

На правах рукописи

Кобцев Сергей Михайлович

**ВОЛОКОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ  
УПРАВЛЯЕМОГО СУПЕРКОНТИНУУМА**

01.04.05 “Оптика”

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Новосибирск - 2010

Работа выполнена в Национальном исследовательском университете “Новосибирский государственный университет”

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, профессор Желтиков Алексей Михайлович

Доктор физико-математических наук Курков Андрей Семёнович

Доктор физико-математических наук, профессор Федорук Михаил Петрович

Ведущая организация

Учреждение Российской академии наук Институт лазерной физики СО РАН

Защита состоится “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2010 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 003.005.01 при Институте автоматизации и электрометрии СО РАН по адресу: 630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга 1.

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

Автореферат разослан “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2010 г.

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

Насыров К.А.

## Актуальность темы.

Бурный прогресс физики и техники источников ультракоротких световых импульсов, а также волоконной оптики за последние годы привёл к возникновению принципиально новых источников спектрально-широкополосного когерентного излучения [1-3], спектр которого способен на сегодняшний день перекрыть до трёх октав оптического спектра [4,5]. Для обозначения этого излучения используется уже устоявшийся термин “суперконтинуум”, хотя общепринятого количественного определения этого термина нет, и суперконтинуумом часто именуется инициируемое лазерными импульсами когерентное излучение с шириной непрерывного спектра, существенно превышающей ширину спектра излучения импульсов накачки, при этом ширина спектра суперконтинуума может измеряться как десятками, так и сотнями нанометров. Наиболее широко явление генерации суперконтинуума стало изучаться после первых демонстраций этого эффекта около 10 лет назад в специальных оптических волокнах (микроструктурированных [6-9], вытянутых [10]), позволяющих кардинально уменьшить порог генерации суперконтинуума. При использовании таких волокон [10,11] генерация суперконтинуума может быть получена при накачке фемтосекундными импульсами с относительно малой энергией, составляющей менее наноджоуля [12,13]. Ультракороткие импульсы с такой энергией могут генерироваться непосредственно в лазерах с синхронизацией мод излучения без использования систем усиления. Появление микроструктурированных (МС) и вытянутых оптических волокон сделало возможным существенное упрощение систем для генерации суперконтинуума, исключив необходимость использования мощных громоздких многокаскадных лазерных систем.

Развитие исследований в области генерации суперконтинуума показало перспективность и высокую практическую ценность излучения этого типа для решения задач метрологии, телекоммуникаций, нанотехнологий, оптической когерентной томографии, дистанционного анализа атмосферы и многих других. В этой связи задача создания генераторов суперконтинуума для различных применений стала чрезвычайно актуальной. Однако разрабатываемые в последние годы несколькими компаниями подобные генераторы [14] не обеспечивают возможность управления параметрами генерируемого излучения, востребованную в целом ряде применений и, прежде всего, в научных исследованиях с использованием суперконтинуума. Единственным изменяемым параметром излучения накачки этих генераторов являет-

ся мощность (или энергия) импульсов. В связи с этим характеристики суперконтинуума существующих коммерческих генераторов являются по большей части слабо варьируемыми или фиксированными.

Разработка способов управления параметрами суперконтинуума предполагает в том числе наличие возможностей изменения (желательно в реальном масштабе времени) характеристик излучения лазерной системы, используемой для генерации суперконтинуума. Такие возможности до начала выполнения данной работы во многих лазерных системах ультракоротких импульсов существовали в очень ограниченном объёме, а в волоконных вариантах таких лазеров были ещё более лимитированы. Как следствие разработка генераторов управляемого суперконтинуума требовала также радикального совершенствования лазерных систем на основе новых идей и подходов.

В волоконных генераторах суперконтинуума возбуждаемой средой является оптоволокно, которое может быть специальным или стандартным. Характеристики используемого оптического волокна в немалой степени определяют параметры суперконтинуума и уровень сложности получения необходимых режимов его генерации. Нелинейное взаимодействие лазерных импульсов с веществом оптических волокон приводит к проявлению в разной степени ряда физических эффектов (фазовая самомодуляция и кросс-модуляция, вынужденное комбинационное рассеяние, возникновение и распад оптических солитонов, самоукручение фронта импульса, четырехволновые взаимодействия, модуляционная неустойчивость), за счёт которых формируется суперконтинуум. Знание деталей этого процесса крайне важно для понимания путей достижения целевых параметров и режимов генерации суперконтинуума.

Таким образом, работы этого направления, начатые автором в 1998 г., были неразрывно связаны с изучением физических явлений, лежащих в основе исследуемых процессов как в оптических волокнах, в которых генерируется суперконтинуум, так и в лазерных системах, обеспечивающих излучение накачки для генерации суперконтинуума.

### **Цель данной работы.**

Основной целью данной работы является изучение физических основ управления спектральными, энергетическими, временными, поляризационными и фазовыми характеристиками суперконтинуума, в том числе с ярко выраженными солитонными структурами в спектре, генерируемого в оптических волокнах.

В соответствии с поставленной целью необходимо было решить следующие задачи:

- разработать технологию изготовления в лабораторных условиях вытянутых оптических волокон с перетяжками диаметром 2-5 мкм, используемых на первом этапе работы в качестве модельных, провести апробацию образцов, исследовать возможности их длительной работы при различных вариантах защиты перетяжки от внешней среды;
- исследовать свойства суперконтинуума, генерируемого в различных вытянутых и МС световодах, на изменение параметров лазерного излучения накачки (длины волны, энергии, длительности, поляризации и фазовой модуляции импульсов), изучить физические механизмы, определяющие специфику отклика суперконтинуума на изменение характеристик лазерного излучения накачки;
- определить когерентные свойства суперконтинуума с ярко выраженными солитонными структурами в спектре и зависимость степени когерентности разных спектральных компонентов суперконтинуума от фазовой модуляции импульсов накачки;
- разработать и исследовать твердотельные и волоконные лазерные системы, обеспечивающие перестройку спектра излучения ультракоротких импульсов;
- разработать и исследовать высокоэнергетичные импульсные цельноволоконные и гибридные (дискретно-волоконные) лазерные системы для генерации импульсов суперконтинуума с относительно высокой энергией;
- исследовать режимы спектрального уширения импульсов накачки в нелинейных оптических усилителях и длинных оптических резонаторах;
- изучить пути оптимизации свойств управляемого суперконтинуума для различных приложений.

### **Научная новизна и практическая ценность результатов работы.**

Научная новизна работы.

В результате проведенных в настоящей работе исследований:

- выявлена высокая чувствительность свойств суперконтинуума к изменению длины волны (вблизи длины волны нулевой дисперсии МС/вытянутого световода), поляризации и фазовой модуляции фемтосекундных импульсов возбуждения. Полученные в ходе исследований результаты впервые позволили создать научную основу для разработки нового поколения генераторов суперконтинуума с управляемыми характеристиками (ширина и форма спектра, спектральная

плотность мощности, степень поляризации, пиковая мощность и спектральное положение солитонов);

- установлено, что когерентность коротковолнового излучения генерируемого в МС световоде суперконтинуума, имеющего хорошо выраженные солитонные структуры в спектре, является неполной и зависит от фазовой модуляции фемтосекундных импульсов накачки. При этом обнаружено, что длинноволновое солитонное излучение полностью когерентно в широком диапазоне вариаций несущей частоты солитонов;

- впервые получен в иттербиевом волоконном задающем генераторе с синхронизацией мод и полностью положительной дисперсией резонатора режим генерации пикосекундных цугов излучения, заполненных стохастичной последовательностью фемтосекундных импульсов. С помощью численного моделирования показано, что наблюдаемый режим проявляется в том же лазерном резонаторе, в котором может генерироваться последовательность фазово-модулированных пикосекундных импульсов. Выявлено, что одними из отличительных признаков наблюдаемого режима является двойная форма автокорреляционной функции интенсивности излучения импульсов и гладкая форма спектра излучения. Проанализированы особенности управления параметрами генераторов суперконтинуума на базе лазеров, работающих в этом режиме;

- выявлены новые физические условия достижения высокой ( $>1$  мкДж) энергии импульсов волоконных и гибридных задающих лазеров с синхронизацией мод излучения. Экспериментально показана возможность генерации импульсов суперконтинуума с энергией порядка нескольких десятков мкДж при использовании предложенных высокоэнергетичных лазерных систем в составе волоконных генераторов суперконтинуума;

- показаны возможности реализации специальных режимов генерации суперконтинуума в стандартных активных или пассивных оптических волокнах: в первом случае была получена генерация спектрально-уширенного излучения с относительно высокой спектральной плотностью мощности излучения, во втором – генерация суперконтинуума со сдвинутым в длинноволновую область спектром, формируемым преимущественно за счёт комбинационного рассеяния;

- найдены новые схемные решения лазеров и лазерных систем на основе активных сред, допированных иттербием, позволяющие осуществить перестройку длины волны ультракоротких импульсов в широком спектральном диапазоне;

Практическая ценность результатов работы.

1. Разработаны и исследованы эффективные методы характеристики ультракоротких лазерных импульсов на основе предложенных интерференционных автокорреляторов и нелинейных фотоприёмников, позволяющие повысить точность измерений.
2. Разработаны и апробированы опытные образцы лазеров на основе активных сред, допированных иттербием, позволяющие: в режиме синхронизации мод осуществлять непосредственно в лазере перестройку длины волны ультракоротких импульсов в широком спектральном диапазоне, генерировать импульсы с энергией более 1 мкДж без модуляции добротности и дополнительных оптических усилителей. Высокоэнергетичные лазеры реализованы и в цельноволоконных конфигурациях.
3. Разработаны и исследованы различные конструкции вытянутых световодов, которые могут быть изготовлены в лабораторных условиях. Созданные конструкции выгодно отличаются более низкой себестоимостью и расширенными возможностями управления дисперсионными и нелинейными характеристиками волокон, за счет чего удастся существенно повысить эффективность генерации суперконтинуума.
4. Реализованы режимы генерации суперконтинуума со специальными параметрами в стандартных активных и пассивных оптических волокнах.
5. Проведена физически обоснованная классификация генераторов суперконтинуума на базе различных лазеров для разных применений.
6. Созданы опытные образцы волоконных генераторов управляемого суперконтинуума, проведена аттестация одного из них во ФГУП “Новосибирский центр стандартизации, метрологии и сертификации”.

Внедрение научно-технических решений в области лазерной физики и волоконной оптики, полученных в ходе выполнения данной работы, вносит значительный вклад в развитие прогресса в области квантовой электроники.

