

## Отзыв официального оппонента

Смирнова Александра Михайловича, доктора физико-математических наук на диссертационную работу Вахрушева Александра Станиславовича «Висмутовые волоконные световоды со сложным профилем легирования», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

**Актуальность темы** диссертации обоснована необходимостью поиска, создания новых оптических материалов, обладающих уникальными свойствами, изучения их структурных особенностей, разработки новых принципов и подходов для их усовершенствования, а также для решения научно-практических задач на базе полученных материаловедческих результатов – создания волоконно-оптических источников когерентного излучения, усилителей оптических сигналов, способных работать в O-, E-, S- и U-телекоммуникационных диапазонах.

Исследования, представленные в диссертационной работе Вахрушева А. С., направлены на разработку и изучение свойств легированных висмутом световедущих структур с ранее не используемым профилем показателя преломления при неоднородном химическом составе стекла. Результатами данного исследования стали новые знания, позволившие расширить фундаментальные представления о процессах, протекающих в стеклообразных материалах при тепловой обработке и воздействии лазерного излучения, в частности, об особенностях формирования и разрушения висмутовых активных центров (ВАЦ) с лазерно-активными переходами в ближней ИК-области, а также в практической реализации оптических устройств на их основе. При этом, созданные волоконно-оптические лазеры и усилители обеспечивают требуемые спектральные и энергетические характеристики, стабильность выходной мощности, простоту конструкции и компактность. Результаты, достигнутые в ходе выполнения диссертационной

работы, могут стать основой для появления новых направлений научных исследований, а также позволят сформулировать требования для усовершенствования технологического процесса создания волоконных световодов с характеристиками, превосходящими ныне существующие. Особенно стоит отметить, что результаты, представленные в диссертации, раскрыли свойства висмутовых волокон с различными типами ВАЦ, необходимые для создания коммерческих приборов, которые начинают выходить на международный рынок, например, висмутовый усилитель в схеме восьмиканального оптического приемопередатчика «LR-8 LAN-WDM» со скоростью 400 Гбит/с (OFS), висмутовый усилитель «MAP mOFA-C1» для O-диапазона (OFS и Viavi Solutions Inc.).

### **Содержание диссертации**

Работа изложена на 150 страницах. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка используемой литературы (130 наименований). Диссертация содержит 67 рисунков и 7 таблиц.

**Введение** содержит описание общего состояния исследований в области висмутовых световодов, что позволило сформулировать актуальность проведения исследований по выбранной тематике. Несмотря на значительное количество проведённых исследований в данной области, накоплен большой пласт научных задач, решение которых чрезвычайно важно. В данном разделе также приводятся цели, задачи работы, научная новизна, практическая и теоретическая ценность работы, и положения, выносимые на защиту.

В **главе 1** представлен обзор результатов опубликованных работ к моменту начала выполнения исследований в рамках диссертации, анализ которых позволил определить основные направления исследований диссертации.

Во второй главе приведено подробное описание процесса изготовления исследованных образцов, а также основных методов исследования их свойств.

В основной части диссертации (Главы 3-5) изложены результаты проведенного диссертантом исследования. К наиболее значимым результатам работы можно отнести следующее: 1) разработаны лазерно-активные материалы на основе висмутовых германосиликатных световодов со специальным профилем легирования (G-дизайн), в которых изучены особенности формирования активных центров, включая определение коэффициента конверсии  $Vi \rightarrow VAЦ$  для различного радиального распределения легирующих (активных и неактивных) добавок. Получена взаимосвязь коэффициента конверсии с концентрациями висмута и  $GeO_2$  в стекле сердцевины; 2) экспериментально показано, что активные среды на основе висмутовых световодов G-дизайна при созданном распределении ВАЦ позволяют добиться рекордной эффективности лазерной генерации, а в случае фосфоросиликатных световодов W-дизайна обеспечить широкий спектр оптического усиления благодаря возможности формирования нескольких типов (ВАЦ); 3) выявлены особенности процессов фотообесцвечивания ВАЦ, ассоциированных с фосфором (ВАЦ-Р), определены распределения энергий активации таких процессов, предложена феноменологическая модель изучаемых процессов на основе структурных трансформаций в сетке стекла; 4) обнаружен и подробно изучен эффект насыщения мощности лазерной генерации в висмутовых активных световодах при возбуждении на длине волны 808 нм, который был вызван медленной скоростью релаксации ВАЦ на верхний лазерный уровень.

