

На правах рукописи

Кукарин Сергей Владимирович

Генерация суперконтинуума в
биконических микросветоводах при
накачке фемтосекундными
импульсами

01.04.05 “Оптика”

Автореферат

диссертации на соискание ученой 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,
профессор Федорук Михаил Петрович

доктор физико-математических наук
Плеханов Александр Иванович

Ведущая организация: Институт лазерной физики СО РАН

Защита состоится “5” декабря 2006 года в 10-00 часов на заседании диссертационного совета К 003.005.01 в Институте автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1.

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

Автореферат разослан “2” ноября 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
к.т.н.

В.П. Косых

Общая характеристика диссертационной работы.

Актуальность темы. Генерация суперконтинуума в биконических микросветоводах (оптические волокна с перетяжкой диаметром несколько микрометров, окруженной воздухом) и в микроструктурных (или дырчатых) волокнах при накачке импульсами фемтосекундной длительности – относительно новое физическое явление, нашедшее в последние годы ряд применений в фундаментальных и прикладных исследованиях в различных областях науки. Дальнейшее расширение круга задач, в которых может быть использован этот эффект, не вызывает сомнений. В связи с этим, представляется весьма актуальным исследование основных свойств суперконтинуума (спектральный состав излучения, энергетические и поляризационные характеристики, временная структура), определение физических механизмов, ответственных за формирование излучения со сверхшироким спектром, перекрывающим октаву. С прикладной точки зрения, выяснение влияния характеристик задающего фемтосекундного лазера и конструкции/свойств специальных оптических волокон позволит эффективно управлять параметрами суперконтинуума, подстраивая их под требования конкретной исследовательской задачи.

Целью диссертационной работы являлось:

изготовление образцов биконических микросветоводов и исследование основных свойств генерируемого в них суперконтинуума при накачке импульсами фемтосекундной длительности с энергией ~ 1 нДж, определение влияния параметров образцов и характеристик излучения накачки на свойства суперконтинуума, использование суперконтинуума в научных исследованиях.

В ходе работы решались задачи:

разработка и создание лабораторного макета фемтосекундного лазера на сапфире с ионами титана, исследование его генерационных характеристик и выяснения возможности их оптимизации, реализация на основе проведенных исследований компактной, функционально развитой конструкции лазера, исследование возможностей изготовленного лазера при работе в составе интегрированного фемтосекундного лазерного комплекса;

разработка методов и устройств для измерения длительности фемтосекундных импульсов и исследования временной структуры суперконтинуума;

разработка технологии и лабораторной установки для изготовления биконических микросветоводов с граничащей с воздухом перетяжкой;

исследование основных характеристик и особенностей суперконтинуума, генерируемого в изготовленных образцах, разработка методов управления параметрами суперконтинуума.

Научная новизна работы

1. Разработан, исследован и реализован компактный фемтосекундный титан-сапфировый лазер оригинальной конструкции, обеспечивающий стабильный режим синхронизации мод в спектральном диапазоне 750-1050 нм при длительности импульсов 17-100 фс и средней мощности выходного излучения до 500 мВт. Разработан, исследован и реализован сканирующий автокоррелятор с компьютерной регистрацией данных и возможностью использования его в качестве линии оптической задержки на величину до 50 пс.

2. Впервые предложен способ формирования оптической задержки между реплика-ми светового импульса с использованием качающейся двулучепреломляющей пластины, на основе которого разработана и реализована новая схема компактно-го, простого в эксплуатации сканирующего интерференционного автокоррелято-ра для измерения длительности сверхкоротких световых импульсов.
3. С использованием разработанного фемтосекундного лазера и изготовленных би-конических микросветоводов с круговым сечением граничащей с воздухом пере-тяжки получена генерация суперконтинуума, впервые продемонстрирована воз-можность управления шириной спектра суперконтинуума с помощью изменения длины волны импульсов накачки.
4. Впервые разработаны и изготовлены сдвоенные биконические микросветоводы с квазиэллиптическим сечением перетяжки, в которых реализована генерация по-ляризованного суперконтинуума, исследованы его основные характеристики и показана возможность управления шириной его спектра и степенью поляризации.
5. В изготовленных биконических микросветоводах впервые наблюдался эффект преобразования импульса накачки в отдельные солитонные компоненты. Экспе-риментально определены энергетические, спектральные и временные параметры импульсов и диаметры перетяжек биконических микросветоводов, необходимые для наблюдения этого явления, выявлена временная структура подобного излу-чения.

Практическая значимость и внедрение результатов работы:

1. Различные модификации разработанного фемтосекундного титан-сапфирового лазера изготовлены и поставлены в Российский центр лазерной физики при СПбГУ и ВНИЦ "ГОИ им.С.И.Вавилова" (Санкт-Петербург), МЛЦ МГУ, ФИ им.П.Н.Лебедева РАН, ВНИИ ОФИ (Москва), ИФП СО РАН и НИИ физиологии СО РАМН Новосибирск).
2. Разработанные автокорреляторы изготовлены и поставлены в ФТИ им.А.Ф.Иоффе РАН (Санкт-Петербург), ФИ им.П.Н.Лебедева РАН (Москва), НИИ физиологии СО РАМН и ИЛФ СО РАН (Новосибирск), где используются для проведения научных исследований.
3. Изготовленные образцы биконических микросветоводов используются в ИЛФ СО РАН (Новосибирск) и ИХФ им.Н.Н.Семенова РАН (Москва).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Предложенная новая схема сканирующего интерференционного автокоррелятора с использованием качающейся двулучепреломляющей пластины для создания переменной оптической задержки реплик светового импульса позволяет регистрировать автокорреляционные функции интенсивности поля лазерных импульсов с длительностью в фемтосекундном и субпикосекундном диапазонах.
2. Ширина спектра суперконтинуума, генерируемого в биконическом микросвето-вододе с круговым сечением перетяжки при накачке импульсами фемтосекунд-ной длительности, изменяется при перестройке спектра импульсов накачки вбли-зи длины волны нулевой дисперсии микросветовода.
3. Максимальная ширина спектра поляризованного суперконтинуума, генерируемо-го в сдвоенном биконическом микросветоводе с квазиэллиптическим сечением перетяжки при накачке импульсами фемтосекундной длительности, достигается

при совмещении плоскости поляризации излучения накачки с одной из осей симметрии профиля поперечного сечения перетяжки микросветовода. При этом также достигается наиболее гладкая форма спектра суперконтинуума и наибольшая степень его поляризации (до 97 %).

