

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Сергея Владимировича Фирстова "Активные волоконные световоды, легированные висмутом, для эффективных лазеров ближнего ИК диапазона", представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 - – Лазерная физика

Диссертационная работа Сергея Владимировича Фирстова посвящена широкомасштабному комплексному исследованию лазеров и усилителей для ближней ИК области спектра на основе волоконных световодов, легированных висмутом, и созданию новых устройств. Волоконные лазеры с диодной накачкой компактны, надежны, устойчивы к внешним воздействиям, не нуждаются в юстировке, имеют, как правило, высокий КПД и дают излучение большой мощности с дифракционной расходимостью. Они применяются для обработки материалов, в медицине, линиях связи, военном деле. В качестве рабочей среды используются, в основном, световоды из кварцевого стекла, легированного редкоземельными (РЗ) ионами. Однако РЗ ионы не покрывают области 1.15 – 1.5 мкм и 1.6 – 1.8 мкм. Между тем установлено, что для различных медицинских операций и процедур требуется лазерное излучение с определенной длиной волны. Также, важнейшей для современного общества задачей является увеличение скорости передачи информации по одному волоконному световоду до уровня Петабит/с. Она может быть решена путем освоения всего спектрального диапазона 1.3 – 1.7 мкм (где оптические потери телекоммуникационных световодов достаточно низки) вместо сейчас используемой узкой области 1.53 – 1.61 мкм, определяемой полосой усиления эрбиевого волоконного усилителя. В НЦВО РАН по инициативе академика Е.М. Дианова были начаты работы по созданию висмутовых волоконных лазеров, и в 2005 году впервые в мире была получена генерация в легированном висмутом волокне (в области 1.15 – 1.2 мкм). В дальнейшем при непосредственном участии Сергея Владимировича Фирстова были разработаны легированных висмутом световоды для волоконных лазеров и оптических усилителей, работающих в области 1.3 – 1.55 мкм (эти результаты вошли в кандидатскую диссертацию С.В. Фирстова). Рецензируемая докторская диссертация С.В. Фирстова – результат логического продолжения этих работ. Актуально было понять природу активных центров в новых лазерных средах - легированных висмутом световодах, физику наблюдаемых в них явлений и на этой основе постараться повысить эффективность уже созданных висмутовых волоконных лазеров и создать новые, в частности, для освоения диапазона длин волн 1.6 – 1.8 мкм.

Замечу, что Нобелевская премия по физике 2018 года была присуждена «за фундаментальные изобретения в области лазерной физики» ("for groundbreaking inventions in the field of laser physics"), при этом Gérard Mourou и Donna Strickland получили ее «за разработанный ими метод генерации высокоинтенсивных ультракоротких лазерных импульсов». Ссылаясь на свою миссию премировать работы, приносящие пользу человечеству, Нобелевский комитет отметил, что это привело к созданию широко применяемых в медицине лазеров, в частности, для коррекции зрения. Освоение волоконными лазерами спектральной области 1.3 – 1.7 мкм и на этой основе решение задачи повышения на несколько порядков скорости передачи информации по волоконно-оптическим линиям связи было бы достижением, заслуживающим присуждения Нобелевской премии. Так что актуальность темы докторской диссертации С.В. Фирстова не вызывает сомнений.

Цель работы была сформулирована следующим образом: «Поисковое исследование новых лазерных сред для ближней ИК области спектра на основе волоконных световодов, легированных висмутом, и проведение систематического комплексного изучения их оптических свойств. Создание на их основе эффективных устройств для генерации и усиления оптического излучения, изучение основных выходных характеристик таких устройств».

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 252 страницы, включая 132 рисунка, 13 таблиц и библиографию из 226 наименований (сюда входят и 43 публикации по теме диссертации). **Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи диссертации, приведены основные положения, выносимые на защиту, излагаются научная новизна и практическая значимость работы, приведены сведения об апробации работы и публикациях автора по теме диссертации.

**Первая глава** представляет собой литературный обзор и постановку задачи исследования. Разделы главы с подробным описанием видов дефектов в стекле (1.1), технологий получения легированных висмутом световодов (1.2.1), видов и характеристик висмутовых волоконных лазеров могут служить хорошим пособием по теме. Постановка задачи логично следует из обзора литературы.

