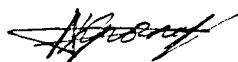


На правах рукописи



**Крылов Александр Анатольевич**

**Импульсные лазеры на основе иттербиевых и висму-  
товых волоконных световодов**

Специальность: 01.04.21 – лазерная физика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук



Москва 2009

Работа выполнена в Научном центре волоконной оптики Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор Крюков Петр Георгиевич,  
ИЦВО РАН

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Кулевский Лев Александрович,  
ИОФ РАН

доктор физико-математических наук,  
профессор Чекалин Сергей Васильевич,  
ИСАН

Ведущая организация: Институт прикладной физики Российской академии наук.

Защита состоится 5 сентября 2009 года в 15 часов на заседании Диссертационного совета Д 002.063.03 Института общей физики имени А.М. Прохорова РАН по адресу: 119333, Москва, Вавилова ул., 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИОФ РАН.

Автореферат разослан "3" сентября 2009 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук



Воляк Т.Б.

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы

В последние годы волоконные лазеры получают все большее распространение в различных областях науки и техники, среди которых выделяются промышленная обработка материалов (сварка, резка, гравировка, микрообработка) и метрология. К основным преимуществам волоконных лазеров относятся компактность; надежность, обусловленная простотой конструкции и минимумом юстируемых элементов; экономичность, обусловленная высокой эффективностью системы накачки; отсутствие серьезных проблем с теплоотводом даже при уровне выходной мощности в сотни ватт; возможность генерировать как одномодовые (практически гауссовы), так и многомодовые пучки; удобство доставки излучения к месту применения с помощью гибкого волоконного кабеля; широкий диапазон мощностей в непрерывном режиме генерации (от единиц мВт до десятков кВт), а также длительностей импульсов в импульсном режиме работы (от единиц микросекунд вплоть до десятков фемтосекунд).

Одно из главных преимуществ волоконных лазеров связано с эффективной системой ввода излучения накачки в активированный световод. При этом эффективность современного иттербиевого одномодового волоконного лазера достигает 85% по отношению к диодной накачке, и 30% - "от розетки", а его максимальная выходная мощность превосходит 1 кВт.

Наряду с непрерывными, интенсивно развиваются также импульсные волоконные лазеры, работающие в режимах модуляции добротности резонатора и синхронизации мод, реализация которых предполагает включение в резонатор также и объемных оптических элементов (в том числе поляризационно-чувствительных), таких как модулятор потерь (или фазы), насыщающийся поглотитель, компенсатор дисперсии. Эти объемные элементы необходимо жестко интегрировать с наименьшими потерями со световодами, что является довольно трудной задачей, поскольку требует особых технологических решений, но, вместе с тем, весьма актуальной.

Широкие полосы люминесценции активных центров в сердцевине световода позволяют создавать перестраиваемые в широком спектральном диапазоне непрерывные, а также импульсные лазеры. При этом обеспечить высокую ско-

рость перестройки с одной длины волны на другую, а также узкую спектральную полосу пропускания, высокую эффективность и малые вносимые потери позволяют быстродействующие акустооптические перестраиваемые спектральные фильтры (АОФ). Однако для их эффективной работы входное излучение должно быть плоскополяризованным, что приводит к необходимости согласования таких фильтров с дешевым стандартным изотропным световодом с целью обеспечения стабильной генерации лазера без флуктуаций выходной мощности. К тому же сдвиг несущей частоты излучения, возникающий при дифракции света на бегущей звуковой волне, приводит к довольно сложной картине генерации лазера с возможностью реализации даже стабильного импульсного режима.

В настоящее время проводится работа по расширению диапазонов выходных характеристик волоконных непрерывных и импульсных лазеров. В частности, диапазона длин волн излучения. В последнее время проводятся интенсивные исследования нового типа активной среды – волоконного световода на основе кварцевого стекла, сердцевина которого активирована висмутом. Полосы поглощения активных висмутовых центров в нем лежат в диапазоне длин волн генерации волоконных иттербиевого и ВКР-лазеров, что очень удобно с точки зрения создания полностью волоконной системы, а их спектр люминесценции простирается от 1.1 мкм до 1.7 мкм. Это, в свою очередь, даёт основания надеяться на возможность генерации ультракоротких импульсов (УКИ) с длительностью вплоть до субпикосекунд при осуществлении режима пассивной синхронизации мод, что может явиться альтернативой хорошо известному твердотельному лазеру УКИ на кристалле форстерита, легированного хромом.

Круг задач, рассматриваемых в данной работе, связан с исследованием иттербиевых импульсных волоконных лазеров с перестройкой длины волны излучения, в резонатор которых, помимо активированных иттербием изотропных световодов, входят дополнительные элементы, обеспечивающие работу лазера в импульсном режиме и перестройку длины волны. Наряду с этим исследуется возможность усиления излучения таких лазеров и достижения пиковых мощностей узкополосного излучения киловаттного уровня.

В число задач данной работы также входило исследование возможности реализации режима непрерывной пассивной синхронизации мод в лазере на ос-

нове нового типа активной среды – световода, легированного висмутом. При этом с целью сокращения длительности УКИ исследовалась схема лазера с внутриврезонаторным компенсатором дисперсии групповых скоростей (ДГС) на основе пары отражательных дифракционных решеток.

Таким образом, актуальность диссертационной работы определяется необходимостью реализации эффективных и удобных в эксплуатации источников лазерного излучения, генерирующих импульсы с длительностями от наносекунд до фемтосекунд в широком диапазоне длин волн.

