

На правах рукописи



ФИРСТОВ СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ЛАЗЕРЫ НА ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДАХ,
ЛЕГИРОВАННЫХ ВИСМУТОМ, ГЕНЕРИРУЮЩИЕ В
СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ 1300-1550 НМ**

Специальность: 01.04.21 – Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук



Москва – 2009

Работа выполнена в Научном центре волоконной оптики
Российской академии наук

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

Буфетов Игорь Алексеевич – член-корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук,
ИЦВО РАН, г. Москва

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Ильичев Николай Николаевич – доктор физико-математических наук,
профессор, ИОФ РАН, г. Москва

Плотниченко Виктор Геннадьевич – доктор физико-математических наук,
профессор, ИЦВО РАН, г. Москва

Ведущая организация: Московский государственный
университет им. М.В. Ломоносова
(физический факультет), г. Москва

Защита состоится "03" октября 2009 г. в 15⁰⁰ на заседании диссертационного
совета Д 002.063.03 в Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН по
адресу: 119333, Москва, ул. Вавилова, д. 38

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИОФ РАН

Автореферат разослан "03" сентября 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук
тел. +7(499)503-8147

Т. Б. Воляк

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Создание лазеров и оптических усилителей, работающих в различных спектральных диапазонах, неразрывно связано с поиском и исследованием новых активных сред. Первый волоконный лазер на основе световода, легированного ионами неодима, был создан Снитцером в 1961 году. Бурное развитие волоконных лазеров и усилителей началось после появления световодов с низкими потерями (менее 0.5 дБ/км на длине волны 1550 нм), пригодных для создания оптических систем передачи информации на дальние расстояния. Возникшая потребность в оптических усилителях и источниках лазерного излучения, работающих в области длин волн 1550 нм (окно прозрачности световодов на основе кварцевого стекла), для таких систем связи способствовала интенсивному поиску и исследованию новых активных сред. Результатом поиска стала реализация в 1985 г. первого оптического усилителя, работающего в области длин волн 1550 нм, активной средой которого был эрбиевый световод.

В настоящее время рабочий диапазон существующих волоконных лазеров на световодах из кварцевого стекла, легированного редкоземельными ионами (Yb^{3+} , Er^{3+} , Nd^{3+} , Tm^{3+} , Ho^{3+}), охватывает область длин волн от ~900 до 2300 нм. Благодаря ряду преимуществ перед другими видами лазеров (компактность, малый вес, постоянный модовый состав, стабильность выходного излучения) волоконные лазеры находят широкое применение в различных областях. Однако важной и в то же время неосвоенной оставалась область длин волн ~1200 – 1500 нм, интерес к которой, прежде всего, связан с возможностью ее использования для расширения спектрального диапазона передачи информации волоконно-оптических систем связи, ограниченного в настоящее время полосой усиления эрбия (1520 – 1600 нм). Разработка волоконных лазеров и широкополосных оптических усилителей для спектрального диапазона 1300 – 1500 нм позволит повысить пропускную способность волоконных линий связи. Существенным шагом к решению задачи реализации таких источников лазерного излучения является нахождение соответствующей активной среды.

В 2005 году было показано, что потенциально возможной активной средой для волоконных перестраиваемых лазеров и оптических усилителей являются световоды из кварцевого стекла, легированного висмутом. Обусловлено это, в первую очередь, тем, что такие световоды обладают полосами ИК люминесценции в довольно широкой области длин волн 1000 – 1600 нм, а также тем, что на их основе уже реализованы волоконные лазеры. Первые волоконные висмутовые лазеры работали в спектральном диапазоне 1140 – 1215 нм с эффективностью ~ 14 %. Накачка висмутовых лазеров осуществлялась в сердцевину активного световода иттербиевым лазером, излучающим на длине волны 1064 нм. В качестве активных сред использовались алюмосиликатные световоды, легированные висмутом. Для продвижения в длинноволновую область (1300 – 1550 нм) необходимо осуществить поиск состава стекла сердцевины световода с висмутом, обладающего оптическим усилением в указанном диапазоне длин волн. До настоящей работы, в литературе данные о получении лазерной генерации на световодах, легированных висмутом, в спектральном диапазоне 1300 – 1550 нм отсутствовали.

Из вышесказанного следует, что актуальность данной диссертационной работы определяется необходимостью поиска состава световодов, легированных висмутом, и реализации на основе таких световодов оптических усилителей и источников лазерного излучения, работающих в спектральном диапазоне 1300 – 1550 нм, для систем волоконной связи и других применений.

