

Новый висмутовый волоконный лазер, излучающий в диапазоне 1625–1775 нм

Е.М.Дианов, С.В.Фирстов, С.В.Алышев, К.Е.Рюмкин, А.В.Шубин, В.Ф.Хопин, А.Н.Гурьянов, О.И.Медведков, М.А.Мелькумов

Впервые продемонстрирована непрерывная лазерная генерация на волоконном германосиликатном световоде, легированном Вi, в диапазоне длин волн, который покрывает спектральную область между полосами излучения Er- и Tm-лазеров.

Ключевые слова: висмут, лазер, волоконный световод.

С момента создания первого висмутового волоконного лазера в 2005 г. [1] значительное внимание уделялось поиску новых составов стекол для сердцевины висмутовых световодов и исследованию их спектрально-люминесцентных свойств. Проведенные исследования показали, что волоконные световоды, легированные висмутом, являются перспективной активной средой для создания лазеров и оптических усилителей в спектральном диапазоне 1000–1800 нм [2].

Первый висмутовый волоконный лазер с активной средой на основе алюмосиликатного световода генерировал в спектральном диапазоне 1140–1215 нм [1]. Позже были реализованы висмутовые волоконные лазеры в области 1270–1550 нм, которые использовали световоды с сердцевиной из фосфорогерманосиликатного, германосиликатного и кварцевого стекол (см., напр., обзоры [3, 4] и ссылки в них). Кроме того, был создан эффективный висмутовый волоконно-оптический усилитель с максимальным коэффициентом усиления 25 дБ на длине волны 1430 нм [5].

Однако до сих пор не существовало висмутовых волоконных лазеров и усилителей для спектральной области 1600–1800 нм. В то же время несомненно существует потребность в подобных устройствах, особенно для диапазона длин волн 1620–1700 нм, в котором оптические потери волоконных световодов на основе кварцевого стекла достаточно малы (не более 0.4 дБ/км), что делает этот диапазон перспективным для передачи информации по волоконным линиям связи. Проблема использования данного спектрального диапазона для передачи информации в настоящее время связана с отсутствием элементной базы волоконно-оптических систем связи, прежде всего волоконных лазеров и оптических усилителей.

В настоящей работе мы сообщаем результаты исследований по разработке висмутовых волоконных световодов, люминесцирующих в спектральной области 1600–1800 нм, и волоконных лазеров на их основе.

Е.М.Дианов, С.В.Фирстов, С.В.Алышев, К.Е.Рюмкин, А.В.Шубин, О.И.Медведков, М.А.Мелькумов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: alyshs@fo.gpi.ru

В.Ф.Хопин, А.Н.Гурьянов. Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г.Десятых РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Тропинина, 49

Поступило в редакцию 17 апреля 2014 г.

Семейство волоконных световодов с сердцевиной, состоящей из стекла с различным содержанием $\text{SiO}_2/\text{GeO}_2$ и Bi_2O_3 (германосиликатные световоды, легированные висмутом, далее ВГСС), было изготовлено методом MCVD. Детальные сведения о химическом составе стекла сердцевины активных световодов будут опубликованы позже. Из полученного семейства световодов были выбраны образцы с интенсивной люминесценцией висмутовых активных центров (ВАЦ) в спектральном диапазоне 1600–1800 нм, что стало первым шагом на пути получения лазерной генерации в указанной области.

На рис. 1 показаны спектры оптических потерь, люминесценции и возбуждения люминесценции ВГСС, который использовался для получения лазерной генерации. В полученном спектре поглощения (кривая 1) присутствуют полосы с максимумами на длинах волн 830 и 1400 нм, принадлежащие ВАЦ, ассоциированным с SiO_2 , а также полосы на 460, 950 и 1650 нм, обусловленные наличием ВАЦ, ассоциированных с GeO_2 [6]. При возбуждении ВГСС полупроводниковым лазерным диодом ($\lambda_p = 975$ нм) и висмутовым волоконным лазером ($\lambda_p = 1460$ нм) [7] была обнаружена широкополосная ИК люминесценция в диапазоне 1550–1800 нм. Форма спектра люминесценции слабо зависела от длины волны возбуждения. Типичный спектр люминесценции ВГСС показан кривой 2. Время жизни люминесценции в области 1700 нм при накачке на 975 нм составило 500 мкс (кривая затухания люминесценции описывалась экспоненциальной функцией). В спектре возбуждения данной полосы люминесценции (кривая 3) наблюдаются полосы с максимумами на 460, 950 нм, а также край полосы с максимумом в области 1600–1650 нм.

