

Иваненко Алексей Владимирович

**Режимы синхронизации мод в сверхдлинных
волоконных лазерах с различными конфигурациями
резонаторов**

Специальность 01.04.21 – лазерная физика

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск - 2011

Работа выполнена в Новосибирском государственном университете и Новосибирском государственном техническом университете

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Кобцев Сергей Михайлович

Научный консультант: доктор физико-математических наук
профессор
Дмитриев Александр Капитонович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Клементьев Василий Михайлович

доктор технических наук
Айрапетян Валерик Сергеевич

Ведущая организация: Институт оптики атмосферы
имени В.Е. Зуева СО РАН

Защита состоится «__» _____ 2012 года в ____ на заседании диссертационного совета Д 003.024.01 при Учреждении Российской академии наук Институте лазерной физики СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13/ 3

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Института лазерной физики СО РАН.

Автореферат разослан «__» _____ 2011г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

Никулин Н. Г.

Актуальность темы.

В настоящее время лазеры являются важными инструментами для фундаментальной науки и практических приложений. Революционный прогресс во многих областях науки обусловлен развитием мощных лазерных систем, генерирующих ультракороткие импульсы и генераторов с высокой энергией импульса. Среди генераторов ультракоротких импульсов все большее распространение в различных областях науки и техники получают волоконные лазеры с синхронизацией мод. Помимо прочих достоинств (высокие эффективность генерации и качество выходного пучка, отсутствие необходимости юстировки резонатора в цельноволоконных конфигурациях) волоконные импульсные лазеры предоставляют большую свободу в выборе и оптимизации частотно-временных характеристик импульсного излучения. Конфигурированием резонатора волоконного лазера можно получать генерацию импульсов различной формы (гауссовой, параболической, солитонной), длительности, а также варьировать знак и величину фазовой модуляции (“чирпа”) импульсов. Одной из наиболее интересных с научной точки зрения, а также важных для практических приложений отличительной особенностью волоконных задающих генераторов с пассивной синхронизацией мод за счёт эффекта нелинейного вращения поляризации является возможность генерации лазера в различных режимах с разными параметрами импульсов. Особый интерес представляют сверхдлинные (с длиной резонатора сотни метров и километры) импульсные волоконные лазеры, поскольку в таких лазерах возможна генерация высокоэнергетичных импульсов (с энергией импульса сотни и более нДж). Разработка сверхдлинных волоконных лазеров с пассивной синхронизацией мод для генерации высокоэнергетичных световых импульсов с очень низкой (суб-мегагерцовой) частотой следования является новым и стремительно развивающимся направлением лазерной физики. Однако получение стабильного режима синхронизации мод в таких лазерах является весьма нетривиальной задачей.

Исследование режимов синхронизации в сверхдлинных волоконных лазерах с суммарной нормальной внутрирезонаторной дисперсией представляет огромный научный и практический интерес. Моделирование и экспериментальное изучение особенностей синхронизации мод и динамики импульсов в таких лазерах, а также разработка и исследование новых схем являются важными задачами на пути создания импульсных лазерных источников излучения с уникальными характеристиками, способных стать основой более совершенных технологий фотоники в промышленности, биомедицине, метрологии, телекоммуникациях.

Цель работы - исследование особенностей синхронизации мод в сверхдлинных волоконных лазерах с суммарной нормальной внутрирезонаторной дисперсией и с различными конфигурациями резонаторов и реализацию лабораторных образцов новых эффективных лазерных систем с высокой энергией ультракоротких импульсов.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

1. Исследование режимов синхронизации мод в сверхдлинных волоконных лазерах с суммарной нормальной внутрирезонаторной дисперсией и с синхронизацией мод за счёт нелинейной эволюции поляризации.

2. Исследование дисперсионного сжатия в оптических волокнах импульсов сверхдлинных волоконных лазеров с суммарной нормальной внутрирезонаторной дисперсией и с самосинхронизацией мод.
3. Разработка и исследование новых схем сверхдлинных с волоконных лазеров с суммарной нормальной внутрирезонаторной дисперсией и с самосинхронизацией мод.

Научная новизна работы.

1. Полученный стабильный режим самостартующей синхронизации мод с ультранизкой частотой повторения и высокой энергией импульса без распада волны обеспечивается использованием специального волокна с относительно большой нормальной внутрирезонаторной дисперсией и волокна со смещенной нулевой дисперсией в комбинации с уменьшением поляризационной нестабильности в длинном линейном плече резонатора.
2. Впервые зарегистрированные автокорреляционные функции интенсивности излучения сверхдлинного лазера с синхронизацией мод служат прямым экспериментальным подтверждением квазистохастической природы генерации в длинных и сверхдлинных лазерах. В сверхдлинных эрбиевых лазерах с суммарной нормальной внутрирезонаторной дисперсией и с синхронизацией мод за счёт нелинейной эволюции поляризации характерными режимами одноимпульсной генерации являются режим шумоподобной импульсной генерации и режим импульсной генерации с высокочастотными флуктуациями интенсивности излучения.
3. Впервые экспериментально показано, что коэффициент дисперсионного сжатия импульсов сверхдлинных волоконных лазерах с суммарной нормальной дисперсией и с синхронизацией мод за счёт нелинейной эволюции поляризации достигает величины, равной 2, что согласуется с результатами численного моделирования.
4. Впервые получена стабильная самостартующая генерация суб-наносекундных относительно высокоэнергетичных импульсов с низкой частотой следования и низким уровнем спонтанной эмиссии в лазерной системе на базе сверхдлинного волоконного лазера за счёт оптимизации параметров излучения в двух линейных плечах «гамма»-схемы резонатора задающего генератора (уменьшение поляризационной нестабильности в длинном плече резонатора с подавлением спонтанной эмиссии, ограничением длительности импульсов, предотвращением их разрушения и перескоков длины волны генерации, конкуренции поляризационных мод в коротком плече резонатора).

