

«УТВЕРЖДАЮ»

Зам. директора Федерального
государственного бюджетного научного
учреждения «Федеральный исследовательский
центр Институт прикладной физики
Российской академии наук»
академик РАН Хазанов Е. А.



«9» марта 2021 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

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.

В настоящее время разработка волоконных лазеров остается весьма **актуальной задачей**, которая имеет важное значение как для фундаментальных исследований, так и для многочисленных практических применений. Наиболее яркие результаты получены с использованием световодов на основе кварцевых стекол, легированными редкоземельными элементами. Предлагаемая диссертационная работа посвящена изучению свойств кварцевых световодов, легированных висмутом, разработке на их основе импульсных источников нано- и пикосекундной длительности, в том числе определению зависимостей выходных характеристик висмутовых лазеров ультракоротких импульсов от используемого механизма синхронизации мод, дисперсии и нелинейности световодов резонатора, а также возможностям последующего усиления и компрессии импульсов. Проведенное исследование вносит значительный вклад в изучение спектрально-люминесцентных и генерационных свойств висмутовых световодов.

Целью представленных в диссертации исследований является разработка новых волоконных лазерных сред и импульсных источников для спектрального диапазона 1,25 -

1,75 мкм, не полностью освоенного световодами, легированными редкоземельными элементами.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка используемой литературы. Общий объем диссертационной работы составляет 165 страниц, включая 91 рисунок, 4 таблицы и список литературы из 156 наименований.

Во введении изложены актуальность, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, приведены положения, выносимые на защиту и сведения об апробации полученных результатов.

В первой главе представлен обзор литературы по теме диссертации, содержащий основные оптические характеристики световодов на основе кварцевого стекла, легированного висмутом и свойства непрерывных лазеров и усилителей на основе таких световодов. Помимо этого, в разделе описаны механизмы пассивной синхронизации мод и активной модуляции добротности. Проведен анализ работ по теме диссертации на момент начала исследований.

Вторая глава содержит описание технологии создания волоконных световодов, легированных висмутом, экспериментальных схем измерения оптических характеристик волоконных световодов и импульсных лазеров.

Третья глава посвящена описанию оптических свойств фосфоросиликатных и высокогерманатных световодов с висмутом. Отдельное внимание уделено анализу зависимостей усиления и ненасыщаемых потерь в фосфоросиликатных световодах от концентрации висмута. Показано, что спектр усиления в таких световодах существенно зависит от длины волны источника накачки. Отобраны висмутовые световоды, наиболее подходящие для использования в качестве активной среды лазеров с пассивной синхронизацией мод и модуляцией добротности.

В четвертой главе описаны характеристики лазеров на висмутовом световоде с пассивной синхронизацией мод. Рассмотрены схемы с нелинейным кольцевым волоконным зеркалом, реализованным в двух различных модификациях, когда активный световод находится внутри и вне зеркала. Отдельное внимание уделено описанию работы зеркала Саньяка в случае использования световодов с большим двулучепреломлением. Приведены спектры дисперсионных коэффициентов используемых световодов. Для лазера, использующего схему восьмерки на высокогерманатном световоде с висмутом, проведен анализ установившегося режима генерации с помощью численного моделирования нелинейного уравнения Шредингера. Также изучены генерационные свойства кольцевой схемы на фосфоросиликатном световоде, легированном висмутом, с синхронизацией мод с помощью одностенных углеродных нанотрубок. Проведен анализ

стабильности полученного лазера.

В пятой главе представлены результаты исследования работы лазера на фосфоросиликатном световоде с активной модуляцией добротности акустооптическим модулятором. Изучены энергетические характеристики разработанного лазера в зависимости от использования световодов с различной концентрацией висмута. Получены предельные для используемых активных волокон значения выходной энергии в импульсе и дано физическое объяснение наблюдаемого ограничения. Рассчитаны значения средней концентрации висмутовых активных центров в исследованных световодах, измерены радиальные распределения таких центров по сердцевине волокна, и на основе полученных данных вычислены спектры сечений поглощения висмутовых активных центров, ассоциированных с фосфором.

В заключении перечислены основные результаты проведенного диссертационного исследования.

По содержанию диссертационной работы могут быть сделаны следующие замечания:

1. В работе получены значения концентрации висмутовых активных центров в фосфоросиликатных световодах. Было бы уместно провести сравнение между полной концентрацией висмута в сердцевине и измеренной концентрацией активных центров.

2. Предпринимались ли попытки измерения распределения активных центров в высокогерманатных висмутовых световодах с висмутом? Данная информация была бы уместна в рамках представляемой диссертационной работы.

3. В спектре импульсной генерации лазеров с нелинейным кольцевым зеркалом присутствуют пики спонтанной эмиссии, обусловленные большим двулучепреломлением световодов, использованных в зеркале Саньяка. Автору диссертации следовало бы более подробно исследовать влияние спектральной фильтрации обусловленной двулучепреломлением на генерационные свойства висмутовых лазеров.

4. В разделе 4.3.1. при описании работы волоконного лазера с пассивной синхронизацией мод на нелинейном активном петлевом зеркале Саньяка отмечено, что запуск режима синхронизации мод инициируется внешним воздействием. Следовало бы более подробно исследовать процессы запуска синхронизации мод, т. к. это важно для практических применений.