Помимо этого, среди результатов работы стоит выделить создание лабораторных усилителей с пиковым усилением  $>25-30$  дБ и коэффициентами шума 5–6 дБ в O-, E- и S- телекоммуникационных диапазонах. При комбинировании длин волн накачки для возбуждения

различных типов активных центров висмутовых фосфоросиликатных световодов W-дизайна достигнуты рекордных значений ширины спектра усиления  $>120$  нм (по уровню  $-3$  дБ) при вариациях усиления  $<2$  дБ. Преодолен эффект насыщения выходной мощности при росте поглощаемой мощности накачки путем эффективного заселения лазерного уровня за счет использования дополнительного лазерного излучения в диапазоне длин волн  $1930 - 2040$  нм, которое повышало вероятность вынужденных переходов ВАЦ с вышерасположенного уровня на лазерный уровень, что позволило увеличить мощность выходного излучения почти вдвое.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

**Научная новизна** работы заключается в создании и изучении свойств висмутовых световодов с различными распределениями легирующих добавок. Главный интерес заключается в том, что легирующие (неактивные) добавки выступают неотъемлемым компонентом для формирования ВАЦ, поэтому их распределение, даже при равномерном распределении висмута, будет определять профиль распределения ВАЦ. Изучение активных световодов с неравномерным распределением легирующих добавок рассматривается в качестве одного из подходов для улучшения их характеристик. Созданные активные световоды позволили сконструировать волоконно-оптические устройства с заданными характеристиками. Были установлены закономерности формирования висмутовых активных центров в световодах с кольцевым и центральным легированием висмута и квазиградиентным распределением оксида германия, а также выявлены особенности протекания процесса фотообесцвечивания ВАЦ при воздействии лазерного излучения инфракрасного и видимого диапазонов в световодах W-дизайна с сердцевинной из фосфоросиликатного стекла.

Оригинальность работы определяется разработкой методов управления оптическими свойствами висмутовых волоконных световодов W-дизайна,

что позволило создать активную среду с широким и плоским контуром оптического усиления благодаря взаимному перекрытию полос усиления ВАЦ-Si и ВАЦ-P, а также обнаружением эффекта насыщения в активной среде при возбуждении излучением на длине волны 808 нм. При выполнении работы учтен характер взаимного распределения висмута и легирующих добавок, а также областей легирования (оболочка или сердцевина), в том числе вблизи границ раздела сред, характеризующихся повышенным дефектообразованием, что влияет на ненасыщаемые потери и перераспределение висмутовых центров, ответственных за их появление. Таким образом заполнена ниша в области создания и определения свойств висмутовых световодов.

Таким образом, можно заключить, что **обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций** диссертационной работы не вызывает сомнений

**Теоретическая и практическая ценность** результатов диссертационной работы не вызывают сомнения.

**Достоверность** результатов и выводов, подкреплена обоснованностью научных положений, корректным использованием методов исследования при использовании современного сертифицированного научного оборудования и применением теоретически обоснованных моделей, а также созданием лабораторных оптических устройств с последующей их характеристикой.

Результаты диссертационной работы отражены в 12 опубликованных работах в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК РФ, индексируемых в Web of Science и Scopus и в 5 тезисах международных и всероссийских конференций.

К диссертационной работе есть **ряд вопросов и замечаний**.