4. В биконическом микросветоводе при накачке импульсами фемтосекундной длительности, спектр которых попадает в область аномальной дисперсии образца, реализуется режим многосолитонной генерации. При этом с ростом входной мощности излучения накачки наблюдается увеличение числа солитонных компонент и эффект смещения спектра каждой из них в длинноволновую область.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 2-ом Межд. симпозиуме “Современные проблемы лазерной физики” (Новосибирск, 1997), 11-ой Межд. Вавиловской конф. (Новосибирск, 1998), 16-ой Межд. конф. по когерентной и нелинейной оптике “ICONO’98” (Москва, 1998), 4-ой Всерос. школе-семинаре “Люминесценция и сопутствующие явления” (Иркутск, 1998), 4-ой Межд. конф. “AMPL’99” (Томск, 1999), 3-ем Межд. симпозиуме “Современные проблемы лазерной физики” (Новосибирск, 2000), Межд. конф. “CLEO/Europe 2000”, (Ницца, Франция, 2000), Летней школе по фоточувствительности в оптических волноводах и стеклах “POWAG’2002” (Санкт-Петербург, 2002), Межд. конф. “IQEC/LAT’2002” (Москва, 2002), Межд. конф. “OFC’2003” (Атланта, США, 2003), 9-ом Межд. семинаре по теории оптических волноводов и численному моделированию (Прага, Чешская республика, 2003), Межд. конф. “CLEO/Europe-EQEC’2003” (Мюнхен, Германия, 2003), Межд. конф. “CLEO/Pacific Rim 2003” (Тайпей, Тайвань, 2003), Межд. конф. по нелинейным направленным волнам и их применению (Торонто, Канада, 2004), Летней школе “Summer-School on Advanced Glass-Based Nano-Photonics, POWAG’2004” (Бас, Великобритания, 2004), 9-ой Межд. школе-семинару по люминесценции и лазерной физике “ЛЛФ-2004” (Иркутск, 2004).

Структура и объём работы.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав с изложением материала диссертации и заключения, в котором перечислены основные результаты. Общий объём диссертации составляет 157 страниц и включает 49 рисунков, 8 таблиц и список литературы из 162 наименований.

Содержание работы.

Во введении приведен обзор литературы, посвященный явлению генерации суперконтинуума в объёмных средах, микроструктурных и вытянутых волокнах и результатам его использования в фундаментальных и прикладных исследованиях. Обосновывается актуальность темы диссертации, формулируется цель работы и излагаются ее результаты.

Первая глава посвящена описанию разработанного фемтосекундного лазера на кристалле сапфира с ионами титана в качестве активной среды и синхронизацией мод на основе нелинейного эффекта Керра.

В $\subseteq 1$ приведен обзор наиболее важных работ по генераторам фемтосекундных (длительностью менее 100 фс) импульсов. Изложена мотивировка выбора сапфира с титаном в качестве активной среды фемтосекундного лазера.

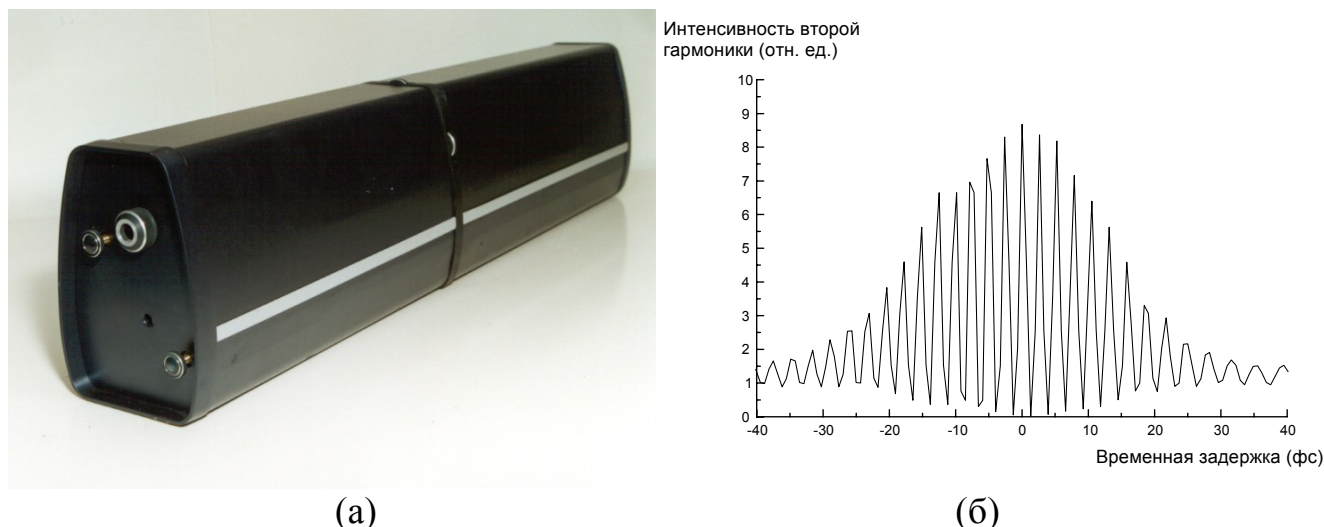


Рис. 1. (а) Общий вид разработанного фемтосекундного лазера на кристалле сапфира с ионами титана. (б) Автокорреляционная функция (АКФ) генерируемых лазером импульсов с длительностью 17 фс, центральной длиной волны 810 нм и средней выходной мощностью излучения 150 мВт.

В $\underline{\text{2}}$ сформулированы основные вопросы, требующие решения при разработке твердотельного фемтосекундного генератора (параметры лазерных кристаллов и оптическая накачка, особенности резонатора, пассивная синхронизация мод, внутрирезонаторная компенсация дисперсии).

