

На правах рукописи



Федотов Юрий Сергеевич

**Исследование режимов генерации диссипативных солитонов в волоконных
иттербиевых лазерах**

01.04.21 “Лазерная физика”

Автореферат диссертации на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Новосибирск - 2014

Работа выполнена в Новосибирском национальном исследовательском государственном университете.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Кобцев Сергей Михайлович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Плеханов Александр Иванович

доктор физико-математических наук
Лосев Леонид Леонидович

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Научный центр волоконной оптики Российской
академии наук, г. Москва

Защита состоится “17” октября 2014 года в 15:00 на заседании диссертационного
совета Д 003.024.01 в Институте лазерной физики СО РАН, 630090, г. Новосибирск,
проспект академика Лаврентьева 13/3.

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

Автореферат разослан “06” августа 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к. ф.-м.н.



Н.Г.Никулин

Общая характеристика работы

Актуальность работы. В настоящее время применение волоконных импульсных лазеров получает все большее распространение как в фундаментальных исследованиях, так и в практических приложениях. Аккумулирование энергии генерируемого излучения в коротком лазерном импульсе позволяет получать высокие энергии и пиковые мощности излучения импульсов, создавая уникальные условия для изучения сверхбыстрых процессов и нелинейных эффектов, а также для обработки и модификации свойств материалов.

Длительность импульсов может варьироваться от нескольких микро- и субмикросекунд (лазеры с модуляцией добротности резонатора) до нескольких десятков фемтосекунд (лазеры с синхронизацией мод (СМ) излучения). Волоконные лазеры сверхкоротких импульсов имеют ряд важных особенностей. С одной стороны использование оптических волокон позволяет создавать лазерные резонаторы длиной в сотни и тысячи метров, предоставляя возможность управления энергией импульсов непосредственно в задающем генераторе. С другой стороны, так как распространение света в волоконных лазерах происходит не в вакууме, а в среде (как правило, в кварце), то на эволюцию импульсов также оказывают влияние процессы, связанные с взаимодействием излучения с веществом. Дисперсия и нелинейные эффекты, которыми можно управлять выбирая параметры волокна (диаметр сердцевины, разница показателей преломления сердцевины и оболочки, и др.), играют важную роль в формировании и эволюции импульсов.

В зависимости от длины волны излучения и дисперсионных характеристик используемых волокон результирующая дисперсия резонатора волоконного лазера может быть нормальной, близкой к нулю, и аномальной. В зависимости от величины суммарной дисперсии резонатора реализуются различные режимы генерации импульсов. В среде с аномальной дисперсией и пренебрежимо малыми потерями энергии, формируются спектрально ограниченные импульсы, так называемые, классические солитоны (КС), распространяющиеся без изменения формы и длительности, вследствие согласованного действия дисперсионного сжатия и нелинейного уширения. В области нормальной дисперсии формируются импульсы, обладающие частотной модуляцией (часто называемые чирпованными импульсами), -

диссипативные солитоны (ДС) - пакеты поля, устойчивая локализация которых вызвана балансом притока и оттока энергии в нелинейной среде.

Энергия ДС может в сотни раз превышать энергию КС, за счет большей длительности. ДС могут быть усилены без существенного изменения исходных параметров и сжаты до спектрально ограниченных импульсов внешним компрессором. Возможность генерации ДС в различных спектральных диапазонах, а также возможность управления их формой, длительностью и энергией в широких пределах делают ДС востребованными во многих исследовательских и прикладных задачах. Однако полученные режимы генерации ДС и методы управления их параметрами до настоящей работы были далеко не полностью изучены и, кроме того, ряд нерешенных ключевых проблем ограничивает пока использование ДС в решении пользовательских задач.

Во-первых, перестройка длины волны излучения в широком спектральном диапазоне ограничена шириной полосы усиления редкоземельных металлов. Расширение этого диапазона за счет вынужденного комбинационного рассеяния или генерации суперконтинуума не является простой задачей, решение которой позволило бы получить лазерные импульсы с заданными параметрами с широким спектральном диапазоне.

Во-вторых, для полностью волоконных иттербиевых лазеров существует существенно меньше возможностей управления длительностью импульсов по сравнению с полностью волоконными эрбиевыми лазерами, так как для спектральной области 1,0-1,1 мкм нет стандартных и коммерчески доступных недорогих волокон с аномальной дисперсией.