### **Цели диссертационной работы**

1. Реализация и исследование стабильной генерации в режиме активной модуляции добротности с минимизацией длительности импульсов в лазере на основе изотропного активированного иттербием световода с многомодовой диодной накачкой в диапазоне перестройки длины волны излучения анизотропным акустооптическим спектральным фильтром.
2. Создание и исследование эффективного мощного одномодового усилителя импульсного излучения на основе активированного иттербием изотропного световода с увеличенной площадью фундаментальной моды.
3. Реализация и исследование режима пассивной синхронизации мод, инициируемого с помощью насыщающегося поглотителя SESAM в лазере на основе алюмосиликатного волоконного световода, активированного висмутом, при его накачке непрерывным излучением иттербиевого волоконного лазера.
4. Генерация УКИ пикосекундной длительности в висмутовом волоконном лазере, работающем в режиме пассивной синхронизации мод, путем регулирования внутриврезонаторной ДГС с помощью пары дифракционных решеток.

### **Научная новизна работы**

1. Показано, что наличие в резонаторе акустооптического перестраиваемого спектрального фильтра (АОФ) в схеме кольцевого акустооптического зеркала приводит к чередованию режимов нерегулярной (шумовой) импульсной генерации и частичной синхронизации мод в лазере, содержащем нелинейное усиливающее кольцевое зеркало при перестройке длины волны излучения в полосе усиления иттербиевого световода.

2. Получен и исследован режим генерации иттербиевого волоконного лазера с многомодовой накачкой, в котором при модуляции добротности резонатора с помощью акустооптического затвора в диапазоне акустооптической перестройки длины волны излучения наблюдаются стабильные гладкие симметричные лазерные импульсы колоколообразной формы с варьируемой частотой следования, минимальная длительность которых соответствует времени одного прохода резонатора.
3. В лазере на основе световода, активированного висмутом, впервые реализована и исследована генерация в режиме непрерывной пассивной синхронизации мод, который инициировался и поддерживался с помощью полупроводникового насыщающегося поглотителя SESAM.
4. В висмутовом волоконном лазере, работающем в режиме непрерывной пассивной синхронизации мод, путем регулирования ДГС внутри резонатора получена и исследована стабильная генерация УКИ пикосекундной длительности.

#### **Практическая ценность результатов**

1. Доступность и простота разработанного способа согласования анизотропных элементов с изотропными световодами делают его привлекательным для применения в лазерной технике.
2. Продемонстрированные особенности генерации иттербиевого волоконного лазера с акустооптической перестройкой длины волны излучения в режиме активной модуляции добротности резонатора могут быть полезны при разработке лазерных источников излучения с варьируемыми длительностью и частотой следования импульсов, а также длиной волны излучения.
3. Разработанный эффективный одномодовый усилитель наносекундных импульсов на основе иттербиевых световодов с многоэлементной первой оболочкой (МПО) и увеличенной площадью фундаментальной моды, который обеспечивает выходную пиковую мощность киловаттного уровня, представляет собой готовый инструмент для использования в таких областях науки и техники, как исследование нелинейных явлений и обработка материалов.
4. Реализация и исследование режима пассивной синхронизации мод в лазере на основе новой активной среды – световода, активированного висмутом – рас-

ширяют диапазон длин волн генерации современных импульсных волоконных лазеров и открывают возможность для дальнейшего развития сопутствующих технологий, например технологии полупроводниковых насыщающихся поглотителей и специальных световодов.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Иттербиевый волоконный лазер с многомодовой диодной накачкой и перестройкой длины волны генерации в режиме активной модуляции добротности резонатора излучает гладкие импульсы колоколообразной формы с варьируемой частотой следования, длительность которых соответствует одному проходу резонатора.
2. Эффективный усилитель с выходной пиковой мощностью наносекундных лазерных импульсов киловаттного уровня и одномодовым распределением интенсивности в поперечном сечении пучка реализован на основе маломодовых иттербиевых МПО-световодов с увеличенной площадью фундаментальной моды.
3. Режим непрерывной пассивной синхронизации мод инициируется с помощью насыщающегося поглотителя SESAM в лазере на основе световода, активированного висмутом, при его накачке непрерывным излучением иттербиевого волоконного лазера.
4. Висмутовый волоконный импульсный лазер с регулировкой ДГС внутри резонатора с помощью пары дифракционных решеток излучает в режиме непрерывной пассивной синхронизации мод стабильные УКИ пикосекундной длительности.

#### **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано 6 печатных статей, список которых приведен в конце автореферата.

#### **Апробация работы**

Результаты исследований, представленные в диссертационной работе, докладывались на российских и международных конференциях: XII Conference on Laser Optics (Санкт-Петербург, Россия, 26-30 июня 2006), XI Школа молодых ученых “Актуальные проблемы физики” (Звенигород, Россия, 26-29 ноября 2006), OFC/NFOEC Conference (Анахайм, США, 25-29 марта 2007), Российский

семинар по волоконным лазерам (Новосибирск, Россия, 4-6 апреля 2007), ICONO/LAT Conference, section "LAT: Advanced Lasers and Systems" (Минск, Белоруссия, 28 мая-1 июня 2007), Всероссийская конференция по волоконной оптике, секция "Волоконные лазеры- I" (Пермь, Россия, 10-12 октября 2007).

Результаты работы также регулярно докладывались на семинарах Научного центра волоконной оптики РАН.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, благодарностей и списка цитируемой литературы. Текст иллюстрируют 52 рисунка и одна таблица, библиография содержит 158 наименований. Общий объем диссертации составляет 146 машинописных страниц.

### **Содержание работы**

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели работы, описана ее структура, изложены положения, которые выносятся на защиту, а также апробация работы.