### **Публикации.**

Основные результаты диссертации содержатся в 54 работах, из них 37 работ опубликовано в ведущих рецензируемых журналах и изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией.

### **Апробация работы.**

Результаты работы докладывались на международных конференциях CLEO/Europe-2000 (Ницца, Франция)/2003/2009 (Мюнхен, Германия), CLEO/Pacific Rim-2003 (Тайпей, Тайвань), Photonics West-2008/2009 (Сан-Хосе, США), 2010 (Сан-Франциско, США), ACOLC/ACOFT-2009 (Аделаида, Австралия), LAT-2002 (Москва), ICONO/LAT-2005 (Санкт-Петербург), Laser Optics-1998/2006/2008 (Санкт-Петербург), OFC-2003 (Атланта, США), MPLP-2004 (Новосибирск), POWAG-2002 (Санкт-Петербург) / 2004 (Баз, Великобритания), NLGW-2004 (Торонто, Канада), LFNМ-2005 (Ялта, Украина), а также на Всероссийских конференциях по волоконной оптике – 2007/2009 (Пермь), Российских семинарах по волоконным лазерам – 2007 (Новосибирск) / 2008 (Саратов) / 2009 (Уфа) / 2010 (Ульяновск), Всероссийской конференции “Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине” – 2009 (Новосибирск).

### **На защиту выносятся следующие положения диссертации:**

1. Вариации длины волны и поляризации фемтосекундных импульсов возбуждения в спектральной области вблизи длины волны нулевой дисперсии вытянутого/МС оптического волокна существенным образом влияют на свойства генерируемого суперконтинуума, позволяя изменять ширину и форму спектра, спектральную плотность мощности, степень поляризации суперконтинуума, а также реализовать режим генерации спектрально-перестраиваемых солитонов.
2. Когерентность коротковолнового излучения генерируемого в микроструктурированном оптоволокне суперконтинуума, имеющего хорошо выраженные солитонные структуры в спектре, является неполной и зависит от фазовой модуляции фемтосекундных импульсов накачки. При этом длинноволновое солитонное излучение при изменении фазовой модуляции импульсов накачки сохраняет полную когерентность, несмотря на значительные вариации несущей частоты солитонов.
3. В волоконном лазере с синхронизацией мод за счет нелинейной эволюции поляризации и полностью положительной дисперсией резонатора может быть реализован как режим генерации последовательности одиночных импульсов, так и режим генерации последовательности цугов импульсов со стохастичным заполнением ультракороткими суб-импульсами. В этих двух режимах имеются качественные раз-

личия как в спектрах излучения, так и в регистрируемых автокорреляционных функциях интенсивности излучения импульсов.

4. Высокоэнергетичные импульсные цельноволоконные и гибридные (дискретно-волоконные) лазерные системы с длинными оптическими резонаторами задающих генераторов способны инициировать в микроструктурированном оптоволокне генерацию суперконтинуума с энергией импульсов порядка нескольких десятков мкДж при длительностях импульсов менее 10 нс.

5. В волоконных усилителях или в стандартных пассивных оптоволоконках могут быть реализованы специальные режимы генерации суперконтинуума: генерация спектрально-уширенного излучения с высокой спектральной плотностью мощности излучения или генерация суперконтинуума со сдвинутым в длинноволновую область спектром, формируемым преимущественно за счёт комбинационного рассеяния в условиях спектрально уширенного излучения накачки.

### **Объем и структура диссертации**

Диссертация изложена на 232 страницах, включая список цитируемой литературы (235 наименований), список из 54 публикаций автора по теме диссертации, содержит 1 таблицу и 83 рисунка.

Во введении дается общая характеристика работы; в первой главе приведен обзор литературных данных; главы 2-7 содержат описание проведенных исследований, их обсуждение и анализ; в заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

### **Личный вклад автора**

Диссертационная работа является результатом многолетней работы автора в лаборатории лазерных систем Новосибирского государственного университета и представляет собой обобщение научных исследований автора, выполненных совместно с сотрудниками НГУ, а также специалистами ИЛФ СО РАН, ИФП СО РАН и Астон Университета (Великобритания). Публикации результатов данной работы выполнены в соавторстве, так как проводимые работы имели коллективный характер. Все полученные в диссертации результаты получены автором лично, либо при его непосредственном участии или под его научным руководством. Подавляющее большинство этих результатов было получено в ходе выполнения работ, инициатором и научным руководителем которых являлся автор.

## Основное содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, приведены ее цели и защищаемые положения, излагается научная новизна и практическая значимость полученных результатов, даны сведения об их апробации и публикации.

В **главе 1** проведён обзор литературных данных по теме диссертации и представлено состояние проблемы исследований. Глава начинается с краткого очерка основных теоретических положений и необходимых экспериментальных сведений, касающихся физики генерации суперконтинуума в оптических волокнах. Далее анализируются полученные ранее ключевые результаты в области тематики исследований данной работы.

**Глава 2** посвящена исследованию отклика суперконтинуума, генерируемого в различных вытянутых и МС световодах, на изменение характеристик лазерного излучения накачки. Глава начинается с описания разработанной технологии изготовления в лабораторных условиях вытянутых германосиликатных световодов с перетяжкой диаметром 2-5 мкм (рис. 1), в том числе с некруговым поперечным сечением перетяжки.

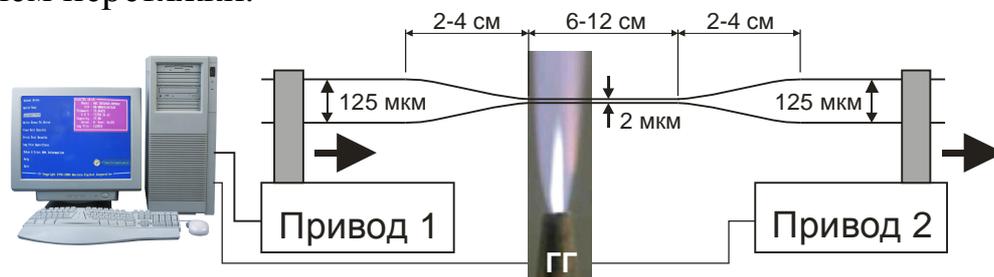


Рис. 1. Схема созданной лабораторной установки для вытяжки световодов с перетяжками диаметром несколько микрон: ГГ – газовая горелка, привод 1,2 – электромеханические приводы на основе шаговых двигателей.

Лаборатория лазерных систем НГУ в течение нескольких лет была второй лабораторией в мире (после группы оптоэлектроники Университета Баз, Великобритания), где существовала технология изготовления этих уникальных световодов. Благодаря этому стало возможным до появления коммерческих МС волокон начать исследования в области генерации суперконтинуума с использованием вытянутых световодов собственного изготовления. Это также позволило получить с этими волокнами ряд приоритетных результатов, которые позднее были получены другими группами при использовании МС световодов. К таким результатам относится в первую очередь выявленная высокая чувствительность ширины и формы спектра супер-

континуума и, следовательно, спектральной плотности мощности, к изменению длины волны фазово-модулированных фемтосекундных импульсов накачки вблизи длины волны нулевой дисперсии вытянутого германосиликатного световода (рис. 2).

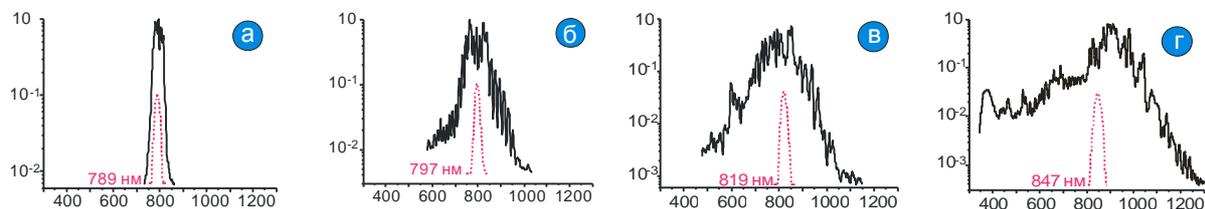


Рис. 2. Спектры излучения на выходе вытянутого световода при изменении длины волны фемтосекундных импульсов накачки: а – 789 нм, б – 797 нм, в – 819 нм, г – 847 нм. Штриховая линия – спектр излучения импульсов накачки.

При перестройке центральной длины волны излучения импульсов длительностью 80 фс в диапазоне от 789 до 847 нм при фиксированной средней мощности излучения накачки ширина спектра суперконтинуума варьировалась от 98 до 790 нм по уровню -20 дБ. Полный спектр суперконтинуума при наибольшей ширине (рис. 2г) перекрывал почти две октавы оптического спектра – от 340 нм до 1320 нм. На рис. 3 показана видимая часть суперконтинуума, полученная разложением спектра излучения с помощью дифракционной решетки.



Рис. 3. Фотография видимой части суперконтинуума, полученной пространственным разложением спектра излучения с помощью дифракционной решетки.

Как было выявлено в ходе проведённых исследований, при переходе длины волны излучения импульсов накачки из области нормальной дисперсии световода в область аномальной дисперсии скорость уширения спектра в зависимости от пиковой мощности импульсов изменяется из-за смены механизма начального уширения спектра суперконтинуума: в области нормальной дисперсии уширение происходит за счёт фазовой самомодуляции, а в области аномальной дисперсии – за счёт самосдвига частоты солитонов. Таким образом, вариация длины волны импульсов накачки вблизи длины волны нулевой дисперсии вытянутого световода является эффективным средством управления ключевыми параметрами суперконтинуума при неизменной средней мощности накачки. Этот вывод позже был подтверждён результатами работы [15], в которой аналогичная сильная зависимость была выяв-

лена при генерации суперконтинуума в микроструктурированных световодах.

В диссертационной работе эффект значительного уширения спектра суперконтинуума при изменении длины волны излучения накачки фиксированной средней мощности исследовался также с использованием разработанного задающего генератора на базе Yb:KYW лазера с перестройкой длины волны излучения импульсов длительностью 250 фс в диапазоне 1038-1053 нм. На рис. 4 приведены спектры суперконтинуума, генерируемого в МС волокне SC-5.0-1040 ("Crystal Fiber", длина волны нулевой дисперсии 1040 нм), при средней мощности накачки 300 мВт на разных длинах волн в диапазоне 1040-1049 нм. Видно, что ширина спектра суперконтинуума резко увеличивается (с 124 до 400 нм по уровню -15 дБ) при перестройке длины волны излучения Yb:KYW лазера от 1040 до 1049 нм в окрестности длины волны нулевой дисперсии микроструктурного волокна.