Цель работы

Цель настоящей работы заключается в нахождении состава стекла сердцевины световода, легированного висмутом, как активной среды, обладающей оптическим усилением в спектральном диапазоне 1300 – 1550 нм, и реализации на световодах такого состава волоконных лазеров, генерирующих в области длин волн 1300 – 1550 нм. Для достижения поставленной цели ставились и решались следующие задачи:

- исследование оптических свойств алюмосиликатных, германоалюмосиликатных, титаноалюмосиликатных и фосфорogerманосиликатных световодов, легированных висмутом;
- исследование влияния соотношения концентраций легирующих добавок (германия и фосфора) на оптические свойства фосфорogerманосиликатных световодов с висмутом;
- создание и исследование свойств волоконных висмутовых лазеров, генерирующих в спектральном диапазоне 1300 – 1550 нм;
- исследование возможности повышения КПД висмутовых лазеров путем оптимизации состава стекла сердцевины активного световода, длины волны излучения накачки и параметров резонатора висмутовых лазеров.

Научная новизна работы

1. Впервые созданы лазеры на волоконных световодах, легированных висмутом, генерирующие в спектральном диапазоне 1300 – 1550 нм.
2. Исследованы оптические свойства титаноалюмосиликатных световодов, легированных висмутом.
3. Измерены спектры оптического усиления в диапазоне длин волн 1100 – 1300 нм алюмосиликатных, германоалюмосиликатных и титаноалюмосиликатных световодов, легированных висмутом, при возбуждении излучением в полосу поглощения с максимумом около 1000 нм.
4. Показана возможность использования фосфорogerманосиликатных световодов, легированных висмутом, для получения оптического усиления и лазерной генерации в диапазоне длин волн 1300 – 1550 нм.
5. Впервые продемонстрировано получение лазерной генерации на фосфорogerманосиликатных световодах, легированных висмутом, при возбуждении излучением в полосы поглощения с максимумами на ~ 800 нм и ~ 950 нм.
6. Реализованы волоконные лазеры на основе фосфорogerманосиликатных световодов, легированных висмутом, с максимальной выходной мощностью

2.5 Вт и кпд до 25% (лазер на 1330 нм – кпд 25%; лазер на 1480 нм – кпд 18-23%).

Практическая значимость работы

- Продемонстрирована принципиальная возможность усиления оптических сигналов и генерации лазерного излучения в спектральной области 1300 – 1550 нм с помощью волоконных световодов, легированных висмутом, что является существенным продвижением к решению задачи о создании эффективных волоконных усилителей для волоконных систем связи следующего поколения.
- Показано, что в стекле сердцевинны световода возможно формирование активных висмутовых центров с короткоживущими энергетическими уровнями, устранение которых позволит повысить эффективность волоконных висмутовых лазеров.
- На основании экспериментальных данных показано, что световоды из кварцевого стекла, легированного висмутом, фосфором и/или германием, с широкой полосой усиления 1250 – 1550 нм являются перспективными усиливающими активными средами для волоконных лазеров и оптических усилителей указанного диапазона.
- Проведенное исследование оптических и усилительных свойств активных висмутовых центров при вариации соотношения концентраций германия и фосфора в сердцевине световода позволяет оптимизировать состав стекла сердцевинны волоконного световода и длину волны излучения источника накачки для получения эффективной лазерной генерации в диапазоне длин волн 1300 – 1550 нм.
- Создание лазеров на световодах, легированных висмутом, с выходной мощностью 2 Вт и более указывают на возможность повышения выходной мощности волоконных висмутовых лазеров в спектральном диапазоне 1300 – 1500 нм.

Положения, выносимые на защиту:

1. Лазеры на волоконных световодах, легированных висмутом, генерируют в спектральном диапазоне 1300 – 1550 нм. (Лазерная генерация продемонстрирована на 11 длинах волн из указанного спектрального диапазона при возбуждении излучением на длине волны около 1230 нм).
2. На основании экспериментально полученных зависимостей форм спектров поглощения, люминесценции и оптического усиления волоконных фосфорогерманосиликатных световодов, легированных висмутом, от концентраций легирующих добавок в сердцевине световода (при увеличении количества фосфора от 0 до ~ 3.8 ат. % и одновременном снижении количества германия от 4.5 до 0 ат. %) осуществляется выбор состава активного световода и длины волны источника излучения накачки при создании волоконных висмутовых лазеров, излучающих в области длин волн 1300-1550 нм.
3. Лазерная генерация на длинах волн 1320 нм и 1550 нм получена при накачке в различные полосы поглощения активных висмутовых центров с максимумами на длинах волн около 800 нм и 950 нм соответственно. В качестве активных сред использовались фосфорогерманосиликатные световоды, легированные висмутом.
4. Оптимизация состава стекла сердцевины световода, длины волны накачки и параметров резонатора лазера позволяет повысить кпд висмутовых лазеров. Реализованные волоконные висмутовые лазеры генерируют в спектральном диапазоне 1300 – 1500 нм, с кпд до 25 % и выходной мощностью более 2 Вт.

