

На правах рукописи

Корель Игорь Игоревич

**ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ И ШУМОВЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ
УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ В НЕЛИНЕЙНО-
ОПТИЧЕСКИХ СРЕДАХ**

01.04.05 "Оптика"

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Новосибирск - 2006

Работа выполнена в Институте лазерной физики Сибирского отделения
Российской академии наук

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук

В.И. Денисов

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор
доктор физико-математических наук, профессор

В.С. Егоров
Ю.П. Мешалкин

Ведущая организация:

Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН

Защита состоится "24" _ноября___ 2006 г. в 15 часов на заседании
диссертационного совета Д 003.024.01 в Институте лазерной физики СО
РАН по адресу: 630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева 13/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института лазерной
физики СО РАН.

Автореферат разослан " __ " _____ 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

к.ф.-м.н.



Н.Г. Никулин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

За четыре последних десятилетия, лазерные технологии прошли гигантский путь, сократив временной масштаб длительностей импульсов на девять порядков - от микро- до фемтосекунд. Современные методики позволяют получать стабильные сигналы длительностью в несколько фемтосекунд [1], более того появляются сообщения об освоении в ультрафиолетовой области излучения следующего за фемтосекундным - аттосекундного диапазона [2].

Термин "ультракороткие импульсы" относится к импульсам длительностью не превышающим несколько десятков пикосекунд, но чаще употребляется для обозначения фемтосекундного диапазона. Как правило, в качестве генераторов УКИ используются лазеры с пассивной синхронизацией мод [3], среди которых наиболее широко распространены Ti:S лазеры [4].

Важность расширения диапазона длительности лазерных импульсов (и в особенности - сокращения их длительности) трудно переоценить. Сегодня лазерные методики с использованием УКИ лежат в основе целого ряда фундаментальных физических экспериментов, спектроскопических прецизионных измерений [5], измерений сверхбыстрых процессов в химии [6] и биологии [7], используются в информационных технологиях [8], медицине [9], материаловедении [10] и метрологии [11].

В этой связи симптоматичным выглядит даже тот факт, что первая Нобелевская премия, в преамбуле к которой упоминались ультракороткие импульсы, была присуждена по химии, а не по физике: в 1999-ом году ее получил Ахмед Зевейл "за изучение переходных состояний химических реакций с помощью фемтосекундной спектроскопии".

Шестью годами позже, в 2005-ом, лауреатами Нобелевской премии по физике стали: Рой Глаубер, Джон Холл и Теодор Хэнш. Т. Хэншу и Дж. Холлу премия присуждена за работы в области прецизионной лазерной спектроскопии, "включая технику измерения, основанную на использовании частотных гребенок". Они добились впечатляющих результатов в создании и развитии новой методики измерения электромагнитных колебаний с недостижимой ранее точностью (до 15 знаков), что явилось неопределимым подспорьем в лазерной спектроскопии, а также открыло путь для самых разнообразных форм применения - от создания оптических часов до улучшения технологии спутниковой навигации.

Прорыв в области генерации УКИ привел к открытию нового и чрезвычайно важного нового явления - спектрального сверхуширения фемтосекундных импульсов в оптических волокнах. В настоящее время это явление больше известно как генерация спектрального суперконтинуума (ССК) [12]. Генерация ССК связана с эффективностью нелинейных процессов в волокне при распространении фемтосекундных импульсов, для которых характерны высокие интенсивности.

Генерация ССК явилась революционным открытием для метрологии [13]. Фемтосекундные комбы - спектр излучения фемтосекундных лазеров - представляют собой детерминированную решетку частот, характеристики которой зависят от частоты повторений импульсов. При прохождении фемтосекундного импульса через оптические волокна спектр мод может уширяться более чем на октаву. Таким образом, с созданием оптоволоконных систем уширения спектра мод открылись уникальные возможности по синтезу и измерению частот от радио до УФ диапазонов.

Процесс формирования спектральной огибающей импульса в волокне связан с действием целого ряда нелинейных эффектов, среди которых: фазовая самомодуляция, образование ударной волны, рамановское рассеяние. В настоящее время опубликовано и продолжает публиковаться большое число теоретических и экспериментальных работ по исследованию процессов

уширения спектра фемтосекундных импульсов в микроструктурированных волокнах [14] и волокнах с перетяжкой [15].