В **Главе 1** диссертации проведен обзор опубликованной литературы, касающейся вопросов импульсной генерации волоконных лазеров в режимах синхронизации мод и модуляции добротности резонатора, при этом более подробно рассмотрены особенности реализации режима синхронизации мод с помощью насыщающегося поглотителя SESAM. Обсуждаются дисперсионные свойства световодов и методы компенсации ДГС внутри резонатора, при этом подробно описывается компенсатор ДГС на основе пары отражательных дифракционных решеток, указываются его преимущества и недостатки. Представлена диаграмма энергетических уровней иона иттербия в сердцевине световода на основе кварцевого стекла и дана схема ввода многомодового излучения накачки в активный иттербиевый МПО–световод. Описаны особенности световодов, активированных висмутом, а также представлен обзор висмутовых волоконных лазеров, реализованных к настоящему моменту. Также дан краткий обзор особенностей перестройки длины волны генерации волоконных лазеров и усиления излучения в волоконных световодах с увеличенной площадью фундаментальной моды и многомодовой диодной накачкой.



**Глава 2** посвящена получению и исследованию режимов синхронизации мод и модуляции добротности резонатора лазера на основе изотропного иттербиевого МПО-световода с многомодовой диодной накачкой в диапазоне перестройки длины волны его излучения с помощью анизотропного акустооптического спектрального фильтра.

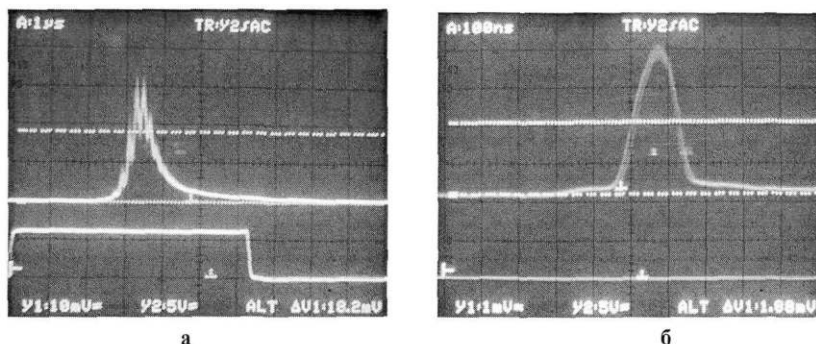
В начале главы описываются принципы работы акустооптического фильтра и затвора, а также приводится эффективный способ согласования изотропного световода с анизотропным элементом. Этот способ основан на использовании широкополосного термостабильного поляризационного делителя, реализованного на монокристалле  $\text{CaCO}_3$ , в схеме интегрированного кольцевого перестраиваемого акустооптического зеркала.

В п.2.3 приводятся результаты исследования режимов генерации лазера, содержащего нелинейное усиливающее кольцевое зеркало, при перестройке длины волны излучения. При этом области длин волн с нерегулярной пиковой (шумовой) генерацией чередовались с областями, в которых импульсы приобретали более регулярный характер следования. Такое поведение означает, что в данном случае имела место частичная синхронизация мод лазерного резонатора, инициируемая совместным влиянием сдвига несущей частоты излучения в акустооптическом спектральном фильтре (АОФ) и фазовой самомодуляции (ФСМ) излучения в световодах.

В п.2.4 диссертации описывается эффективный способ генерации лазерных импульсов наносекундной длительности при активной модуляции добротности резонатора Фабри–Перо с помощью акустооптического затвора.

В случае, когда  $\tau_0 \gg \tau_{\text{res}}, \tau_f$  ( $\tau_0$  — время, в течение которого затвор открыт, обеспечивая низкий уровень потерь;  $\tau_{\text{res}}$  — время жизни фотона в резонаторе, которое определяется его добротностью;  $\tau_f$  — быстродействие затвора, которое определяется конечным временем пробега фронта звука через световой пучок) и частота модуляции потерь  $f$  невелика, имеет место генерация гигантского импульса модуляции добротности, эффективно насыщающего активную среду и извлекающего ее энергию. Так, при  $\tau_0 \approx 6.2$  мкс ( $\tau_{\text{res}} \approx 270$  нс в резонаторе длиной 19 м) длительность лазерного импульса составляет  $\tau_p \approx 1$  мкс (рис.1а) на частоте следования  $f = 7.6$  кГц. Однако импульс в этом случае имеет внутреннюю струк-

туру в виде амплитудной модуляции с периодом  $T_{\text{res}} \approx 200$  нс (равным времени обхода резонатора), которая, в основном, связана со ступенчатым характером его формирования в длинном волоконном резонаторе. В данном случае величины  $\tau_r$  и  $T_{\text{res}}$  близки ( $\tau_r \approx 100$  нс и  $T_{\text{res}} \approx 200$  нс), поэтому ступенчатый характер импульса ярко выражен лишь на начальной стадии его формирования, вдали от насыщения.



**Рис. 1.** Лазерный импульс при различных значениях  $\tau_0$  (изображен вместе с управляющим радиочастотным импульсом) в резонаторе длиной 19 м.

*а* –  $\lambda = 1082$  нм,  $\tau_0 \approx 6.2$  мкс,  $f = 7.6$  кГц, выходная средняя мощность  $P = 12$  мВт – гигантский импульс модуляции добротности,  $\tau_p \approx 1$  мкс;  
*б* –  $\lambda = 1106$  нм,  $\tau_0 \approx 280$  нс (оптимальная),  $f = 100$  кГц,  $\tau_p \approx 120$  нс,  $P = 28$  мВт.