Апробация работы

Результаты исследований, изложенные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на конференциях и научных школах: “17th International Laser Physics Workshop” (г. Тронхейм, Норвегия, 2008); “3rd EPS-QEOD Europhoton conference” (г. Париж, Франция, 2008); “34th European Conference on Optical Communication” (г. Брюссель, Бельгия, 2008); “Материалы нано-, микро- и оптоэлектроники: физические свойства и применение” (г. Саранск, Россия,

2008); “Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC) and the National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC)” (г. Сан-Диего, США, 2009); “18th International Laser Physics Workshop” (г. Барселона, Испания, 2009), а также на семинарах НЦВО РАН и ИОФ РАН. Работа “Висмутовые волоконные лазеры и усилители, работающие в диапазоне длин волн 1300 – 1520 нм”, являющаяся частью настоящей диссертации, получила первое место на конкурсе научных работ молодых ученых НЦВО РАН 2008 года.

Публикации

Основные результаты диссертационной работы представлены в 15 публикациях, указанных в списке литературы.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 116 страниц машинописного текста, включая 51 рисунок, 6 таблиц и список литературы из 106 наименований. В конце каждой главы представлены основные полученные в ней результаты.

Содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, научная новизна, защищаемые положения и практическая значимость работы, приведены сведения об апробации работы и публикациях автора, изложена структура диссертации, благодарности.

В **Главе 1** приводится обзор опубликованных другими авторами данных, посвященных исследованию оптических свойств стекол и волоконных световодов, легированных висмутом. Рассмотрено влияние состава матрицы стекла на оптические свойства активных центров, связанных с висмутом. Проведен сравнительный анализ оптических свойств световодов и стекол, легированных висмутом (Параграф 1.1). В параграфе 1.2 приведены результаты исследования

структуры активного висмутового центра (АВЦ) различными методиками: XANES (X-ray Absorption Near Edge Structure); EXAFS (Extended X-ray Absorption Fine Structure); ядерный магнитный резонанс; электронный парамагнитный резонанс и другие. Несмотря на многообразие методик исследования, адекватной модели АВЦ, описывающей экспериментально полученные результаты, до настоящего времени не существует. Более подробно рассмотрено получение лазерной генерации на волоконных световодах, легированных висмутом (Параграф 1.3). Приведены данные о влиянии процессов поглощения энергии накачки активными висмутовыми центрами, находящимися в возбужденном состоянии, на эффективность лазерной генерации.

В Главе 2 приведено описание методик изготовления (MCVD и SPCVD) заготовок волоконных световодов, легированных висмутом (Параграф 2.1); приведены схемы экспериментальных установок, с помощью которых были исследованы оптические и усилительные свойства активных висмутовых центров, а также схемы лазеров на основе волоконных световодов, легированных висмутом (Параграфы 2.2-2.6).

Глава 3 посвящена исследованию оптических и усилительных свойств алюмосиликатных (АСВ), германоалюмосиликатных (ГАСВ) и титаноалюмосиликатных (ТАСВ) световодов, легированных висмутом.

В параграфе 3.1 обсуждается выбор составов световодов, легированных висмутом; приводятся основные характеристики исследуемых световодов: профиль показателя преломления, составы световодов, а также распределение концентрации легирующих добавок (алюминия и германия/титана) по поперечному сечению сердцевин световода с висмутом.

В параграфе 3.2 рассмотрено влияние добавки германия или титана в алюмосиликатный световод, легированный висмутом, на спектры поглощения и люминесценции. В спектре поглощения алюмосиликатного световода с висмутом можно выделить полосы с максимумами на длинах волн ~ 500 нм, 700 нм, 800 нм и 1000 нм. Показано, что введение германия и титана оказывало слабое влияние на форму спектра поглощения. В свою очередь, при возбужде-

нии на 808 нм спектр люминесценции ГАСВ и ТАСВ световодов существенно уширялся в длинноволновую область. Приведены результаты низкотемпературных измерений ($T=77\text{ K}$) люминесцентных свойств АСВ, ТАСВ и ГАСВ световодов.