В $\underline{\text{3}}$ рассмотрен разработанный фемтосекундный лазер на кристалле сапфира с ионами титана. Приведены описание и схемы конструкции лазера и фотографии его внешнего вида. Представлены генерационные характеристики лазера в режиме синхронизации мод в различных диапазонах спектра и с различными типами лазеров накачки. Общий вид лазера представлен на Рис.1(а). На Рис.1(б) приведена автокорреляционная функция импульсов наименьшей длительности, полученных с созданным лазером. Основные характеристики разработанного фемтосекундного лазера на кристалле сапфира с ионами титана:

вблизи центра контура усиления (800 нм) при типичной длительности импульсов 17-50 фс и частоте следования 80 МГц, средняя мощность излучения достигает 500 мВт (в зависимости от типа и мощности лазера накачки), что соответствует пиковой мощности импульсов ~ 100 кВт;

стабильный режим генерации импульсов с длительностью менее 100 фс и средней мощностью свыше 100 мВт экспериментально реализован в диапазоне 750-1050 нм.

Вторая глава посвящена описанию разработанных устройств для измерения длительности фемтосекундных импульсов на основе автокорреляционного метода.

В $\underline{\text{4}}$ обоснован выбор метода измерений, приведены оптическая схема и особенности конструкции разработанного сканирующего интерференционного автокоррелятора на базе интерферометра Майкельсона с нелинейно-оптическим преобразованием исследуемого излучения во вторую гармонику. Варьируемая оптическая задержка между репликами импульса (Рис.2(а)) осуществляется с помощью качания

двухзеркального перископа, расположенного в одном из плеч интерферометра, максимальное значение временной задержки составляет 50 пс. Фотография разработанного автокоррелятора представлена на Рис.2(б). Конструкция автокоррелятора позволяет использовать его также в качестве линии оптической задержки (например, для экспериментов типа “накачка-зондирование”).

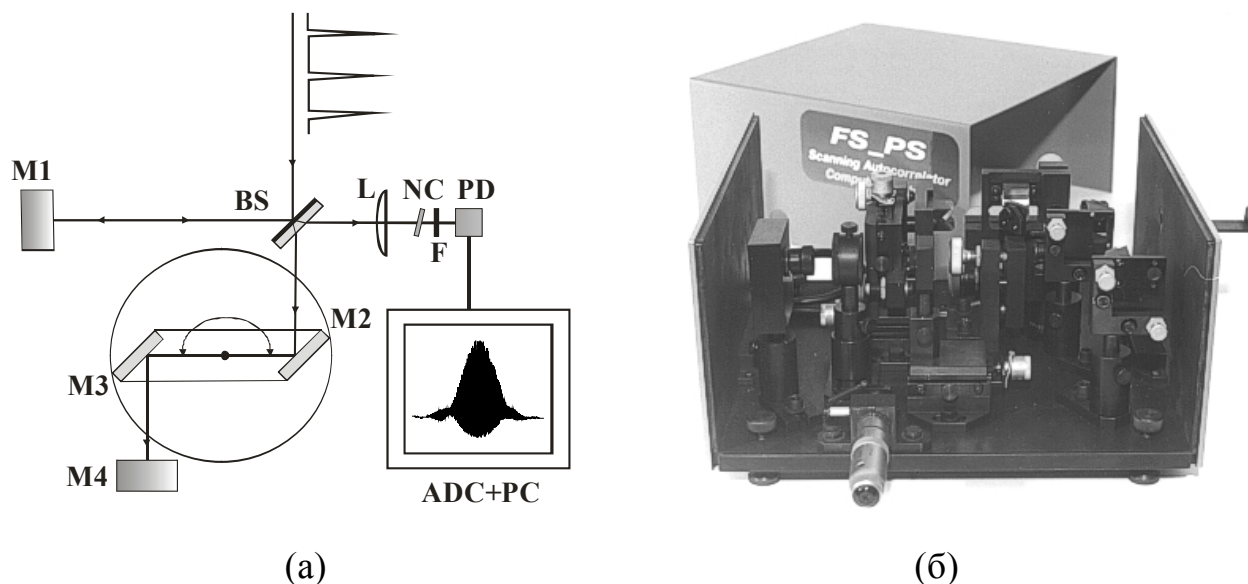


Рис. 2. (а) Принципиальная оптическая схема разработанного широкодиапазонного автокоррелятора высокого временного разрешения с компьютерной регистрацией данных: BS - 50%-делитель лазерного излучения, M1 и M4 – концевые уголкового отражатели интерферометра Майкельсона, M2 и M3 – зеркала сканируемого перископа, L – фокусирующая линза, NC – нелинейный кристалл, F – фильтр, PD – фотоприёмник, ADC+PC – аналого-цифровой преобразователь и компьютер. (б) Фотография общего вида оптико-механической части автокоррелятора.

Программное обеспечение автокоррелятора дает возможности преобразования регистрируемой автокорреляционной функции (АКФ) из аналогового в цифровой формат, осуществления её математической обработки и определения длительности и параметров фазовой модуляции исследуемых импульсов.

В ≤ 5 приведен анализ основных факторов (дисперсионные и нелинейно-оптические эффекты в оптических элементах), оказывающих уширяющее действие на регистрируемую АКФ импульсов. Определена минимальная, достоверно определяемая автокоррелятором, длительность импульсов. Изложены результаты экспериментальных исследований возможности использования для регистрации АКФ светоизлучающего диода в качестве нелинейного фотоприёмника. Показано, что замена в системе регистрации АКФ пары “нелинейный кристалл + линейный фотоприёмник” на светоизлучающий диод обеспечивает нелинейный отклик в более широкой спектральной области без необходимости какой-либо дополнительной подстройки, меньшую степень искажения временной структуры исследуемых импульсов, повышение чувствительности и долговечности работы автокоррелятора.

В ≤ 6 приведена предложенная и реализованная новая схема формирования оптической задержки между репликами светового импульса в сканирующем авто-

корреляторе, который практически не требует настройки, достаточно прост в изготовлении и позволяет регистрировать АКФ при малом уровне деформаций временной структуры исследуемых сверхкоротких импульсов. Переменная временная задержка реплик светового импульса создается качающейся пластиной из одноосного кристалла. Предложенная схема сканирующего автокоррелятора на основе качающейся двулучепреломляющей пластины приведена на Рис. 3.

Созданный с использованием новой схемы автокоррелятор позволяет регистрировать интерференционные АКФ интенсивности поля лазерных импульсов с длительностью в субпикосекундном и фемтосекундном диапазонах. Получены аналитические выражения для величины диапазона сканирования и оптимальной ориентации оптической оси кристалла, численно исследовано влияние дисбаланса интенсивностей волн, прошедших по разным оптическим путям, на вид АКФ. Предложены одноосные кристаллы, пригодные для изготовления пластины.