Сокращение  $\tau_0$  до определенного значения, зависящего от величины  $T_{\text{res}}$ , приводит к генерации гладких лазерных импульсов колоколообразной формы с незначительным пьедесталом, не содержащих внутренней модуляции (рис.1б), длительность которых соответствует одному проходу резонатора:  $\tau_p \sim T_{\text{res}}/2$ . Она постоянна в диапазоне перестройки длины волны генерации, не зависит от частоты модуляции потерь, а также мощности излучения накачки. В отличие от гигантского импульса модуляции добротности, длительность и время развития которого существенно зависят от соотношения начальной и пороговой инверсных населенностей активной среды, и следовательно, от частоты повторения и мощности излучения накачки, в данном случае эти параметры полностью определяются соотношением  $\tau_0$  и  $T_{\text{res}}$ . При этом лазерный импульс формируется в течение нескольких проходов излучения по резонатору ( $\approx 6$ ). В данном режиме генерации получена перестройка длины волны излучения лазера в спектральном диапазоне 1167–1110 нм в полосе частот следования импульсов 50–100 кГц. Минимальная

длительность лазерных импульсов составила  $\tau_p = 70$  нс в резонаторе длиной 14 м при минимальной ширине спектра излучения  $\Delta\lambda \approx 0.1$  нм и выходной средней мощности 40 мВт.

Параграф 2.5 диссертации посвящен исследованию процесса усиления наносекундных импульсов в мощных одномодовых волоконных двухкаскадных усилителях на основе изотропных иттербиевых МПО-световодов с увеличенной площадью фундаментальной моды при их накачке многомодовым излучением.

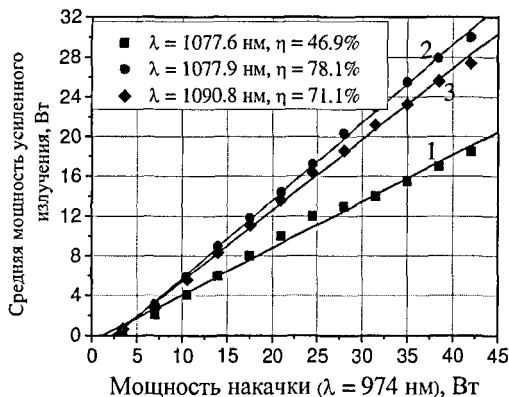
Первый каскад усиления (предусилитель) и мощный (выходной) каскады были изготовлены на основе изотропных маломодовых алюмосиликатных иттербиевых МПО-световодов со ступенчатым профилем показателя преломления. Диаметр поля фундаментальной моды LP01 (MFD) активных световодов составлял 12 и 14 мкм при  $\lambda = 1080$  нм.

Активный световод усилителя стыковался по входу и выходу с пассивным изотропным трехслойным одномодовым световодом с W-образным профилем показателя преломления длиной  $\approx 1$  м. При этом MFD активного и W-световодов был согласован. Одно из свойств W-световода заключается в том, что он позволяет при определенных параметрах обеспечить одномодовый режим распространения излучения с увеличенным диаметром поля моды без сильного скручивания, которое необходимо для фильтрации высших мод в маломодовых световодах со ступенчатым профилем показателя преломления. В данном случае W-световод на входе усилителей использовался для эффективного возбуждения фундаментальной моды LP01 маломодового активного световода, тогда как W-световод на выходе усилителей – для фильтрации высших мод, возникающих в активном световоде.

Зависимость средней мощности излучения на выходе усилителей от мощности излучения накачки представлена на рис.2.

При максимальной мощности излучения накачки получено 30 Вт средней мощности на длине волны 1077.9 нм без ВКР (дифференциальная эффективность мощного каскада составила при этом  $\eta \approx 78\%$ ), что соответствует пиковой мощности излучения в выходном волоконном световоде  $P_{\text{peak}} \approx 3$  кВт для импульсов длительностью  $\tau_p = 70$  нс на частоте следования 100 кГц. При этом максимальная энергия в импульсе составила  $E_{\text{max}} \approx 0.3$  мДж.

Профиль пучка в дальней зоне при максимальной мощности хорошо описывается функцией Гаусса, при этом параметр качества пучка  $M^2$ , измеренный с помощью анализатора пучков BeamScore vP5, составил  $M^2 \approx 1.2$ . Этот факт подтверждает наличие только фундаментальной LP01 моды на выходе усилителя. При максимальной мощности ширина спектра составила  $\Delta\lambda_{FWHM} \approx 0.4$  нм на длине волны 1077.9 нм.



*Рис. 2. Средняя мощность на выходе усилителей в зависимости от мощности излучения накачки. 1 – мощный усилительный каскад на основе активного МПО-световода с диаметром поля моды LP01 12 мкм и длиной 7 м; 2,3 – мощный усилительный каскад на основе активного МПО-световода с диаметром поля моды LP01 14 мкм и длиной 3 м.*

**Глава 3** диссертации посвящена реализации и исследованию режима пассивной синхронизации мод, который инициировался с помощью полупроводникового насыщающегося поглотителя SESAM в лазере на основе новой активной среды – волоконного световода, активированного висмутом – при его накачке непрерывным излучением иттербиевого волоконного лазера.

В п.3.1 приводятся основные характеристики алюмосиликатных висмутовых световодов, преформы для вытяжки которых были изготовлены с помощью технологий MCVD и SPCVD. Спектры оптических потерь и люминесценции в них при возбуждении на длине волны  $\approx 1064$  нм представлены на рис.3.

В п.3.2 даны характеристики насыщающегося поглотителя SESAM, а также представлены схемы накачки и измерения параметров излучения висмутового волоконного лазера. Насыщающийся поглотитель SESAM в резонансной конфигурации на основе GaInNAs полупроводниковой структуры образовывал глухое зеркало резонатора Фабри–Перо, при этом торец пассивного волоконного световода резонатора висмутового лазера, отполированный под прямым углом к его оси, стыковался непосредственно к поверхности SESAM.

Накачка висмутового лазера осуществлялась излучением специально изготовленного для этой цели непрерывного иттербиевого волоконного лазера с максимальной выходной мощностью 5.2 Вт на длине волны  $\lambda = 1075$  нм. Излучение накачки вводилось в сердцевину активного висмутового световода через волоконный мультиплексор (WDM) с эффективным объединением излучений с длинами волн 1075 нм и 1160 нм, потери в котором составили 0.1 дБ.