Для численного моделирования этого эффекта было использовано обобщённое нелинейное уравнение Шрёдингера [16]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial A}{\partial z} = & i \sum_{k=2}^{k_{\max}} \frac{i^k}{k!} b_k \frac{\partial^k A}{\partial t^k} + ig(1-f_R)|A|^2 A - g \frac{1-f_R}{w_0} \frac{\partial}{\partial t} (|A|^2 A) + \\ & + igf_R \left( 1 + \frac{i}{w_0} \frac{\partial}{\partial t} \right) \left( A(z,t) \int_0^{\infty} R(t') |A(z,t-t')|^2 dt' \right) - \alpha A \end{aligned} \quad (1)$$

здесь  $A(z, t)$  – огибающая напряженности электрического поля,  $b_k$  – дисперсионные коэффициенты на частоте накачки  $w_0$  и  $g = n_2 w_0 / (A_{\text{eff}} c)$  – нелинейный коэффициент, где  $n_2 = 3.2 \times 10^{-20}$  м<sup>2</sup>/Вт – нелинейный показатель преломления материала волокна (кварца),  $A_{\text{eff}}$  – эффективная площадь сечения основной моды,  $\alpha$  – коэффициент потерь,  $c$  – скорость света в вакууме. Ядро  $R(t)$  интегрального оператора, описывающего задержанный нелинейный отклик среды (эффект вынужденного комбинационного рассеяния):

$$R(t) = \frac{t_1^2 + t_2^2}{t_1 t_2^2} \cdot \exp\left(-\frac{t}{t_2}\right) \sin\left(\frac{t}{t_1}\right) \quad (2)$$

Времена  $\tau_1$  и  $\tau_2$  определяются из эксперимента и составляют 12,2 фс и 32 фс соответственно,  $f_R = 0,18$  [16].

Был проведён сравнительный расчет скоростей спектрального уширения импульсов в случае фазовой самомодуляции и самосдвига частоты солитонов. Моделировалось распространение импульсов длительностью 100 фс в перетяжке вытянутого световода длиной 10

см и диаметром 2.3 мкм при накачке в области аномальной дисперсии (длина волны излучения 805 нм,  $\beta_2 = -11.9$  пс<sup>2</sup>/км), в этом случае уширение спектра определяется, в основном, самосдвигом частоты солитонов, и распространение импульсов длительностью 100 фс в этом же световоде, но с нормальной дисперсией ( $\beta_2 = +11.9$  пс<sup>2</sup>/км). Расчетные зависимости приведены на рис. 5

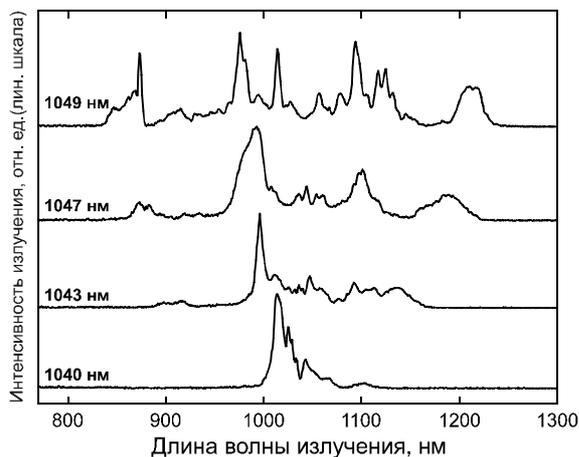


Рис. 4. Спектры суперконтинуума при фиксированной средней мощности и разных длинах волн излучения накачки.

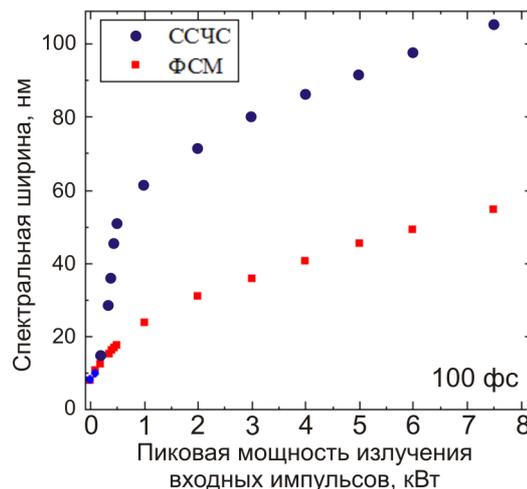


Рис. 5. Зависимость ширины спектра суперконтинуума от пиковой мощности излучения входных импульсов длительностью 100 фс при разных механизмах уширения: ССЧС - самосдвиг частоты солитонов, ФСМ – фазовая самомодуляция.

Из рис. 5 видно, что при малых пиковых мощностях излучения входных импульсов (до ~ 400 Вт) спектральное уширение одинаково (в обоих случаях основным эффектом является фазовая самомодуляция). При пиковой мощности входных импульсов около 400 Вт в случае накачки в область аномальной дисперсии световода происходит распад многосолитонного состояния на фундаментальные солитоны, что и определяет существенно бóльшую скорость спектрального уширения в данном случае.

Другой важный результат, полученный в диссертационной работе сначала с использованием вытянутого световода с некруговым поперечным сечением перетяжки, а затем с микроструктурированным волокном с эллиптическим сечением сердцевинки, относится к возможности управления поляризацией суперконтинуума с помощью поляризации излучения накачки. При эллиптическом (или квазиэллиптическом) сечении сердцевинки изменение ориентации плоскости линейной поляризации излучения накачки относительно осей эллипса

сечения приводит как к изменению степени поляризации суперконтинуума, так и к изменению ширины и формы спектра суперконтинуума (рис. 6). Распределение энергии импульса накачки между двумя собственными ортогональными поляризационными модами световода приводит к тому, что формирование суперконтинуума каждой из ортогонально-поляризованных компонент импульса происходит при меньшей мощности излучения, что объясняет меньшую ширину спектра суперконтинуума в этом случае. Приведённые на рис. 7 спектры суперконтинуума, генерируемого в микроструктурированном волокне с эллиптическим сечением сердцевинки, показывают, что поворот плоскости поляризации излучения фемтосекундной накачки ( $\lambda=795$  нм) на  $90^\circ$  вызывает как изменение ширины и формы спектра суперконтинуума, так и изменение центральной длины волны излучения солитонов (длинноволновые пики на рис. 7). При этом наибольшая скорость спектральной перестройки солитонов достигается тогда, когда поляризация излучения накачки совпадает с малой осью эллипса сердцевинки волокна.

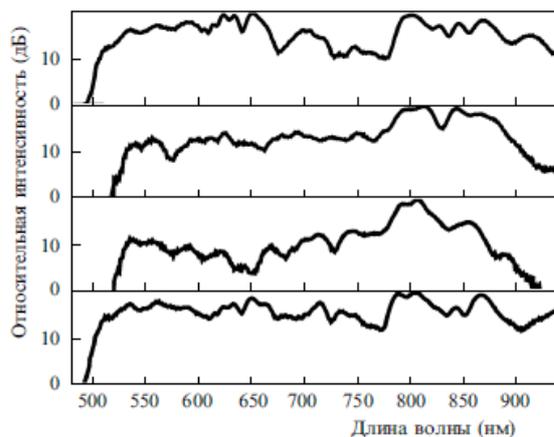


Рис. 6. Спектры суперконтинуума при разных ориентациях плоскости поляризации излучения накачки относительно квази-эллиптического сечения перетяжки вытянутого световода

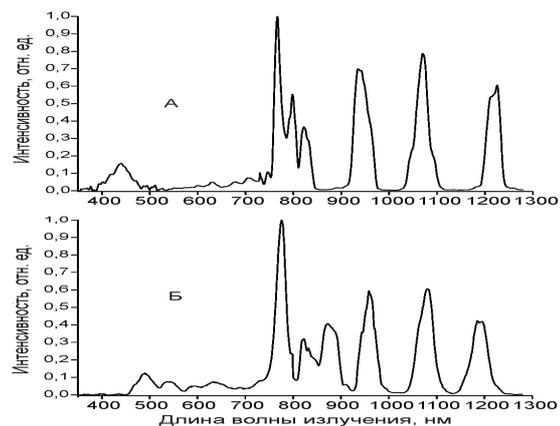


Рис. 7. Спектры суперконтинуума, генерируемого в микроструктурированном волокне: А – поляризация излучения накачки совпадает с малой осью эллипса сечения сердцевинки, Б - поляризация излучения накачки совпадает с большой осью эллипса сечения сердцевинки

Чувствительность параметров самоперестраиваемых по частоте солитонов, генерируемых при определённых условиях на начальной стадии развития суперконтинуума, к изменениям характеристик излучения накачки также изучалась сначала в вытянутых световодах, а затем в микроструктурированных. Необходимо отметить, что генерация самоперестраиваемых по частоте солитонов в вытянутом световоде

впервые была получена автором с коллегами. Проведенные эксперименты с микроструктурированными световодами показали, что при изменении длины волны или поляризации фемтосекундных импульсов накачки при фиксированной средней мощности её излучения спектральное положение самосдвинутых по частоте солитонов может изменяться на несколько десятков нанометров.

Экспериментальное измерение временного распределения интенсивности суперконтинуума с использованием метода генерации суммарной частоты волн накачки и суперконтинуума показало, что ярко выраженные длинноволновые компоненты спектра соответствуют уединённым временным структурам с характерными временными интервалами между структурами от нескольких пикосекунд до 15 пс.

Таким образом, выявленные зависимости параметров суперконтинуума от характеристик излучения накачки при использовании различных вытянутых и МС световодов позволяют выработать требования к источникам накачки для реализации режимов генерации управляемого суперконтинуума.