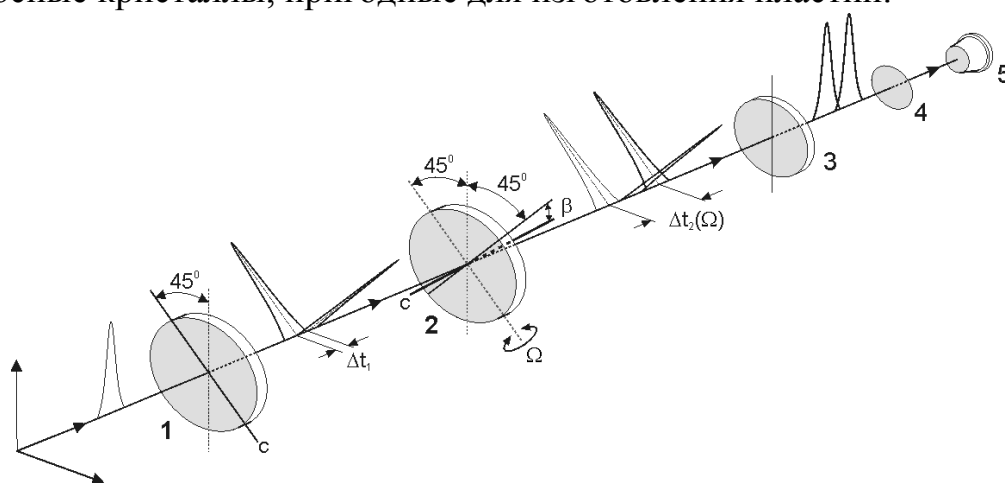


Рис. 3. Схема предложенного сканирующего автокоррелятора на основе качающейся двулучепреломляющей пластинки: 1 – неподвижная двулучепреломляющая пластина, 2 – качающаяся двулучепреломляющая пластина, c – оптическая ось, β – угол между оптической осью и поверхностью пластины, отсчитанный вглубь пластинки, Ω – угол отклонения пластины 2 относительно оси, лежащей в плоскости пластины и перпендикулярной проекции оптической оси на поверхность пластины, Δt_1 и $\Delta t_2(\Omega)/2$ – задержки между обыкновенной и необыкновенной репликами импульса после пластины 1 и 2 соответственно, 3 – поляризационный фильтр, 4 – линза, 5 – нелинейный фотоприемник.

В Третьей главе изложены основные результаты по изготовлению вытянутых биконических микросветоводов с граничащей с воздухом перетяжкой (одинарных с круговым сечением и сдвоенных с квазиэллиптическим сечением), генерации в них суперконтинуума при накачке импульсами фемтосекундной длительности с энергией ~ 1 нДж и управлению его параметрами.

В §7 описаны разработанные технология и лабораторная установка для изготовления биконических микросветоводов из стандартных оптических световодов. Основные параметры изготовленных образцов: пропускание излучения накачки – 50%, минимальный диаметр вытянутого участка - 1,5 мкм, максимальная длина перетяжки – 200 мм. Приведены расчетные зависимости эффективной площади моды

и параметра дисперсии для разных диаметров перетяжек от длины волны излучения. Отмечено, что с уменьшением диаметра перетяжки положение точки нулевой дисперсии монотонно смещается в коротковолновую область спектра и для диаметров 1,5-1,8 мкм лежит в диапазоне 655-685 нм. После размещения в пылеизолированных корпусах образцы биконических микросветоводов достаточно устойчивы к возмущениям внешней среды и сохраняются в течение длительного времени (месяцы и более).

В §8 изложены экспериментальные результаты по генерации суперконтинуума в вытянутых биконических микросветоводах с круговым сечением граничащей с воздухом перетяжки (Рис. 4(а)). Типичный вид спектра генерируемого суперконтинуума представлен на Рис. 4(б) для образца с диаметром 2,8 мкм и длиной 140 мм. Выявлено высокое качество выходного излучения, профиль поперечного распределения интенсивности излучения был близок к гауссову.

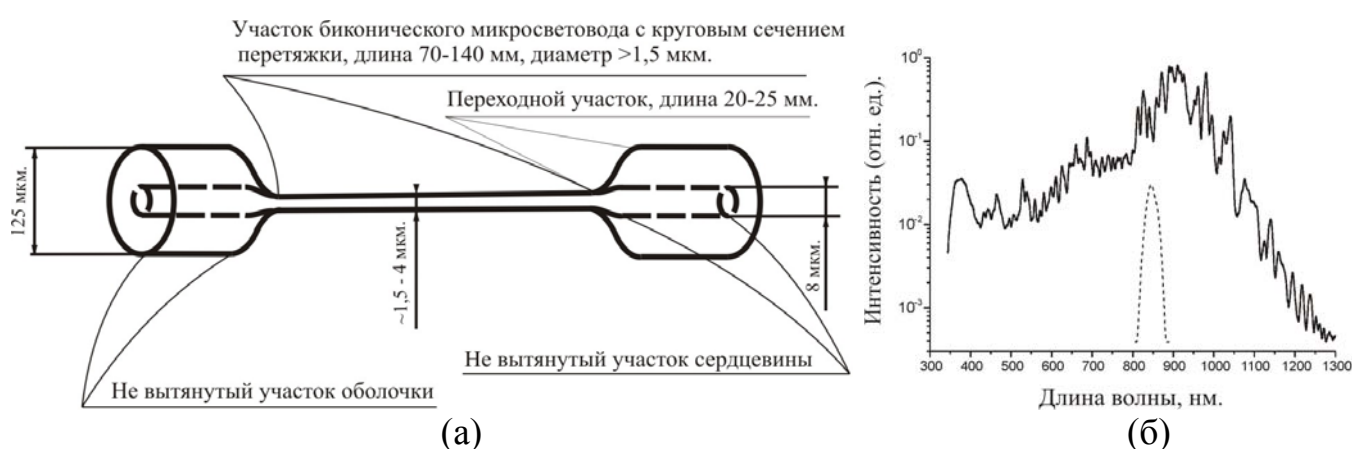


Рис. 4. (а) Схема конструкции вытянутого одинарного биконического микросветовода с круговым сечением граничащей с воздухом перетяжки. (б) Спектр генерируемого суперконтинуума при центральной длине волны входных импульсов 847 нм, длительности 80 фс и энергии 1,1 нДж. Ширина спектра суперконтинуума на выходе микросветовода составляет 790 нм (по уровню -20 дБ).