Также в п. 3.2 диссертации подробно исследуется влияние параметров выходного зеркала резонатора Фабри-Перо на характеристики генерируемых импульсов. В исследовании использовались два вида высокоотражающих волоконных брэгговских решеток (ВБР) и волоконных зеркал Саньяка. Необходимость применения высокоотражающего выходного зеркала резонатора обусловлена довольно малым коэффициентом усиления в висмутовом световоде.

ВБР №1 имела коэффициент отражения 75% (пропускание -6 дБ) на центральной длине волны 1161.1 нм и ширину спектра отражения (на половине максимального значения)  $\Delta\lambda_{FWHM} \approx 0.1$  нм. Коэффициент отражения ВБР №2 составлял 95% (пропускание -13 дБ) на центральной длине волны 1159.5 нм при ширине спектра отражения  $\Delta\lambda_{FWHM} \approx 0.5$  нм. В лазере с ВБР была получена генерация стабильных импульсов в режиме непрерывной пассивной синхронизации мод во всем диапазоне мощностей излучения накачки вплоть до максимально допустимой ( $\approx 1.2$  Вт). Ширина спектра излучения при этом составила  $\Delta\lambda_{FWHM} = 0.2$  нм в лазере с ВБР №2, что на порядок превышает результат, достигнутый в лазере с ВБР №1 ( $\Delta\lambda_{FWHM} = 0.02$  нм). Однако, несмотря на это, лазерные импульсы оказались довольно длинными ( $\tau_p \approx 3.5$  нс) по сравнению со слу-

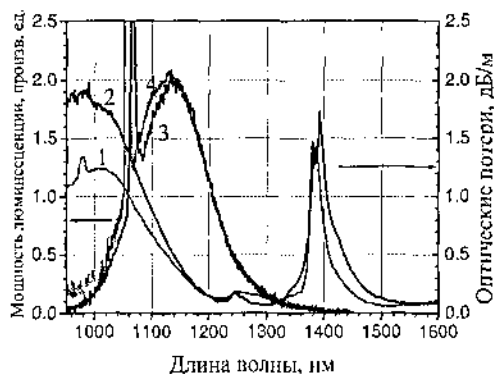


Рис.3. Спектры оптических потерь и люминесценции в световодах, преформы для вытяжки которых изготовились MCVD (кривые 1 и 3) и SPCVD (кривые 2 и 4) методами. Полоса поглощения на 1000 нм обусловлена висмутowymi центрами, полосы на 1250 нм и 1390 нм — ОН-группами.

чаем ВБР №1 ( $\tau_p \approx 50$  пс) и к тому же содержали внутреннюю структуру в виде амплитудной модуляции. При этом оказалось, что автокорреляционная функция интенсивности импульсов содержала центральный пик шириной  $\approx 10$  пс, который как раз и соответствует наличию этой внутренней структуры.

Увеличение длительности импульса и появление в нём внутренней структуры, по-видимому, связано с тем фактом, что в случае распространения лазерных импульсов с более широким спектром нормальная ДГС в длинном волоконном резонаторе и ВБР оказывает более существенное влияние при формировании импульса. Можно предположить также, что влияние нелинейных эффектов (ФСМ и четырехволнового смешения) также может стать более существенным. При этом, по-видимому, ДГС в ВРБ в случае широкого спектра играет особенно важную роль.

Для получения еще более широкого спектра лазерного излучения и исключения дополнительной, нежелательной ДГС в ВБР, в п.3.2.2 исследовался лазер, в котором в качестве выходного зеркала резонатора Фабри–Перо использовались широкополосные петлевые волоконные зеркала Саньяка (ВЗС) с коэффициентами отражения в линейном режиме  $R = 82\%$  (ВЗС №1,  $R \approx 100\%$  при  $\lambda = 1060$  нм) и  $R = 95\%$  (ВЗС №2,  $R \approx 100\%$  при  $\lambda = 1190$  нм) при  $\lambda = 1160$  нм. Они исключали спектральную фильтрацию излучения, характерную для ВБР, и имели ДГС, присущую пассивному волоконному световоду, из которого изготовлены элементы лазерного резонатора, то есть незначительно увеличивали внутррезонаторную ДГС.

В лазере с ВЗС №1 также удалось реализовать стабильный режим непрерывной пассивной синхронизации мод и исключить режим модуляции добротности резонатора во всем диапазоне мощностей излучения накачки вплоть до максимальной ( $\approx 1.2$  Вт).

Автокорреляционная функция интенсивности импульсов (рис.4) является гладкой и не содержит особенностей, что также свидетельствует о стабильности цуга импульсов. Ее аппроксимация гауссовой кривой дала ширину профиля  $\tau_a \approx 240$  пс (на полувысоте) и длительность лазерных импульсов с гауссовым профилем огибающей  $\tau_p \approx 170$  пс соответственно, причем эта величина практически не зависела от мощности лазерного излучения.

Максимум спектра излучения лазера (рис.5) находилась около длины волны 1160 нм, при этом его положение, ширина и форма зависели от выходной мощности лазера. Спектр имеет характерную прямоугольную форму (в логарифмическом масштабе), что согласуется с экспериментальными результатами и теоретическим моделированием процесса формирования импульсов в резонаторе со значительной нормальной ДГС. Максимальная ширина спектра излучения лазера составила  $\Delta\lambda_{\max} \approx 2.1$  нм (спектр 4 на рис.5) при максимальной средней выходной мощности  $P_{\max} = 7.8$  мВт.

Глава 4 посвящена исследованию висмутового волоконного лазера, работающего в режиме пассивной синхронизации мод, с регулированием ДГС внутри резонатора с помощью пары отражательных дифракционных решеток.

