

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе,
Председатель диссертационного совета
Университета ИТМО

д.т.н., профессор Владимир Олегович

Никифоров



«20» _____ 2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу
Харахордина Александра Васильевича
«Фото- и термоиндуцированные процессы в световодах с сердцевиной из GEO2 – SIO2 стекла,
легированного висмутом»
представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических
наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика

Диссертационная работа Харахордина Александра Васильевича посвящена исследованию новых явлений, наблюдаемых в висмутовых волоконных световодах. К таким явлениям относятся фотообесцвечивание и термически активированное восстановление и формирование висмутовых активных центров (ВАЦ) в волоконных световодах с сердцевиной из германосиликатного стекла, легированного висмутом. Особое внимание было уделено автором определению фундаментальных параметров, характеризующих изучаемые явления; их влияние на оптические характеристики световодов, связанные с их использованием в качестве лазерных источников и усилителей. Построены модели процессов и проведены численные расчеты, а также дана теоретическая оценка долговременной стабильности выходных характеристик висмутовых лазеров.

Основными результатами диссертации можно считать следующее.

1. Обнаружено новое явление – фотообесцвечивание ВАЦ, ассоциированных с германием, облученных лазерным излучением в диапазоне длин волн 1550 нм. Установлены закономерности протекания данного процесса, построена феноменологическая модель, которая соответствует экспериментальным данным. Определены энергия активации и скорость протекания процесса. Полученная модель позволила оценить влияние рассматриваемых процессов на долговременную стабильность висмутовых источников света при различных температурах.
2. Проведено систематическое изучение влияния различных параметров термообработки и режима вытяжки высокогерманатных световодов, легированных висмутом, на интенсивность термоиндуцированных процессов, приводящих к формированию центров ИК люминесценции. Были получены экспериментальные и расчетные данные о факторах, оказывающих наибольшее влияние на оптические свойства висмутовых световодов. Продемонстрирована возможность использования концепции

демаркационной энергии для анализа термоиндуцированных процессов формирования ВАЦ.

3. Обнаружено и экспериментально исследовано влияние скорости вытяжки висмутовых германосиликатных световодов волокон на их оптические и лазерные свойства в полосе усиления длин волн 1600 – 1800 нм. Это позволило оптимизировать параметры процесса вытяжки для получения световодов с улучшенными характеристиками, что привело к увеличению эффективности лазерной генерации на длине волны около 1,7 мкм с 17% до 34%.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 128 источников. Объем диссертации составляет 139 страниц, содержит 82 рисунка и 5 таблиц.

Во введении излагается история создания и использования оптических волноводов и активных волноводов, в частности. Обосновывается необходимость разработки активных волноводов для диапазонов длин волн, которые не покрываются эрбиевыми волокнами и предлагается для этого использовать кварцевые волноводы с высоким содержанием германия, легированные висмутом.

В первой главе описывается современное состояние исследований висмутовых волоконных световодов, используемых в качестве активных сред для лазеров и усилителей ближнего ИК диапазона. Приведены основные этапы развития направления, касающиеся их изучения с 1999г. по 2016г. Дана классификация ВАЦ по ассоциации с алюминием (Al-ВАЦ), фосфором (P-ВАЦ), кремнием (Si-ВАЦ) и германием (Ge-ВАЦ).

Представленные спектры люминесценции для различных оптических волноводов допированных и недопированных висмутом демонстрируют вклад различных ВАЦ в люминесценцию и показаны в широком диапазоне длин волн возбуждения. Особое внимание уделено Ge-ВАЦ, которые ответственны за люминесценцию в диапазоне длин волн 925 нм и 1700 нм. Дано объяснение антистоксовой люминесценции в видимой области спектра при ИК возбуждении Si-ВАЦ и Ge-ВАЦ.

Подробное изучение положения наблюдаемых полос антистоксовой люминесценции и анализ схем энергетических уровней позволили установить однозначное соответствие между наблюдаемыми полосами люминесценции и переходами в схеме энергетических уровней ВАЦ.

Рассмотрены схемы непрерывных и импульсных висмутовых волоконных лазеров. Показано, что для получения высокой эффективности лазера для диапазона длин волн 1600нм необходима высокая концентрация ~50% GeO₂. При этом дифференциальная и полная эффективность устройства могут совпадать и составлять 30%.