Показана возможность управления шириной спектра суперконтинуума с помощью перестройки спектра фемтосекундных импульсов накачки вблизи точки нулевой дисперсии образца биконического микросветовода. При перестройке центральной длины волны спектра входных импульсов длительностью 80 фс (энергия на входе в образец 1,1 нДж) от 789 до 847 нм ширина спектра генерации суперконтинуума на выходе образца (при одинаковой средней выходной мощности 45 мВт) варьировалась от 98 до 790 нм (по уровню -20 дБ).

Показано, что спектральная неоднородность генерируемого суперконтинуума может уменьшаться при использовании комбинации двух вытянутых биконических микросветоводов с круговым сечением и разными диаметрами перетяжек.

Приведён пример использования генератора суперконтинуума (фемтосекундный лазер + биконический микросветовод) в экспериментах по исследованию пространственной динамики изменения спектра рассеяния широкополосного излучения,

распространяющегося в кристаллических средах, содержащих электродипольные светорассеивающие частицы.

В $\subseteq 9$ изложены результаты по генерации поляризованного суперконтинуума в сдвоенных биконических микросветоводах с квазиэллиптическим сечением перетяжки микронных размеров (Рис. 5(а)) и определению его основных параметров. На Рис. 5(б) приведён типичный для этого типа микросветоводов спектр суперконтинуума (образец с поперечными размерами перетяжки $2 \times 3,4$ мкм и длиной 100 мм).

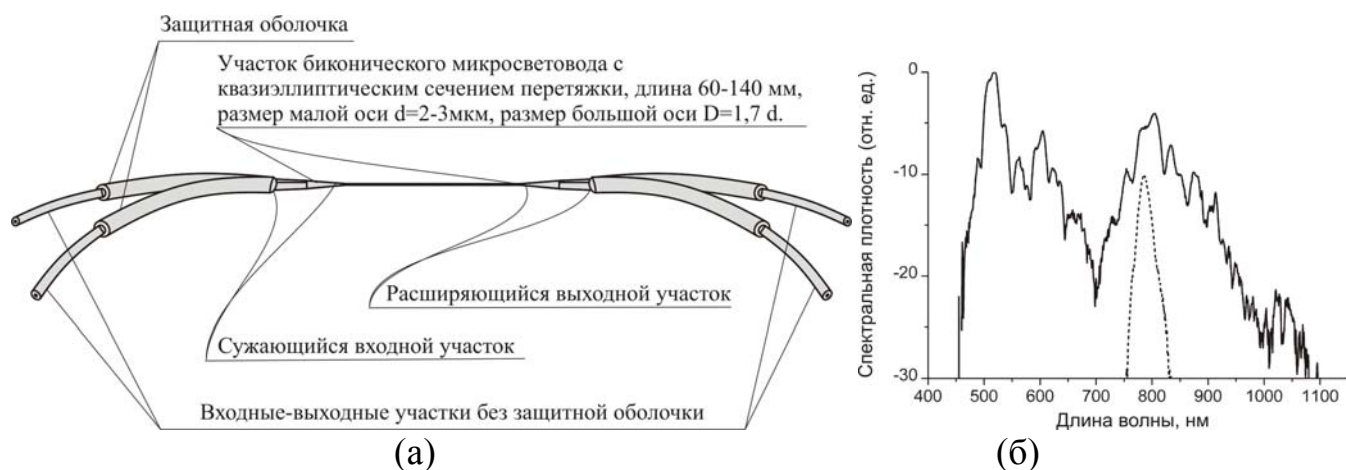


Рис. 5. (а) Схема конструкции вытянутого сдвоенного биконического микросветовода с квазиэллиптическим сечением граничащей с воздухом перетяжки. (б) Спектр генерируемого суперконтинуума при центральной длине волны входных импульсов 805 нм, длительности 90 фс и энергии 1,3 нДж. Ширина спектра суперконтинуума на выходе микросветовода составляет 610 нм (по уровню -28 дБ).

Показана возможность управления шириной спектра суперконтинуума и степенью его поляризации с помощью ориентации вектора поляризации излучения накачки относительно осей симметрии квазиэллиптического профиля поперечного сечения микроволокна. Максимальная ширина спектра, наиболее гладкая форма и наибольшая степень поляризации (до 97%) достигаются при совмещении плоскости поляризации входного излучения с одной из осей симметрии. Полученный суперконтинуум характеризуется гауссовым поперечным профилем интенсивности излучения на выходе образцов микросветоводов и высокой степенью когерентности генерируемых частот.

В Четвертой главе приведены результаты детального исследования спектральной и временной структуры суперконтинуума, генерируемого в биконических микросветоводах при накачке фемтосекундными импульсами, спектр которых попадает в диапазон аномальной дисперсии образцов.

В $\subseteq 10$ приведён обзор опубликованных данных по механизмам формирования суперконтинуума в дырчатых световодах с накачкой фемтосекундными импульсами с энергией ~ 1 нДж.

В $\subseteq 11$ изложены результаты исследования особенностей спектральной структуры суперконтинуума, генерируемого в биконических микросветоводах при накач-

ке фемтосекундными импульсами в случае, когда спектр импульсов накачки попадает в диапазон аномальной дисперсии образца.