В п.4.1 представлена экспериментальная схема лазера с решеточным компенсатором ДГС (рис.6). Одним из двух глухих зеркал лазерного резонатора Фабри-Перо был насыщающийся поглотитель SESAM, к которому вплотную прижимался торец световода, отполированный под прямым углом к его оси.

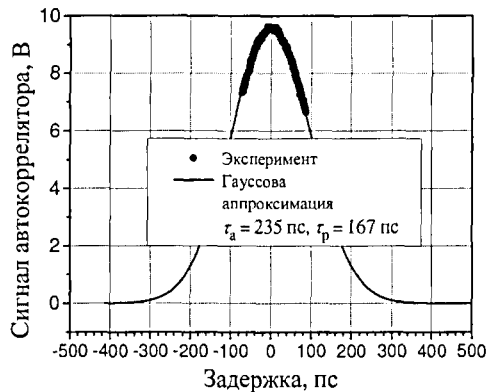


Рис.4. Автокорреляционная функция интенсивности импульсов, генерируемых висмутовым волоконным лазером с ВЗ №1.

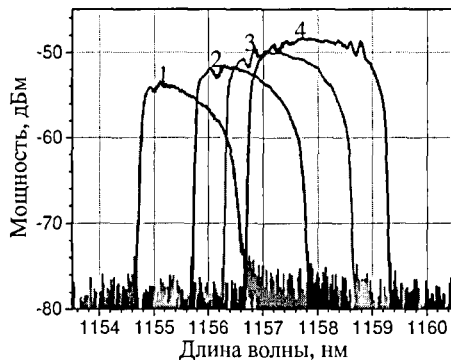


Рис.5. Эволюция положения и формы спектра излучения висмутового волоконного импульсного лазера с ВЗ №1 при варьировании его средней выходной мощности  $P_{\text{out}}$ .

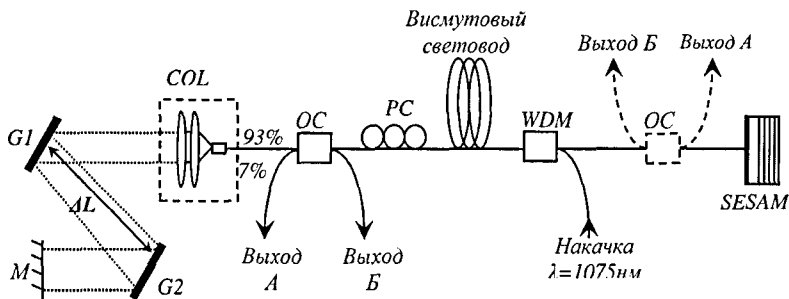
1 –  $P_{\text{out}} = 1.36$  мВт,  $\Delta\lambda = 1.16$  нм; 2 –  $P_{\text{out}} = 2.48$  мВт,  $\Delta\lambda = 1.38$  нм; 3 –  $P_{\text{out}} = 4.48$  мВт,  $\Delta\lambda = 1.59$  нм; 4 –  $P_{\text{out}} = 7.77$  мВт,  $\Delta\lambda = 2.07$  нм.

Вторым глухим зеркалом резонатора являлось зеркало с многослойным диэлектрическим покрытием с коэффициентом отражения  $\approx 100\%$  в спектральной полосе 1140–1250 нм. Между ним и торцом световода располагалась пара отражательных дифракционных решеток с золотым покрытием, с помощью которых осуществлялась регулировка ДГС внутри резонатора. Основные характеристики решеточных компенсаторов ДГС, использованных в работе, представлены в таблице 1.

**Таблица 1. Основные характеристики решеточных компенсаторов, использованных в работе.**

параметр	период решеток $d$ , мкм	эффективность дифракции (s-поляризация) $\eta_s$ , %	потери (с учетом обратного ввода) $l_s$ , дБ	удельная ДГС (на проход), $\beta_2$ , пс <sup>2</sup> /м
№1	1.67	64.6	-8.1	-1
№2	1	92	-1.7	-3

Излучение лазера выводилось из резонатора с помощью направленного ответвителя *OC* с коэффициентом деления по мощности 7/93 при  $\lambda = 1160$  нм и потерями 0.1 дБ, при этом для измерений лазерных параметров использовались оба его свободных выхода.



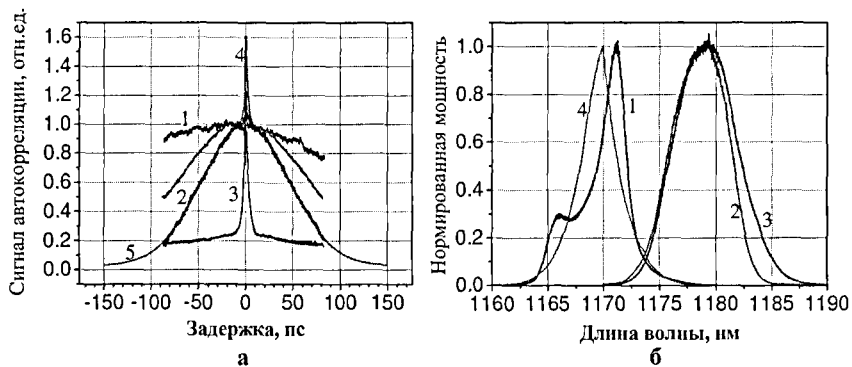
**Рис.6. Вискмуттовый волоконный лазер с внутрирезонаторным компенсатором ДГС.**

*WDM* – волоконный мультиплексор; *PC* – контроллер поляризации на основе одномодового световода *flexcore*; *OC* – направленный ответвитель с коэффициентом деления по мощности 7/93 при  $\lambda = 1160$  нм для вывода из резонатора; *G1* и *G2* – отражательные дифракционные решетки; *M* – зеркало с многослойным диэлектрическим покрытием с коэффициентом отражения  $\approx 100\%$  в спектральной полосе 1140–1250 нм; *COL* – коллиматор излучения на основе двухлинзового объектива.



