

ОТЗЫВ

официального оппонента, кандидата технических наук Дворецкого Дмитрия Алексеевича на диссертационную работу Хегая Александра Михайловича «Импульсные висмутовые волоконные лазеры, генерирующие в диапазоне 1,25-1,75 мкм», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика.

Диссертация Хегая А.М. посвящена разработке импульсных лазеров на основе фосфоросиликатных и германосиликатных висмутовых волоконных световодов. В работе реализована серия лазеров на длинах волн 1,3 мкм и 1,7 мкм с пассивной синхронизацией мод на основе нелинейного кольцевого зеркала и насыщающегося поглотителя с одностенными углеродными нанотрубками. Исследована возможность усиления и сжатия полученных ультракоротких импульсов. Разработанные фосфоросиликатные и высокогерманатные световоды с висмутом позволили получить лазерную генерацию в спектральной области 1,3 и 1,7 мкм, важной с точки зрения применения в различных областях науки и техники: в биофотонике и медицине для неинвазивной диагностики, в частотной метрологии в качестве делителей частоты в составе оптического стандарта частоты, в лазерно-информационных технологиях и телекоммуникациях для синхронизации и калибровки систем передачи информации, в астрофизике, в системах прецизионной спектроскопии и др. Важной особенностью выполненной диссертационной работы является проведенное исследование оптических свойств фосфоросиликатных висмутовых световодов в зависимости от концентрации висмута. Важно отметить, что в результате проведенного диссертационного исследования были получены радиальные распределения висмутовых активных центров, их концентрация и определены спектры сечений поглощения и люминесценции в образцах фосфоросиликатных световодов.

Стоит отметить, что тема диссертации, затрагиваемые научные проблемы и полученные результаты обладают значительной актуальностью по ряду причин, среди которых как технические, так и фундаментальные. К первым можно отнести необходимость создания компактных, стабильных, простых и недорогих источников ультракоротких импульсов в слабо освоенных для волоконных лазеров спектральных диапазонах 1,3 и 1,7 мкм. Ко вторым, несомненно, относится необходимость углубленного понимания природы висмутовых активных центров, их структуры и оптических свойств.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка используемой литературы. Общий объем диссертации составляет 165 страниц, включая 91 рисунок, 4 таблицы и библиографию, содержащую 156 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, указана научная новизна и практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту, и указаны сведения об апробации и публикациях автора.

В главе 1 изложено современное состояние исследования по тематике диссертационной работы. Рассмотрены основные типы висмутовых активных световодов на основе кварцевого стекла, а также устройства на таких световодах. Описаны методы синхронизации мод и модуляции добротности, реализуемые в волоконных схемах.

В главе 2 приведены детали технологического процесса изготовления опытных образцов волоконных световодов, легированных висмутом, а также изложены методы и подходы, использованные при исследовании спектрально-люминесцентных характеристик активных световодов, легированных висмутом и изучении импульсных режимов генерации лазеров на их основе.

В главе 3 рассмотрены свойства фосфоросиликатных и высокогерманатных световодов с висмутом. Проведены исследования, направленные на оптимизацию свойств висмутовых волокон для последующего использования в качестве активной среды импульсных лазеров. Изучена зависимость усиления и ненасыщаемых потерь в фосфоросиликатных световодах от полной концентрации вводимого висмута и от длины волны излучения накачки. Получен образец такого световода с максимальным на сегодняшний день погонным усилением.

В главе 4 описаны характеристики лазеров с пассивной синхронизацией мод, созданные на основе разработанных световодов с висмутом. С использованием схемы на нелинейном кольцевом зеркале получена импульсная генерация в области 1,3 мкм с энергией $\sim 1,6$ нДж на выходе из лазера и $\sim 8,5$ нДж – из усилителя. С помощью компрессора на паре дифракционных решеток удалось сжать полученные импульсы до длительности ~ 700 фс. Также реализована схема с насыщающимся поглотителем на основе одностенных углеродных нанотрубок, работающая в спектральном диапазоне 1,3 мкм. На высокогерманатном световоде с висмутом создан лазер с пассивной синхронизацией мод на основе нелинейного кольцевого зеркала. Полученный лазер формировал пикосекундные импульсы в области 1,7 мкм. Стоит отметить, что в работе

проведено численное моделирование установившегося режима генерации на основе решения нелинейного уравнения Шредингера. Получена эволюция длительности, спектра и частотной модуляции импульса по мере его распространения внутри резонатора. Результаты расчетов подтверждаются полученными экспериментальными данными.