Компенсация положительной дисперсии резонатора в полностью волоконных иттербиевых лазерах производится либо за счёт использования специальных волокон: микроструктурированного волокна [1] или волокна с модами высших порядков в сочетании с длиннопериодными брэгговскими решетками [2] или вытянутого (биконического) волокна [3] или полого световода с фотонной запрещенной зоной [4], либо за счет использования чирпованных волоконных брэгговских решёток, являющихся одновременно и спектральными фильтрами [5, 6]. Методы компенсации дисперсии с использованием этих компонентов позволяют управлять длительностью

импульса, однако они не свободны от существенных недостатков: для микроструктурированного волокна имеется проблема соединения его со стандартным волокном, сердцевина вытянутого (биконического) волокна граничит непосредственно с воздухом, а чирпованные брэгговские решётки, как и длиннопериодные брэгговские решетки, являются относительно дорогими.

Эти обстоятельства стимулируют изучение процессов формирования солитонов и управления их свойствами в лазерах без компенсации дисперсии и генерации импульсов, обладающих частотной модуляцией. Актуальным является вопрос о влиянии внутрирезонаторной спектральной фильтрации на форму сильно чирпованных импульсов [7, 8]. Стоит отметить, что применяемые ранее широкополосные фильтры, выполненные на основе брэгговских решёток с шириной полосы отражения более 1 нм за счёт аperiodической модуляции показателя преломления, характеризуются относительно высокой дисперсией групповой скорости, а объёмные элементы [7, 9] не позволяют реализовать лазер в полностью волоконной конфигурации.

И в-третьих, одним из наиболее надёжных способов запуска режима СМ является использование специальных внутрирезонаторных устройств - насыщаемых поглотителей (НП), способных осуществить самостарт и поддержание режима СМ. Однако, в настоящий момент, для волоконных лазеров не существует универсальных коммерчески доступных НП, удовлетворяющих всем предъявляемым к ним основным требованиям. Полупроводниковые НП имеют ограниченный срок службы, обусловленный работой НП в условиях высокой плотности мощности излучения при наличии примесей и дефектов материала. В волоконных лазерах на основе нелинейной эволюции поляризации используются волоконные контроллеры поляризации, действие которых основано на сдавливании/скручивании волокна, что приводит к временному изменению параметров двулучепреломления волокна из-за пластической механической деформации аморфного плавленого кварца, или наборы объёмных волновых пластинок, обеспечивающих более высокую стабильность параметров двулучепреломления резонатора, однако не позволяющих реализовать лазер в полностью волоконной конфигурации. Использование активной СМ с применением быстрых оптических модуляторов (10-40 ГГц) не позволяет получить импульсы короче 2,5-10 пс. В связи с этим поиск надёжных НП, способных стать

альтернативой существующим устройствам синхронизации мод излучения, является актуальной современной задачей.

Цель диссертационной работы состоит в теоретическом и экспериментальном изучении генерации ДС в волоконных иттербиевых лазерах. В рамках этого вопроса были сформулированы следующие задачи:

- Исследование возможностей перестройки по длине волны генерации волоконного иттербиевого лазера с синхронизацией мод, а также исследование возможностей рамановского преобразования частоты и его влияния на характеристики генерируемых импульсов.
- Разработка технологии изготовления насыщающегося поглотителя с использованием одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ), интегрируемого в полностью волоконный лазер.
- Разработка волоконного перестраиваемого спектрального фильтра для полностью волоконного лазера, работающего в режиме синхронизации мод в области полностью нормальной дисперсии.

Научная новизна. Впервые получена генерация диссипативных солитонов в областях от 1075 до 1120 нм, от 1130 до 1174 нм, от 1190 до 1235 нм и от 1255 до 1300 нм при помощи использования стоксовых компонент в волоконном иттербиевом лазере.

Разработана технология изготовления НП на основе ОУНТ, в виде однородной полимерной пленки с регулируемой концентрацией углеродных нанотрубок.

Получена генерация режима синхронизации мод в спектральной области 1 мкм в полностью волоконном лазере при помощи НП на основе ОУНТ, синтезированных методом каталитического разложения углеводородов.