В п.4.2 описаны особенности генерации УКИ в зависимости от параметров лазерного резонатора и компенсатора ДГС, а также проведена оптимизация этих параметров с целью генерации наиболее коротких и стабильных импульсов.

В лазере с компенсатором ДГС №1 был реализован режим непрерывной пассивной синхронизации мод с частотой повторения импульсов  $f \approx 2.4$  МГц. Пороговая мощность излучения накачки, при которой возникает генерация, была  $P_{th} = 500$  мВт. На рис.7 изображены автокорреляционные функции интенсивности импульсов и спектры излучения, соответствующие различным параметрам лазера.



**Рис.7. Автокорреляционные функция интенсивности импульсов (а) и спектр излучения (б) висмутового волоконного лазера с компенсатором ДГС №1.**

Расстояние между решетками  $\Delta L = 37$  см, средняя выходная мощность  $P_1 = 1.3$  мВт, ширина автокорреляционной функции и длительность импульсов  $\tau_a, \tau_p \gg 100$  пс, ширина спектра  $\Delta\lambda_{FWHM} \approx 2.5$  нм (1);  $\Delta L = 55$  см,  $P_2 = 0.15$  мВт,  $\tau_a = 130$  пс,  $\tau_p \approx 92$  пс,  $\Delta\lambda_{FWHM} \approx 6$  нм (2);  $\Delta L = 55$  см,  $P_3 = 0.56$  мВт,  $\tau_a = 7$  пс,  $\tau_p \approx 5$  пс,  $\Delta\lambda_{FWHM} \approx 6.5$  нм (3);  $\Delta L = 88$  см,  $P_4 = 0.58$  мВт,  $\tau_a \approx 165$  пс,  $\Delta\lambda_{FWHM} \approx 3$  нм (4); аппроксимация функцией Гаусса кривой 2 (5).

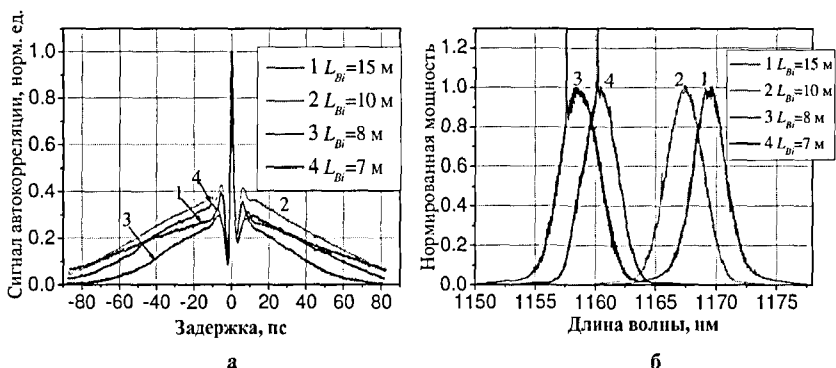
Кривая 3 на рис.7а соответствовала минимальной ширине автокорреляционной функции импульсов,  $\tau_a = 7$  пс (отличие автокорреляционных функций 2 и 3 друг от друга заключается в том, что они получены при варьировании состояния поляризации и мощности излучения в резонаторе). При этом выходная средняя мощность излучения составляла  $P_{out} = 0.56$  мВт (мощность излучения накачки  $P_{pump} = 760$  мВт). Таким образом, в лазере с компенсатором ДГС №1 удалось получить генерацию импульсов с гауссовым профилем огибающей с минимальной длительностью, составляющей по оценке  $\tau_p \approx 5$  пс.

При такой малой длительности возрастает роль нелинейных эффектов, в частности фазовой самомодуляции (ФСМ). Наличие пьедестала в автокорреляционной функции 3, по-видимому, обусловлено тем, что положительная частотная модуляция импульса за счет ДГС и ФСМ в волоконной части резонатора, компенсируется отрицательной линейной частотной модуляцией в решеточном компенсаторе ДГС только в центральной части импульса, то есть там, где она является практически линейной.

В лазере с компенсатором ДГС №2, исследованию которого посвящен п.4.2.2, также был реализован режим непрерывной пассивной синхронизации мод, при этом параметры лазерных импульсов существенно зависели от величины и знака внутрирезонаторной ДГС, а также мощности излучения накачки. Более стабильные УКИ наблюдались в том случае, когда направленный ответвитель *ОС*, выводящий излучение из лазерного резонатора, располагался непосредственно около насыщающегося поглотителя SESAM (показан пунктиром на рис.6), что, возможно, обусловлено более равномерным распределением потерь внутри резонатора в этом случае.

На рис.8а представлены наилучшие с точки зрения минимизации величины пьедестала и ширины сжатого пика автокорреляционные функции интенсивности импульсов для различных длин активного висмутового световода. Соответствующие спектры показаны на рис.8б. Видно, что уменьшение длины висмутового световода привело к заметному уменьшению площади несжатых “крыльев” пьедестала при аналогичной средней выходной мощности, что следует из сравнения кривых 1 и 3 на рис.8а. Это может быть обусловлено снижением влияния ФСМ вследствие уменьшения величины нелинейного набега фазы излучения и, как следствие, величины нелинейного чирпа импульса при его распространении в более коротком световоде.

Минимальная ширина автокорреляционной функции интенсивности импульсов на половине максимального значения составляет  $\tau_d = 1.6$  пс (кривые 2, 3 и 4 на рис.8а), что соответствует длительности лазерного импульса с гауссовым профилем огибающей (на половине максимальной интенсивности)  $\tau_p \approx 1.1$  пс. Минимальная длительность импульса в случае кривой 1 составила  $\tau_p \approx 1.4$  пс.