Глава 5 посвящена исследованию лазера в спектральной области 1,3 мкм с резонатором на основе фосфоросиликатного активного висмутового световода и акустооптическим модулятором излучения. Проведен анализ выходных характеристик импульсного излучения лазера в зависимости от частоты модулятора, длины волны генерации, параметров используемого активного световода и мощности накачки. В качестве активной среды лазера выбраны активные висмутовые световоды с различным уровнем ненасыщаемых потерь. В лазерной схеме достигнуты предельные для используемых активных световодов значения энергии более 10 мкДж в импульсе. На основе полученных данных о предельных значениях энергии удалось рассчитать среднюю концентрацию висмутовых активных центров. В итоге получены абсолютные распределения концентраций и спектры сечений поглощения висмутовых активных центров, ассоциированных с фосфором.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Диссертационная работа написана грамотным языком. Результаты исследования представляют научную и практическую ценность, их достоверность подтверждается публикациями полученных результатов в 19 работах, из них 6 статей в рецензируемых журналах из списка ВАК и апробацией на 13 российских и международных конференциях.

В работе по теме диссертации автор продемонстрировал высокую квалификацию и глубокое понимание изучаемых процессов при проведении исследований. Основные результаты работы представляют значительный практический интерес. Реализованные импульсные волоконные лазеры имеют значительный потенциал для применения в биофотонике и медицине в многофотонной микроскопии, в частотной метрологии в качестве делителей частоты в составе оптического стандарта частоты, в лазерно-информационных технологиях и телекоммуникациях для синхронизации и калибровки систем передачи информации, в астрофизике, в системах прецизионной спектроскопии и др. Помимо этого, диссертация обладает значительной фундаментальной составляющей, например, измеренные распределения висмутовых активных центров и рассчитанные спектры сечений поглощения дают новую информацию о природе висмутовых центров и

могут быть использованы в том числе при моделировании лазерной среды, легированной висмутом.

Диссертация Хегая Александра Михайловича является законченным научным исследованием, выполнена на высоком научном уровне. Автореферат диссертации полностью отражает содержание работы. Тема диссертации соответствует специальности 01.04.21 – Лазерная физика.

В качестве замечаний следует отметить:

1. В диссертационной работе отсутствует сравнение выходных характеристик разработанных волоконных лазерных источников излучения с известными аналогами на длинах волн 1.3 и 1.7 мкм, однако, стоит отметить, что такое сравнение приводится в публикациях по теме диссертации.

2. В работе отсутствует систематическое исследование кратковременной стабильности разработанных лазерных источников, в частности отсутствуют радиочастотные спектры импульсного сигнала и отсутствуют измеренные шумы интенсивности выходного излучения, что могло бы значительно усилить аргументацию в пользу обозначенных в диссертационном исследовании применений.

3. При разработке оптической схемы резонатора лазера с пассивной синхронизацией мод на основе нелинейного волоконного зеркала и с активным фосфоросиликатным световодом автору диссертационной работы следовало воспользоваться разработанным волокном с максимальным погонным усилением, что, очевидно, приведет к улучшению известных выходных оптических характеристик лазера, а также позволит достичь лучшей долговременной и кратковременной стабильности выходного оптического излучения.

Указанные недостатки не умаляют научной значимости диссертации и полученных автором результатов. Диссертационная работа Хегая А.М. удовлетворяет требованиям, которые установлены Положением о присуждении учёных степеней, утвержденным Постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г. (ред. от 10.06.2017 г.), предъявляемым к кандидатским диссертациям,

а её автор, Хегай Александр Михайлович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика.

Старший научный сотрудник

НОЦ «Фотоника и ИК-техника»

ФГБУО ВО МГТУ им. Н. Э. Баумана

кандидат технических наук

 Д.А. Дворецкий

Подпись Дворецкого Д.А. удостоверяю



**ЗАМ. НАЧАЛЬНИКА
УПРАВЛЕНИЯ КАДРОВ
ИЗАРОВА О. В.
8-499-263-60-48**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

105005, Москва, 2-я Бауманская улица, дом 5

тел.: +79037838807

e-mail: ddvoretzkiy@bmstu.ru