Цель работы

Разработка теоретической и численной моделей, описывающих спектральные и шумовые характеристики последовательности ультракоротких импульсов при их взаимодействии с нелинейно-оптическими средами.

Задачи исследования

1. Построить численную модель прохождения фемтосекундных импульсов в волокнах с перетяжкой. Оценить влияние основных нелинейных и дисперсионных эффектов на формирование уширенного спектра в волокнах данного типа.

2. Построить численную модель прохождения фемтосекундных импульсов в волокнах с непостоянным диаметром (убывающей дисперсией) с учетом изменений дисперсионного профиля по длине волокна. Исследовать влияние параметров волокна на форму уширенного спектра.

3. Разработать теоретическую и численную модели для описания влияния флуктуаций интенсивности на спектральные характеристики последовательностей УКИ при прохождении через оптические волокна с учетом нелинейных и дисперсионных эффектов.

4. Оценить параметры соответствия спектров отдельного фемтосекундного импульса и последовательности УКИ при прохождении через оптические волокна в присутствии амплитудных флуктуаций.

5. Выявить и обосновать возможность использования методов Фурье-спектроскопии для исследования оптически плотных сред с сильной диполь-дипольной связью и многоуровневых квантовых систем. Рассмотреть

возможность использования методов ФС для оценки амплитудных шумов в последовательностях УКИ.

Научная новизна

1. На основе нелинейного уравнения Шредингера развиты и обоснованы методы численного анализа процесса спектрального уширения ультракоротких импульсов в специальных оптических волокнах двух типов: с перетяжкой и меняющейся по длине дисперсией.

2. Разработан численный алгоритм расчета спектральных искажений для цугов ультракоротких импульсов в присутствии амплитудных флуктуаций (флуктуаций интенсивности) на входе в нелинейное оптическое волокно.

3. Изучены особенности спектральных искажений, вызванных амплитудными флуктуациями, для различных условий спектрального уширения в оптическом волокне.

4. Предложен новый метод регистрации и исследования поправок, вносимых локальной коррекцией поля в задачу о резонансном взаимодействии двухуровневых атомов с полем, а также - метод оценки амплитудного шума в последовательностях УКИ.

Практическая значимость

Генерация суперконтинуума в настоящее время осуществляется с использованием оптических волокон различного типа - микроструктурированных волокон, волокон с перетяжкой, с меняющейся по длине хроматической дисперсией. При этом параметры специальных оптических волокон, предназначенных для уширения спектра фемтосекундных лазеров, могут меняться в очень широких пределах. Поскольку для оптимального решения широкого круга фундаментальных и

прикладных задач требуются различные спектральные параметры излучения на выходе из волокна, изучение характеристик конкретных нелинейностей в зависимости от параметров волокон и их влияние на преобразованный спектр излучения является необходимым условием оптимизации.

В рамках задачи о генерации суперконтинуума в оптических волокнах, точность прецизионных измерений должна определяться шумами (фундаментальными и техническими) спектральных компонент преобразованного волоконного спектра излучения, то есть нелинейная среда должна вносить свой вклад в спектральные искажения. Модель исследования спектральных искажений для цугов импульсов, предложенная в настоящей работе, открывает ряд необычных свойств преобразования шумов в оптических волокнах.

Фемтосекундная фурье-спектроскопия известна широкой областью применения. Многие прецизионные эксперименты, направленные на изучение самых разнообразных сред и процессов используют ее методики. Настоящая работа предлагает развитие методов фемтосекундной спектроскопии как для фундаментальных исследований - задача о локальной коррекции поля в оптически плотных средах с сильной диполь-дипольной связью, так и для прикладных - оценка амплитудного шума в последовательностях УКИ.

Научные положения, выносимые на защиту

1. В оптическом волокне с перетяжкой при характерных дисперсионных длинах, превышающих размеры самого волокна, дисперсионные эффекты оказывают существенное влияние на форму уширенного спектра.

2. При вводе излучения в волокно с меняющейся по длине дисперсией происходит интенсивная перекачка энергии центральных компонент спектра в коротковолновые и длинноволновые компоненты. Этот

эффект реализуется в случае, когда нулевая точка дисперсии начального участка волокна находится вблизи центральной длины волны вводимого излучения.

3. В рамках модели спектрального уширения под действием фазовой самомодуляции с учетом амплитудных флуктуаций на входе в оптическое волокно, интерференция между точками импульса с равными мгновенными отстройками частоты приводит к заметным искажениям спектра.