В параграфе 3.3 исследовалась возможность получения в световодах данного типа оптического усиления в области $\sim 1300\text{ нм}$. Оказалось, что при возбуждении в полосу поглощения с максимумом около 1000 нм германо- и титаноалюмосиликатные световоды, легированные висмутом, обладают оптическим (on/off) усилением в довольно узкой полосе, а именно $\sim 1140 - 1250\text{ нм}$, тогда как спектр люминесценции охватывает существенно больший спектральный диапазон вплоть до 1700 нм . Максимум спектра оптического (on/off) усиления в таком случае располагался на длине волны около 1125 нм . Причина снижения оптического усиления в области $\sim 1300 - 1500\text{ нм}$ исследовалась в параграфе 3.4. Используя методику спектроскопии с временным разрешением, были измерены временные зависимости релаксации люминесценции АСВ, ТАСВ и ГАСВ световодов при возбуждении на 808 нм и 975 нм ($T=77\text{ K}$ и 300 K). Во всех экспериментах спад люминесценции ТАСВ и ГАСВ световодов состоял из двух компонент: быстрой со временем менее 4 мкс , которая отсутствовала в спаде люминесценции АСВ световода, и медленной со временем $\sim 800\text{ мкс}$. Амплитуды данных компонент зависели от регистрируемой длины волны люми-

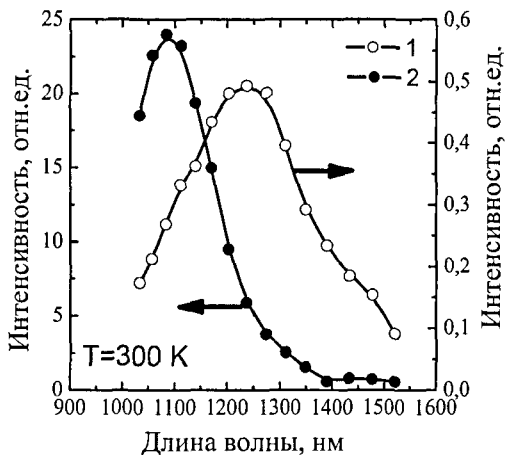


Рис. 1 Спектры короткоживущей люминесценции (со временем менее 4 мкс) (1) и долгоживущей люминесценции (со временем $\sim 800\text{ мкс}$) (2) для ТАСВ световода при возбуждении излучением на длине волны 975 нм

люминесценции, температуры и длины волны накачки. По экспериментально измеренным осциллограммам были построены спектры коротко- и долгоживущей люминесценции. Пример таких спектров приведен на Рис. 1. Максимумы спектров долгоживущей и короткоживущей люминесценции расположены на длинах волн ~ 1100 нм и ~ 1250 нм соответственно. В результате проведенного исследования была показана возможность формирования активных висмутовых центров с коротким временем жизни (менее 4 нс) в алюмосиликатных световодах с висмутом, легированных германием или титаном, присутствие которых в сердцевине световода приводило к снижению оптического усиления в области длин волн 1300 – 1500 нм. Помимо активных короткоживущих висмутовых центров, существенное влияние на оптическое усиление могут оказывать процессы апконверсии и поглощения излучения накачки активными центрами, находящимися в возбужденном состоянии. Экспериментальные результаты, свидетельствующие о наличии таких процессах в ГАСВ световодах, приведены в параграфе 3.5.

В Главе 4 исследованы оптические свойства фосфорogerманосиликатных (ФГСВ) световодов, легированных висмутом, с различным содержанием германия и фосфора в сердцевине световода (Таблица 1).

Основные характеристики (состав, распределение концентрации легирующих добавок (германия и фосфора) по поперечному сечению световода, диаметр поля моды на длине волны 1300 нм, разность показателей преломления сердцевины и оболочки) представлены в параграфе 4.1 (Таблица 1). В параграфе 4.2 проведен сравнительный анализ спектров поглощения ФГСВ и ГАСВ световодов. Показано существенное различие форм спектров оптического поглощения ФГСВ и ГАСВ световодов. В спектре поглощения ФГСВ световода (световод F2) наблюдались полосы с максимумами на ~ 450 нм, ~ 800 нм, плечо на ~ 950 нм и сложная полоса в области длин волн 1100 – 1500 нм, которая, очевидно, включала в себя также поглощение присутствующих в стекле сердцевины световода групп ОН с максимумами на ~ 1240 нм и ~ 1380 нм (Рис. 2 а), од-

нако отсутствовали полосы на 500, 700 и 1000 нм, характерные для АСВ световодов.

Таблица 1. Характеристики фосфорогерманосиликатных световодов с висмутом

| Название световода | Концентрации легирующих добавок | | $\Delta n \cdot 10^{-3}$ | Диаметр поля моды на 1,3 мкм, мкм |
|--------------------|---------------------------------|-----------|--------------------------|-----------------------------------|
| | Ge (ат. %) | P (ат. %) | | |
| F1 | 4,3 | - | 19 | 4,8 |
| F2 | 4,4 | 0,5 | 22 | 4,1 |
| F3 | 4,3 | 0,6 | 18,5 | 4,06 |
| F4 | 2,9 | 1,9 | 14,5 | 4,8 |
| F5 | 0,5 | 2,7 | 8,5 | 6,4 |
| F6 | 0,3 | 3,9 | 9 | 5,9 |
| F7 | - | 3,7 | 7 | 6,6 |