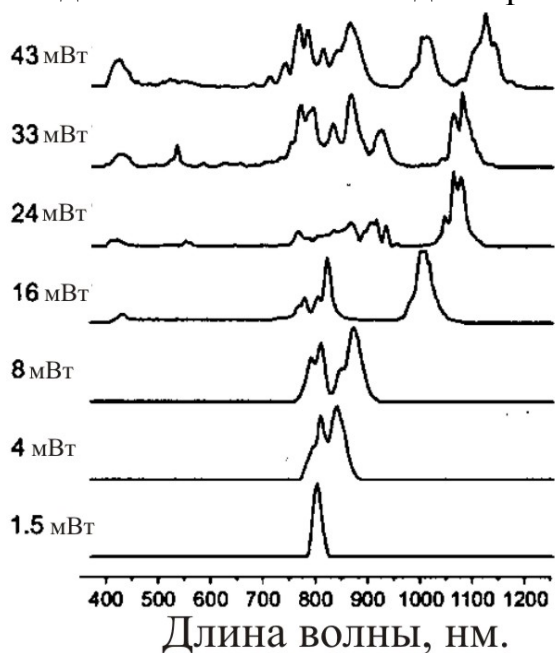
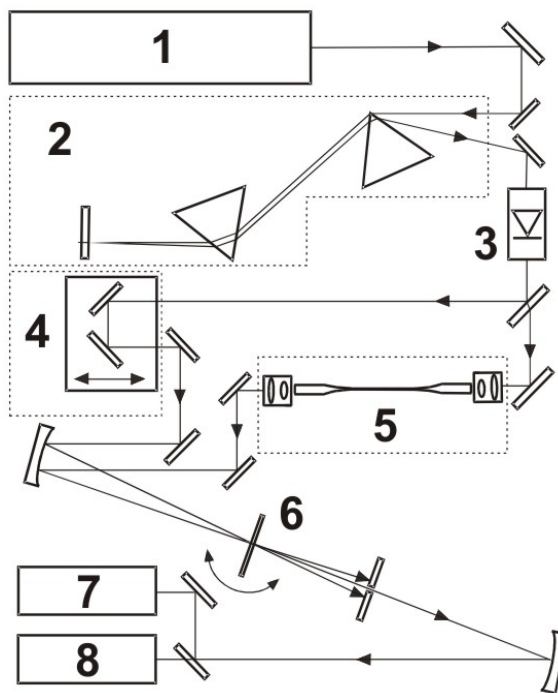


Рис. 6. Эффект трансформации спектра фемтосекундного импульса накачки в отдельные выраженные спектральные компоненты с ростом пиковой мощности импульса в биконическом микросветоводе. Слева от спектров приведены значения средней выходной мощности излучения.

В экспериментах использован микросветовод с диаметром перетяжки 2,3 мкм (длина волны нулевой дисперсии 755 нм), длиной перетяжки 120 мм при накачке 50-фс импульсами со спектром вблизи длины волны 805 нм и средней мощностью излучения до 110 мВт (пиковая мощность до 25 кВт). В данных условиях наблюдается эффект преобразования спектра затравочных импульсов в отдельные, отчетливо выраженные спектральные компоненты. При увеличении пиковой мощности исходного импульса наблюдается увеличение числа спектральных компонент, смещение спектра каждой из них в длинноволновую область и появление (относительно мало-мощного) излучения в видимой области (Рис. 6).

Рис. 7. Схема экспериментальной установки для исследования временной структуры суперконтинуума: 1 – фемтосекундный лазер, 2 – двухпризменный компрессор, 3 – оптический изолятор, 4 – линия задержки, 5 – микросветовод, 6 – сканируемый по углу синхронизма нелинейный кристалл ВВО, 7 – оптический анализатор спектра, 8 – измеритель мощности излучения.



Полученные результаты сопоставлены с данными по генерации суперконтинуума в биконических микросветоводах при накачки импульсами в области нормальной дисперсии образцов (≤ 8), результатами численного моделирования распространения фемтосекундных импульсов в области аномальной дисперсии биконических микросветоводов и опубликованным данным по механизмам формирования суперконтинуума в дырчатых световодах (≤ 10). На основании проведённого анализа сделан вывод о том, что наблюдаемый эффект трансформации спектра импульсов накачки связан с явлением генерации самосдвинутых по частоте солитонов.

В ≤ 12 представлены результаты исследования временной структуры суперконтинуума, генерируемого в биконических микросветоводах при накачке фемтосекундными импульсами в области аномальной дисперсии образцов. Описана экспериментальная установка для исследования временной структуры излучения со спектром в диапазоне 400 - 1400 нм с использованием метода генерации суммарной частоты компонентами исследуемого излучения и опорным импульсом с известной длительностью в сканируемом по углу синхронизма нелинейном кристалле (Рис. 7).

Представлены результаты по регистрации временной структуры суперконтинуума и её изменению с ростом пиковой мощности импульсов накачки.

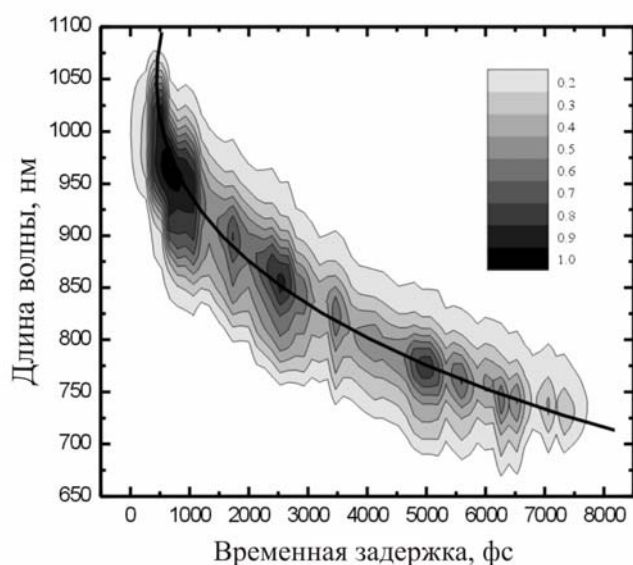


Рис. 8. Двухмерная зависимость интенсивности суперконтинуума от длины волны и времени задержки опорного импульса. Интенсивность показана на графике градациями серого цвета.

На Рис. 8 приведена двумерная зависимость интенсивности компонент суперконтинуума от длины волны и времени задержки относительно опорного импульса, позволяющая выявить связь между временной структурой суперконтинуума и его спектром. В эксперименте использовался образец с диаметром перетяжки 2,1 мкм и длиной 70 мм при накачке 50-фс импульсами со спектром вблизи длины волны 795 нм (пиковая мощность до 25 кВт).

Представлены результаты сопоставления экспериментальных данных по временной структуре суперконтинуума с данными, полученными численным моделированием распространения фемтосекундных импульсов в области аномальной дисперсии образцов биконических микросветоводов.