**Рис.8.** Автокорреляционные функции интенсивности импульсов (а) и спектры излучения (б) висмутового волоконного лазера с компенсатором ДГС №2 при различных длинах активного висмутового световода  $L_{Bi}$ .

Расстояние между решетками  $\Delta L = 10.25$  см, выходная средняя мощность  $P_{out} = 0.2$  мВт, ширина спектра  $\Delta\lambda_{FWHM} \approx 2.9$  нм,  $L_{Bi} = 15$  м (1);  $\Delta L = 6.6$  см,  $P_{out} = 0.31$  мВт,  $\Delta\lambda_{FWHM} \approx 3.5$  нм,  $L_{Bi} = 10$  м (2);  $\Delta L = 6.3$  см,  $P_{out} = 0.24$  мВт,  $\Delta\lambda_{FWHM} \approx 3.8$  нм,  $L_{Bi} = 8$  м (3);  $\Delta L = 6.05$  см,  $P_{out} = 0.37$  мВт,  $\Delta\lambda_{FWHM} \approx 3.6$  нм,  $L_{Bi} = 7$  м (4). Мощность излучения накачки 190 мВт (1); 230 мВт (2); 370 мВт (3); 1140 мВт (4).

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

### Основные результаты и выводы

1. Разработан и исследован иттербиевый импульсный волоконный лазер с многомодовой диодной накачкой и перестройкой длины волны излучения, работающий в стабильном режиме модуляции добротности и генерирующий гладкие импульсы колоколообразной формы с варьируемой частотой следования, длительность которых соответствует одному проходу резонатора. Достигнута минимальная длительность импульсов 70 нс в диапазоне 1067–1110 нм и полосе частот следования 50–100 кГц. Минимальная ширина спектра при выходной средней мощности 40 мВт составила  $\approx 0.1$  нм.
2. Разработан и исследован эффективный одномодовый усилитель наносекундных импульсов на основе маломодовых иттербиевых МПО-световодов с увеличенной площадью фундаментальной моды. В двух каскадах усиления, с использованием непрерывной многомодовой диодной накачки мощностью 42 Вт на длине волны  $\approx 974$  нм достигнута максимальная средняя мощность усиленного излучения 30 Вт при дифференциальной эффективности 78%. Пиковая мощность и энергия для импульсов длительностью 70 нс на частоте

следования 100 кГц составили 3 кВт и 0.3 мДж. Выходной пучок был одномодовым с параметром качества  $M^2 \approx 1.2$ . Одномодовое распределение интенсивности в поперечном сечении пучка реализовывалось благодаря стыковке одномодовых W-световодов к входу (эффективное возбуждение фундаментальной моды) и выходу (фильтрация излучения высших мод) активных маломодовых МПО-световодов с увеличенной площадью фундаментальной моды.

3. Реализована и исследована генерация в режиме непрерывной пассивной синхронизации мод, который инициировался с помощью полупроводникового насыщающегося поглотителя SESAM, в лазере на основе волоконного световода, активированного висмутом, при его накачке непрерывным излучением иттербиевого волоконного лазера. В лазере без компенсации дисперсии групповых скоростей (ДГС) внутри резонатора получены импульсы длительностью от 50 пс до 3.5 нс в зависимости от типа и параметров его выходного зеркала.
4. Реализован и исследован висмутовый волоконный импульсный лазер, работающий в режиме непрерывной пассивной синхронизации мод, с регулируемой ДГС внутри резонатора с помощью пары дифракционных решеток. В результате оптимизации параметров излучения лазера путем регулирования ДГС внутри резонатора достигнута минимальная длительность стабильных ультракоротких импульсов (УКИ) 1.1 пс.

## Список печатных работ по теме диссертации

1. A. A. Krylov, "30W Yb<sup>3+</sup> pulsed fiber laser with wavelength tuning and its second harmonic generation", *Proc. SPIE*, vol. 6610, 66100D (2007).
2. A.A. Krylov, E.M. Dianov, V.V. Dvoyrin, P.G. Kryukov, V.M. Mashinsky, O.G. Okhotnikov, M. Guina, "Mode-locked Bi-doped fiber laser", *Journal Opt. Soc. of Am. (B)*, vol. 24, N8, 1807-1808 (2007).
3. Б.Л. Давыдов, А.А. Крылов, "Перестраиваемый Yb<sup>3+</sup>-лазер на основе изотропного волоконного световода с анизотропным акустооптическим фильтром, встроенным в резонатор без сопутствующих поляризационных потерь с помощью нового поляризационного делителя", *Квант. электроника*, **37**, N9, 843-846 (2007).
4. B.L. Davydov, A.A. Krylov, "30W Yb<sup>3+</sup> – pulsed fiber laser with wavelength tuning", *Laser Physics*, **17**, N12, 1404-1415 (2007).
5. А.А. Крылов, В.В. Двойрин, В.М. Машинский, П.Г. Крюков, О.Г. Охотников, М. Гуина, "Синхронизация мод в висмутовом волоконном лазере с помощью SESAM", *Квант. электроника*, **38**, N3, 233-238 (2008).
6. А.А. Крылов, П.Г. Крюков, Е.М. Дианов, О.Г. Охотников, М. Гуина, "Импульсный волоконный висмутовый лазер с внутрирезонаторной компенсацией дисперсии групповых скоростей", *Квант. электроника*, **39**, N1, 21-24 (2009).

---

Заказ № 50-а/08/09 Подписано в печать 26.08.2009 Тираж 100 экз. Усл. п.л. 1

---



ООО "Цифровичок", тел. (495) 649-83-30; (495) 778-22-20  
*[www.cfr.ru](http://www.cfr.ru) ; e-mail: [info@cfr.ru](mailto:info@cfr.ru)*