В **главе 3** представлены результаты исследований когерентных свойств суперконтинуума с ярко выраженными солитонными структурами в спектре. Такой режим реализуется при определенном сочетании параметров вытянутого или МС волокна и импульсов накачки и имеет свою специфику по сравнению с генерацией суперконтинуума с гладким спектром. Суперконтинуум с ярко выраженными солитонными структурами в спектре, характеризующийся значительной (более октавы) шириной спектра и высоким уровнем спектральной плотности мощности в солитонных пиках, может представлять практический интерес для его использования в метрологии, в связи с чем возникла задача измерения степени когерентности различных спектральных компонентов такого суперконтинуума. Также было важно выяснить влияние характеристик излучения накачки на когерентные свойства такого суперконтинуума. Было экспериментально установлено существенное влияние начальной фазовой модуляции фемтосекундных импульсов накачки на степень когерентности коротковолнового излучения генерируемого в МС волокне суперконтинуума, имеющего хорошо выраженные солитонные структуры в спектре. На рис. 8 приведена зависимость степени когерентности суперконтинуума на длине волны 510 нм от параметра фазовой модуляции фемтосекундных импульсов накачки при средней мощности суперконтинуума 30 мВт. Видно, что степень когерентности изменяется от 0.3 до 0.65 при изменении параметра фазовой модуляции от -1,8 до 2. Кроме того,

была выявлена сильная зависимость спектрального положения длинноволнового солитонного пика от параметра фазовой модуляции импульсов накачки (рис. 9). Было установлено, что наибольшая ширина спектра суперконтинуума и наибольшая степень когерентности его коротковолнового излучения достигаются при небольшом положительном значении параметра фазовой модуляции [15], составляющем 0,25. Измерения степени когерентности длинноволнового солитонного излучения показали, что при изменении фазовой модуляции импульсов накачки это излучение сохраняет полную когерентность несмотря на значительные вариации несущей частоты солитонов.

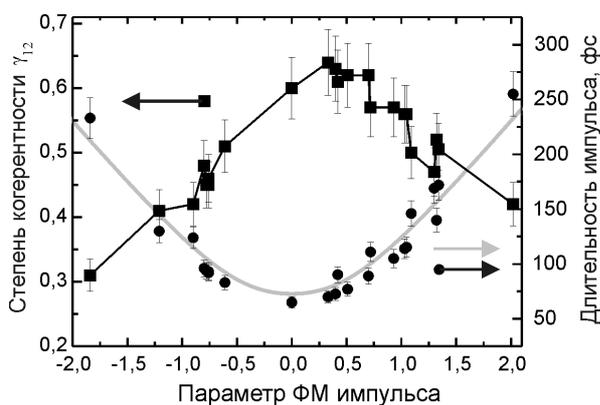


Рис. 8. Зависимость степени когерентности суперконтинуума на длине волны 510 нм и длительности импульсов накачки от параметра фазовой модуляции импульса накачки, серая кривая соответствует расчетным данным.

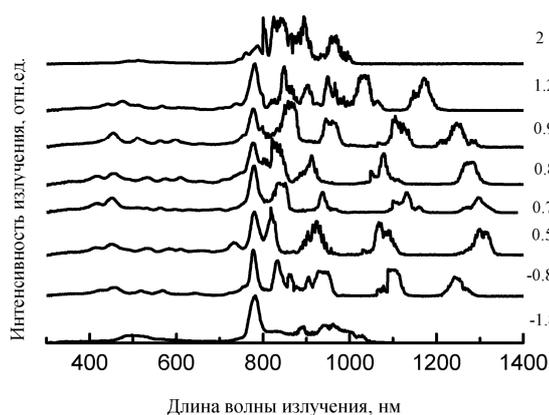


Рис. 9. Спектры генерации суперконтинуума в микроструктурированном волокне при различных параметрах фазовой модуляции импульсов накачки (величина параметра приведена справа от каждого спектра).

В данной главе рассмотрен также закономерно возникающий в контексте данной работы вопрос о применимости излучения суперконтинуума с отличной от единицы степенью когерентности для оптических часов. Показано, что при степени когерентности  $\sim 0.6$  и малых временах усреднения на уровне  $10^{-5}$ – $10^{-4}$  с отношение уровня шума к сигналу оптического комба не превышает  $\sim (-30)$  –  $(-40)$  дБ, что является приемлемым для рассматриваемых метрологических приложений.

В главе 4 рассмотрены предложенные твердотельные, волоконные и гибридные лазерные системы ультракоротких импульсов с перестройкой длины волны излучения. Перестройка спектра излучения ультракоротких (фемто-, пикосекундных) импульсов в лазерах с синхронизацией мод является традиционно непростой задачей, решение которой в значительной степени определяется спецификой лазера:

шириной полосы усиления, усилением, длительностью импульсов, механизмом синхронизации мод и т.д. В волоконных лазерах эта задача дополнительно усложняется существенно более узким набором возможных средств в волоконном исполнении. В данной главе описаны предложенные методы и устройства для спектральной перестройки излучения импульсов лазеров с синхронизацией мод – твердотельных (Ti:Sapphire лазер, Yb:KYW лазер) и волоконных (Yb, Er), используемых в качестве источников излучения накачки генераторов суперконтинуума на разных этапах выполнения работы.

В твердотельных лазерах для перестройки длины волны излучения ультракоротких импульсов использовался специальный двулучепреломляющий фильтр, защищенный авторским свидетельством (автор С.М.Кобцев). Ориентация оптической оси плоскопараллельной пластинки из кристаллического кварца под углом  $43-50^\circ$  к её поверхности позволяет при использовании её в резонаторе лазера под углом Брюстера осуществить выделение линии генерации лазера с помощью максимума пропускания первого порядка при относительно большой толщине пластины (2-3 мм). Ориентация оптической оси в указанном диапазоне углов обеспечивает также относительно большую угловую дисперсию такого селектора ( $\sim 20$  нм/град) и сохранение контраста функции пропускания предложенного селектора при широкодиапазонной перестройке спектрального положения максимума пропускания, что является дополнительным преимуществом этого устройства. Необходимо отметить, что этот селектор длин волн излучения может успешно применяться и в волоконных лазерах. Однако в линейных волоконных лазерах является проблемой обеспечение спектрально-широкой рабочей полосы отражателей волоконных лазерных резонаторов. Простые отражательные брэгговские решётки с периодической структурой обладают высоким отражением в довольно узком спектральном диапазоне ( $\sim < 0,5-1$  нм). Недавно была продемонстрирована возможность изготовления аперидических решёток, имеющих высокое отражение ( $> 95\%$ ) в области шириной несколько сотен нанометров [17]. Однако изготовление таких решёток является весьма непростой задачей, а кроме того, значительная фазовая модуляция импульсов, приобретаемая при отражении от такой решётки, может играть отрицательную роль в ряде приложений.

В этой главе описаны предложенные сверхширокополосные волоконные отражатели, которые могут быть реализованы на базе стандартных волоконных циркуляторов. Было установлено, что образованный соединением входного и выходного портов циркулятор может

выполнять роль волоконного отражателя с высоким отражением (> 80-90%) в спектральном диапазоне шириной десятки нанометров и относительно высоким отражением (>50%) в спектральной полосе шириной более 150 нм. Схема перестраиваемого волоконного Yb лазера с синхронизацией мод и предложенным отражателем приведена на рис. 10. В этом лазере был реализован устойчивый режим синхронизации мод с генерацией как одиночных (за обход резонатора) пикосекундных импульсов, так и пикосекундных цугов со стохастической “начинкой” фемтосекундными импульсами. Спектр линейно поляризованного излучения выходных импульсов перестраивался в области шириной 45 нм от 1075 до 1120 нм.

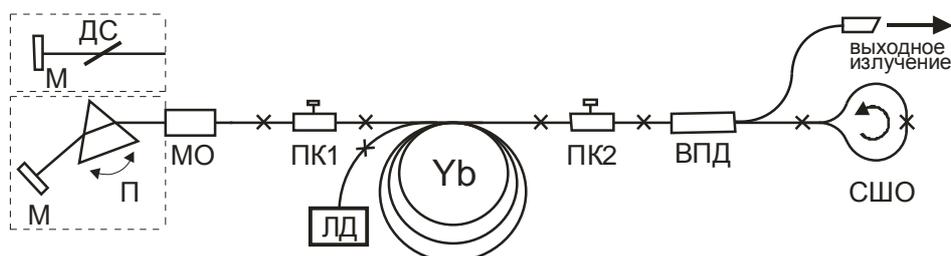


Рис.10. Схема перестраиваемого волоконного Yb лазера с синхронизацией мод излучения и предложенным отражателем на основе циркулятора: Yb – активное волокно, допированное иттербием, ЛД – лазерный диод накачки, ПК1,2 – контроллеры поляризации, ВПД – волоконный делитель поляризации, СШО – спектрально-широкополосный отражатель, МО – микрообъектив, П – призма, ДС - двулучепреломляющий селектор, М – спектрально-широкополосное отражающее зеркало.

Для существенного расширения области спектральной перестройки излучения этого лазера его излучение усиливалось в дополнительном волоконном усилителе и направлялось в волокно 1060XP длиной 60 м. При средней мощности излучения на входе в волокно 1060XP до 6 Вт на его выходе излучение включало до трёх стоксовых компонент, образованных в результате вынужденного комбинационного рассеяния основного излучения в волокне 1060XP. Спектральная перестройка стоксовых компонент осуществлялась синхронно с перестройкой основного излучения (рис. 11), а общий диапазон перестройки длины волны излучения составил 1075-1300 нм с небольшими разрывами в областях 1120-1130 нм, 1174-1190 нм и 1235-1255 нм, которые могут быть устранены при дальнейшем небольшом увеличении области спектральной перестройки основного излучения. Длительность пикосекундных цугов основного излучения и стоксовых компонент составляла 5-10 пс, при этом вид автокорреляционных функций импульсов основного излучения и всех трёх стоксовых ком-

понент был практически идентичен (рис. 12). Характерная двойная структура автокорреляционных функций (узкий фемтосекундный пик на пикосекундном пьедестале) подтверждает генерацию во всём спектральном диапазоне пикосекундных цугов с заполнением стохастической последовательностью фемтосекундными импульсами.

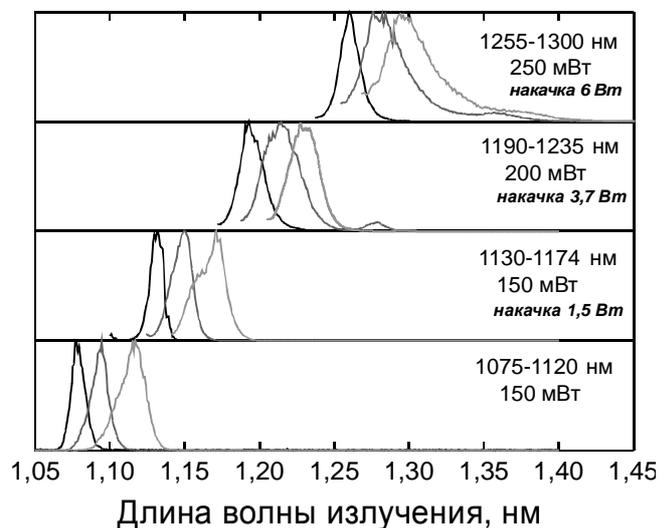


Рис. 11. Спектры основного излучения и стоксовых компонент при перестройке, справа приведены средние мощности излучения стоксовых компонент и средние мощности накачки.