На основании полученных экспериментальных данных и их анализа сделан вывод о том, что основным механизмом формирования суперконтинуума в данных условиях является генерация и распад солитона высокого порядка на фундаментальные солитоны, спектр каждого из которых смещён в длинноволновую область за счет эффекта самосдвига частоты солитона.

В Заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Основные результаты.

1. Разработан, исследован и реализован компактный фемтосекундный титан-сапфировый лазер оригинальной конструкции. Параметры лазерной генерации вблизи центра усиления активной среды (800 нм): длительность импульсов 17-50 фс, средняя выходная мощность до 500 мВт при частоте следования импульсов 80 МГц (энергия импульсов до 6 нДж, пиковая мощность ~100 кВт). Получена стабильная генерация лазера в режиме синхронизации мод в широком спектральном диапазоне (750-1050 нм) при длительностях импульсов не превышающих 100 фс и средней мощности свыше 100 мВт.
2. Разработан, исследован и реализован широкодиапазонный (спектральный диапазон 500-1050 нм) сканирующий автокоррелятор высокого временного разрешения с компьютерной регистрацией данных для измерения длительности и параметра фазовой модуляции фемтосекундных лазерных импульсов, с возможностью его использования в качестве программируемой линии оптической задержки на величину до 50 пс.
3. Предложена новая оптическая схема сканирующего интерференционного автокоррелятора для измерения длительности сверхкоротких импульсов. Основными особенностями схемы являются нетребовательность к настройке и компактное исполнение автокоррелятора. Переменная оптическая задержка реплик светового импульса создается качающейся пластиной из одноосного кристалла. Созданный на основе предложенной схемы автокоррелятор позволяет измерять длительности сверхкоротких импульсов в фемтосекундном и субпикосекундном диапазонах. Получены аналитические выражения для ширины диапазона сканирования и оптимальной ориентации оптической оси пластины. Предложен ряд материалов для изготовления двулучепреломляющих пластин автокоррелятора.
4. Разработаны технология и лабораторная установка для вытяжки биконических микросветоводов с окруженной воздухом перетяжкой.
5. При накачке изготовленных образцов биконических микросветоводов фемтосекундными импульсами разработанного титан-сапфирового лазера получена генерация суперконтинуума с характерными границами спектра (по уровню -20 дБ) 350 и 1150 нм, средней выходной мощностью до 100 мВт, гауссовым профилем поперечного распределения и расходимостью, близкой к дифракционной. Впервые продемонстрирована возможность управления шириной спектра суперконтинуума, генерируемого в биконическом микросветоводе, с помощью перестройки спектра импульсов накачки в области изменения знака дисперсии образца. При перестройке центральной длины волны спектра входных импульсов длительностью 80 фс (энергия 1.3 нДж) от 789 до 847 нм в образце с круговым сече-

нием перетяжки диаметром 2,8 мкм (длина волны нулевой дисперсии 800 нм) экспериментально наблюдается увеличение ширины спектра суперконтинуума от 98 до 790 нм (по уровню -20 дБ).

6. Впервые в биконических микросветоводах нового типа - вытянутых сдвоенных микросветоводах с квазиэллиптическим сечением граничащей с воздухом перетяжки - получена генерация поляризованного суперконтинуума при накачке излучением фемтосекундного лазера с энергией в импульсе ~ 1 нДж. Характерные границы спектра суперконтинуума – от 460 до 1070 нм (по уровню -28 дБ). Экспериментально установлено, что максимальная ширина спектра суперконтинуума и его наиболее гладкая форма достигаются при совмещении плоскости поляризации излучения накачки с одной из осей симметрии квазиэллиптического профиля поперечного сечения перетяжки биконического микросветовода. При этом достигается также наибольшая степень поляризации излучения суперконтинуума (до 97 %).
7. Впервые в биконическом микросветоводе при накачке фемтосекундными импульсами в области аномальной дисперсии образца наблюдался эффект преобразования спектра исходного импульса в отдельные ярко выраженные спектральные компоненты. Выяснено, что при увеличении пиковой мощности исходного импульса наблюдается увеличение числа спектральных компонент, сдвиг спектра каждой из них в длинноволновую область и возникновение относительно мало-мощного излучения в видимой области спектра. Экспериментальный и численный анализ временной и спектральной структуры подобного излучения позволил интерпретировать наблюдаемое явление как генерацию солитона высокого порядка и его распад на фундаментальные солитоны, спектры которых смещены в длинноволновую область под действием эффекта самосдвига частоты солитона.

Основные результаты диссертации отражены в следующих публикациях:

1. Martinovich E.F., Martinovich E.E., Polityko S.I., Bondarev B.V., Kukarin S.V., Sorokin V.B., Zlygostev A., Reiterov V.M. New luminescent methods of femtosecond optical measurements // II Int. Symp. modern problems of laser physics, Novosibirsk, Russia, Jul.28–Aug.2, 1997.– Tech. Dig.- P. 41-42.
2. Martinovich E.F., Bashkov D.A., Bondarev B.V., Kukarin S.V., Sorokin V.B. Experimental investigation of non-steady effect of spatial modulation of luminescence intensity in crystals under femtosecond excitation // XVI Int. Conf. on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO'98), Moscow, Russia, 1998- Tech. Dig.- P. 734.
3. Bondarev B.V., Ischenko V.N., Kochubei S.A., Kukarin S.V., Sorokin V.B. Compact femtosecond system on the base of dye amplifiers, pumped by multichannel N₂ longitudinal discharge laser // Proc. of XI Int. Vavilov Conf., Novosibirsk, 1998.- V. 2886.- P. 462-469.
4. Бондарев Б.В., Кобцев С.М., Кукарин С.В., Сорокин В.Б. Фемтосекундная лазерная система для измерений в ближней ИК-области спектра. // Тез. лекций и докладов IV Всерос. школы-семинара “Люминесценция и сопутствующие явления”, Иркутск, Россия, 19-23 октября, 1998.- Иркутск.- С. 12-14.

