four-photon coupling in glass // Phys. Rev. Lett. – 1970. – V. 24, N. 11. – P. 584-587.
- [2] *Желтиков А. М.* Нелинейная оптика микроструктурированных волокон // УФН – 2004. – V. 174, N. 1. – P. 73-105
- [3] *Ranka J. K., Windeler R. S., Stentz A. J.* Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm // Opt. Lett. – 2000. – V. 25, N. 1. – P. 25-27.
- [4] *Birks T. A., Wadsworth W. J., Russell P. St. J.* Supercontinuum generation in tapered fibers // Opt. Lett. – 2000. – V. 25, N. 19. – P. 1415-1417.
- [5] *Hall J. L., Ye J., Diddams S. A., Ma L.-S., Cundiff S. T., Jones D. J.* Ultrasensitive spectroscopy, the ultrastable lasers, the ultrafast lasers, and the seriously nonlinear fiber: a new alliance for physics and metrology // IEEE Journ. Quant. El. – 2001. – V. 37, N. 12. – P. 1482-1492.
- [6] *Fercher A. F., Drexler W., Hitzenberger C. K., Lasser T.* Optical coherence tomography — principles and applications // Rep. on Progr. in Phys. – 2003. – V. 66, N. 2. – P. 239-303.
- [7] *Tamura K. R., Kubota H., Nakazawa M.* Fundamentals of stable continuum generation at high repetition rates // Quant. Electr. – 2000. – V. 36, N. 7. – P. 773-779.

- [8] *Südmeyer T., Brunner F., Innerhofer E., Paschotta R., Furusawa K., Baggett J. C., Monro T. M., Richardson D. J., Keller U.* Nonlinear femtosecond pulse compression at high average power levels by use of a large-mode-area holey fiber // *Opt. Lett.* – 2003. – V.28, N.20. – P. 1951-1953.
- [9] *Schenkel B., Paschotta R., Keller U.* Pulse compression with supercontinuum generation in microstructure fibers // *Journ. Opt. Soc. Am. B.* – 2005. – V.22, N.3. – P. 687-693.
- [10] *Желтиков А. М.* Сверхкороткие импульсы и методы нелинейной оптики. – М.: Физ.-мат. лит., 2006. – 294 с.
- [11] *Smirnov S. V., Ania-Castañón J. D., Ellingham T. J., Kobtsev S. M., Kukarin S. V., Turitsyn S. K.* Optical spectral broadening and supercontinuum generation in telecom applications // *Opt. Fib. Technol.* – 2006. – V.12, N.2. – P. 122-147.
- [12] *Nicholson J. W., Abeeluck A. K., Headley C., Yan M. F., Jørgensen C. G.* Pulsed and continuous-wave supercontinuum generation in highly nonlinear, dispersion-shifted fibers // *Appl. Phys. B* – 2003. – V.77, N.2-3. – P. 211-218.
- [13] *Abeeluck A. K., Headley C., Jørgensen C. G.* High-power supercontinuum generation in highly nonlinear, dispersion-shifted fibers by use of a continuous-wave Raman fiber laser // *Opt. Lett.* – 2004. – V.29, N.18. – P. 2163-2165.

Подписано к печати “26” октября 2006 г.
Формат бумаги 60x84 1/16. Объём 1 печ. л.
Тираж 100 экз. Заказ № 1901.

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