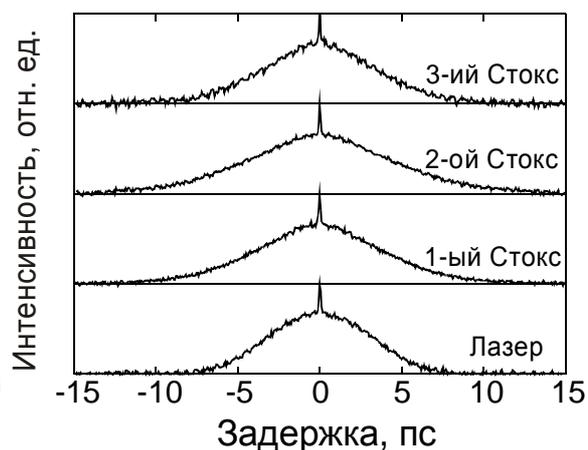


Рис. 12. Автокорреляционные функции импульсов лазера и импульсов разных стоксовых компонент.

Таким образом, предложенные и исследование методы спектральной перестройки излучения ультракоротких световых импульсов твердотельных и волоконных лазеров способны обеспечить реализацию рассмотренных выше способов управления параметрами суперконтинуума.

В главе 5 представлены предложенные высокоэнергетичные волоконные и гибридные лазерные системы накачки суперконтинуума. Эти системы базируются на ультрадлинных (длина более 1 км) резонаторах, применение которых позволяет достичь непосредственно на выходе лазера энергий импульсов более 1 мкДж. В режиме синхронизации мод излучения лазера частота следования импульсов задаётся длиной резонатора лазера, поэтому увеличение длины резонатора при сохранении средней мощности излучения приводит к увеличению энергии импульсов. Очевидно, что реализация этого подхода к увеличению энергии импульсов наиболее проста в волоконных лазерах, длина резонатора которых может быть легко увеличена на сотни метров и даже на километры. Однако до настоящей работы наибольшие

длины резонаторов лазеров с синхронизацией мод излучения составляли 100-400 м [18,19], что позволяло увеличить энергию импульсов до 120 нДж [19]. В диссертационной работе были впервые исследованы волоконные и гибридные лазеры с синхронизацией мод излучения, оптические длины резонаторов которых были радикально увеличены – до нескольких километров. Дискретно-волоконный иттербиевый лазер с оптической длиной резонатора 3,8 км, синхронизация мод которого осуществлялась с помощью эффекта нелинейного вращения поляризации излучения, генерировал импульсы с частотой повторения 77 кГц, длительностью 3 нс и энергией 3,8 мкДж при средней мощности излучения 300 мВт на длине волны 1075 нм. На момент выполнения этой работы энергия полученных импульсов (3,9 мкДж) являлась самой большой энергией импульсов, полученных непосредственно на выходе волоконного лазера с синхронизацией мод без применения модуляции добротности резонатора лазера, метода открытия закрытого резонатора лазера ("cavity dumping") или дополнительного оптического усилителя. Далее этот лазер был усовершенствован и реализован в цельноволоконной конфигурации с оптической длиной резонатора, составляющей 8 км. При средней выходной мощности лазера 150 мВт генерировались импульсы длительностью 10 нс с частотой повторения 37 кГц и энергией 4 мкДж, что также является рекордной величиной для волоконных лазеров с синхронизацией мод излучения. Выходное излучение этого цельноволоконного Yb лазера линейно поляризовано и выводится через волокно с поддержкой поляризации излучения. Необходимо отметить, что в коротком варианте (без удлиняющего волокна) лазер генерировал импульсы длительностью ~1 пс, которые могли быть скомпрессированы вне резонатора лазера до 550 фс. При удлинении резонатора лазера длительность и энергия импульсов увеличивались, при этом экспериментально было обнаружено существование двух характерных режимов генерации лазера при относительно небольших длинах его резонатора. В одном режиме лазер генерировал последовательность фазово-модулированных пикосекундных импульсов, а в другом – пикосекундные цуги со стохастичной "начинкой" из фемтосекундных импульсов. Экспериментально и с помощью моделирования было выявлено, что отличительными признаками второго режима является двойная форма автокорреляционной функции импульсов и гладкая форма спектра излучения.

Применение высокоэнергетичной длинноимпульсной (например, наносекундной) накачки суперконтинуума представляет интерес в связи с возможностью достижения высоких энергий импульсов су-

перконтинуума. Генерация суперконтинуума в оптических волокнах при накачке ультракороткими световыми импульсами (фемтосекундными, пикосекундными) сопровождается, как правило, распадом импульса накачки на несколько (или множество) импульсов суперконтинуума с различной энергией. Во временном представлении это соответствует последовательности импульсов суперконтинуума с временем между импульсами порядка их характерной длительности или превышающем её. Как показало моделирование, при накачке импульсами наносекундной длительности импульсы суперконтинуума сохраняют свою целостность на наносекундном масштабе времени, поэтому в этом случае импульсы суперконтинуума можно характеризовать такими параметрами как энергия импульса, длительность и т.д.

На рис. 13 приведена схема созданного высокоэнергетичного цельноволоконного генератора суперконтинуума. Выходное излучение кольцевого Yb лазера с оптической длиной 8 км и энергией импульсов 4 мкДж дополнительно усиливается и заводится в МС волокно SC-5.0-1040 длиной 30 м. Средняя мощность излучения на выходе из этого волокна составила 1,5 Вт при энергии наносекундных импульсов суперконтинуума 40 мкДж. Насколько известно автору, это самая большая энергия импульсов суперконтинуума длительностью порядка 10 нс, достигнутая при генерации в МС волокне на момент выполнения данной работы. Спектр генерации суперконтинуума приведен на рис. 14. Отметим относительно гладкое крыло полученного суперконтинуума в области 1160-1550 нм, а также интенсивный пик в спектре в районе 570 нм.

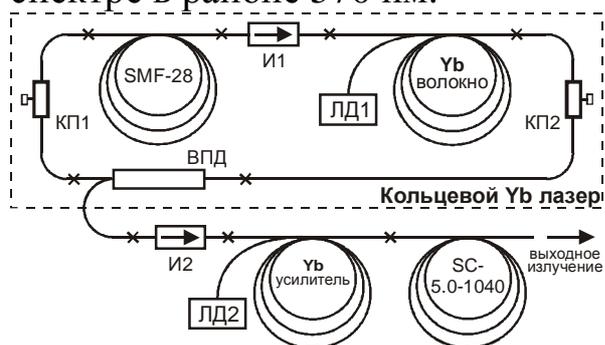


Рис. 13. Схема созданного цельноволоконного генератора суперконтинуума с высокой энергией импульсов: ЛД1,2 – лазерные диоды накачки с длиной волны излучения 975 нм, КП1,2 – контроллеры поляризации, И1,2 – изоляторы, ВПД – волоконный поляризационный делитель.



Рис. 14. Спектр суперконтинуума с энергией импульсов 40 мкДж

Таким образом, создание высокоэнергетических наносекундных волоконных задающих генераторов с синхронизацией мод в ультрадлинном резонаторе позволило реализовать на базе такого лазера цельноволоконный генератор суперконтинуума с относительно высокой энергией импульсов.

В главе 6 обсуждаются генераторы суперконтинуума на основе стандартных активных и пассивных оптических волокон. Эффект уширения спектра импульсов при их усилении в волоконном оптическом усилителе был впервые получен недавно [20] для импульсов наносекундной длительности. Представляло интерес выяснить специфику этого эффекта в случае фемтосекундных импульсов. Схема созданной экспериментальной установки приведена на рис. 15. В качестве задающего осциллятора использовался Yb:KYW лазер с длительностью импульсов 250 фс на длине волны 1046 нм (частота следования  $\sim 100$  МГц, средняя мощность излучения 400 мВт). Для усиления излучения лазера был применен волоконный Yb усилитель на основе сдвоенного волокна (технология GTWave [21]) с диаметром светопроводящей жилы активного волокна 7 мкм и длиной 12 м. Накачка усилителя осуществлялась через пассивный световод диодным лазером с мощностью излучения 8 Вт на длине волны 976 нм. Максимальная средняя мощность усиленного излучения достигала 3,4 Вт. Спектры выходного излучения в зависимости от средней мощности приведены на рис. 16.

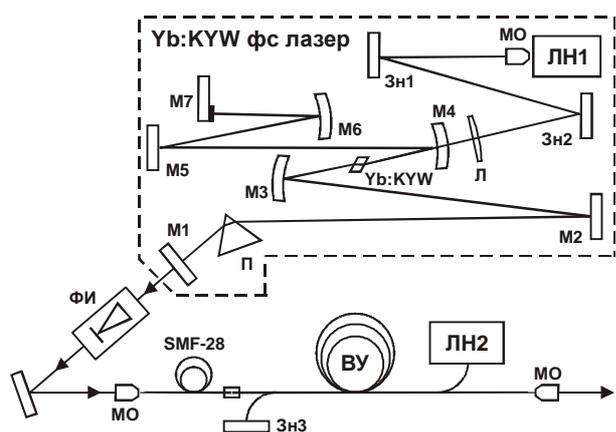


Рис. 15. Схема экспериментальной установки: ЛН1,2 – диодные лазеры накачки, Зн1-3 – зеркала, отражающие излучение накачки, М1-М7 – зеркала Yb:KYW лазера, Л – фокусирующая линза, П – призма, МО – микрообъектив, ФИ – фарадеевский изолятор, ВУ – волоконный усилитель.

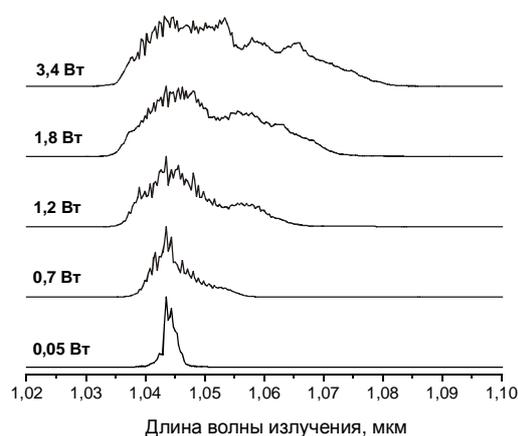


Рис. 16. Спектры излучения на выходе нелинейного оптоволоконного усилителя, слева около каждой кривой – значение средней мощности выходного излучения.