Предложен и исследован полностью волоконный двулучепреломляющий фильтр (ДФ) с регулируемой шириной полосы пропускания и глубиной модуляции, являющийся волоконным аналогом классического фильтра Лио [10].

Впервые исследовано влияния полностью волоконного ДФ на формирование режима синхронизации мод, форму и длительность диссипативных солитонов.

Получена рекордная энергия импульсов 4 мкДж в волоконном иттербиевом задающем генераторе с синхронизацией мод излучения .

Практическая значимость данной работы заключается в демонстрации возможностей генерации ДС с уникальными характеристиками, востребованными в ряде приложений. Предложен способ создания широкополосных перестраиваемых источников излучения диссипативных солитонов в области 1075 -1300 нм, а также недорогих полностью волоконных источников импульсного излучения субпикосекундной длительности с использованием ОУНТ. Разработана технология создания в лабораторных условиях, НП в виде полимерной пленки, содержащей ОУНТ, интегрируемой в полностью волоконный лазер. Предложен и исследован волоконный двулучепреломляющий спектральный фильтр, позволяющий генерировать перестраиваемые по длине волны диссипативные солитоны в волоконном иттербиевом лазере. Предложенный спектральный селектор, позволяет также контролировать длительность и частотную модуляцию генерируемых импульсов.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Иттербиевый волоконный лазер с синхронизацией мод на основе эффекта нелинейного вращения поляризации, внутррезонаторным спектрально селективным элементом и преобразованием частоты на основе вынужденного комбинационного рассеяния позволяет осуществить перестройку длины волны генерируемых диссипативных солитонов в спектральных областях 1075 – 1120 нм, 1130 – 1174 нм, 1190 – 1235 нм, 1255 – 1300 нм.
2. Насыщающийся поглотитель, на основе одностенных углеродных нанотрубок диаметром 0.9 ± 0.1 нм в полимерной матрице из поливинилового спирта, позволяет реализовать режим синхронизации мод иттербиевого волоконного лазера с выходной средней мощностью до 10 мВт и пикосекундной длительностью диссипативных солитонов.
3. Волокна с поддержкой поляризации в сочетании со стандартными одномодовыми волокнами и поляризационно чувствительными элементами в резонаторе могут выполнять функцию двулучепреломляющего спектрального фильтра с регулируемой шириной полосы пропускания и глубиной модуляции в иттербиевом волоконном

лазере с суммарной нормальной дисперсией и синхронизацией мод с помощью насыщающегося поглотителя на основе одностенных углеродных нанотрубок.

4. Изменение длины волокна с поддержкой поляризации, и контроль двулучепреломления в стандартных одномодовых волокнах при наличии поляризационно чувствительных элементов в резонаторе позволяет управлять шириной спектра, фазовой модуляцией и длительностью диссипативных солитонов в волоконном иттербиевом лазере с синхронизацией мод излучения.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях и семинарах: III Российском семинаре по волоконным лазерам 2009 (Уфа, Россия); CLEO/Europe-EQEC 2009, 14-19 June 2009, Munich, Germany, CJ.P.16; IV Российском семинаре по волоконным лазерам 2010 (Ульяновск, Россия); XLVIII Международной научной студенческой конференции “Студент и научно-технический прогресс” 2010 (Новосибирск, Россия); Конференции «Фотоника и Оптические Технологии» 2011 (Новосибирск, Россия); Конференции «Фотоника и Оптические Технологии» 2012 (Новосибирск, Россия); Российский семинар по волоконным лазерам 2012 (Новосибирск, Россия); 15th International Conference "Laser Optics 2012" (St.Petersburg, Russia).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 12 работах, из которых 6 работ удовлетворяют требованиям ВАК, на основе работы получен 1 патент.

Личный вклад автора заключается в получении экспериментальных данных и их анализе. Автор разработал и оптимизировал собственную технологию создания НП на основе ОУНТ. Предложил идею и продемонстрировал возможность создания полностью волоконного, перестраиваемого ДФ с регулируемыми параметрами. Провел сравнительный анализ расчетов с экспериментальными данными, а также реализовал новую схему пикосекундного волоконного лазера в области 1-1.1 мкм с НП на основе ОУНТ.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав с изложением материала диссертации и заключения, в котором изложены основные результаты. Общий объем диссертации

составляет 132 страницы машинописного текста и включает 65 рисунков, 2 таблицы и список литературы из 131 наименования.