Практическая ценность.

1. Создан импульсный сверхдлинный цельноволоконный кольцевой эрбиевый лазер с рекордной длиной резонатора 25 км для лазеров с синхронизацией мод.
2. Предложены линейно-кольцевые схемы резонаторов для оптимизации параметров излучения сверхдлинных волоконных лазеров:
 - реализован сверхдлинный цельноволоконный лазер с линейно-кольцевой схемой резонатора, обеспечивающей самостартующий режим синхронизации мод и однонаправленный режим генерации в активной среде.
 - разработан сверхдлинный цельноволоконный эрбиевый лазер с суммарной нормальной внутрирезонаторной дисперсией и с самостартующей синхронизацией мод,

имеющий оригинальную «гамму» конфигурацию резонатора, предоставляющую расширенные возможности для оптимизации и стабилизации импульсных режимов генерации.

3. На основе сверхдлинного волоконного лазера с «гамма»-схемой резонатора реализована цельноволокonnая лазерная система, позволяющая генерировать высокоэнергетичные суб-наносекундные импульсы с низким уровнем интенсивности спонтанной эмиссии.

Все разработанные волоконные лазеры и лазерные системы внедрены в производство на малом научно-техническом предприятии при НГУ ЗАО "Техноскан".

Публикации.

Основные результаты диссертации опубликованы в 19 работах, в том числе один патент RU 2426226 C1, 10 работ опубликованы в научных периодических изданиях, удовлетворяющим требованиям ВАК, из которых 6 работ – статьи в российских и зарубежных реферируемых журналах.

Апробация работы.

Результаты работы были представлены на российских и международных конференциях: IX Международная конференция Актуальные Проблемы Электронного Приборостроения, АПЭП 2008, (Новосибирск, 2008); III Всероссийский Семинар по Волоконным Лазерам (Уфа, 2009); IX Всероссийский Семинар по Волоконным Лазерам (Ульяновск, 2010); XVI Всероссийская Научная Конференция среди Студентов Физиков и Молодых Учёных; XVI ВНКСФ 2010 (Волгоград, 2010); XIV International Conference on Laser Optics, ICLO, (Санкт-Петербург, 2010); 36th European Conference and Exhibition on Optical Communication, ECOC 2010, (Турин, 2010); Фотоника и Оптические Технологии (Новосибирск, 2011).

Результаты работы были отмечены медалью Российской Академии Наук за лучшую работу конкурса РАН 2010 г. для молодых учёных России.

На защиту выносятся следующие положения диссертации:

1. В волоконных эрбиевых задающих генераторах с суммарной нормальной внутрирезонаторной дисперсией и с синхронизацией мод за счёт нелинейной эволюции поляризации увеличение длины резонатора до нескольких километров позволяет получать импульсы с энергией до нескольких мкДж.
2. В сверхдлинных эрбиевых волоконных лазерах с суммарной нормальной внутрирезонаторной дисперсией и с синхронизацией мод за счёт нелинейной эволюции поляризации возможна реализация одноимпульсных режимов генерации с высокочастотными флуктуациями интенсивности излучения.
3. Внутрирезонаторная спектральная и поляризационная фильтрация излучения с помощью волоконных решёток позволяет ограничивать длительность импульсов на уровне наносекунды, а также фиксировать длину волны генерации и подавлять усиленное спонтанное излучение в сверхдлинных волоконных лазерах с суммарной нормальной дисперсией и с синхронизацией мод за счёт нелинейной эволюции поляризации.

4. Эффективность дисперсионного сжатия в оптических волокнах импульсов сверхдлинных волоконных лазеров с суммарной нормальной внутрирезонаторной дисперсией и с синхронизацией мод за счёт нелинейной эволюции поляризации ограничена из-за сложной временной структуры импульса.

Объём и структура диссертации.

Диссертация изложена на 107 страницах, включая список цитируемой литературы (122 наименований), список из 18 публикаций автора по теме диссертации, содержит 35 рисунка.

Во введении даётся общая характеристика работы; в первой главе приведён обзор литературных данных; главы 2-4 содержат описание проведённых исследований, их обсуждение и анализ; в заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Личный вклад автора.

Диссертационная работа является результатом работы автора в Отделе лазерной физики и инновационных технологий научно-исследовательской части Новосибирского государственного национального исследовательского университета, а также работы автора на кафедре лазерных систем Новосибирского государственного технического университета. Работа представляет собой обобщение научных исследований автора, выполненных совместно с сотрудниками НГУ, НГТУ, а также специалистами ИЛФ СО РАН и Астон Университета (Великобритания). Публикации данной работы выполнены в соавторстве, так как проводимые работы имели коллективный характер. Все полученные в диссертации результаты получены автором лично, либо при непосредственном участии.

Основное содержание работы.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, приведены её 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. В главе рассматриваются методы получения ультракоротких импульсов, методы получения высокоэнергетических импульсов и приводится обзор по сверхдлинным волоконным лазерам.

В главе 2 даны теоретические основы синхронизации мод, а также приведены результаты исследования и моделирования режимов синхронизации мод в коротких (до 100 метров) волоконных лазерах.

Одной из наиболее интересных с научной точки зрения, а также важных для практических приложений отличительной особенностью волоконных лазеров с пассивной синхронизацией мод за счёт эффекта нелинейного вращения поляризации является возможность лазерной генерации в различных режимах, число которых относительно велико [3].