Также рассматриваются висмутовые лазеры ультракоротких импульсов (УКИ), работающих в режиме синхронизации мод в различных спектральных диапазонах, в частности на длине волны генерации 1700 нм (Ge-ВАЦ).

Достаточно подробно описана природа и расчетная модель ВАЦ, описывающая спектры люминесценции в широком диапазоне длин волн.

Фотоиндуцированные явления в волоконных световодах, легированных активными ионами, их обратимость. Показана динамика фотообесцвечивания (разрушения ВАЦ) активных волокон с помощью засветки УФ излучением, а также их восстановление температурным отжигом. Разрушение, а не восстановление ВАЦ может быть получено выбором температурного цикла.

На основе изложенного материала в первой главе сделан вывод о необходимости проведения дальнейших исследований активных волокон, легированных висмутом.

Во второй главе представлена технология изготовления экспериментальных образцов активных волокон и методы исследования их параметров. Основным методом изготовления заготовки является метод MCVD – Modified Chemical Vapor Deposition. Приводится профиль показателя преломления заготовки. Сердцевина исследуемых преформ была сделана из стекла химического состава ≈ 50 мол.% SiO_2 – 50 мол.% GeO_2 . Концентрация висмута в стекле сердцевины не превышала 0,02 вес.%.

Описаны методики измерения спектров поглощения и люминесценции исследуемых световодов в процессе термообработки и воздействия лазерного излучения. Рассматриваются схемы измерения поглощения слабого и большого сигнала, спектров люминесценции, времени жизни люминесценции. Спектры поглощения слабого сигнала висмутовых световодов измеряются методом облома. В качестве источника галогенная лампа с возможностью ввода излучения в волокно. Измерение ненасыщаемых оптических потерь проводилось по аналогии с измерением поглощения слабого сигнала, только в качестве источника использовался волоконный лазер, как правило, Er-Yb лазер на длине волны 1568 нм или другой источник с выходной мощностью более 0,5 Вт.

Измерение спектров люминесценции активного световода проводилось с помощью GTWave волоконной конструкции, содержащей две световедущих жилы. Спектр люминесценции измерялся оптическим спектроанализатором. Измерение времени жизни люминесценции осуществлялось по аналогичной схеме с регистрацией сигнала люминесценции фотоприемником PDA10D-EC (Thorlabs).

В главе приведены методики измерения абсорбционных и люминесцентных характеристик в процессе термообработки висмутовых световодов. Также приведены схемы для изучения усилительных и генерационных свойств висмутовых волоконных световодов: схемы измерений.

С помощью описанных методик были получены спектры поглощения, ненасыщаемых потерь и люминесценции высокогерманатных световодов, легированных висмутом. Приведены данные о зависимостях активных и ненасыщаемых потерь на длине волны 1650 нм от общей концентрации висмута в сердцевине световода, которая изменялась в пределах от 0,002 до 0,1 вес.%. Видно, что активное поглощение растет линейно с концентрацией висмута, в отличие от ненасыщаемых потерь, нелинейно зависящих от общей концентрации висмута.

В третьей главе изложены исследования фотоиндуцированных процессов в висмутовых световодах, особенности их протекания, процессы восстановления фотообесцвеченных центров. Обсуждается возможность использования антистоксовой люминесценции для регистрации указанных процессов.

Приводятся экспериментальные зависимости интенсивности люминесценции различных типов ВАЦ от времени облучения лазерным излучением 407 нм (интенсивность 1 МВт/см²). Показана стабильность интенсивности люминесценции Ge-ВАЦ после выключения лазерного излучения при комнатной температуре. Данный факт свидетельствует о стабильности фотоиндуцированных изменений при комнатной температуре. Однако другими исследователями - Ding M., Wei S., Luo Y., Peng G.D было обнаружено полное восстановление интенсивности полос люминесценции и поглощения через 48 часов даже при комнатной температуре. Автор рассматриваемой диссертации объясняет это расхождение более сложным составом стекла у Ding M., Wei S., Luo Y., Peng G.D. Получена линейная зависимость скорости фотообесцвечивания от интенсивности используемого излучения на 532 нм в двойном логарифмическом масштабе. Предложен альтернативный способ ввода излучения – в оболочку. Это позволяет обрабатывать более длинные участки волокна (~ 100 м) из-за низких потерь в оболочке.

Автор исследует возможность использования антистоксовой люминесценции для наблюдения “стирания” ВАЦ лазерным излучением. Зависимости интенсивности антистоксовой люминесценции на 485 нм и стоксовой люминесценции на $\lambda = 940$ нм от температуры световода, легированного висмутом, позволили рассчитать энергию активации тушения люминесценции 70 мэВ и 390 мэВ соответственно.