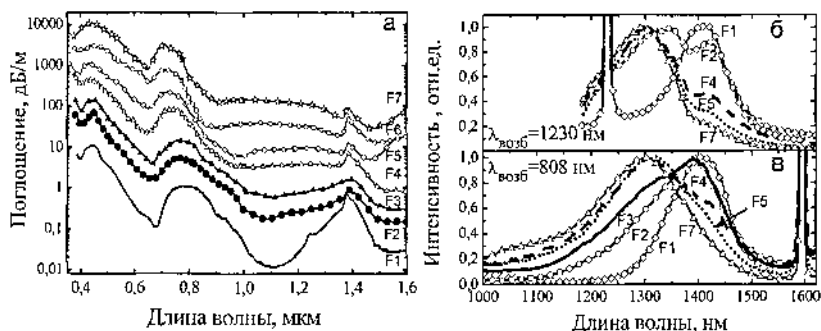


Рис. 2 Спектры поглощения (а) и люминесценции фосфорогерманосиликатных световодов, легированных висмутом при возбуждении на 1230 нм (б) и 808 нм (в). (Для наглядности рисунка (а), спектры поглощения световодов были умножены на соответствующие коэффициенты: F1 – 1; F2 – 0.85; F3 – 0.6; F4 – 15; F5 – 30; F6 – 250; F7 – 200).

Показано, что от соотношения концентраций германия и фосфора в сердцевине световодов, легированных висмутом, существенно зависит форма спектра поглощения (Рис. 2 а). Так, при возрастании концентрации фосфора и снижении концентрации германия наблюдался рост поглощения в области длин волн 1000 – 1300 нм, сдвиг максимума полосы поглощения на ~ 800 нм в коротковолновую область, уширение полосы поглощения с максимумом на ~ 450 нм. При возбуждении излучением на длинах волн 1230 нм и 808 нм наблюдались довольно широкие спектры люминесценции, состоящие из двух полос с макси-

мумами на ~ 1300 нм и ~ 1400 нм и характерными временами спада 800 мкс и 600 мкс соответственно (Параграф 4.3). Показано, что за возникновение полос люминесценции на длинах волн ~ 1300 нм и ~ 1400 нм, интенсивность которых зависит от содержания фосфора и германия в сердцевине световода, ответственны активные висмутовые центры, связанные с фосфором (АВЦ(P)) и германием (АВЦ(Ge)) соответственно (Рис. 2 б, в). Кроме того, в параграфе 4.2, исследовалось изменение формы спектра люминесценции световода F2 от интенсивности излучения накачки на длине волны 925 нм. При использовании излучения на длине волны 925 нм спектр люминесценции световода F2 состоял из двух полос с максимумами на длинах волн ~ 1150 нм и ~ 1600 нм, интенсивность которых зависела от интенсивности излучения накачки. Показано, что при значениях интенсивности введенного излучения накачки $\sim 50 - 100$ Вт/см² интенсивность полосы люминесценции с максимумом на ~ 1600 нм была существенно выше, чем интенсивность полосы на ~ 1150 нм. Повышение интенсивности накачки до ~ 400 кВт/см² приводило к обратному эффекту, а именно, полоса на ~ 1150 нм оказывалась интенсивнее полосы на ~ 1600 нм.

В параграфе 4.4 приведены результаты исследования усилительных

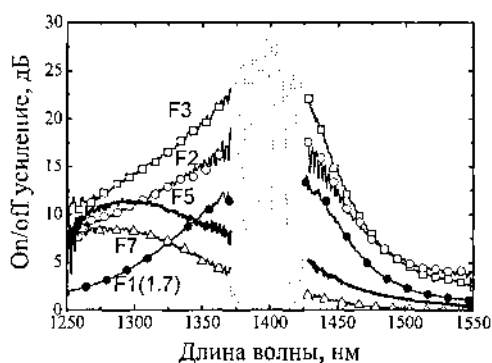


Рис. 3 Спектры оптического усиления ФГСВ световодов: F1, F2, F5, F7 длиной 30 м и F3 – 10 м при возбуждении на длине волны 1230 нм (70 мВт) ($T=300$ К). Для наглядности графика спектр усиления световода F1 умножен на коэффициент указанный в скобках.

свойств ФГСВ световодов, легированных висмутом. Спектры оптического (on/off) усиления были измерены в спектральном диапазоне 1250–1550 нм при накачке излучением на 1230 нм (Рис. 3). В области ~ 1400 нм определение коэффициента оптического усиления было затруднено из-за сильного поглощения ОН групп. Показано, что для световодов с высоким содержанием фосфора макси-

мум спектра оптического усиления располагается на длине волны около 1300 нм, а для световодов с высоким содержанием германия – на ~ 1400 нм. Введение германия в сердцевину световода приводило к возрастанию усиления в области 1400 – 1550 нм, а фосфора в области 1250 – 1350 нм, что довольно хорошо согласовывалось с данными по люминесценции. Максимальный коэффициент оптического (on/off) усиления ~ 22 дБ достигнут в 10-м отрезке световода F3 на длине волны ~ 1360 нм.