4. При распространении последовательности УКИ в оптических волокнах с аномальной хроматической дисперсией амплитудная нестабильность приводит к большим искажениям в спектре по сравнению с областью нормальной дисперсии.

5. Нелинейные среды с сильной диполь-дипольной связью могут быть использованы для оценки амплитудных шумов последовательностей УКИ.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы докладывались на международных конференциях и симпозиумах:

Втором международном симпозиуме по современным проблемам лазерной физики (MPLP'97), Новосибирск, 1997; Девятой конференции по лазерной оптике (IX Conference on Laser Optics), Санкт-Петербург, 1998; Международной конференции по когерентной и нелинейной оптике (ICONO'98), Москва, 1998; Третьем международном симпозиуме по современным проблемам лазерной физики (MPLP'2000), Новосибирск, 2000; Третьем итало-российском симпозиуме по проблемам лазерной физики и технологий (ITARUS'2000), Палермо, Италия; Международной конференции по лазерной спектроскопии (ICOLS 2001), Сноуберд, США, 2001; Конференции по точным электромагнитным измерениям (CPEM 2002),

Оттава, Канада, 2002; Международной конференции по квантовой электронике (IQEC/LAT 2002), Москва, 2002; Конференции по лазерной оптике (Conference on Laser Optics), Санкт-Петербург, 2003; Конференции по передовой оптоэлектронике и лазерам (CAOL'2003), Алушта, Украина, 2003; Конференции по нелинейной волновой физике (NWP'2003), Нижний Новгород, 2003; Третьем российско-французском лазерном симпозиуме (RFLS-2003), Москва, 2003; Пятом итало-российском лазерном симпозиуме (ITARUS 2003), Москва; Четвертом международном симпозиуме по современным проблемам лазерной физики (MPLP'04), Новосибирск, 2004.

Публикации

Основное содержание диссертации опубликовано в 11 научных работах в российских и зарубежных изданиях, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Диссертация содержит 123 страницы машинописного текста, включая 27 рисунков и список цитируемой литературы из 135 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения.

Во введении, формулируются цели и задачи исследования, обсуждается научная новизна и актуальность темы, дается краткий обзор содержания работы и выносятся защищаемые положения.

Первая глава посвящена общим принципам формирования суперконтинуума.

В §1.1. на примере Ti:сапфирового лазера дается краткое описание фемтосекундного комба и его характеристик.

В §1.2. дается обзор основных нелинейных и дисперсионных эффектов, характерных для распространения импульсов в оптических волокнах. В частности, описываются дисперсия групповых скоростей, эффект Керра и пр. Приводится краткое описание нелинейного уравнения Шредингера (НУШ).

В §1.3. Описан фурье-метод с расщеплением по физическим параметрам, используемый для численного решения НУШ.

Во второй главе рассматривается задача об уширении спектров фемтосекундных импульсов в специальных оптических волокнах - с перетяжкой и волокнах с меняющейся по длине хроматической дисперсией.

В §2.1. приводятся оценки основных параметров прохождения импульса в волноводе с перетяжкой, связанные с их особенностями: нелинейная и дисперсионные длины, образование ударной волны, показана существенность учета эффекта вынужденного комбинационного саморассеяния.

В §2.2. приводятся результаты численного моделирования прохождения импульсов для различных диаметров волокна и разных мощностей излучения в сравнении со спектрами, полученными экспериментально.

Показана возможность изменять форму огибающей уширенного спектра, варьируя параметры волокна и характеристик вводимого излучения.

В §2.3. представлены результаты численного моделирования задачи о прохождении фемтосекундного импульса в оптическом волокне с меняющейся по длине хроматической дисперсией. Диаметр таких волокон непостоянен, что приводит к различиям дисперсионных профилей в разных точках волокна. Приводится сравнение с экспериментальными спектрами.

В третьей главе рассмотрены вопросы, связанные с фазовыми и амплитудными флуктуациями в последовательности фемтосекундных

импульсов, а также исследовано влияние этих вариаций на спектральные характеристики излучения на выходе из оптического волокна.

В §3.1. представлена спектральная модель последовательности, составленной из одинаковых импульсов, дан краткий обзор статистических характеристик спектров в присутствии флуктуаций, но без учета влияния нелинейных и дисперсионных эффектов в волокне. Обсуждается влияние амплитудной нестабильности и нестабильности межимпульсного интервала на спектральные характеристики.