Одним из важных результатов исследования явилась возможность восстановления фотообесцвеченных ВАЦ с помощью температурной обработки волокон. После термообработки не происходит существенного изменения свойств (спектральная форма, положение и количество полос) люминесценции ВАЦ. Кроме того, не происходит появления новых полос люминесценции и поглощения. Но важно отметить, что происходит возрастание интенсивности люминесценции ВАЦ. Так при температурной обработке обесцвеченного световода в течение процесса нагрева, интенсивность полос поглощения на 1700 нм, связанных с Ge-ВАЦ, почти монотонно увеличиваются и, в итоге, достигает больших значений, чем в исходном образце.

В четвертой главе приведены экспериментальные данные о наблюдении термоиндуцированных процессов формирования ВАЦ.

Измерены интенсивность люминесценции, величина поглощения малого сигнала и ненасыщаемых потерь в различных режимах термообработки волокон. Регистрировались температура, время отжига, скорости нагрева и охлаждения. При анализе экспериментальных данных установлено, что увеличение интенсивности люминесценции в важной области 1000 нм в процессе термообработки висмутовых световодов вызвано увеличением количества ВАЦ, а не изменениями, связанными со структурой ВАЦ. Определены оптимальные условия термообработки для улучшения спектрально-люминесцентных и генерационных свойств висмутовых высокогерманатных световодов.

Показано, что одним из важнейших параметров, оказывающих влияние на изменение активного поглощения и ненасыщаемых оптических потерь, является скорость охлаждения волокна (закалка).

Проведен анализ термохимических реакций формирования новых ВАЦ, восстановления фотообесцвеченных ВАЦ и неактивных центров, ответственных за ненасыщаемые потери. Получены характерные значения энергий активации указанных процессов. Установлено, что прекурсоры ВАЦ имеют разную физическую природу.

Исследовано влияния параметров процесса вытяжки волокна из заготовки на лазерные и оптические свойства висмутовых световодов. Оказалось, что скорость вытяжки является определяющим фактором, оказывающим воздействие на абсорбционные характеристики световодов, в частности, на снижение уровня ненасыщаемых потерь. Было получено повышение эффективности генерации излучения на длине волны 1700 нм с 17% до 34% при увеличении скорости вытяжки таких световодов с 10 до 100 м/мин.

В пятой главе представлены результаты исследования влияния комбинированного воздействия лазерного облучения и тепловой обработки на оптические свойства и долговременную стабильность висмутовых световодов.

Показано, что чувствительность исследуемых световодов к лазерному излучению существенно увеличивается при повышенных температурах.

Особенно важным является феноменологическая модель наблюдаемого явления, предложенная автором. Показано как ВАЦ преобразуются при повышенной температуре в ПАЦ (Прекурсор висмутового Активного Центра), который не участвует в люминесценции. Рассчитаны константы этого процесса с учетом разброса параметров ВАЦ и ПАЦ.

На основе предложенной модели проведен анализ долговременной стабильности свойств

висмутовых волоконных световодов при воздействии излучения накачки для различных температур, что особенно важно для использования волоконных лазеров и усилителей в реальных устройствах.

Следует подчеркнуть, что полученные в диссертации результаты представлены последовательно и изложены логично. Чтение диссертации существенно облегчает наличие интерактивного оглавления.

Вместе с тем работа не лишена некоторых недочетов и упущений.