Глава 5 посвящена созданию волоконных лазеров на основе фосфоро-германосиликатных световодов, легированных висмутом, генерирующих в спектральном диапазоне 1300 – 1550 нм.

В параграфе 5.1 приведено описание основных элементов висмутовых лазеров: источники накачки, параметры брэгговских решеток, длины активных световодов. Создан ряд волоконных висмутовых лазеров, генерирующих в

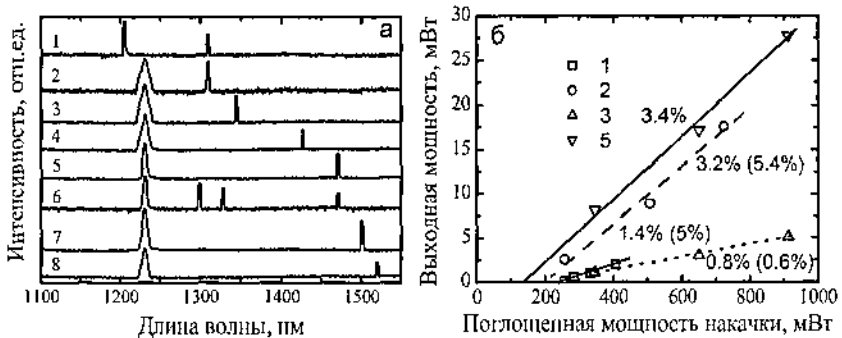


Рис. 4 а) Спектры оптического излучения на выходе волоконных висмутовых лазеров 1-8: накачка $\lambda_{\text{возб}}=1205$ нм, генерация $\lambda_{\text{ген}}=1310$ нм (1); $\lambda_{\text{возб}}=1230$ нм, $\lambda_{\text{ген}}=1310$ нм (2); $\lambda_{\text{возб}}=1230$ нм, $\lambda_{\text{ген}}=1345$ нм (3); $\lambda_{\text{возб}}=1230$ нм, $\lambda_{\text{ген}}=1427$ нм (4); $\lambda_{\text{возб}}=1230$ нм, $\lambda_{\text{ген}}=1470$ нм (5); $\lambda_{\text{возб}}=1230$ нм, $\lambda_{\text{ген}1}=1300$ нм, $\lambda_{\text{ген}2}=1330$ нм, $\lambda_{\text{ген}3}=1470$ нм (6); $\lambda_{\text{возб}}=1230$ нм, $\lambda_{\text{ген}}=1500$ нм (7); $\lambda_{\text{возб}}=1230$ нм, $\lambda_{\text{ген}}=1520$ нм (8); б) Зависимости выходной мощности висмутовых лазеров (1, 2, 3 и 5) от поглощенной мощности накачки при $T=300$ К (в скобках указан КПД лазера при $T=77$ К)

области 1300 – 1520 нм, спектры выходного излучения для указанных лазеров приведены на Рис. 4 а. В качестве активной среды использовался 30-м отрезок световода F2. КПД висмутовых лазеров и пороговые мощности накачки при

$T=300$ К составили 1 – 4 % и 50 – 250 мВт соответственно (Рис. 4 б). Кроме того, продемонстрировано получение лазерной генерации одновременно на трех длинах волн 1300, 1330 и 1470 нм, что свидетельствует о значительном неоднородном уширении спектра оптического усиления (Рис. 4 а, кривая б). Показана возможность использования излучения на длинах волн 808 и 925 нм для получения лазерной генерации на длинах волн 1320 и 1550 нм соответственно. В обоих случаях длина лазеров составляла ~ 13 м. В качестве активной среды также использовался световод F2.

В параграфе 5.2 исследована возможность повышения эффективности висмутовых лазеров, генерирующих в области длин волн 1300 – 1500 нм, путем оптимизации состава активного световода, длины волны возбуждения и параметров резонатора висмутовых лазеров. Первые висмутовые лазеры, излучающие в области 1.3 – 1.5 мкм, обладали достаточно низкой эффективностью ~ 1 – 4 %.