5. В разделе 4.3.2. рассмотрена работа нескольких волоконных схем с нелинейным оптическим петлевым зеркалом в режиме генерации диссипативных солитонов при пассивной синхронизации мод. Автор отметил, что иногда сложно по анализу автокорреляционной функции и спектру выходного излучения лазера сделать вывод о

генерации в одноимпульсном режиме. Для более подробного изучения генерации в одноимпульсном режиме следовало бы использовать методику временного стробирования с частотным разрешением (FROG).

Перечисленные замечания не влияют на общую высокую положительную оценку работы и не снижают ценность полученных результатов.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались на 13 международных и всероссийских конференциях.

Публикации по теме диссертации. Материалы диссертации основаны на научных публикациях автора. В список литературы включены 6 печатных работ в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах Web of Science и Scopus.

Научная новизна диссертационной работы. Проведена оптимизация концентрации висмута в фосфоросиликатных световодах для дальнейшего применения в качестве активной среды импульсных лазеров с синхронизацией мод и модуляцией добротности. Получены световоды с максимальным, известным на данный момент в таких световодах, коэффициентом усиления 0,32 дБ/м.

Разработаны лазеры на основе фосфоросиликатного висмутового световода с использованием активного и пассивного нелинейного кольцевого зеркала (NALM, NOLM). Проведенный анализ и оптимизация схем позволили получить генерацию импульсов пикосекундной длительности в области 1,3 мкм.

Разработан лазер на высокогерманатном световоде с висмутом с пассивной синхронизацией мод на нелинейном усиливающем кольцевом зеркале, генерирующий в области 1,7 мкм. Проведено численное моделирование такого лазера с использованием нелинейного уравнения Шредингера. В рамках моделирования были проведены расчеты, позволяющие изучить формирование и распространение импульсов в резонаторе.

Разработана и исследована схема кольцевого лазера на фосфоросиликатном световоде с висмутом и пассивной синхронизацией мод с помощью насыщаемого поглотителя на основе одностенных углеродных нанотрубок. В представленной лазерной схеме получена стабильная самозапускающаяся импульсная генерация диссипативных солитонов.

Разработан кольцевой лазер на фосфоросиликатном висмутовом световоде с активной модуляцией добротности с помощью акустооптического модулятора. В лазере была достигнута максимальная для используемых активных световодов энергия в импульсе. Показано, что ограничение энергии импульса достигается из-за баланса предельно достижимого уровня экстрагируемой на единицу длины энергии и уровня

ненасыщаемых потерь. На основании этого факта были определены абсолютные значения средней концентрации ВАЦ-Р в сердцевине световодов. Используя данные о средней концентрации и относительное радиальное распределение ВАЦ-Р, измеренное спектральным методом, определен спектр сечения поглощения ВАЦ-Р.

Практическая значимость результатов работы. Разработаны и изучены оптические свойства волоконных световодов на основе как фосфоросиликатных, так и высокогерманатных стекол, легированных висмутом. Такие световоды позволяют осуществить генерацию в диапазоне 1.25-1.75 мкм, малоосвоенном кварцевыми световодами, легированными редкоземельными элементами. На их основе реализованы схемы импульсных лазеров, имеющих весьма широкий спектр потенциальных применений. Такие импульсные источники могут быть востребованы, например, в медицине в задачах многофотонной микроскопии, в телекоммуникационных системах для промежуточного усиления оптических сигналов, в задачах мониторинга окружающей среды для детектирования газовых примесей в атмосфере и т. д.

Полученные результаты представляют практический интерес в организациях, специализирующихся на разработке и изучении лазерных сред. Результаты могут быть использованы в Институте прикладной физики РАН, МГУ им. Ломоносова, Институте радиотехники и электроники РАН, Институте автоматизации и электрометрии СО РАН, Физическом институте РАН и других организациях.

Достоверность представленных результатов обусловлена использованием современных измерительных приборов и применяемых методов экспериментального и численного исследования, сопоставлением данных, полученных различными методами, апробацией результатов на международных конференциях и публикациями в ведущих рецензируемых журналах.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Диссертационная работа Хегая А.М. «Импульсные висмутовые волоконные лазеры, генерирующие в диапазоне 1.25 – 1.75 мкм» является законченным научным исследованием и отвечает требованиям установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г. (ред. от 02.08.2016 г.), а ее автор, Хегай Александр Михайлович, заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика.

Доклад по диссертации заслушан и отзыв утвержден на заседании Ученого совета Отделения нелинейной динамики и оптики «16» февраля 2021 г.

Отзыв составил заведующий лабораторией экстремальной нелинейной оптики

Института прикладной физики РАН

кандидат физико-математических наук

Ким Аркадий Валентинович



603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова, д.46, ИПФ РАН

Тел.: 8(831)416-49-79

E-mail: arkady.kim@ipfran.ru

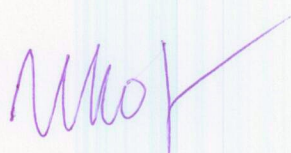
Подпись Кима А. В. удостоверяю

Учёный секретарь

Института прикладной физики РАН

кандидат физико-математических наук

Корюкин И.В.



Сведения о ведущей организации

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН)

603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46.

Контактный телефон: (831)416-06-16

Интернет-сайт: www.ipfran.ru, e-mail: dir@ipfran.ru