Содержание работы

Во Введении приведен обзор литературы, даны основные определения и пояснения к используемой терминологии, дан краткий экскурс в историю развития исследований по выбранной теме. Обосновывается практическая значимость и актуальность исследуемой проблемы. Формулируются цели работы и представляются выносимые на защиту положения. Также изложено краткое содержание каждой из глав диссертации.

В первой главе излагается физика процесса формирования режима СМ в лазерном резонаторе. Особое внимание уделено основным существующим подходам к запуску режима СМ в волоконных лазерах и видам насыщаемых поглотителей, устройств, осуществляющих запуск режима СМ. Рассмотрены их сильные и слабые стороны.

Во второй главе проводится исследование возможностей генерации ДС в волоконных лазерах с СМ, основанных на эффекте нелинейной эволюции поляризации. Затрагивается тема высокоэнергетичных и широкополосных лазерных систем, основанных на данном методе. Обсуждаются нелинейные эффекты, влияющие на характеристики генерируемых импульсов: уширение спектра (фазовая модуляция, кросс-модуляция), смещение длины волны генерации (рамановское рассеяние).

Для подтверждения результатов в эксперименте использовался дискретно волоконный иттербиевый лазер с полностью нормальной внутрирезонаторной дисперсией, схема которого приведена на рис.1.

Как показывают результаты проведенных экспериментов, в лазерах с нормальной дисперсией возможно получение перестраиваемых по длине волны диссипативных солитонов в широком спектральном диапазоне. При использовании эффекта Рамана продемонстрирована возможность существенного смещения длины волны генерации излучения в длинноволновую область.

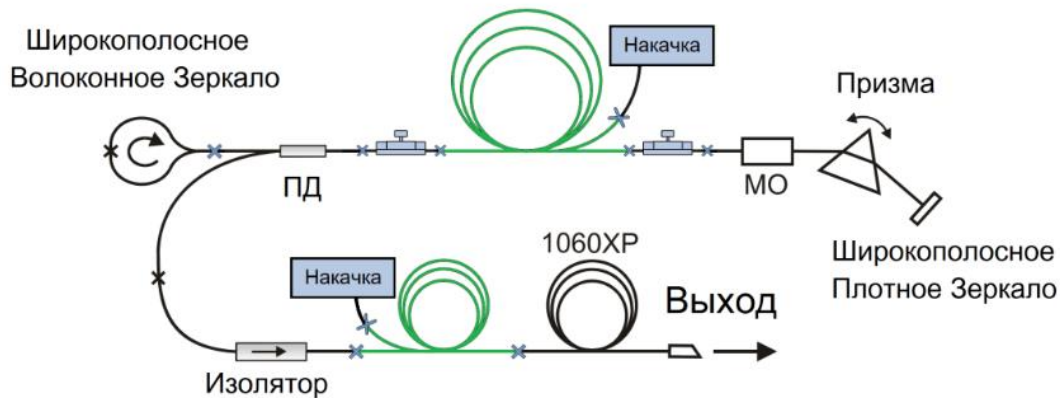


Рис. 1. Схема дискретно-волоконного перестраиваемого иттербиевого лазера с рамановским преобразованием частоты.

Третья глава посвящена исследованию возможности генерации режима СМ с НП на основе полимерных пленок, содержащих ОУНТ. Подробно обсуждаются способы их синтеза, исследуется связь их физико-химических свойств с их структурой. Отдельное внимание уделяется факторам, влияющим на эффект насыщаемого поглощения.

Для апробации созданного НП в эксперименте использовался короткий волоконный иттербиевый лазер с полностью нормальной дисперсией, схема которого приведена на Рис. 2.