Причиной этого являлось то, что большая часть излучения накачки на 1230 нм в активном световоде F2 поглощалась АВЦ(P), и лишь малая часть – АВЦ(Ge). Низкий КПД в полосе люминесценции АВЦ(P) (в области ~ 1300 нм) был обусловлен сравнительно низкой концентрацией фосфора (~ 0.5 ат. %), а в полосе АВЦ(Ge) – малой долей возбужденных активных висмутовых центров, связанных с германием. По-

казано, что оптимальной длиной волны излучения накачки для легированных висмутом световодов с высоким содержанием германия является излучение в

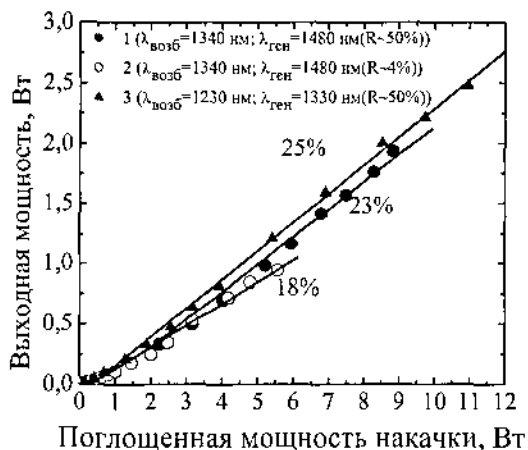


Рис. 5 Выходная мощность висмутовых лазеров (1, 2 – 90-м отрезок световода F2; 3 – 100-м отрезок световода F5) от поглощенной мощности накачки

области 1300 – 1340 нм, тогда как для активных световодов с высоким содержанием фосфора – излучение в области ~ 1230 нм. В результате оптимизации вышеуказанных параметров, эффективность висмутовых лазеров возрастала в несколько раз и составила ~ 18 – 25 % (Рис. 5). Также была получена лазерная генерация на длине волны 1480 нм с дифференциальной эффективностью 18 % без выходной брэгговской решетки (Рис. 5). В этом случае выходным зеркалом был скол активного световода с коэффициентом отражения ~ 4 % за счет френелевского отражения. Тем самым показана принципиальная возможность создания оптического усилителя с усилением не менее 14 дБ на основе волоконного световода, легированного висмутом.

В **Заключении** диссертационной работы сформулированы основные результаты:

1. Впервые экспериментально исследованы оптические свойства фосфорогерманосиликатных волоконных световодов, легированных висмутом, при увеличении количества фосфора от 0 до ~ 3.8 ат. % и одновременном снижении количества германия от ~ 4.5 до 0 ат. % в сердцевине световода. Показано, что:
 - а. спектры люминесценции световодов в области $\lambda > 1$ мкм состоят из 2-х полос с максимумами на длинах волн 1300 нм и 1400 нм, интенсивность которых зависит от содержания в сердцевине световода фосфора и германия соответственно.
 - б. при возбуждении излучением на ~ 1230 нм фосфоро-, германо- и фосфорогерманосиликатные световоды, легированные висмутом, обладают оптическим усилением в диапазоне длин волн 1250 – 1550 нм. Исследована зависимость формы спектров оптического усиления от состава стекла сердцевины световодов. Экспериментально показана возможность создания оптического усилителя на длине волны 1480 нм с усилением не менее 14 дБ на волоконном световоде, легированном висмутом.

2. Впервые созданы лазеры на волоконных световодах, легированных висмутом, генерирующие в спектральном диапазоне 1300 – 1550 нм. Для получения лазерной генерации в диапазоне 1300 – 1550 нм использовались германо-, фосфоро- и фосфорogerманосиликатные (с различным соотношением количества германия и фосфора) световоды, легированные висмутом. Лазерная генерация продемонстрирована на 11 длинах волн из указанного спектрального диапазона при накачке на длине волны 1230 нм с к.п.д. 1% и более. Пороговые значения мощности накачки составляли от 50 до 250 мВт.
3. Впервые продемонстрирована возможность получения лазерной генерации на фосфорogerманосиликатном световоде, легированном висмутом, при возбуждении в полосы поглощения с максимумами на 800 нм и 950 нм.
4. На основании проведенного исследования оптических свойств фосфорogerманосиликатных световодов, легированных висмутом, показано, что оптимизация состава стекла сердцевины световода, длины волны накачки и параметров резонатора висмутового лазера позволяют достичь выходной мощности лазерной генерации на длинах волн 1330 нм и 1480 нм более 2 Вт с дифференциальным КПД до 25%.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Bufetov I.A., Golant K.M., Firstov S.V., Kholodkov A.V., Shubin A.V., and Dianov E.M., Bismuth activated aluminosilicate optical fibers fabricated by surface-plasma chemical vapor deposition technology // *Applied Optics*, 2008, 47 (27), 4940
2. Firstov S.V., Bufetov I.A., Smirnov A.M., Khopin V.F., Guryanov A.N., Dianov E.M., Time-resolved spectroscopy of Bi-doped silica-based fibers // *Book of abstracts, 17th International Laser Physics Workshop (LPHYS'08)*, June 30 – July 4, 2008, Trondheim, Norway, 522
3. Firstov S.V., Bufetov I.A., Khopin V.F., Umnikov A.A., Guryanov A.N., Dianov E.M., Optical gain of Bi-doped aluminosilicate fibers codoped with Ge and Ti // *Book of abstracts, 17th International Laser Physics Workshop (LPHYS'08)*, June 30 – July 4, 2008, Trondheim, Norway, 526
4. Bufetov I.A., Golant K.M., Firstov S.V., Kholodkov A.V., Shubin A.V., Dianov E.M., Bismuth activated aluminosilicate optical fibers fabricated by SPCVD technology // *Book of abstracts, 17th International Laser Physics Workshop (LPHYS'08)*, June 30 – July 4, 2008, Trondheim, Norway, 525
5. Bufetov I.A., Firstov S.V., Khopin V.F., Guryanov A.N., Dianov E.M., Optical amplification, time-resolved spectroscopy and visible luminescence in Bi- and Ge/Ti-codoped aluminosilicate fibers // *Proceeding of 3rd EPS-QEOD Europhoton conference, 2008, 31th August – 5th September, Paris, France, THoE.6*
6. Bufetov I.A., Firstov S.V., Khopin V.F., Guryanov A.N., Dianov E.M., Visible luminescence and upconversion processes in Bi-doped silica-based fibers pumped by IR radiation // *Proceeding of 34th European Conference on Optical Communication, 2008, Brussels, Belgium, Tu.3.B.4*
7. Firstov S.V., Bufetov I.A., Khopin V.F., Umnikov A.A., Guryanov A.N., Dianov E.M., Time-resolved spectroscopy and optical gain of silica-based