1. Проводится исследование коэффициента конверсии, который зависит от концентрации  $\text{GeO}_2$  с определенной концентрацией висмута. При

увеличении концентрации висмута и неизменной концентрации  $\text{GeO}_2$  коэффициент конверсии снижается. Возможно ли повысив концентрацию  $\text{GeO}_2$ , получить активную среду с высокими концентрациями  $\text{Bi}$  с сохранением низкого уровня ненасыщаемого поглощения и добиться высокого коэффициента конверсии? Кроме этого, значение коэффициента конверсии висмута в активные центры для германо-силикатных световодов представлено для двух концентраций  $\text{GeO}_2$ . Из представленных результатов видно, что в образце Б'' с увеличенной примерно вдвое концентрацией  $\text{GeO}_2$  по сравнению с образцом Б (пиковая концентрация  $n=1,6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) коэффициент конверсии уменьшается более, чем в 3 раза. Возможно ли оценить коэффициент конверсии для концентраций  $\text{GeO}_2$  меньше, чем в образце Б и для промежуточных концентраций относительно образцов Б и Б''?

2. В главе 3, рисунок 3.5 (стр. 65) представлены результаты моделирования спектров поглощения и фотолюминесценции ВАЦ-Si с разложением на отдельные компоненты. Из текста диссертации не понятно, какие подтипы ВАЦ-Si соответствуют каждому из представленных Гауссовых распределений.

3. Известно, что процессы фотообесцвечивания ВАЦ свойственны для световодов с высоким содержанием оксида германия. Однако после тепловой обработки в таких средах происходило полное восстановление ВАЦ. В данном случае наблюдаются ли подобные процессы и если нет, то почему? Кроме этого, механизм фотообесцвечивания рассматривается при облучении на длине волны 532 нм и 265 нм. Энергия квантов света отличается в два раза, что может свидетельствовать о двухступенчатых процессах поглощения излучения на длине волны 532 нм, рассматривались ли возможные процессы типа Оже, которые могут переводить активные центры висмута в неактивные состояния? А также, из текста диссертации не совсем понятно какие именно молекулы участвуют в поглощении квантов

света с данными длинами волн, можно ли минимизировать образование таких молекул в сетке стекла?

4. В главе 5, рисунок 5.2 (стр. 106) диссертационной работы представлено сравнение уровней ненасыщаемого поглощения для длин волн 808 и 1340 нм. Для длины волны 808 нм экспериментальные данные были лишь представлены для низких вводных мощностей, а вывод об уровне ненасыщаемого поглощения сделан из экстраполяции, что дает лишь оценочное значение данного параметра. Какая функция использовалась для экстраполяции и как определялся данный параметр, который использовался при расчете модели работы лазеров с накачкой по оболочке?

5. В экспериментах по исследованию эффекта насыщения в активной среде при введении дополнительного излучения, как подбиралась мощность тулиевого лазера на каждой длине волны? Могла ли его мощность влиять на изменения выходных параметров висмутового лазера?

6. Текст диссертационной работы содержит сложные для понимания конструкции, перегружен излишними вводными оборотами, а также характеристиками исследуемых параметров световодов, не отражающих их физических свойств (небольшой пик, широкая полоса, детальное изучение, потенциальный кандидат, благоприятное локальное окружение и т.п.), кроме этого, работа содержит опечатки и грамматические ошибки.

Отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. Тема и содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния. Автореферат корректно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа «Висмутовые волоконные световоды со сложным профилем легирования» соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата

физико-математических наук, установленным в «Положении о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 года (ред. от 25 января 2024 г.), а ее автор Вахрушев Александр Станиславович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент: Смирнов Александр Михайлович  
доктор физико-математических наук по специальности 1.3.11. Физика полупроводников, доцент кафедры физики полупроводников и криоэлектроники Физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова»  
тел.: 8-495-939-50-72, +7-919-724-00-46  
email: [alsmir1988@mail.ru](mailto:alsmir1988@mail.ru)

А.М. Смирнов  
20.08.2024

Почтовый адрес: 119991, ГСП-1, Москва, ул. Ленинские Горы д.1, строение 2, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», Физический факультет  
+7 (495) 939-16-82  
email: [info@physics.msu.ru](mailto:info@physics.msu.ru),

Подпись А.М. Смирнова заверяю:

И.о. декана

Физического факультета МГУ

профессор В.В. Белокуров

20.08.2024