При увеличении средней мощности выходного излучения от 50 мВт до максимального значения 3,4 Вт ширина спектра излучения на выходе усилителя возрастала с 8,5 нм (ширина спектра излучения задающего генератора) до 50 нм. Скорость уширения спектра усиленного излучения составила 12,4 нм/Вт. Полученная в данном эксперименте скорость уширения спектра излучения фемтосекундных импульсов в нелинейном оптоволоконном усилителе значительно (на 1-2 порядка) ниже, чем аналогичная скорость уширения спектра ультракоротких световых импульсов в микроструктурных или вытянутых волокнах. Относительно низкая скорость спектрального уширения излучения в нелинейном волоконном усилителе позволяет достичь высокой спектральной плотности излучения, существенно превосходящей спектральную плотность суперконтинуума на выходе микроструктурированных или вытянутых волокон при импульсной накачке.

Для исследований возможностей генерации суперконтинуума в стандартном пассивном оптоволокне была создана цельноволоконная лазерная система, представленная на рис. 17. Задающим осциллятором этой системы служил описанный в главе 4 линейный волоконный Yb лазер с синхронизацией мод излучения. В режиме синхронизации мод лазер генерировал цуги длительностью 10 пс со стохастическим наполнением фемтосекундными импульсами. Использование дополнительного волоконного усилителя позволило поднять среднюю выходную мощность лазерной системы до уровня более 2 Вт. При накачке этим излучением стандартного германосиликатного световода 1060XP длиной 80 м на его выходе было получено суперконтинуум, сформированный за счет спектральных пиков, соответствующих комбинационному рассеянию разных порядков (рис. 18).

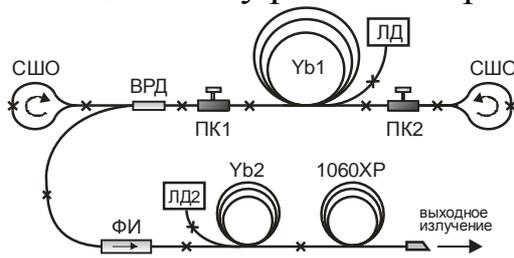


Рис. 17. Схема цельноволоконной лазерной системы: Yb1,2 - активное Yb волокно, ПК1,2 - контроллеры поляризации, СШО - спектрально-широкополосный отражатель, ВРД – волоконный делитель поляризации, ФИ – изолятор.

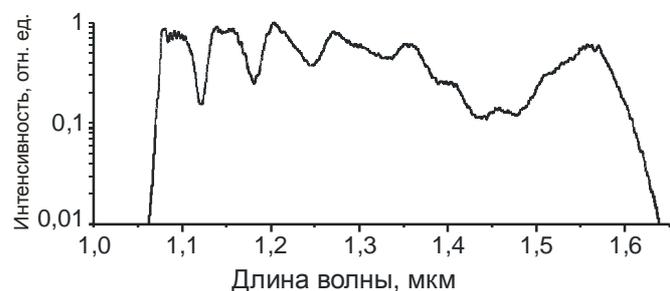


Рис. 18. Спектр суперконтинуума, генерируемого в стандартном оптоволокне 1060XP длиной 80 м при накачке пикосекундными цугами со стохастическим наполнением фемтосекундными импульсами.

Предварительное спектральное уширение излучения в волоконном усилителе вызывало соответствующее спектральное уширение пиков комбинационного рассеяния, в результате чего они перекрывались, образуя сплошной широкий спектр в области 1060-1640 нм.

Таким образом, показано, что уширение спектра ультракоротких импульсов в волоконных усилителях имеет относительно небольшую скорость с увеличением мощности излучения накачки и может быть использовано для генерации суперконтинуума с относительно высокой спектральной плотностью мощности излучения. Кроме того, предварительное нелинейное уширение спектра ультракоротких импульсов в волоконном усилителе играет важную роль в сглаживании спектра суперконтинуума, генерируемого преимущественно за счет комбинационного рассеяния в стандартном длинном оптоволокне.

В главе 7 анализируются волоконные генераторы суперконтинуума для различных применений. Необходимость в широкополосном когерентном излучении – суперконтинууме – возникает при решении самых различных задач нанотехнологий, оптических коммуникаций, метрологии, биомедицины, спектроскопии и других областей. Однако разные приложения предъявляют разные, порой несовместимые друг с другом, требования к свойствам суперконтинуума. Так, например, для метрологии оптических частот необходим суперконтинуум с шириной спектра не менее одной октавы, обладающий высокой стабильностью амплитуды и фазы, тогда как для мнговольных источников в телекоммуникационной технологии WDM оказывается достаточно относительно небольшой ширины спектра суперконтинуума, при этом на первый план выходят требования к однородности спектральной плотности мощности и к регулярности временной структуры излучения, которая должна иметь вид периодической последовательности одиночных импульсов. Для целей оптической когерентной томографии необходим широкополосный суперконтинуум с низким уровнем шумов и достаточно произвольным профилем спектральной плотности мощности, тогда как в схемах генерации ультракоротких импульсов используется суперконтинуум с временным распределением интенсивности в виде последовательности одиночных импульсов с квадратичной и кубической фазовой модуляцией. В схемах встречной накачки волоконных рамановских усилителей востребован суперконтинуум со специальным профилем спектральной плотности мощности, обеспечивающим однородный по спектру коэффициент усиления.

Дополнительное разнообразие возможных параметров вносят генераторы суперконтинуума с непрерывной накачкой, появившиеся в последнее время [22]. В этих источниках генерация суперконтинуума также происходит в оптическом волокне. Действующая на начальном этапе распространения в оптоволокне мощного непрерывного излучения модуляционная неустойчивость приводит к появлению и росту амплитуды модуляции непрерывного излучения с его последующим распадом на последовательность импульсов. Часть из этих импульсов обладает достаточной энергией для формирования оптических солитонов. Поскольку солитоны формируются из усиленного шума, их параметры – энергия и длина волны – являются случайными величинами. Наблюдаемые в эксперименте [22] широкие и гладкие спектры суперконтинуума при непрерывной накачке получаются при усреднении по большому числу солитонов на выходе из волокна.

Следовательно, основное принципиальное отличие механизмов спектрального уширения непрерывного излучения от генерации суперконтинуума при импульсной накачке связано с действием модуляционной неустойчивости, приводящей к усилению шума на начальном этапе распространения непрерывного излучения и распаду последнего на последовательность импульсов, параметры которых испытывают значительные флуктуации. Ещё одним минусом генераторов суперконтинуума с непрерывной накачкой является необходимость использования очень длинных – порядка километра – высоконелинейных волокон, а также отсутствием либо высокой стоимостью высоконелинейных волокон для генерации суперконтинуума при непрерывном возбуждении на длинах волн за пределами телекоммуникационной спектральной области вблизи 1550 нм.

Применимость генераторов суперконтинуума с импульсной и непрерывной накачкой для различных приложений приведена в таблице.

Из сравнения возможных областей применения генераторов суперконтинуума с импульсной и непрерывной накачкой видно, что генераторы с непрерывной накачкой имеют существенно более узкую область применения и меньшие перспективы в связи с этим. В свою очередь генераторы суперконтинуума с импульсной накачкой применимы во всех рассмотренных приложениях и развитие генераторов этого типа более актуально.

Таким образом, развитие идей и подходов к созданию более универсального генератора суперконтинуума, который может быть использован при решении широкого круга задач разных приложений,

несомненно более целесообразно на базе генераторов суперконтинуума с импульсной накачкой.

Таблица

Применимость суперконтинуума с импульсной и непрерывной накачкой в различных приложениях

	Непрерывная накачка	Модулированная непрерывная накачка	Накачка длинными импульсами ( $\beta_2 < 0$ )	Накачка короткими импульсами ( $\beta_2 < 0$ )	Импульсная накачка ( $\beta_2 < 0$ )
Метрология	-	-	-	+	-
Оптическая когерентная томография	+	+	+	+	+
Коммуникации	-	+	-	-	+
ВКР-усилители	+	+	+	+	+
Получение ультракоротких импульсов	-	+	-	+	+
Спектроскопия с временным разрешением	-	+	-	-	+

В **заключении** приведены основные результаты и выводы диссертационной работы.

### **Основные результаты и выводы диссертационной работы.**

В результате проведенных в настоящей работе исследований:

1. Определены условия, при которых достигается наибольшая вариация ширины спектра суперконтинуума, генерируемого в МС и вытянутых световодах, при изменении длины волны излучения фемтосекундных импульсов накачки.
2. Выявлено, что когерентность коротковолнового излучения генерируемого в МС световоде суперконтинуума, имеющего хорошо выраженные солитонные структуры в спектре, является неполной и зависит от фазовой модуляции фемтосекундных импульсов накачки.
3. Установлено, что длинноволновое солитонное излучение, генерируемое в МС световоде на начальной стадии формирования суперконтинуума, полностью когерентно в широком диапазоне вариаций несущей частоты солитонов.

4. Показано, что обнаруженный в иттербиевом волоконном лазере с синхронизацией мод и полностью положительной дисперсией резонатора режим генерации пикосекундных цугов излучения, заполненных стохастичной последовательностью фемтосекундных импульсов, характеризуется двойной формой автокорреляционной функции интенсивности излучения импульсов и гладкой формой спектра излучения.
5. Выявлены новые физические условия достижения высокой ( $>1$  мкДж) энергии импульсов волоконных и гибридных задающих лазеров с синхронизацией мод излучения. Экспериментально показана возможность генерации импульсов суперконтинуума с энергией порядка нескольких десятков мкДж при использовании предложенных высокоэнергетичных лазерных систем в составе волоконных генераторов суперконтинуума.
6. Исследованы режимы генерации суперконтинуума в стандартных активных и пассивных оптических волокнах, позволяющие достичь высокой спектральной плотности мощности излучения или сформировать сдвинутый в длинноволновую область сплошной спектр, возникающий преимущественно за счёт вынужденного комбинационного рассеяния в условиях спектрально уширенной накачки.
7. Предложены новые схемные решения лазеров и лазерных систем на основе активных сред, допированных иттербием, позволяющие осуществить перестройку длины волны ультракоротких импульсов в широком спектральном диапазоне.
8. Разработаны и исследованы эффективные методы характеристики ультракоротких лазерных импульсов на основе предложенных интерференционных автокорреляторов и нелинейных фотоприёмников, позволяющие повысить точность измерений.
9. Проведена физически обоснованная классификация режимов генерации суперконтинуума на базе различных лазеров для широкого круга исследовательских и прикладных задач в физике, химии, биологии, медицине и других областях.
10. Созданы опытные образцы разработанных твердотельных, волоконных и гибридных лазеров, а также волоконных генераторов управляемого суперконтинуума.