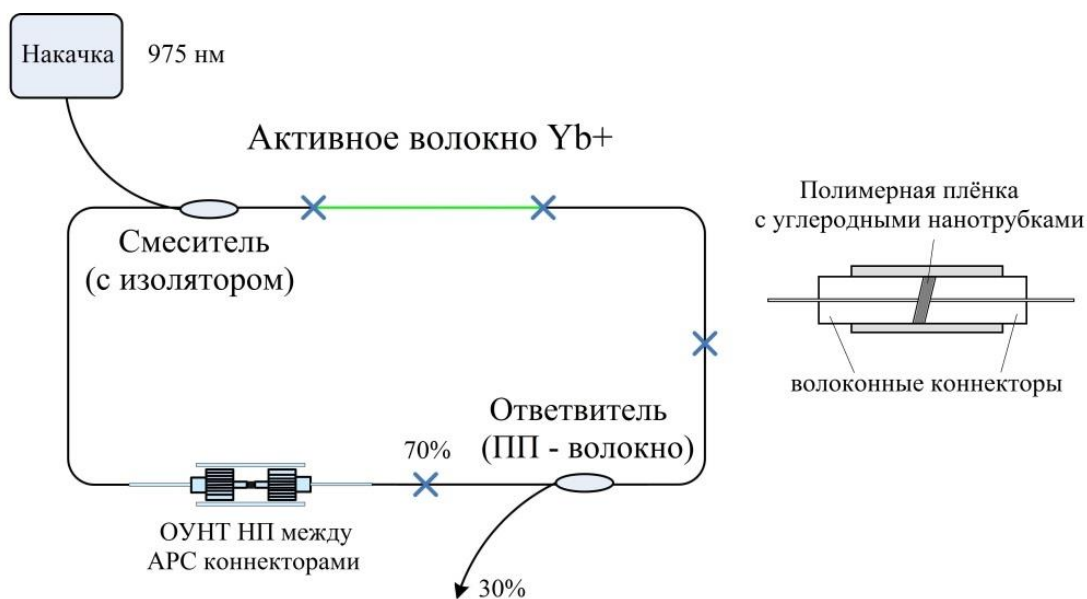


Рис.2 Схема волоконного лазера для испытания НП на основе ОУНТ.

В данной главе описана разработанная технология создания НП в виде однородной полимерной пленки, содержащей ОУНТ и обсуждены результаты экспериментов. Данная схема позволила получить СМ с длительностью импульсов равной 13 пс и выходной средней мощностью до 10 мВт.

В четвертой главе предложена новая схема создания полностью волоконного двулучепреломляющего фильтра, являющегося разновидностью поляризационного фильтра, действие которого основано на явлении интерференции поляризованных лучей. Исследуется вопрос о влиянии спектральной внутрирезонаторной фильтрации на характеристики диссипативных солитонов в волоконных иттербиевых лазерах с синхронизацией мод в области нормальной дисперсии..

Оптические волокна с поддержкой поляризации (ПП) являются средой с сильным наведенным двулучепреломлением за счет механического напряжения плавленого кварца. Это позволяет нивелировать неоднородности эллиптичности сердцевины вызывающие отклонения поляризации от линейной в обычном одномодовом волокне. С другой стороны данное свойство ПП волокон может быть использовано для создания полностью волоконного спектрального фильтра, являющегося аналогом фильтра Лио [10], так как большой показатель двулучепреломления будет обеспечивать большую разность фазового набегу для разных компонент спектра.

В данной главе разработан и продемонстрирован перестраиваемый двулучепреломляющий волоконный фильтр (ДВФ), с регулируемой шириной полосы пропускания и глубиной модуляции (Рис. 3), способствующего запуску режима СМ при помощи насыщающегося поглотителя на основе ОУНТ в области нормальной дисперсии. Для исследований в эксперименте был собран волоконный иттербиевый кольцевой лазер с полностью нормальной дисперсией схема которого показана на Рис. 4. Без применения ДВФ лазер работал в только непрерывном режиме генерации излучения (без использования НП) и режиме модуляции добротности (с использованием НП).