Для численного моделирования режимов генерации в волоконных лазерах использовалась система связанных НУШ [10], описывающая эволюцию поляризованного излучения:

$$\frac{\partial A_x}{\partial z} = i\gamma \left\{ |A_x|^2 A_x + \frac{2}{3} |A_y|^2 A_x + \frac{1}{3} A_y^2 A_x^* \right\} - \frac{\alpha}{2} A_x - \frac{i}{2} \beta_2 \cdot \frac{\partial^2 A_x}{\partial t^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial A_y}{\partial z} = i\gamma \left\{ |A_y|^2 A_y + \frac{2}{3} |A_x|^2 A_y + \frac{1}{3} A_x^2 A_y^* \right\} - \frac{\alpha}{2} A_y - \frac{i}{2} \beta_2 \cdot \frac{\partial^2 A_y}{\partial t^2} \quad (2)$$

где A_x – x-компонента огибающая напряженности электрического поля, A_y – y-компонента огибающая напряженности электрического поля, β_2 – дисперсионный коэффициент на частоте генерируемого лазерного излучения, γ – нелинейный коэффициент для оптического волокна, α – коэффициент линейных потерь в волокне, z – пространственная координата (вдоль волокна).

Для подтверждения результатов численного моделирования в эксперименте использовался волоконный иттербиевый кольцевой лазер с полностью нормальной внутрирезонаторной дисперсией, схема которого представлена на рис. 1.

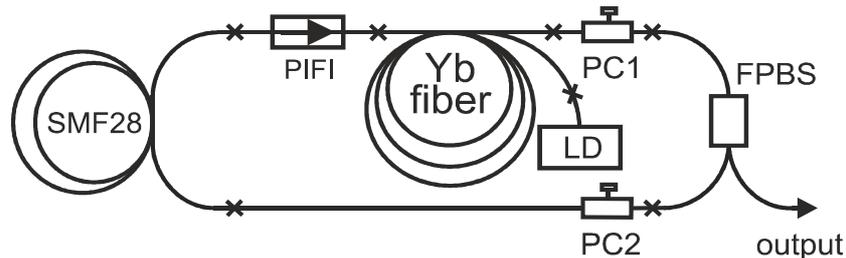


Рис. 1. Экспериментальная схема лазера: PC – контроллер поляризации, PIFI – поляризационно не зависимый изолятор, FPBS – волоконный поляризационный ответвитель, LD – лазерный диод накачки.

Как показывают результаты проведенных нами экспериментов и численного моделирования, в лазерах с нормальной внутрирезонаторной дисперсией может быть реализовано относительно большое количество режимов генерации, переключение между которыми может быть выполнено во время работы лазера путём изменения настроек внутрирезонаторных поляризационных элементов. Импульсы, генерируемые в различных режимах, отличаются энергией и длительностью, формой огибающей и шириной спектра. Можно выделить три характерных режима одноимпульсной генерации:

1. режим генерации импульсов колоколообразной формы;
2. режим шумоподобной генерации;
3. режим генерации с высокочастотными флуктуациями интенсивности излучения.

Первый режим генерации характеризуется высокой стабильностью генерируемых импульсов (так, расчетные флуктуации параметров от импульса к импульсу имеют порядок величины $10^{-6} \dots 10^{-4}$). Отличительной особенностью данного режима генерации является колоколообразная форма АКФ и спектр с резкими краями (см. Рис. 2, левый ряд графиков).

Принципиально иным типом генерации с точки зрения стабильности импульсов является одноимпульсная шумоподобная генерация, также реализуемая в лазерах с нормальной внутрирезонаторной дисперсией при определённых настройках поляризационных элементов и уровнях мощности накачки. При работе лазера в данном режиме генерируются не идентичные колоколообразные импульсы, но волновые пакеты со сложной временной структурой, включающей набор суб-импульсов. Интегральные характеристики волнового пакета в целом (его энергия и длительность) флуктуируют

вокруг средних значений, изменяясь после полного обхода резонатора на величину порядка нескольких процентов. В то же время внутренняя структура волновых пакетов претерпевает гораздо более существенные изменения, демонстрируя шумоподобное поведение. Гладкая форма спектра и пьедестала АКФ волновых пакетов являются следствием усреднения по последовательности генерируемых импульсов, в то время как спектр и АКФ одиночного импульса (волнового пакета) является сильно изрезанным.