В §3.2. решена задача о спектре последовательности импульсов в присутствии фазовых флуктуаций.

Найдено аналитическое выражение для спектра мощности импульсного процесса с флуктуирующей фазой. Обсуждается аналогия со случаем переменного межимпульсного интервала.

В §3.3. представлены аналитические и численные результаты, полученные для последовательности УКИ, уширенных в волокне под действием фазовой самомодуляции без учета влияния других нелинейных эффектов и дисперсии групповых скоростей.

Приводится вывод выражения спектра мощности в случае одиночного импульса и последовательности для модели интерференции точек с равными мгновенными частотами.

Для оценки влияния амплитудных шумов на уширенный спектр, в рамках модели ФСМ, были рассчитаны уширенные спектры последовательностей состоящих из 10, 100 и 1000 импульсов в зависимости от амплитуды флуктуаций. Параметры импульсов и волноводов взяты близкими к параметрам экспериментов по уширению спектра Ti:S лазера в волноводах с перетяжкой.

Из полученных спектров следует, что с ростом флуктуаций интенсивности амплитуды отдельных спектральных компонент падают. Этот факт связывается с увеличением мощности шумовой составляющей спектра и размыванием интерференционной картины. Форма спектра при

максимальной амплитуде флуктуаций, которая соответствует стабильности по мощности $\langle \delta I \rangle / I \approx 1 \cdot 10^{-1}$, разительно отличается от форм спектров последовательностей с относительно малыми флуктуациями интенсивности, даже положения интерференционных максимумов перестают совпадать.

В §3.4. рассмотрен более общий случай совместного учета фазовой самомодуляции и дисперсии групповых скоростей, а также обсуждаются вопросы, связанные с численной оценкой суммарной мощности шума.

Учет совместного действия фазовой самомодуляции и дисперсии групповых скоростей в общем случае не предполагает аналитических решений. Поэтому, на основе нелинейного уравнения Шредингера, был разработан численный метод оценки влияния амплитудных флуктуаций на спектральные характеристики коротких (до 10^3) последовательностей импульсов.

Приводятся результаты численного моделирования для различных дисперсионных параметров. Показано, что в области аномальной дисперсии, при высоких значениях модуля дисперсии групповых скоростей, искажения спектра особенно сильны и становятся визуально заметны уже при $\langle \delta I \rangle / I \approx 1 \cdot 10^{-3}$, что говорит о существовании особого режима разрушения спектральных компонент комба в присутствии амплитудных флуктуаций.

На основе численного анализа делается вывод о том, что присутствие амплитудных флуктуаций может не только исказить огибающую спектра, но и частично разрушить дискретный спектр (фемтосекундный комб).

Четвертая глава посвящена фурье-спектроскопии многоуровневых систем и оптически плотных сред.

В §4.1. на примере двухфотонного взаимодействия атомов Cs с ультракороткими лазерными импульсами рассматривается возможность применения методов фурье-спектроскопии в исследовании многоуровневых систем.

Схема подобных экспериментов основывается на интерферометре Майкельсона, где ультракороткие лазерные импульсы проходят разные (и - переменные) оптические пути и сводятся в ячейке с исследуемым веществом. Регистрируемый сигнал флюоресценции описывает динамику инверсии населенностей.

Определена система уравнений Блоха для двухфотонного взаимодействия атомов цезия с резонансным полем, найдены ее аналитические решения для инверсии населенностей. Теоретические результаты совпали с результатами, полученными в эксперименте с Cs [5].

В §4.2. дается обзор теоретическим моделям взаимодействия оптически плотных сред с когерентным полем. В частности, рассматривается локальная коррекция поля и поправки Лоренц-Лоренца, модель сильной диполь-дипольной связи Боудена [17] для систем соответствующих условию $\lambda^3 n \gg 1$, где λ - длина волны когерентного излучения, n - концентрация частиц (атомов).

На примере короткой и длинной цилиндрической систем показывается, какие изменения может вносить локальная коррекция поля в описание процессов формирования сверхизлучения (суперлюминисценции) в рамках полуклассической модели.