В целом в диссертационной работе продемонстрированы возможности создания волоконных генераторов управляемого суперконтинуума, в том числе с относительно высокоэнергетичными импульсами, на основе предложенных современных лазерных систем с управляемыми параметрами излучения. Возбуждаемой средой этих генераторов суперконтинуума могут являться как специальные опти-

ческие волокна (вытянутые, микроструктурированные), так и в определённых режимах генерации стандартные активные и пассивные волокна. Предложенные и исследованные волоконные генераторы суперконтинуума отличаются управляемостью параметров излучения, необходимой для ряда приложений, в особенности исследовательских. Полученные результаты обеспечивают физическую основу для дальнейшего научного и технического развития этих уникальных источников излучения.

#### **Основные публикации по теме диссертации:**

1. А.с. 1554615. Двухлучепреломляющий селектор линии генерации широкополосных перестраиваемых лазеров / С.М.Кобцев.- №4294307/31-25; Заявлено 07.08.1987; Оpubл. 01.12.1989, Бюл. №12.- 2 с.
2. Барауля В.И., Кобцев С.М., Кораблев А.В. Использование светоизлучающих диодов АЛ307 в качестве фотоприемников для измерения длительности фемтосекундных световых импульсов // Письма в ЖТФ.- 1998.- Т.24.- №1.- С.62-65.
3. Кобцев С.М., Смирнов С.В., Кукарин С.В., Сорокин В.Б. Фемтосекундный автокоррелятор на основе качающейся двухлучепреломляющей пластинки // Квантовая электроника.- 2001.- Т.31.- №9.- С.829-833.
4. Кобцев С.М., Кукарин С.В., Фатеев Н.В. Управление шириной спектра фемтосекундного континуума, генерируемого в световоде малого диаметра // Квантовая электроника.- 2002.- Т.32.- №1.- С.11-13.
5. Кобцев С.М., Кукарин С.В., Фатеев Н.В. Генерация поляризованного суперконтинуума в квазиэллиптических световодах малого диаметра // Квантовая электроника.- 2003.- Т.33.- №12.- С.1085-1088.
6. 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 // Laser Physics.- 2004.- V.14.- N5.- P.748-751.
7. 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 // Квантовая электроника.- 2004.- Т.34.- №12.- С.1107-1115.
8. Kobtsev S.M., Pustovskikh A.A. Improvement of Raman amplifier gain flatness by broadband pumping sources // Laser Physics.- 2004.- V.14.- N12.- P.1488-1492.

9. Kobtsev S.M., Smirnov S.V. Modelling of high-power supercontinuum generation in highly nonlinear, dispersion shifted fibers at CW pump // *Optics Express*.- 2005.- V.13.- N18.- P. 6912-6918.
10. 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.- N2-3.- P.265-269.
11. Kobtsev S.M., Smirnov S.V. Coherent properties of super-continuum containing clearly defined solitons // *Optics Express*.- 2006.- V.14.- N9.- P.3968-3980.
12. Smirnov S.V., Ania-Castanon J.D., Ellingham T.J., Kobtsev S.M., Kukarin S.V., Turitsyn S.K. Optical spectral broadening and supercontinuum generation in telecom applications // *Optical Fiber Technology*.- 2006.- V.12.-N2.- P.122-147.
13. Kobtsev S.M., Smirnov S.V. Supercontinuum fiber sources under pulsed and CW pumping // *Laser Physics*.- 2007.- V.17.- N11.- P. 1303-1305.
14. Кобцев С.М., Кукарин С.В., Смирнов С.В., Фатеев Н.В. Управление спектральными и когерентными свойствами суперконтинуума с ярко выраженными солитонными структурами в спектре с помощью фазовой модуляции фемтосекундных импульсов накачки // *Квантовая электроника*. – 2007.- Т. 37.- №11.- С.1038-1042.
15. Кобцев С.М., Кукарин С.В. Дискретно-волоконный генератор-усилитель субпикосекундных импульсов на базе Yb:KYW лазера // *Квантовая электроника*. – 2007. – Т. 37.- №11.– С.993-995.
16. Kobtsev S.M., Smirnov S.V. Influence of noise amplification on generation of regular short pulse trains in optical fibre pumped by intensity-modulated CW radiation // *Optics Express*.- 2008.- V.16.- C.7428-7434.
17. Kobtsev S.M., Kukarin S.V., Smirnov S.V. Fiber supercontinuum generator with wavelength-tunable pumping // *Laser Physics*.- 2008.- V.18.- N11.- P.1257-1259.
18. Kobtsev S.M., Smirnov S.V. Temporal structure of a supercontinuum generated under pulsed and CW pumping // *Laser Physics*.- 2008.- V.18.- N11.- P.1260-1263.
19. Kobtsev S.M., Smirnov S.V. Fiber supercontinuum generators with dynamically controlled parameters // *Laser Physics*. – 2008.- V.18.- N11.- P.1264-1267.
20. Kobtsev S.M., Kukarin S.V., Fedotov Y.S. High-energy Q-switched fiber laser based on the side-pumped active fiber // *Laser Physics*.- 2008.- V.18.- N11.- P.1230-1233.

21. Kobtsev S., Kukarin S., Fedotov Y. Ultra-low repetition rate mode-locked fiber laser with high-energy pulses // *Optics Express*.- 2008.- V.16.- N26.- P. 21936-21941.
22. Кобцев С.М., Кукарин С.В., Ю.С.Федотов Ю.С. Импульсный высокоэнергетичный волоконный лазер на основе сдвоенного световода // *Квантовая электроника*.- 2009.- Т.39.- №5.- С.417-420.
23. Кобцев С.М., Смирнов С.В. Волоконные генераторы суперконтинуума с расширенным набором управляемых параметров в реальном масштабе времени // *Оптика и спектроскоп.*- 2009.- Т.107.- №3.- С.363-367.
24. Кобцев С.М., Кукарин С.В. Спектральное уширение фемтосекундных импульсов в нелинейном оптоволоконном усилителе // *Оптика и спектроскопия*.- 2009.- Т.107.- № 3.- С.368-371.
25. Kobtsev S., Kukarin S., Smirnov S., Turitsyn S, Latkin A. Generation of double-scale femto/pico-second optical lumps in mode-locked fiber lasers // *Optics Express*.- 2009. - V.17.- N23.- P.20707-20713.
26. Ivanenko A.I., Kobtsev S.M., Kukarin S.V. Femtosecond ring all-fiber Yb laser with combined wavelength-division multiplexer–isolator // *Laser Physics*.- 2010.- V.20.- N.2.- P. 344–346.
27. Kobtsev S.M., Kukarin S.V. All-fiber Raman supercontinuum generator // *Laser Physics*.- 2010.- V.20.- N.2.- P. 372–374.
28. Kobtsev S.M., Kukarin S.V., Smirnov S.V., Fedotov Y.S. High-energy mode-locked all-fiber laser with ultralong resonator // *Laser Physics*.- 2010.- V.20.- N.2.- P. 351–356.
29. Kobtsev S.M., Kukarin S.V., Fedotov Y.S. Wide-spectrally-tunable CW and femtosecond linear fiber lasers with ultrabroadband loop mirrors based on fiber circulators // *Laser Physics*.- 2010.- V.20.- N.2.- P.347–350.
30. Kobtsev S.M., Kukarin S.V., Smirnov S.V. All-fiber high-energy supercontinuum pulse generator // *Laser Physics*.- 2010.- V.20.- N.2.- P. 375–378.
31. Kobtsev S., Kukarin S., Smirnov S., Fedotov Y. Ultra-wide-tunable fibre source of femto- and picosecond pulses based on intracavity Raman conversion // *Photonics West (23-28 Jan 2010, San Francisco, USA): Proc. SPIE, “Fiber Lasers VII: Technology, Systems, and Applications”*.- 2010.- V.7580.- Paper 7580-74.
32. Kobtsev S., Kukarin S., Smirnov S. Different generation regimes of mode-locked all-positive-dispersion all-fiber Yb laser // *Photonics West (23-28 Jan 2010, San Francisco, USA): Proc. SPIE, “Fiber Lasers VII: Technology, Systems, and Applications”*.- 2010.- V.7580.- Paper 7580-79 .

33. Kobtsev S., Kukarin S., Smirnov S., Turitsyn S., Latkin A. Mode-locked all-positive-dispersion long-resonator fiber lasers: features of femto- and picosecond pulses generation regime // ACOLS/ACOFT 2009 Conference and Workshop on Dissipative Solitons (Nov 29 - Dec 03 2009, Adelaide, Australia): Proc. ACOLS/ACOFT on CD.- ISBN 1 876346 612.- 2009.- P.296,297.
34. Kobtsev S, Smirnov S. Supercontinuum generators with CW and pulsed pump: temporal structure and dynamic control of parameters // Photonics West, LASE-2009 (24-29 Jan 2009, San Jose, USA): Proc. SPIE, " Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials, Devices, and Applications VIII".- 2009.- V.7197.- Paper 71971A.
35. Kobtsev S., Kukarin S., Fedotov Y. Q-switched hybrid MOPA laser system based on Yb fibre with side pumping by single source // Photonics West, LASE-2009 (24-29 Jan 2009, San Jose, USA): Proc. SPIE, " Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials, Devices, and Applications VIII".- 2009.- V.7197.- Paper 71932Q.
36. Kobtsev S., Kukarin S., Smirnov S., Latkin A., Turitsyn S. High-energy all-fiber all-positive-dispersion mode-locked ring Yb laser with 8 km optical cavity length // CLEO/Europe and EQEC 2009 Conference (14-19 June 2009, Munich, Germany): Conf. Digest. – 2009. - Paper CJ8.4.
37. Kobtsev S, Kukarin S., Fedotov Y., Smirnov S. All-fiber supercontinuum generator with high-energy pulses // CLEO/Europe and EQEC 2009 Conf. (14-19 June 2009, Munich, Germany): Conf. Dig. – 2009. - Paper CJ.P.16.
38. Kobtsev S., Smirnov S. CW- and pulse-pumped fiber super-continuum generators // Photonics West, LASE-2008 (21-24 Jan 2008, San Jose, USA): Proc. SPIE, "Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials, Devices, and Applications VII".- 2008.- V.6875.- Paper 68750S.
39. Kobtsev S., Kukarin S. Hybrid bulk/fibre MOPA system based on Yb:KYW laser // Photonics West, LASE-2008 (21-24 Jan 2008, San Jose, USA): Proc. SPIE, "Solid State Lasers XVII: Technology and Devices".- 2008.- V.6871.- Paper 68710Y.
40. Kobtsev S.M., Kukarin S.V., Fateev N.V., Smirnov S.V. Effect of femtosecond pump pulses phase modulation on the spectral and coherence properties of super-continuum with strongly expressed soliton spectral structures // XII Межд. Конф. “Оптика лазеров” (26-30 июня 2006, Санкт-Петербург): Proc. SPIE, “Laser Optics 2006: Diode Lasers and Telecommunication Systems”.- 2007.- V.6612.- Paper 66120C.
41. Chepurov S.V., Dianov E.M., Fateev N.V., Kuznetsov S.A., Klementyev V.M., Kobtsev S.M., Pivtsov V.S., Sysoliatin A.A. Supercon-