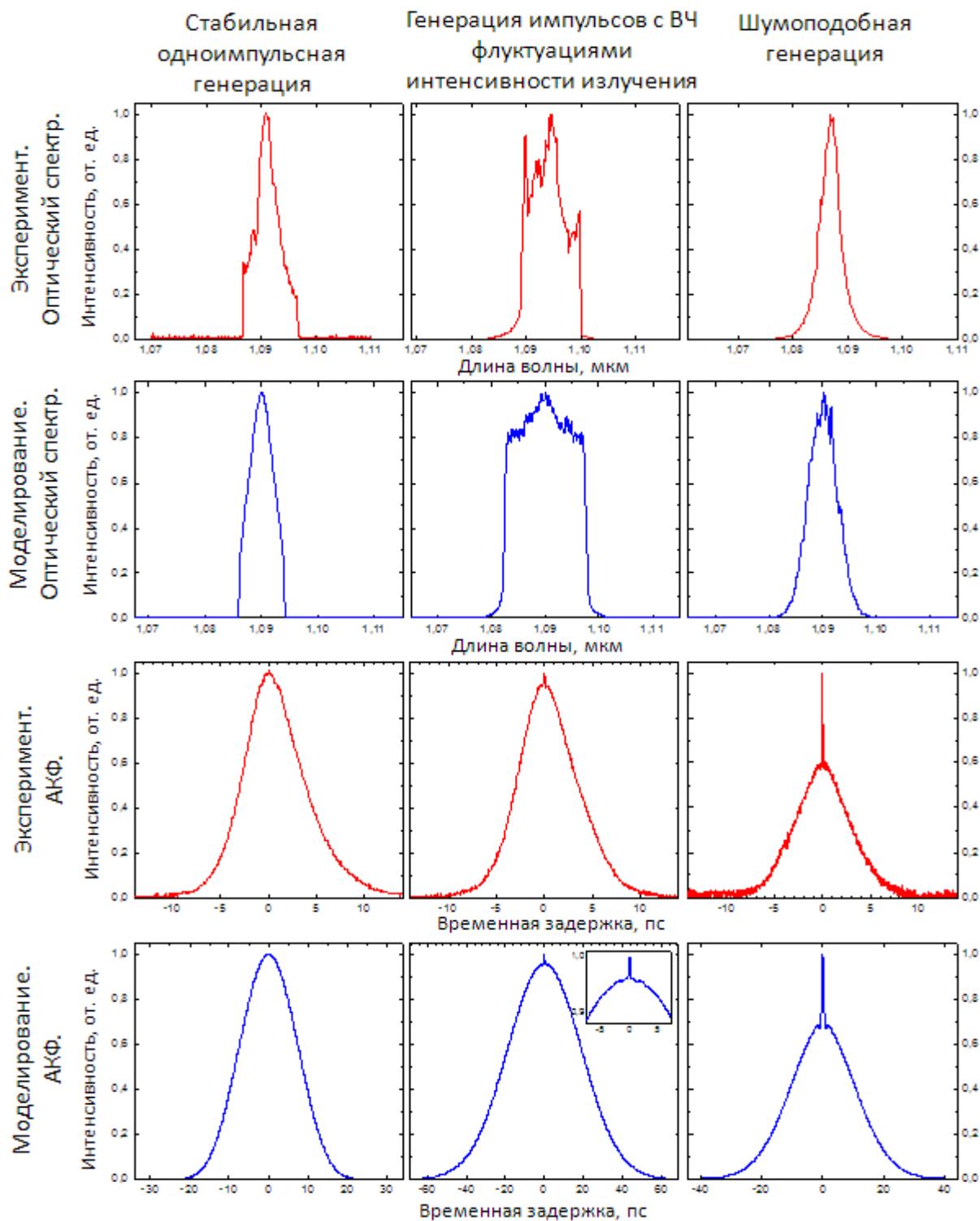


Рис. 2. Экспериментально измеренные (красные) и смоделированные (синий) оптические спектры и АКФ для 3х характерных режимов генерации: стабильной одноимпульсной генерации (левая колонка), режима генерации импульсов с высокочастотными флуктуациями интенсивности излучения (центральная колонка) и шумоподобной генерации (правая колонка).

Спектры генерации, наблюдаемые в режимах с высокочастотными флуктуациями интенсивности излучения, имеют резкие края и плавный спад спектральной мощности у основания. АКФ таких импульсов имеет характерную двойную структуру, однако высота пика намного меньше высоты пьедестала. Таким образом, и спектр, и АКФ такого режима имеют переходный вид между спектром / АКФ стабильного режима и шумоподобным режимом (см. Рис. 2, средний столбец).

Глава 3 посвящена исследованиям синхронизации мод в сверхдлинных волоконных лазерах. В главе рассматриваются сверхдлинные волоконные лазеры с суммарной нормальной внутрирезонаторной дисперсией и с синхронизацией мод за счёт эффекта нелинейной эволюции поляризации.

Увеличение длины резонатора лазера с синхронизацией мод излучения является эффективным методом увеличения энергии импульсов внутри задающего осциллятора. Реализация этого метода наиболее проста в волоконных лазерах, длина резонатора которых может быть легко увеличена без ухудшения стабильности генерации.

Автором диссертации совместно с коллегами из НГУ, ИЛФ СО РАН и университета Астон (Великобритания) были разработаны и исследованы сверхдлинные волоконные эрбиевые лазеры с синхронизацией мод с различными конфигурациями резонаторов.

Проведённые исследования режимов генерации в сверхдлинных волоконных эрбиевых лазерах с суммарной нормальной внутрирезонаторной дисперсией и с синхронизацией мод за счёт нелинейной эволюции поляризации выявили, что, в отличие от коротких волоконных лазеров, генерация одиночных колоколообразных импульсов в сверхдлинных лазерах является крайне сложно осуществимой. В сверхдлинных эрбиевых лазерах с суммарной нормальной внутрирезонаторной дисперсией и с синхронизацией мод за счёт нелинейной эволюции поляризации характерными режимами одноимпульсной генерации являются режим импульсной генерации с высокочастотными флуктуациями интенсивности излучения и режим шумоподобной импульсной генерации.

Различие режимов, как и для коротких волоконных лазеров, заключается в форме оптического спектра и параметрах генерации. Первый режим – режим генерации импульсов с высокочастотными флуктуациями интенсивности излучения - реализуется при малых мощностях накачки, близких к пороговой мощности генерации и характеризуется короткой длительностью импульсов менее 2 нс и малой средней мощностью (до 5 мВт). Оптический спектр характеризуется резкими краями и плавным спадом спектральной мощности у основания (Рис. 3).

Второй режим – режим шумоподобной импульсной генерации - реализуется при мощностях накачки значительно превышающих порог генерации и характеризуется большей длительностью по сравнению с вторым режимом (в 2-4 раза). Средняя мощность импульсов на выходе лазера в первом режиме в несколько раз превышает мощность второго режима. Оптический спектр характеризуется колоколообразной формой спектра.