В §4.3. обсуждается возможность исследования особенностей взаимодействия когерентного поля с оптически плотными средами методами фурье-спектроскопии. Показано, что величина поправки на локальную коррекцию поля, вызванную сильной диполь-дипольной связью, может быть вычислена с хорошей точностью с помощью анализа спектра мощности флюоресцентного сигнала. Рассматривается возможность использования методов фурье-спектроскопии для оценки флуктуаций интенсивности.

В заключении приводятся выводы по основным результатам работы:

1. Для специальных оптических волокон с перетяжкой и непостоянным диаметром построены численные модели спектрального уширения фемтосекундных лазерных импульсов. Найдено, что

дисперсионные эффекты играют существенную роль в формировании огибающей спектра даже для волокон с перетяжками, где дисперсионная длина значительно превосходит размеры волокна. Для волокон с непостоянным диаметром показано, что в случае, когда нулевая точка дисперсии начального участка волокна находится вблизи центральной длины волны вводимого излучения, происходит интенсивная перекачка энергии центральных компонент спектра в коротковолновые и длинноволновые компоненты. Показано, что, варьируя параметры волокна и характеристики вводимого излучения можно эффективно воздействовать на форму огибающей уширенного спектра.

2. Построена аналитическая модель спектральных искажений, связанных с флуктуациями интенсивности в последовательностях фемтосекундных импульсов на входе в оптическое волокно в отсутствие дисперсии, для случая, когда единственным нелинейным эффектом является фазовая самомодуляция. Показано, что интерференция между точками импульса с равными мгновенными отстройками частоты может приводить к заметным искажениям при типичных параметрах экспериментов по генерации спектрального суперконтинуума в волноводах с перетяжкой.

3. Построена численная модель для оценки влияния флуктуаций интенсивности на спектральные искажения с одновременным учетом фазовой самомодуляции и дисперсии. Установлено, что в области аномальной дисперсии амплитудная нестабильность приводит к большим искажениям в спектре по сравнению с областью нормальной дисперсии.

4. Показано, что методы фурье-спектроскопии совместно с последующим численным анализом спектров полученных данных позволяют исследовать как многоуровневые системы, так и коллективные (кооперативные) эффекты в средах с сильной диполь-дипольной связью, требующих локальной коррекции поля. Предложен метод оценки амплитудного шума в последовательностях УКИ.

Представлен список публикаций по материалам которых была написана диссертация и перечень научных мероприятий, где были апробированы ее основные положения.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

1. Bagayev S.N., Denisov V.I., Korel I.I. et al., Synchronization of quantum transitions by the coherent interaction of ultra-short electromagnetic pulses with multilevel quantum systems // *Laser Physics*. - 1999. - V. 9, № 3. - P. 731-736.
2. Denisov V.I., Korel I.I. Cooperative effects and transparency in dense media // In: *Proceedings The Third International Symposium on Modern Problems of Laser Physics*, V. 1, Novosibirsk, 2000, p. 237-243.
3. Denisov V.I., Korel I.I. On near dipole-dipole interaction effects in dense media // *Proc. SPIE*. - 2001. - V. 4429. - P. 26-36.
4. Bagayev S.N., Chepurov S.V., Denisov V.I., Klementyev V.M., Kolker D.B., Korel I.I., Matyugin Yu.A., Pivtsov V.S., Zakharyash V.F., Birks T.A., Wadsworth W.J., Russell P.St.J. Investigation of Ti:S femtosecond laser radiation spectrum broadened in tapered fiber // *Proc. SPIE*. - 2002. - V. 4900. - P. 147-149.
5. Bagayev S.N., Chepurov S.V., Denisov V.I., Dmitriyev A.K., Dychkov A.S., Klementyev V.M., Kolker D.B., Korel I.I., Matyugin Yu.A., Okhapkin M.V., Pivtsov V.S., Skvortsov M.N., Zakharyash V.F., Birks T.A., Wadsworth W.J., Russell P.St.J. Femtosecond Optical Clock with the Use of a Frequency Comb // *Proc. SPIE*. - 2002. - V. 4900. - P. 125-131.
6. Багаев С.Н., Денисов В.И., Захарьяш В.Ф., Клементьев В.М., Корель И.И., Кузнецов С.А., Пивцов В.С., Чепуров С.В. Исследования спектральных характеристик излучения фемтосекундного Ti:S лазера после его прохождения через волокно с перетяжкой // *Квант. электрон.* - 2003. - Т. 33, № 10. - С. 883-888.
7. Bagayev S.N., Denisov V.I., Klementyev V.M., Korel I.I., Kuznetsov S.A., Pivtsov V.S., Zakharyash V.F. Femtosecond Combs for Precision Metrology. - In

book: Femtosecond Laser Spectroscopy / Ed. by Hannaford P. - Springer, 2004, p. 87-108.