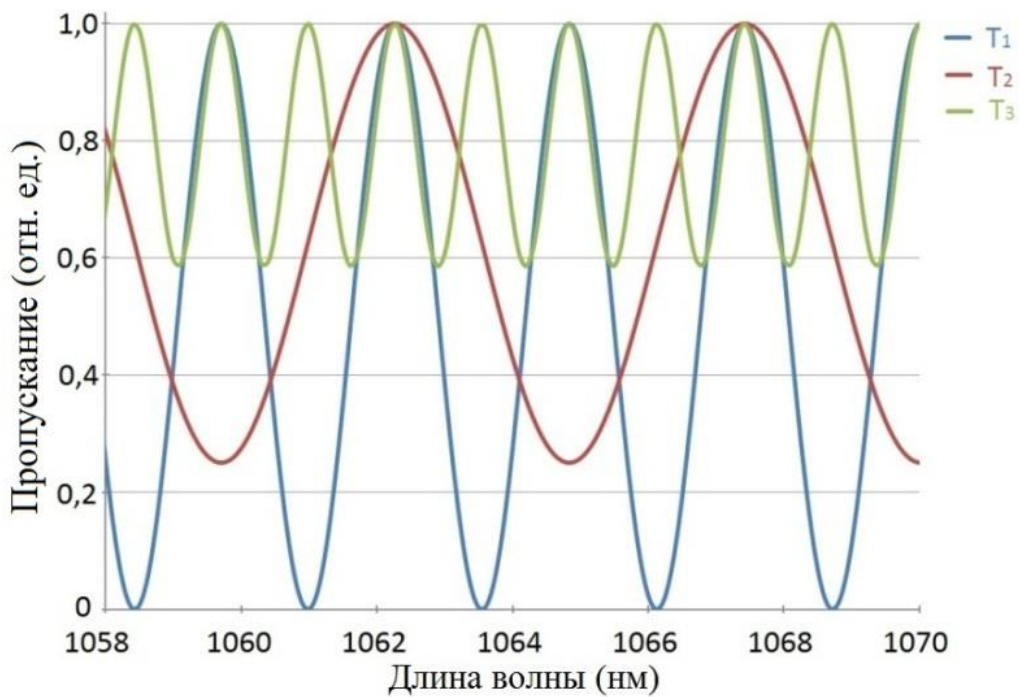


Рис. 3 Расчетная зависимость пропускание ДВФ от длины волны излучения.

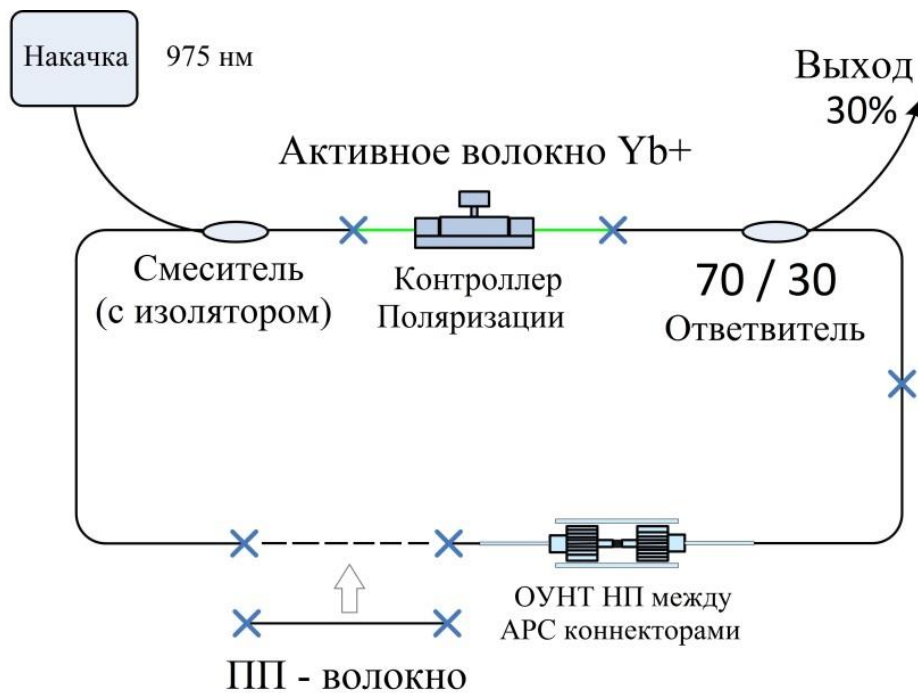


Рис. 4 Схема волоконного иттербиевого лазера с синхронизацией мод с НП на основе ОУНТ и ДВФ в резонаторе.

В данной части продемонстрирована генерация диссипативных солитонов с контролируемой длительностью и длиной волны излучения в полностью волоконном лазере с насыщающимся поглотителем на основе ОУНТ в спектральном диапазоне

1060-1066 нм. Использование ДВФ сконструированного из отрезков ПП волокна различной длины в сочетании с контроллером поляризации позволило управлять шириной спектра выходного излучения, длительностью и частотной модуляцией диссипативных солитонов, а также перестраивать центральную длину волны генерации.