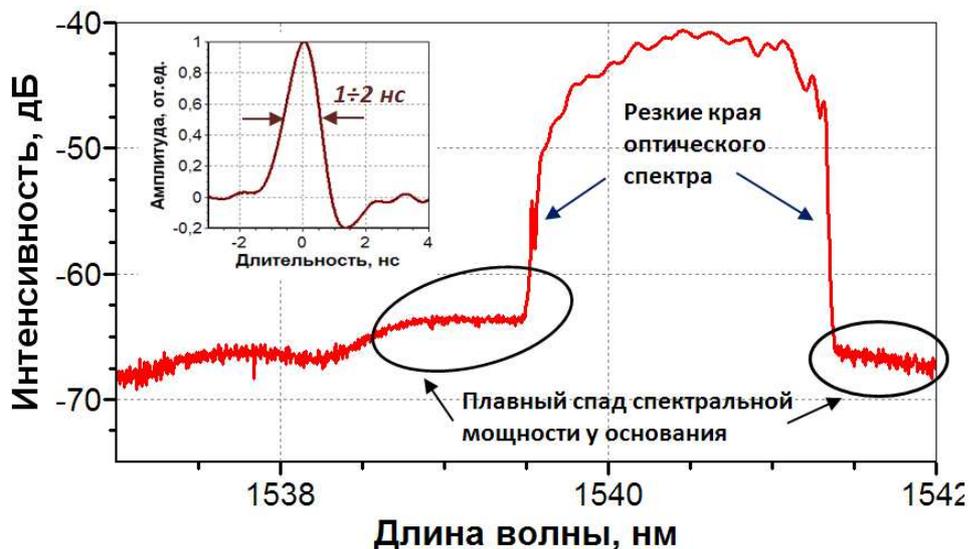


Рис. 3. Оптический спектр сверхдлинного лазера в режиме генерации импульсов с высокочастотными флуктуациями интенсивности излучения.



Рис. 4. Оптический спектр сверхдлинного лазера в режиме шумоподобной импульсной генерации.

Впервые зарегистрированные автокорреляционные функции интенсивности излучения (Рис. 5) сверхдлинного лазера с синхронизацией мод служат прямым экспериментальным подтверждением сделанного ранее на основании результатов численного моделирования вывода о квазистохастической природе генерации в длинных и сверхдлинных лазерах.

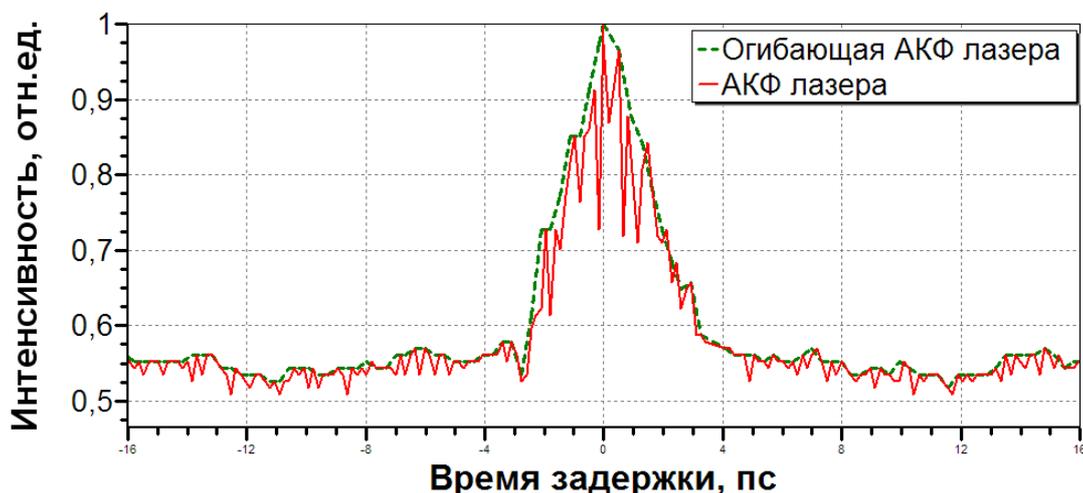


Рис.5. Центральный пик автокорреляционной функции интенсивности лазерных импульсов сверхдлинного волоконного лазера с суммарной внутрирезонаторной дисперсией и с синхронизацией мод за счёт нелинейной эволюции поляризации.

Исследования дисперсионного сжатия в оптических волокнах импульсов сверхдлинных лазеров показали, что эффективность сжатия таких импульсов является ограниченной из-за сложной временной структуры импульса, коэффициент линейного дисперсионного сжатия таких импульсов не превышает 2. На рисунке 6 приведён пример сжатия импульса в стандартном одномодовом волокне различной длины.

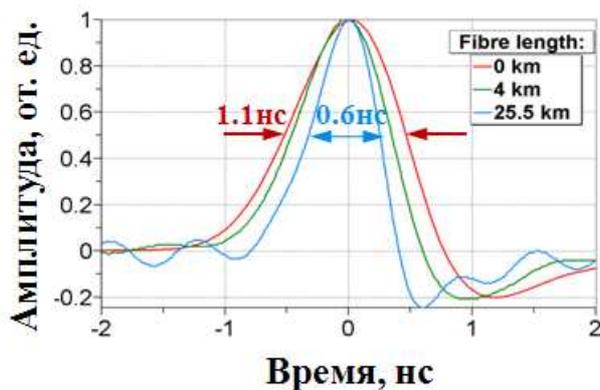


Рис.6. Осциллограмма импульса сверхдлинного волоконного лазера с суммарной внутрирезонаторной дисперсией и с синхронизацией мод за счёт нелинейной эволюции поляризации: красный граф – импульс с выхода лазера; зелёный граф – импульс после прохождения одномодового волокна длиной 4 км; синий граф – импульс после прохождения одномодового волокна длиной 25.4 км.

Глава 4 посвящена исследованию режимов синхронизации мод в линейно-кольцевых схемах резонаторов волоконных сверхдлинных лазеров с синхронизацией мод за счёт нелинейной эволюции поляризации.

Представлен разработанный и исследованный сверхдлинный эрбиевый волоконный лазер с линейно-кольцевой схемой резонатора, который обеспечивает энергию выходного импульса свыше 1 мкДж с килогерцовой частотой повторения на длине волны 1,55 мкм (Рис. 7).