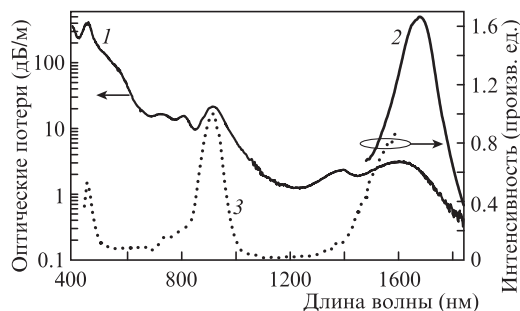


Рис. 1. Оптические характеристики ВГСС: спектр оптических потерь (1), спектр люминесценции при накачке на длине волны 975 нм (2) и спектр возбуждения люминесценции на длине волны 1700 нм (3).

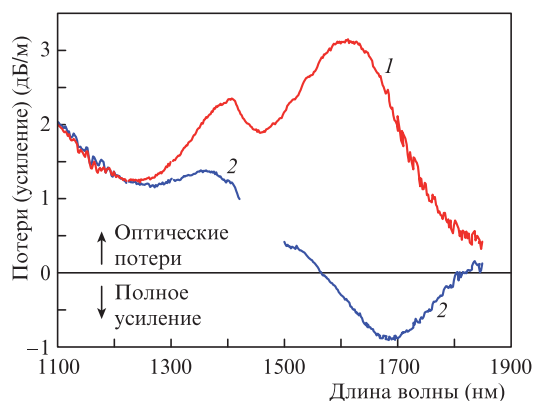


Рис.2. Спектры оптических потерь ВГСС при выключенной (1) и включённой накачке (2) на длине волны $\lambda_p = 1460$ нм.

На рис.2 приведены спектры оптических потерь ВГСС при включенной и выключенной лазерной накачке на $\lambda_p = 1460$ нм. Из полученных спектров можно определить области оптического усиления и наведенного поглощения (вследствие поглощения из возбуждённого состояния) при включении накачки [8]. Кривая 2 демонстрирует полное оптическое усиление в области, где величина оптических потерь становится отрицательной. Видно, что ВГСС имеет оптическое усиление в широком диапазоне длин волн от 1560 до 1800 нм. Сравнивая кривые 1 и 2, можно заметить, что оптические потери ВГСС при включённой накачке не превышают потери в её отсутствие во всём диапазоне 1100–1800 нм. Это свидетельствует об отсутствии поглощения из возбуждённого состояния.

Легированный висмутом германосиликатный световод, оптические свойства которого представлены выше, использовался в качестве активной среды для создания лазера. Висмутовый лазер был выполнен по обычной линейной схеме с резонатором, состоящим из отрезка активного световода и волоконных брэгговских решёток, которыми определялась длина волны лазерной генерации λ_{las} . Для получения генерации на длинах волн 1625 и 1775 нм использовалась пара брэгговских решёток с коэффициентом отражения, близким к 100%. В случае генерации на 1688, 1703 и 1735 нм выходным зеркалом служил торец активного световода. В экспериментах по лазерной генерации источниками накачки были висмутовый волоконный лазер с $\lambda_p = 1460$ нм и волоконный Er–Yb-лазер с $\lambda_p = 1568$ нм. Излучение накачки вводилось в сердцевину активного световода. Длина активного световода варьировалась в диапазоне 15–20 м. Все измерения проводились при комнатной температуре.