- fibers co-doped with Bi, Al, and/or Ge, P, and Ti // *Laser Physics* 2009, 19 (4), 894
8. Фирстов С.В., Буфетов И.А., Хопин В.Ф., Медведков О.И., Гурьянов А.Н., Дианов Е.М., Оптическое усиление в алюмосиликатных световодах, легированных висмутом, титаном и германием // Сборник трудов всероссийской молодежной научной школы “Материалы нано-, микро- и оптоэлектроники: физические свойства и применение”, Саранск, 2008, 161
 9. Dianov E.M., Firstov S.V., Medvedkov O.I., Bufetov I.A., Khopin V.F., Guryanov A.N., Luminescence and laser generation in Bi-doped fibers in a spectral region of 1300-1520 nm // *Proceeding of Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC) and the National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC)*, 2009, 22nd-24th March, San Diego, USA, OWT3
 10. Bufetov I.A., Firstov S.V., Khopin V.F., Medvedkov O.I., Guryanov A.N., Dianov E.M., Bi-doped fiber lasers and amplifiers for a spectral region of 1300-1470 nm // *Optics Letters*, 2008, 33, 2227
 11. Дианов Е.М., Фирстов С.В., Хопин В.Ф., Гурьянов А.Н., Буфетов И.А., Висмутовые волоконные лазеры и усилители, работающие в области 1.3 мкм // *Квантовая электроника*, 2008, 38 (7), 615
 12. Bufetov I.A., Firstov S.V., Khopin V.F., Medvedkov O.I., Guryanov A.N., Dianov E.M., 1.3-1.47 μm bismuth fiber lasers and amplifiers // *Proceeding of 3rd EPS-QEOD Europhoton conference*, 2008, 31th August - 5th September, post deadline session, Paris, France, TUoE.1
 13. Firstov S.V., Bufetov I.A., Khopin V.F., Medvedkov O.I., Guryanov A.N., Dianov E.M., The 2 W bismuth doped fiber lasers in wavelength range 1300 – 1550 nm and variation laser properties with fiber core composition // *Proceeding of 18th International Laser Physics Workshop (LPHYS'09)*, July 13 – July 17, 2009, Barcelona, Spain

14. Дианов Е.М., Фирстов С.В., Хопин В.Ф., Медведков О.И., Гурьянов А.Н., Буфетов И.А., Висмутовые волоконные лазеры, генерирующие в диапазоне 1470 - 1550 нм // Квантовая электроника, 2009, 39 (4), 299
15. Firstov S.V., Bufetov I.A., Khopin V.F., Medvedkov O.I., Guryanov A.N., Dianov E.M., 2W bismuth doped fiber lasers in wavelength range 1300 – 1550 nm and variation laser properties with fiber core composition // Laser Physics Letters, Published online 16 June 2009 <http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/fulltext/122457726/PDFSTART>

Заказ № 49-а/08/09 Подписано в печать 26.08.2009 Тираж 100 экз. Усл. п.л. 1



ООО "Цифровичок", тел. (495) 649-83-30; (495) 778-22-20
www.cfr.ru ; e-mail: info@cfr.ru