- tinuum generation in highly nonlinear optical fibers using Cr:Forsterite laser // 7th Int. Conf. on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (15-17 Sep 2005, Yalta, Ukraine): Proc. LFNM.- Yalta, 2005.- P.128-130.
42. Kobtsev S.M., Pustovskikh A.A., Smirnov S.V. Wide-spectrum supercontinuum generation in fibers with CW pump // Int. Conf. ICONO/LAT-2005: Tech. Digest.- 2005.- IThS43.
43. Kobtsev S.M., Kukarin S.V., Smirnov S.V., Fateev N.V. Self-frequency shifted solitons in photonic crystal fibers: coherent and temporal properties // Int. Conf. ICONO/LAT-2005 (11-15 May 2005, St. Petersburg, Russia): Tech. Digest.- 2005.- IThS44.
44. Kobtsev S.M., Smirnov S.V. Super-continuum generation in tapered and cobweb fibres with two-pulse picosecond pump // IVth Int. Symp. MPLP'2004 (22-27 Aug 2004, Novosibirsk, Russia): Proc. MPLP'2004.- 2005.- P.525-528.
45. Kobtsev S.M., Smirnov S.V. Optimization of temporal characteristics of supercontinuum generated in tapered air-clad fibers // XI Межд. Конф. "Оптика лазеров" (30 июня - 4 июля 2003): Proc. SPIE "Laser Optics 2003: Diode Lasers and Telecommunication Systems".- 2004. V.5480. P.64-71.
46. Kobtsev S., Kukarin S., Fateev N., Mezentsev V., Turitsyn S.K. Dual-core air-clad fiber for supercontinuum polarization control // Nonlinear Guided Waves and Their Applications (28-31 March 2004, Toronto, Canada): Tech. Dig. NLGW.- 2004.- Paper WC8.
47. Kobtsev S.M., Smirnov S.V. Influence of the modulation instability on the formation of super-continuum in tapered and cobweb fibres // Summer-School on Advanced Glass-Based Nano-Photonics POWAG-2004 (12-16 July 2004, Bath, UK): Abstracts POWAG-2004. – 2004.- C3.
48. Kobtsev S., Kukarin S., Fateev N., Mezentsev V., Turitsyn S. Tapered dual-core air-clad fiber for generation of polarized supercontinuum // Summer-School on Advanced Glass-Based Nano-Photonics POWAG-2004 (12-16 July 2004, Bath, UK): Abstracts POWAG-2004. – 2004.- C7.
49. Kobtsev S., Kukarin S., Fateev N., Turitsyn S., Mezentsev V. Silica/air-clad dual-core tapered fiber for polarized supercontinuum generation // Optical Fiber Communication 2003 Conf. (23-28 March 2003, Atlanta, USA): Tech. Dig.- 2003.- V.2.- FH4.- P.689,690.
50. Kobtsev S.M., Kukarin S.V., Fateev N.V. Polarisation properties of super-continuum generated in silica/air-clad dual-core tapered fibre // Int. Conf. CLEO/Europe-2003 (22-27 June 2003, Munich, Germany): Europ. Conf. Abst.- 2003.- V.27E.- CL7M.

51. Kobtsev S.M., Kukarin S.V., Pustovskikh A.A., Fateev N.V. Soliton self-frequency shift in the air-clad tapered fiber // Int. Conf. CLEO/Pacific Rim 2003 (22-26 July 2003, Taipei, Taiwan): Proc. Conf.- 2003.- THP-(5)-12.- V.II.- P.538.
52. Kobtsev S.M., Kukarin S.V., Fateev N.V. Generation of polarized supercontinuum in air-clad dual tapered fiber // Int. Conf. IQEC/LAT-2002 (22-28 June 2002, Moscow): IQEC 2002 Tech. Dig.- 2002.- QWH7.- P.396.
53. Kobtsev S.M., Kukarin S.V., Fateev N.V., Pustovskikh A.A. Spectrum flattening of the supercontinuum generated in tapered fibers // White Nights' Summer School on Photosens. in Optical Waveguides and Glasses POWAG'2002 (17-21 June 2002, St.Petersburg): Dig.- 2002.- ThA2.- P.58,59.
54. Kobtsev S.M., Kukarin S.V., Sorokin V.B. Compact femtosecond autocorrelator based on a swinging birefringent plate // Int. Conf. CLEO/Europe-2000 (10-15 Sep 2000, Nice, France): Conf. Dig.- 2000.- CTuK103.- P.138.

#### **Список цитируемых работ:**

1. Дианов Е.М., Крюков П.Г. Генерация суперконтинуума в волоконных структурах под действием непрерывной последовательности УКИ // Квантовая электроника.- 2001.- Т.31.- N10.- С.877-882.
2. Желтиков А.М. Да будет белый свет: генерация суперконтинуума сверхкороткими лазерными импульсами // Успехи физических наук.- 2006.- Т.176.- №6.- С.623-649.
3. The Supercontinuum Laser Source. Fundamentals with Updated References. Alfano R. (Ed.). // Springer.- ISBN: 978-0-387-24504-1.- 2006.- 537p.
4. Couy F., Benabid F., Roberts P.J., Light P.S., Raymer M.G. Generation and photonic guidance of multi-octave optical-frequency combs // Science.- 2007.- V.318.- N11.- P.1118-1121.
5. Qin G., Yan X., Kito C., Liao M., Chaudhari C., Suzuki T., Ohishi Y. Supercontinuum generation spanning over three octaves from UV to 3.85  $\mu\text{m}$  in a fluoride fiber. Optics Letters.- 2009.- V.34.- N13.- C.2015-2017.
6. 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.- C.25-27.
7. Russell P.St.J. Photonic crystal fibers // Science.- 2003.- V.299.- C.358-362.
8. Желтиков А.М. Нелинейная оптика микроструктурированных волокон // Успехи физических наук.- 2004.- Т.174.- №1.- С.73-105.
9. Dudley J.M., Taylor J.R. Ten years of nonlinear optics in photonic crystal fibre // Nature Photonics.- 2009.- V.3.- N2.- P.85-90.

10. Birks T.A., Wadsworth W.J., Russell P.St.J. Supercontinuum generation in tapered fibers // *Opt. Lett.*- 2000.- V.25.- С.1415–1417.
11. Желтиков А.М. Микроструктурированные световоды в оптических технологиях // *Физматлит.*- ISBN: 5-9221-1031-5.- 2009.- 192с.
12. Akimov D.A., Fedotov A.B., Podshivalov A.A., Zheltikov A.M., Ivanov A.A., Alfimov M.V., Bagayev S.N., Pivtsov V.S., Birks T.A., Wadsworth W.J., Russell P.St.J. Spectral superbroadening of subnanjoule Cr: forsterite femtosecond laser pulses in a tapered fiber // *J. Catal.*- 2001.- V.74.- P.460–463.
13. Hundertmark H., Rammler S., Wilken T., Holzwarth R., Hänsch T.W., Russell P. S. Octave-spanning supercontinuum generated in SF6-glass PCF by a 1060 nm mode-locked fibre laser delivering 20 pJ per pulse // *Optics Express.*- 2009.- V.17.- N3.- С.1919-1924.
14. N.Savage. Supercontinuum sources // *Nature Photonics.*- 2009.- V.3.- N2.- P.114-115.
15. Hansen K.P., Jensen J.R., Birkedal D., Hvam J.M., Bjarklev A. Pumping wavelength dependence of super continuum generation in photonic crystal fibers // *OFC-2002, 17-22 March 2002, Anaheim, USA: Proc. Conf.*- 2002.- P.622- 624.
16. Agrawal G.P. *Nonlinear Fiber Optics.*- Academic Press, 2001.- 481p.
17. Bernier M., Sheng Y., Vallée R. Ultrabroadband fiber Bragg gratings written with a highly chirped phase mask and infrared femtosecond pulses // *Opt. Express.*- 2009.- V.17.- P.3285-3290.
18. Fong K.H., Set S.Y., Kikuchi K. High-energy ultrashort pulse generation from a fundamentally mode-locked fiber laser at 1.7 MHz // *OFC-2007, 25-29 March 2007, Anaheim, USA: Proc. Conf.*- 2007. - OTuF2.
19. Kang J.U., Posey R. Demonstration of supercontinuum generation in a long-cavity fiber ring laser // *Opt. Lett.*-1998.- V.23.- P.1375-1377.
20. Pioger P.H., Couderc V., Leproux P., Champert P.A. High spectral power density supercontinuum generation in a nonlinear fiber amplifier // *Opt. Express.*- 2007.- V.15.- P.11358-11363.
21. Патент США 7221822, МКИ G02B 6/26. Multi-fibre arrangement for high power fibre lasers and amplifiers / Grudin A.B., Payne D.N., Turner P.W., Nilsson L.J.A., Zervas M.N., Ibsen M., Durkin M.K.- 10/999,758; Заявлено 29.11.2004; Опубл. 22.05.2007.
22. Abeeluck A.K., Headley C., Jorgensen C.G. High-power supercontinuum generation in highly nonlinear, dispersion-shifted fibers by use of a continuous-wave Raman fiber laser // *Optics Letters.*- 2004.- V.29.- P.2163-2165.

Кобцев Сергей Михайлович  
Волоконные генераторы управляемого суперконтинуума.  
Автореферат дисс. на соискание учёной степени доктора физ.-мат. наук.  
Подписано в печать “\_\_” июня 2010. Заказ № 2.  
Формат 60×90/32. Усл. печ. л. 2. Тираж 100 экз.  
Отпечатано “Документ-Сервис”,  
630090, Новосибирск, ул. Институтская 4/1