Использование специального волокна с относительно большой нормальной внутрирезонаторной дисперсией и волокна со смещенной нулевой дисперсией в комбинации с компенсацией поляризационной нестабильности в длинном линейном

плече резонатора обеспечило стабильный режим самостартующей синхронизации мод с высокой энергией импульса и ультра-низкой частотой повторения без распада импульса.

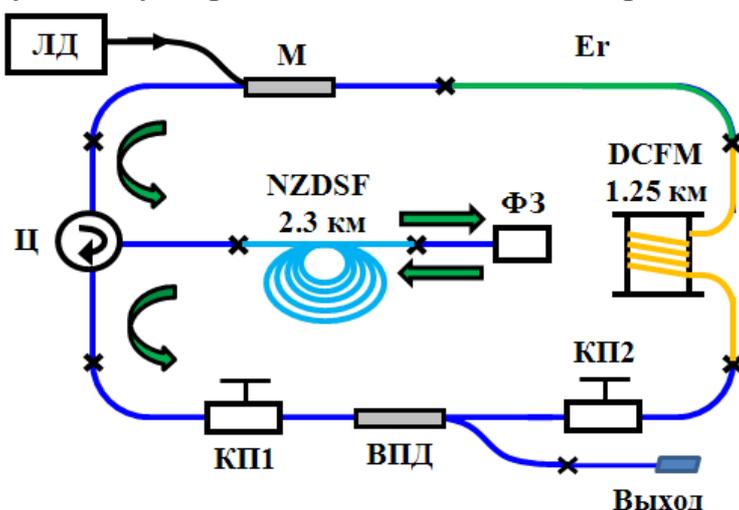


Рис.7. Схема сверхдлинного эрбиевого цельноволоконного лазера. КП1, КП2 – контроллеры поляризации, Ц – циркулятор, М – мультиплексор, ЛД – лазерный диод накачки, Ц – циркулятор, ФЗ – фарадеевское зеркало, ВПД – волоконный поляризационный делитель, Er – активное эрбиевое волокно, NZDF – катушка волокна со смещённой нулевой дисперсией длиной 2.3 км, DCF – катушка волокна длиной 1.25 км компенсирующего дисперсию стандартного одномодового волокна.

Приводятся результаты исследования сверхдлинного волоконного лазера с оригинальной «гамма»-схемой резонатора. Главной целью являлась разработка и исследование сверхдлинного волоконного эрбиевого лазера с синхронизацией мод, имеющего механизмы подавления различных деструктивных эффектов в динамике генерации и способного обеспечить стабильную генерацию высокоэнергетических импульсов длительностью менее 1 нс с высокой пиковой мощностью и низким уровнем интенсивности спонтанного излучения. Лазерные системы с такими характеристиками необходимы для решения целого прикладных и фундаментальных задач, в частности для генерации высокоэнергетических суперконтинуумов и реализации с их помощью передовых методов абсорбционной спектроскопии.

Разработанный лазер имеет цельноволоконный резонатор линейно-кольцевого типа, схема которого изображена на рисунке 8. Одним из ключевых отличий данной схемы от обычной линейно-кольцевой, является наличие в резонаторе дополнительного линейного плеча выполняющего функции, связанные с поддержкой и стабилизацией режима синхронизации мод, а также спектральным профилированием импульсов.

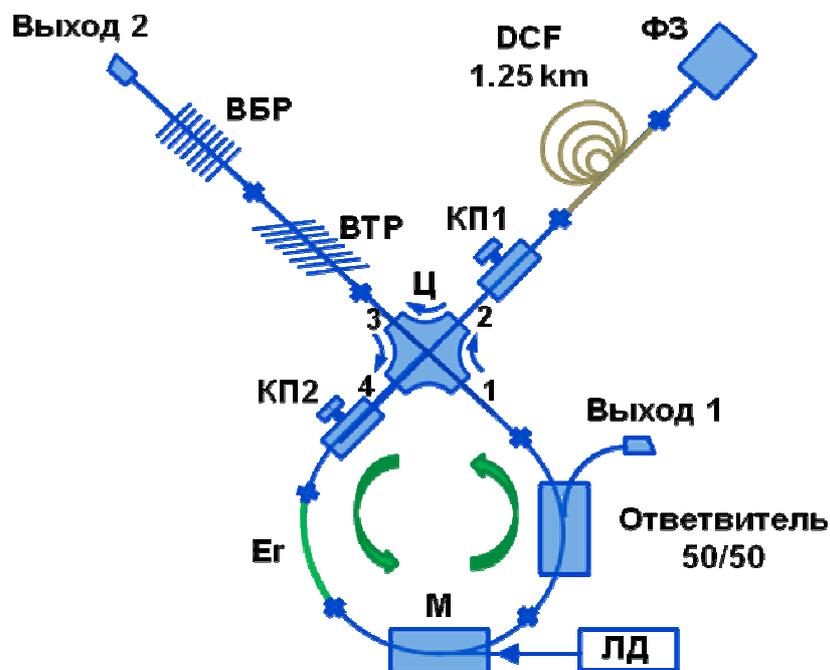


Рис. 8. Схема резонатора лазера. ЛД – лазерный диод накачки; М – мультиплексор; Er – активное волокно, легированное ионами эрбия; Ц – циркулятор; КП1, КП2 – контроллеры поляризации; О – ответвитель 50/50; DCF – катушка волокна с нормальной дисперсией 1.25 км; ВТР – волоконная «тильда»-решётка; ФЗ – фарадеевское зеркало; Из – изолятор; ВБР – волоконная брегговская решётка.

На основе разработанного сверхдлинного эрбиевого цельноволоконного лазера с нормальной дисперсией, имеющего оригинальную «гамму»-схему резонатора, была создана цельноволоконная импульсная лазерная система, которая обеспечивает генерацию суб-наносекундных импульсов (Рис. 9, 10) с энергией более 400 нДж и частотой следования 81.6 кГц. Новые схемные решения, такие как компенсация поляризационной нестабильности в сверхдлинном плече резонатора, применение внутррезонаторного полосового фильтра на основе широкополосной волоконной брегговской решётки в сочетании с наклонной решёткой показателя преломления, обеспечили относительно низкий уровень интенсивности спонтанного излучения и высокую стабильность параметров выходного излучения.