В Заключение сформулированы основные результаты диссертации.

1. Получена перестройка длины волны генерации иттербиевого волоконного лазера с синхронизацией мод на $+22,5$ нм относительно центральной длины волны, при помощи призмы и широкополосного волоконного зеркала. Получено внутри- и внерезонаторное рамановское преобразование частоты с генерацией трех стоксовых компонент в областях 1075 – 1120 нм, 1130 – 1174 нм, 1190 – 1235 нм, 1255 – 1300 нм. Как показали исследования, длительность импульсов задающего генератора и стоксовых компонент практически не отличается и составляют 6 ± 1 пс.
2. Разработан и исследован метод изготовления НП на основе ОУНТ в лабораторных условиях и показаны преимущества его использования. Создан пикосекундный иттербиевый лазер с использованием разработанного и изготовленного НП. Длительность и средняя мощность полученных импульсов составили 13 пс и 10 мВт соответственно.
3. Разработан полностью волоконный двулучепреломляющий перестраиваемый спектральный фильтр с регулируемыми параметрами на основе волокон с ПП.
4. Продемонстрирован полностью волоконный иттербиевый лазер с углеродными нанотрубками, работающий в режиме СМ с контролируемой длительностью импульсов, шириной спектра излучения и центральной длиной волны генерации в области 1060 – 1066 нм. Средняя выходная мощность излучения лазера составила 1,5 мВт, частота повторения импульсов 50 МГц. Ширина спектра излучения лазера может изменяться от 0,15 до 1,25 нм, а длительность импульсов от 2 до 3,8 пс. Перестройка центральной длины волны генерации возможна в спектральной области шириной 5 нм.

Список работ, опубликованных реферируемых журналах по теме диссертации

1. Y.S.Fedotov, S.M.Kobtsev, R.N.Arif et al. Spectrum-, pulsewidth-, and wavelength-switchable all-fiber mode-locked Yb laser with fiber based birefringent filter // *Optics Express*.- 2012.-V.20.-№16.-P.17797-17805.
2. S.M.Kobtsev, S.V.Kukarin, Y.S.Fedotov. Mode-Locked Yb fiber laser with saturable absorber based on carbon nanotubes // *Laser Physics*.- 2011.-V.21.-№2.- P.283–286.
3. S.M.Kobtsev, S.V.Kukarin, S.V.Smirnov, Y.S.Fedotov. High-energy mode-locked all-fiber laser with ultralong resonator // *Laser Physics*.- 2010.-V.20.-№2.-P.351-356.
4. S.M.Kobtsev, S.V.Kukarin, Y.S.Fedotov. Wide-spectrally-tunable CW and femtosecond linear fiber lasers with ultrabroadband loop mirrors based on fiber circulators // *Laser Physics*.- 2010.-V.20.-№2.-P.347-350.
5. S.Kobtsev, S.Kukarin, Y.Fedotov. High-energy pulsed fibre laser based on a two-fibre assembly // *Quantum Electron*.-2009.- V.39.-№5.- P.417-420.
6. S.Kobtsev, S.Kukarin, Y.Fedotov. Ultra-low repetition rate mode-locked fiber laser with high-energy pulses // *Optics Express*.- 2008.- V.16.-№26.-21936-21941.

Список патентов по теме диссертации

7. С.М.Кобцев, С.В.Кукарин, С.В.Смирнов, Ю.С.Федотов. Волоконный задающий генератор с высокой энергией импульсов излучения // *Патент РФ №119531*, опубликовано 20.08.2012, Бюл. №23.