**Вторая глава** называется «Оптические свойства волоконных световодов, легированных висмутом». По этой теме диссертант опубликовал 9 работ. Объемный раздел 2.1 посвящен описанию образцов, технологии их изготовления, методик исследования. Регистрировались спектры поглощения, люминесценции, возбуждения люминесценции, кривые затухания люминесценции при импульсном однофотонном и

ступенчатом возбуждении. Строились карты интенсивности в осях «Длина волны люминесценции - Длина волны возбуждения». Такая методика весьма информативна и позволяет разобраться даже в очень сложной картине многоцентральной люминесценции.

Еще до начала данной работы было известно, что структура висмутовых активных центров (ВАЦ) в легированных висмутом световодах сложная, не сводится просто к иону висмута в каком-то зарядовом состоянии и зависят от состава стеклянной матрицы. Прежде всего, была взята матрица простейшего состава, а именно, кварцевое стекло  $\text{SiO}_2$ . Были определены основные полосы поглощения и люминесценции, относящиеся к ВАЦ-Si, построена диаграмма энергетических уровней этого центра. Затем с использованием упомянутой выше методики построения карт интенсивности были исследованы легированные висмутом световоды с сердцевиной из алюмо-, фосфо- и германосиликатного стекла. Использовалось также ступенчатое возбуждение для изучения кооперативных эффектов и структуры энергетических уровней. В результате проведенного исследования были определены основные полосы поглощения и люминесценции, относящиеся к висмутовым активным центрам, ассоциированным с кремнием/германием/фосфором (ВАЦ-Si/Ge/P).

Анализ спектрально-люминесцентных свойств световодов с сердцевиной из германосиликатного стекла, легированного висмутом, показал, что такие световоды являются многообещающими средами для получения оптического усиления в области 1600-1800 нм. Раздел 2.4 посвящен систематическому изучению оптических свойств висмутовых германосиликатных световодов с различным содержанием оксида германия (от 5 до 95 мол.%) и висмута (до 0.04 вес. %), изготовленных по различным технологиям. Установлено, что существует оптимальная концентрация висмута, превышение которой нецелесообразно, так как начинается преимущественное образование комплексов висмута, увеличивающих ненасыщаемые потери.

В **третьей главе** рассматриваются фотоиндуцированные эффекты в висмутовых световодах при воздействии лазерного и ионизирующего излучений, а также влияние термообработки. Явление фотообесцвечивания висмутовых активных центров было впервые описано в работе по теме диссертации. Проведенное исследование позволило установить влияние различных факторов на скорость фотообесцвечивания, предложить механизм этого явления и найти способы восстановления ВАЦ, а также предложить способ повышения количества ВАЦ с полосой оптического усиления в спектральной области 1.6 – 1.8 мкм в висмутовых световодах. Продемонстрирована возможность периодического фотообесцвечивания и восстановления активных центров. Исследована радиационная стойкость висмутовых световодов.

**Четвертая глава** посвящена экспериментальному исследованию усилительных и генерационных характеристик висмутовых световодов. Представлены результаты по разработке эффективных висмутовых волоконных лазеров, усилителей, суперлюминесцентного источника для различных областей ближнего ИК диапазона. Результаты впечатляющие: реализованы непрерывные лазеры с длинами волн генерации 1.33 и 1.46 мкм, с рекордной выходной мощностью и эффективностью, ~10 Вт, ~40% и 22 Вт, ~60%, соответственно; впервые продемонстрирована лазерная генерация на нескольких длинах волн в области от 1.62 до 1.77 мкм; реализован висмутовый лазер на длине волны 1.7 мкм с выходной мощностью более 2 Вт и эффективностью более 30%; создан суперлюминесцентный источник ИК излучения ( $\lambda = 1.73$  мкм, выходная мощность до 7 мВт при мощности накачки 650 мВт, ширина спектра выходного излучения – 50 нм); разработан волоконно-оптический усилитель для спектрального диапазона 1.64 – 1.77 мкм.

В **Пятой главе** рассмотрены волоконные световоды, солегированные висмутом и эрбием, перспективные для создания активной среды с широкой полосой усиления в области малых потерь телекоммуникационных световодов. Проведены поисковые исследование по выбору подходящей стеклянной матрицы и оптимального соотношения  $V_i/E_g$ . Реализован широкополосный волоконно-оптический усилитель для диапазона длин волн 1.5 – 1.8 мкм и исследованы его основные выходные характеристики. Эта разработка уже вызвала большой интерес у крупных телекоммуникационных компаний.

Диссертация выполнена на высоком уровне и представляет собой законченное научное исследование. Результаты диссертации представляют несомненную научную и практическую ценность, их достоверность подтверждается апробацией работы на многочисленных российских и международных конференциях и публикациями в рецензируемых журналах из списка ВАК. Автореферат диссертации достаточно полно отражает основное содержание работы и полученные результаты.