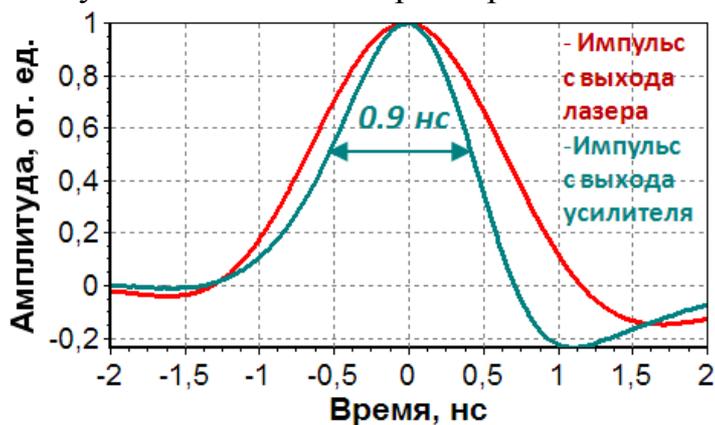


Рис. 9. Осциллограммы лазерных импульсов до усиления (синий) и после (красный).

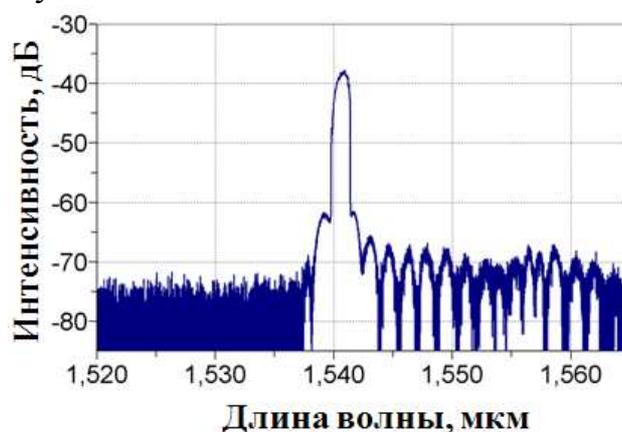


Рис. 10. Оптический спектр после усиления.

В заключении приведены основные результаты и выводы диссертационной работы.

Основные результаты и выводы диссертационной работы.

В ходе проделанной работы были получены следующие результаты:

1. Получена генерация импульсов с энергией 1.7 мкДж с ультра-низкой частотой повторения 35,1 кГц непосредственно из цельноволоконного эрбиевого лазера с синхронизацией мод с линейно-кольцевым резонатором при использовании для удлинения резонатора специального волокна с нормальной внутрирезонаторной дисперсией и волокна со смещенной нулевой дисперсией на длине волны 1.55 мкм.

2. Продемонстрирована синхронизация мод в волоконном лазере с рекордной длиной резонатора 25 км. За счет значительного увеличения длины резонатора реализована ультра-низкая для лазеров с синхронизацией мод частота повторения импульсов 8.1 кГц.

3. Экспериментально исследованы режимы синхронизации мод в сверхдлинных волоконных лазерах с суммарной нормальной внутрирезонаторной дисперсией.

Впервые полученные автокорреляционные функции интенсивности излучения сверхдлинного лазера с синхронизацией мод служит прямым экспериментальным подтверждением сделанного ранее на основании результатов численного моделирования вывода о квазистохастической природе генерации длинных и сверхдлинных лазеров. В сверхдлинных эрбиевых лазерах с суммарной нормальной внутрирезонаторной дисперсией и с синхронизацией мод за счёт нелинейной эволюции поляризации характерными режимами одноимпульсной генерации являются режим шумоподобной импульсной генерации и режим импульсной генерации с высокочастотными флуктуациями интенсивности излучения.

4. Исследована временная компрессия в стандартном одномодовом волокне импульсов сверхдлинных волоконных лазеров с суммарной нормальной дисперсией и с синхронизацией мод за счёт нелинейной эволюции поляризации. Максимальный коэффициент сжатия импульсов достигает величины, равной 2, что согласуется с результатами численного моделирования.

5. Разработан и исследован сверхдлинный цельноволоконный эрбиевый лазер с суммарной нормальной внутрирезонаторной дисперсией и с самостартующей синхронизацией мод, имеющий оригинальную «гамму» конфигурацию резонатора, предоставляющую расширенные возможности для оптимизации и стабилизации импульсных режимов генерации. В лазере успешно реализованы механизмы подавления деструктивных эффектов в динамике генерации, а именно механизмы уменьшения поляризационной нестабильности, уменьшения интенсивности спонтанного излучения, ограничения длительности импульсов и предотвращения их распада, предотвращения перескоков длины волны генерации. Это позволило создать на основе разработанного лазера стабильную цельноволоконную лазерную систему, способную генерировать субнаносекундные высокоэнергетические импульсы с относительно низким уровнем шумов спонтанной эмиссии. Данная лазерная система обеспечивает генерацию субнаносекундных импульсов с энергией более 400 нДж с уровнем спонтанной эмиссии не превышающим 5% от энергии импульса и частотой следования 81.6 кГц.

В целом в диссертационной работе проведены исследования режимов синхронизации мод в сверхдлинных волоконных лазерах с суммарной внутрирезонаторной дисперсией и с синхронизацией мод за счёт нелинейной эволюции поляризации в резонаторах с различными конфигурациями. Разработаны и реализованы новые решения для резонаторов волоконных лазеров, позволяющие оптимизировать

параметры излучения. Полученные результаты обеспечивают физическую основу для дальнейшего научного и технического развития волоконных лазеров с синхронизацией мод.