1. В работе следует указать пороги оптических мощностей, при которых выполняется разрушение ВАЦ.
2. На стр.25 ошибочно дана ссылка на рис.1.9 вместо рис.1.8.
3. На стр.44 недостаточно полно приведены подписи к рис.1.24. Следует указать, что квадратики, ромбики и треугольники относятся к охлаждению от соответствующих температур, а кружочки к нагреву. На этой же странице пропущен предлог «от» в последней строке.
4. На стр.51 не указано чему соответствуют черная и красная зависимости на рис.2.2. На этой же странице указан диаметр сердцевины получаемого одномодового световода. Хотелось бы также знать диаметр светового поля на определенных длинах волн для оценки эффективности связи со стандартными телекоммуникационными волокнами.
5. На стр.52 указана длина волны 1586нм для измерения ненасыщаемых оптических потерь, хотя на рис.2.7 показаны потери для нескольких для волн.
6. Стр.59. Чем обусловлено использование двух типов концентраций мол.% и ат.%?
7. Стр.59. Указано, что из рис.2.7,а видно уровень ненасыщаемых потерь составляет примерно до 10% от общего уровня поглощения на данной длине волны (в области поглощения ВАЦ). Не совсем понятно как это можно увидеть.
8. Стр.60. Указано, что при использовании излучения, попадающего в наблюдаемые полосы, происходит его поглощение ВАЦ, которые излучают в областях 830 и 1430 нм (Si-ВАЦ); 950 и 1700 нм (Ge-ВАЦ). Спектры люминесценции и возбуждения люминесценции Si-ВАЦ и Ge-ВАЦ показаны на рисунке 2.7,б. На рис.2.7,б указанные длины волн отсутствуют.
9. Не понятно как получены зависимости на рис.3.5 стр.66.
10. На стр.71 указаны длины волн излучения 485нм и 660нм, а на рис.3.10 - 463нм. Переход E3->E1 дает или $1/(1/463-1/1650)=644\text{нм}$, или $1/(1/485-1/1650)=687\text{нм}$, а не 660 нм.
11. Не понятно что показано на рис.3.14.
12. Стр.84. Из рис.4.2 не следует, что ненасыщаемые потери в процессе тепловой обработки в течение 100 мин при 600 оС возрастают более чем в 20 раз.
13. Стр.85, рис.4.3,б. Не указано что означают красная 1 и зеленая 2 зависимости.
14. Стр.93. Следует указать для формулы что t - время процесса.
15. Стр.100, рис.4.18. На рисунке обозначение-«Непросветляемые», а в подписи к нему «ненасыщаемые». Это видимо одно и то же.
16. Стр.104. Указано что было продемонстрировано повышение эффективности генерации излучения на длине волны 1700 нм с 17 до 34% при увеличении скорости вытяжки таких световодов с 10 до 100 м/мин. Из рис.4.21 видно, что это увеличение достигается уже при скорости 40 м/мин.
17. Стр.108, рис.5.5. Не понятно где на графиках изображены ненасыщаемые потери.
18. Удивляет почему нет исследований при отрицательных температурах.
19. Есть пожелание исследований по использованию световодов с висмутом в качестве суперлюминесцентных источников излучения.

Высказанные замечания не снижают достоинств диссертационной работы А.В.

Харахордина, ее основные положения достаточно полно раскрыты в автореферате и публикациях диссертанта.

На основе вышесказанного можно сделать следующие выводы.

1. Тема диссертации А.В. Харахордина важна и актуальна. Работу следует отнести к специальности 1.3.19 - Лазерная физика
2. Основные результаты диссертации являются новыми. Решен ряд достаточно трудных естественных задач теории лазерной генерации и оптического усиления.
3. Полученные результаты опубликованы в 7 работах в ведущих рецензируемых журналах, определенных Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки РФ: 8 работ опубликовано в трудах всероссийских и международных конференций
4. В целом диссертация является завершенным научным исследованием, вносящим заметный вклад в данный раздел современной лазерной физики.
5. Автореферат диссертации полно и правильно отражает ее содержание.
6. Представленные в диссертации результаты будут востребованы в дальнейших изысканиях по теории волоконных источников света и оптических усилителей. Она может быть интересна для научных и образовательных учреждений, в которых ведутся исследования по разработке волоконно-оптических усилителей. К их числу относятся Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербургский государственный университет, Национальный исследовательский университет ИТМО. Кроме того, полученные результаты могут служить материалом для различных университетских спецкурсов. На основании вышеприведенного можно заключить, что диссертация Харахордина Александра Васильевича соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по действующему «Положению о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 - Лазерная физика.

Отзыв подготовил:

к.ф.-м.н., проф. НИЦ Световодной фотоники
Университета ИТМО
Стригалева Владимир Евгеньевич

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании научно-исследовательского центра Световодной фотоники Университета ИТМО, протокол № 1 от «20» апреля 2022 г.

Сведения о ведущей организации: научно-исследовательский центр Световодной фотоники федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»

Адрес: Российская Федерация, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А
Тел.: +7 (812) 233-63-88
Электронная почта: igorkm@niuitmo.ru
Сайт: <https://sf.itmo.ru/ru/>

Директор НИЦ Световодной фотоники
Университета ИТМО
д.т.н., профессор


И.К. Мешковский