8. Bagayev S.N., Denisov V.I., Klementyev V.M., Korel I.I., Kuznetsov S.A., Pivtsov V.S., Zakharyash V.F. Femtosecond Combs for Precision Metrology // Laser Physics. - 2004. - V. 14, №. 11. - P. 1–8.

9. 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 // Квант. электрон. - 2004. - Т. 34, № 12. - С. 1107-1112.

10. Denisov V.I., Klementyev V.M., Korel I.I., Kuznetsov S.A., Pivtsov V.S. The effect of incoming radiation noise on spectral broadening in tapered fibers // In: Proceedings The Fourth International Symposium on Modern Problems of Laser Physics, Novosibirsk, 2004, p. 520-524.

11. Denisov V.I., Korel I.I. Amplitude fluctuations and femtosecond pulse train noise in fibers // Laser Physics. - 2006. - V. 16, № 3. - P. 507–510.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Spielman Ch., Curley P.F., Brabec Th., Krausz F. Ultrabroadband femtosecond lasers // IEEE J. Quant. Electron. - 1994. - V.30, № 4. - P.1100-1114.

2. Scrinzi A., Geissler M., Brabec T. Attosecond cross correlation technique // Phys. Rev. Lett. - 2001. - V. 86, № 3. - P.413-415.

3. Keller U. Recent developments in compact ultrafast lasers // Nature. - 2003. - V. 424. - P. 831.

4. U. Morgner et al. Sub-two cycle pulses from a Kerr-Lens modelocked Ti:sapphire laser // Opt. Lett. - 1999. - V. 24. - P. 411-415.

5. Bellini M., Bartoli A., Hänsch T.W. Two-photon Fourier spectroscopy with femtosecond light pulses // Opt. Lett. - 1997. - V.22, № 8. - P.540-542.

6. A. Zewail The Chemical Bond. Structure and Dynamics // Boston: Academic Press, 1992.
7. Femtochemistry and femtobiology // Edited by Douhal A. & Santamaria J. – Singapore: World Scientific, 2002. – 852 p.
8. Sotobayashi H., Chujo W., Ozeki T. Wideband tunable wavelength conversion of 10-Gbit/s return-to-zero signals by optical time gating of a highly chirped rectangular supercontinuum light source // Opt. Lett. - 2001. - V. 26, № 17. - P. 1314-1316.
9. Povazay B. et al. Submicrometer axial resolution optical coherence tomography // Opt. Lett. - 2002. - V.27, № 20. - P. 1800-1802.
10. Schoenlein R.W., Leemans W.P. et al. Femtosecond X-ray Pulses at 0.4 ° Angstrom Generated by 90 Degrees Thomson Scattering: A Tool for Probing the Structural Dynamics of Materials // Science. - 1996. - V. 274. - P. 236–238.
11. Бакланов Е.В., Покасов П.В. Оптические стандарты частоты и фемтосекундные лазеры. // Квант. электрон. - 2003. - Т. 33, № 5. - С. 383-399.
12. Bellini M., Hänsch T. W. Phase-locked white-light continuum pulses: toward a universal optical frequency comb synthesizer // Opt. Lett. - 2000. - V. 25. - P. 1049-1053.
13. Udem T. et al. Accurate measurement of large optical frequency differences with a mode-locked laser // Opt. Lett. - 1999. - V. 24. - P. 881-886.
14. Ranka J. K. et al. Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm // Opt. Lett. - 2000. - V. 25, № 1. - P. 25-27.
15. T. A. Birks et al. Supercontinuum generation in tapered fibers // Opt. Lett. - 2000. - V. 25. - P. 1415-1420.
16. Von der Linde D. Characterization of the noise in continuously operating mode-locked lasers. // Appl. Phys. B. -1986. - V. 39, P. 201-217.
17. Bowden C.M., Dowling J.P. Near dipole-dipole effects in dense media: Generalized Maxwell-Bloch equations // Phys. Rev. A. - 1993. - V. 47, № 2. - P. 1247-1251.