Основные публикации по теме диссертации:

- 1) Денисов В.И., Иваненко А.В., Корель И.И., Ньюшков Б.Н., Пивцов В.С., Оптоволоконные фемтосекундные лазеры для метрологии и телекоммуникаций // Фотон-Экспресс.- 2007.- №6 (62).- С. 83.
- 2) Иваненко А.В. Оптоволоконный фемтосекундный лазер // Дни науки НГТУ, Новосибирск, Россия, 2007 г., С. 29.
- 3) Денисов В.И., Дмитриев А.К., Иваненко А.В., Ньюшков Б.Н., Пивцов В.С. Фемтосекундный волоконный лазер для линейных измерений // Материалы IX международной конференции АПЭП - 2008, Том 5, Новосибирск, Россия, 2008, С. 21-24.
- 4) Денисов В.И., Иваненко А.В., Ньюшков Б.Н., Пивцов В.С. Фемтосекундный волоконный лазер с комбинированной линейно-кольцевой схемой резонатора // Квант. Электроника.- 2008.- Т.38.- №9.- С.801-802.
- 5) Koltsev S.M., Kukarin S.V., Fedotov Y.S., Ivanenko A.V. High-energy femtosecond 1086/543-nm fiber system for nano- and micromachining in transparent materials and on solid surfaces // Laser Physics.- 2011.- V.21.- №2.- P.308-311.
- 6) Nyushkov B.N., Denisov V.I., Koltsev S.M., Pivtsov V.S., Kolyada N.A., Ivanenko A.V., Turitsyn S.K. Generation of 1.7-uJ pulses at 1.55um by a self-modelocked all-fiber laser with a kilometers-long linear-ring cavity // Laser Physics Letters.- 2010.- V.7.- №9.- P.661-665.
- 7) Ivanenko A.V., Koltsev S.M., Kukarin S.V., Kurkov A.S. Femtosecond Er laser system based on side-coupled fibers // Laser Physics.- 2010.- V.20.- №2.- P.341-343.
- 8) Ivanenko A.V., Koltsev S.M., Kukarin S.V. Femtosecond ring all-fiber Yb laser with combined wavelength-division multiplexer-isolator // Laser Physics.- 2010.- V.20.- №2.- P.344-346.
- 9) Иваненко А.В., Турицин С.К., Дубов М.В., Кобцев С.М., Дмитриев А.К. Волоконный эрбиевый лазер с синхронизацией мод в резонаторе с длиной 25 км // ВНКСФ-16, Волгоград, Россия, 22-29 апреля, 2010, Сб. тез., 2010, С. 368-369.
- 10) Иваненко А.В., Кобцев С.М., Кукарин С.В., Курков А.С. Фемтосекундная эрбиевая волоконная система на основе сдвоенных световодов // III Российский семинар по волоконным лазерам, Уфа, Россия, апрель 2009, Сб. тез., 2009, С. 61- 62.
- 11) Иваненко А.В., Кобцев С.М., Кукарин С.В. Цельноволокнистый фемтосекундный кольцевой иттербиевый лазер с мультиплексором-изолятором // II Российский семинар по волоконным лазерам, Уфа, Россия, апрель 2009, Сб. тез., 2009, С. 66- 67.
- 12) Иваненко А.В., Турицин С.К., Дубов М.В., Кобцев С.М., Дмитриев А.К. Волоконный эрбиевый лазер с синхронизацией мод излучения в резонаторе с оптической длиной 37 км // IV Российский семинар по волоконным лазерам, Ульяновск, Россия, апрель 2010, Сб. тез., 2010, С. 32-33.
- 13) Ньюшков Б.Н., Денисов В.И., Кобцев С.М., Пивцов В.С., Коляда Н.А., Иваненко А.В., Турицин С.К. Сверхдлинный цельноволокнистый эрбиевый лазер с синхронизацией мод и энергией импульсов 1.7 мкДж // IV Российский семинар по волоконным лазерам, Ульяновск, Россия, апрель 2010, Сб. тез., 2010, С. 34-35.

- 14) Иваненко А.В., Кобцев С.М., Кукарин С.В., Курков А.С. Высокоэнергетичная фемтосекундная 1086/543-нм волоконная система для создания микро- и наноструктур в прозрачных средах и на поверхностях твёрдых материалов // IV Российский семинар по волоконным лазерам, Ульяновск, Россия, апрель 2010, Сб. тез., 2010, С. 52-5367.
- 15) А. Иваненко, С. Кобцев, С. Турицин, Б. Ньюшков, В. Денисов, В. Пивцов, «Гамма»-схема резонатора для высокоэнергетичных волоконных лазеров с синхронизацией мод // Фотоника и оптические технологии, Новосибирск, Россия, февраль, 2011, Сб. тез., 2011, С. 30.
- 16) Turitsyn S., Dubov M., Kobtsev S., Ivanenko A. Mode-Locking in 25-km Fibre Laser // 36th European Conference on Optical Communication (ECOC), Sep 19-23, 2010, Torino, Italy, Tu.5.D.1.
- 17) Nyushkov B., Denisov V., Kobtsev S., Pivtsov V., Kolyada N., Ivanenko A., Turitsyn S. High-pulse-energy mode-locked 3.5-km-long Er fibre laser // 14th International Conference "Laser Optics 2010", June 28 - July 02, 2010, St.Petersburg, Russia, FrR1-38.
- 18) Дмитриев А.К., Гуров М.Г., Кобцев С.М., Иваненко А.В. Квантовый стандарт частоты. Патент RU 2426226 С1, 11.01.2010.

Подписано к печати «» _____ 2011 г.

Формат бумаги 60ч84 1.16. Объём 1 печ.л.

Тираж 100 экз. Заказ №

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