5. Alfimov E.E., Kobtsev S.M., Kukarin S.V., Makukha V.K., Meshalkin Y.P., Oghirenko A.P., Pustovskikh A.A., Sorokin V.B. The "blue shift" of the two-photon absorption for a spectrum of series organic dye // IV Int. Conf. "AMPL'99", Tomsk, Russia, September, 1999.– Tech. Prog.- P. 9.
6. Baraulya V.I., Kobtsev S.M., Kukarin S.V., Sorokin V.B. Titanium-Sapphire laser-based femtosecond spectrometer // IV Int. Conf. "AMPL'99", Tomsk, Russia, September 1999.– Tech. Prog.- P. 38.
7. Baraulya V.I., Kobtsev S.M., Korablev A.V., Kukarin S.V., Yurkin A.M. Widerange interferometric autocorrelator for the measurement of ultrashort light pulses parameters with light-emitting diodes used as a photodetectors // IV Int. Conf. "AMPL'99", Tomsk, Russia, September 1999.– Tech. Prog.- P. 79.
8. Kobtsev S.M., Kukarin S.V., Sentis M., Sorokin V.B., Ischenko V.N. The amplification of femtosecond light pulses in blue spectral region // III Int. Symp. Modern problems of laser physics, Novosibirsk, Russia, July 2000.- Tech. Dig.- P. 184-185.
9. Kobtsev S.M., Kukarin S.V., Sorokin V.B. Compact femtosecond autocorrelator based on swinging birefringent plate // Int. Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO/Europe), Nice, France, September 2000.- Tech. Dig.- Paper CtuK103.- P. 138.
10. Кобцев С.М., Кукарин С.В., Смирнов С.М., Сорокин В.Б. Фемтосекундный автокоррелятор на основе качающейся двулучепреломляющей пластинки // Квантовая электроника.- 2001.- Т. 31.- № 9.- С. 829-833.
11. Кобцев С.М., Кукарин С.В., Фатеев Н.В. Управление шириной спектра генерации фемтосекундного континуума в световоде малого диаметра // Квантовая электроника.- 2002.- Т. 32.- № 1.- С. 11-13.
12. Kobtsev S.M., Kukarin S.V., Pustovskikh A.A., Fateev N.V. Spectrum flattening of the supercontinuum generated in tapered fibres // Summer School on Photosensitivity in Optical Waveguides and Glasses (POWAG'2002), St. Petersburg, Russia, June 2002.- Tech. Dig.- Paper ThA2.- P. 58-59.
13. Kobtsev S.M., Kukarin S.V., Fateev N.V. Generation of polarized supercontinuum in air-clad dual tapered fibre // Int. Conf. IQEC/LAT, Moscow, Russia, June 2002.- Tech. Dig.- Paper QWH7.- P. 396.
14. Бабин С.А., Кобцев С.М., Кукарин С.В., Мешалкин Ю.П., Рыбаков М.А. Фемтосекундный лазерный комплекс для научных исследований и медицинских применений // Наука - производству.- 2003.- № 2.- С. 12-13.
15. Kobtsev S.M., Kukarin S.V., Fateev N.V., Turitsyn S.K., Mesentsev V. Silica/air-clad dual-core tapered fiber for polarized supercontinuum generation // Int. Conf. Optical Fiber Communication (OFC), Atlanta, Georgia, USA, March 23-28, 2003.- Proc. Conf.- Paper FH4.- P. 689-690.
16. Turitsyn S.K., Mesentsev V., Yakovenko S., Kobtsev S.M., Kukarin S.V., Fateev N.V. Numerical modal analysis of silica/air-clad dual-core fibres // XI Int. Workshop on Optical Waveguide Theory and Numerical Modeling, Prague, Czech Republic, April 4-5, 2003.- Tech. Dig.- P. 12.
17. Kobtsev S.M., Kukarin S.V., Fateev N.V. Polarisation properties of super-continuum generated in silica/air-clad dual-core tapered fibres // Int. Conf. on Lasers and Electro-

- Optics (CLEO/Europe), Munich, Germany, June 22-27, 2003. – Tech. Dig. - Paper CL7M.
18. 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.
 19. Старченко А.А., Дресвянский В.П., Кобцев С.М., Кукарин С.В., Мартынович Е.Ф. Пространственное перераспределение спектра рассеяния излучения с фемтосекундным временем когерентности в анизотропных кристаллах. // Научные школы Сибири: взгляд в будущее. Труды II интеграционной междисциплинарной конференции молодых ученых СО РАН и высшей школы. - Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2003.- С. 158-159.
 20. Kobtsev S.M., Kukarin S.V., Pustovskikh A.A., Fateev N.V. Soliton self-frequency shift in the air-clad tapered fiber // Int. Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO/Pacific Rim 2003), Taipei, Taiwan, December 2003.- Tech. Dig.- Paper THP-(5)-12.- P. 538.
 21. Kobtsev S.M., Kukarin S.V., Fateev N.V., Mezentsev V., Turitsyn S. Dual-core air-clad fiber for supercontinuum polarization control // Int. Conf. Nonlinear Guided Waves and Their Application (NLGW), Toronto, Canada, March 2004.- Tech. Dig. on CD (Optical Society of America, 2004).- Paper WC8.
 22. 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.- № 5.- P. 748–751.
 23. Kobtsev S.M., Kukarin S.V., Fateev N.V., Mezentsev V., Turitsyn S.K. Tapered dual-core air-clad fiber for generation of polarized supercontinuum // Summer-School on Advanced Glass-Based Nano-Photonics (POWAG-2004), Bath, UK, July 2004.- Abstracts.- Paper C7.
 24. Старченко А.А., Мартынович Е.Ф., Дресвянский В.П., Кобцев С.М., Кукарин С.В. Рассеяние поляризованного фемтосекундного суперконтинуума в анизотропной среде. // IX Межд. школа-семинар по люминесценции и лазерной физике (ЛЛФ-2004), Иркутск, Россия, 13-17 сентября 2004.- Тез. лекций и докладов.- 2004.- С. 119–121.
 25. Старченко А.А., Дресвянский В.П., Кобцев С.М., Кукарин С.В., Мартынович Е.Ф. Трансформация спектра рассеяния фемтосекундного суперконтинуума, распространяющегося в анизотропной среде // X Всерос. научная конф. студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-Х), Москва, Россия, 2004.- Сб. тез. (часть 1).- 2004.- С. 694-695.
 26. 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. 4.- С. 1107-1115.
 27. 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 application // Optical Fiber Technology.- 2006.- V. 12. - № 2. - P. 122-147.

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

Отпечатано “Документ-Сервис“ , 630090 Новосибирск, ул. Институтская 4/1.