#### **Замечания по работе:**

1) На стр. 95 читаем: «Следует отметить, что появление антистоксовой люминесценции происходит при одновременном использовании излучения с обеими длинами волн  $\lambda_{exc1}$  и  $\lambda_{exc2}$ , что исключает влияние ESA (excited state absorption), ап-конверсии и других процессов». Эта фраза вызывает недоумение. Во-первых, непонятно, почему исключается ESA, а именно, процесс, при котором  $\lambda_{exc1}$  переводит центр из основного состояния на один из возбужденных уровней, а  $\lambda_{exc2}$  – с этого уровня на лежащий еще выше возбужденный, что и приводит к появлению антистоксовой люминесценции. Во-вторых, общепринятое определение ап-конверсии – появление излучения с меньшей длиной

волны, чем у возбуждающего света. Механизмами ап-конверсии могут быть ESA, многофотонное поглощение, множество различных кооперативных процессов. Автор же понимает ап-конверсию в узком смысле – как один из кооперативных процессов, при котором два соседних иона, оба находящиеся в одном и том же возбужденном состоянии, взаимодействуют и, в результате, один из них переходит в основное состояние, а другой – в возбужденное с удвоенной энергией (стр. 32 и Рис. 1.8).

- 2) Встречаются погрешности в рисунках и подписях к ним. Так, неясно, к чему относится сплошная линия, а к чему – пунктир на Рис. 2.19. В подписи к Рис. 4.32(a) пропущено слово «усиления», а на соответствующем этому рисунку Рис. 14 в автореферате на оси абсцисс пропущено слово «входного». Подпись к Рис. 2.20 гласит: «Зависимость интенсивности антистоксовой люминесценции от длины волны возбуждения (при двухступенчатом возбуждении) для различных типов волоконных световодов [118]». Возникает вопрос: «А какова вторая длина волны (при двухступенчатом возбуждении)?». В тексте диссертации есть информация на этот счет: «На Рисунке 2.20 изображены зависимости интенсивности антистоксовой люминесценции от длины волны возбуждения  $\lambda_{ex2}$  при фиксированной величине  $\lambda_{ex1}$  (как правило, это длина волны максимума одной из полос) для различных типов световодов». Такое разъяснение следовало дать в подписи к рисунку.
- 3) Имеются опечатки, языковые погрешности (стр. 73, 110: «наиболее оптимально»; “ЕММ” вместо “ЕЕМ” несколько раз, начиная со стр. 81).

Эти замечания не влияют на общую высоко положительную оценку диссертации. Работу, выполненную С.В. Фирстовым, безусловно можно назвать крупным научным достижением. На основании хорошо продуманного систематического комплексного исследования новых активных сред, а именно, висмутовых волоконных световодов различного состава, проведенного в тесном сотрудничестве с технологами, удалось приписать наблюдаемые полосы поглощения и люминесценции, существенно зависящие от состава стекла, определенным висмутовым центрам; удалось обнаружить и исследовать эффект фотообесцвечивания и предложить способ повышения концентрации висмутовых активных центров и целенаправленно получить заметное улучшение параметров уже имевшихся висмутовых волоконных лазеров и разработать целый ряд новых устройств. Особенно следует отметить пионерскую разработку висмутовых световодов, обеспечивающих усиление в спектральной области 1.6 – 1.8 мкм, и реализацию широкополосного (200 нм) оптического усилителя с усилением не менее 10 дБ в диапазоне длин волн 1.53 – 1.775 мкм.

Диссертационная работа Сергея Владимировича Фирстова полностью соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней и Паспорту специальности. Ее автор С.В. Фирстов, безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика.

10.10.2018

Попова Марина Николаевна  
д.ф.-м.н, профессор  
г.н.с. Института спектроскопии РАН (ИСАН)  
зав. Лабораторией фурье-спектроскопии  
Отдела спектроскопии конденсированных сред ИСАН  
108840 г.Москва, г. Троицк ул. Физическая, 5  
Тел.: +7 495 8510234  
email: [popova@isan.troitsk.ru](mailto:popova@isan.troitsk.ru)

Подпись г.н.с. Института спектроскопии РАН д.ф.-м.н. профессора М.Н. Поповой  
заверяю:

Зам. Директора по научной работе ИСАН,  
д.ф.-м.н.



/Л.А. Сурин/

С отзывом  
12.10.2018г.  
ознакомлен  
Фир