Список работ представленных на конференциях

1. Y.Fedotov, S.M.Kobtsev, A.Rozhin, et al. Spectral width and pulse duration tuning in Yb mode-locked fiber laser with birefringent Lyot filter // *Advanced Photonics Congress, Nonlinear Photon. Conf., OSA Tech Dig. Specialty Optical Fibers (SOF)*, Colorado Springs, Colorado, USA.-June 17-21, 2012.- P: JM5A.25.
2. Y.S.Fedotov, S.M.Kobtsev, A.G.Rozhin et al. Spectrum-, pulse-width and wavelength variable all-fiber mode-locked Yb laser with birefringent filter // *15th Int. Conf. "Laser Optics 2012"*, St.Petersburg, Russia.-June 25-29, 2012.-WeR1-p63.
3. S.M.Kobtsev, S.Kukarin, S.Smirnov, Y.Fedotov. Ultra-wide-tunable fibre source of femto- and picosecond pulses based on intracavity Raman conversion // *Proc. SPIE*,

- "Fiber Lasers VII: Technology, Systems, and Applications".-2010.-V.7580.-P.758023.
4. S.Kobtsev, S.Kukarin, Y.Fedotov, S.Smirnov. All-fiber supercontinuum generator with high-energy pulses // CLEO/Europe-EQEC 2009, Munich, Germany.-June 14-19, 2009.-CJ.P.16.
 5. S.Kobtsev, S.Kukarin, Y.Fedotov. Q-switched hybrid MOPA laser system based on Yb fibre with side pumping by single source // Proc. SPIE, " Solid State Lasers XVIII: Technology and Devices ".-2009.- V.7193.-P.71932Q.
 6. С.М.Кобцев, С.В.Кукарин, Ю.С.Федотов, А.И.Иваненко. Высокoэнергетичная фемтосекундная 1086/543-нм волоконная система для создания микро- и наноструктур в прозрачных средах и на поверхностях твёрдых материалов // Материалы IV Российского семинара по волоконным лазерам, 19-22 апреля 2010 г., Ульяновск / под ред. А.С.Куркова.- Ульяновск: УлГУ.- 2010.-С. 52, 53.

Список цитируемых работ

1. H. Lim, F. Ilday, and F. Wise. Femtosecond ytterbium fiber laser with photonic crystal fiber for dispersion control // Opt. Express.-2002.-V.10.-25.-P.1497-1502.
2. M. Schultz, O. Prochnow, A. Ruehl, et al. Sub- 60-fs ytterbium-doped fiber laser with a fiber-based dispersion compensation // Opt. Lett.-2007.-V.32.-№16.-P.2372-2374
3. M. Rusu, R. Herda, S. Kivistö, and O. G. Okhotnikov. Fiber taper for dispersion management in a mode-locked ytterbium fiber laser // Opt. Lett.- 2006.- V.31.-№15.-P.2257-2259
4. A. Isomäki and O. G. Okhotnikov. All-fiber ytterbium soliton mode-locked laser with dispersion control by solid-core photonic bandgap fiber // Opt. Express.- 2006.- V.14.-№10.-P.4368-4373.
5. S. Kivistö, R. Herda, and O. G. Okhotnikov. All-fiber supercontinuum source based on a mode-locked ytterbium laser with dispersion compensation by linearly chirped Bragg grating // Opt. Express.- 2008.-V.16.-№1.-P.265-270

6. R. Gumenyuk, I. Vartiainen, H. Tuovinen, et al. Dispersion compensation technologies for femtosecond fiber system // *Appl. Opt.*- 2011.-V.50.-№6.-P.797-801.
7. A. Chong, W. H. Renninger, and F. W. Wise. J. Properties of normal-dispersion femtosecond fiber lasers // *Opt. Soc. Am. B.*-2008.-V.25.-№.2.- P. 140-148.
8. B. G. Bale, J. N. Kutz, A. Chong, et al. Spectral filtering for high-energy mode-locking in normal dispersion fiber lasers // *Opt. Soc. Am. B.*-2008.-V.25.-№10.-P.1763-1770.
9. B. Nie, D. Pestov, F. W. Wise, and M. Dantus. Generation of 42-fs and 10-nJ pulses from a fiber laser with self-similar evolution in the gain segment // *Opt. Express.*-2011.-V.19.-№13.-P.12074-12080.
10. B. Lyot. *C. R. Acad. Sci. Optical apparatus with wide field using interference of polarized light* // (Paris).-1933.-V. 197.-P.1593.

Федотов Юрий Сергеевич

Исследование режимов генерации диссипативных солитонов в волоконных
иттербиевых лазерах.

Автореф. дисс. на соискание учёной степени кандидата физ.-мат. наук.

Подписано в печать 31 июля 2014. Заказ № 3.

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Отпечатано в “Документ - Сервис”

630090, Новосибирск, ул. Институтская 4/1