В результате была получена лазерная генерация на длинах волн $\lambda_{las} = 1625, 1688, 1703, 1735$ и 1775 нм при $\lambda_p = 1460$ нм. Пороговая мощность накачки составила около 40 мВт. Зависимость выходной мощности излучения на длине волны $\lambda_{las} = 1703$ нм от вводимой мощности накачки ($\lambda_p = 1460$ нм) представлена на рис.3. Дифференциальная эффективность лазера не превышала 1.5%. Столь низкое значение эффективности при $\lambda_p = 1460$ нм обусловлено, по-видимому, высоким уровнем поглощения накачки ВАЦ, ассоциированных с SiO_2 , которые не вносят вклад в лазерную генерацию в области 1700 нм. Для повышения КПД висмутового лазера мы использовали в качестве накачки излучение с длиной волны, большей 1460 нм, а именно, излучение волоконного Er–Yb-лазера ($\lambda_p = 1568$ нм). В результате дифференциальная эффек-

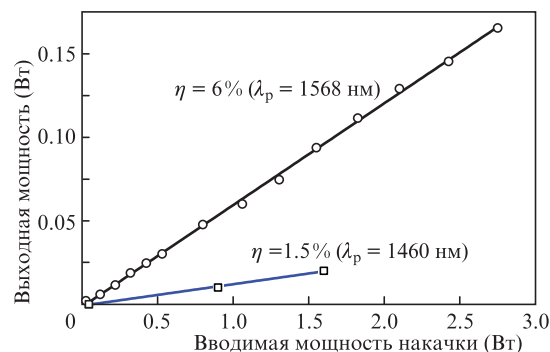


Рис.3. Зависимости выходной мощности излучения висмутового лазера на длине волны 1703 нм от мощности вводимого излучения накачки на $\lambda_p = 1460$ и 1568 нм; η – дифференциальная эффективность.

тивность висмутового лазера на $\lambda_{las} = 1703$ нм заметно выросла и составила 6% (рис. 3), а максимальное значение выходной мощности превысило 150 мВт. Аналогичные параметры имеет висмутовый лазер с $\lambda_{las} = 1735$ нм.

На рис.4 показан спектр полного оптического усиления и отмечены длины волн, на которых была получена лазерная генерация. Ширина по полувысоте полосы усиления разработанного волоконного германосиликатного световода, легированного висмутом, составила 150 нм.

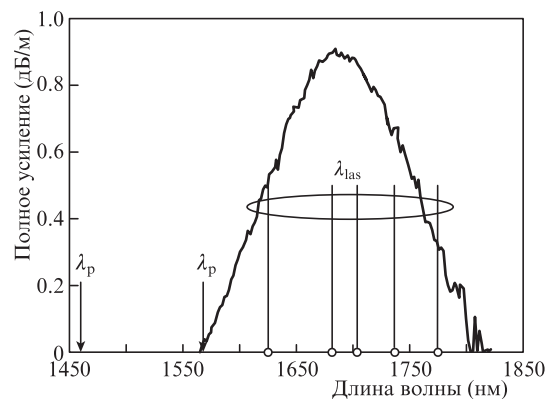


Рис.4. Спектр полного оптического усиления ВГСС; стрелки и кружки указывают длины волн накачки и генерации соответственно.

Таким образом, создан легированный висмутом германосиликатный световод, имеющий оптическое усиление в области 1560–1800 нм. Этот световод является перспективной активной средой для лазеров и усилителей, работающих в указанной области, что подтверждается впервые полученными результатами по лазерной генерации на длинах волн 1625, 1688, 1703, 1735 и 1775 нм. Оптимизация параметров активных световодов и основных этапов технологического процесса позволит повысить эффективность реализованных висмутовых лазеров.

Работа была выполнена в рамках программы № 24 Президиума РАН и проекта РФФИ (грант № 13-02-01320А).

1. Дианов Е.М., Двойрин В.В., Машинский В.М. и др. *Квантовая электроника*, **35** (12), 1083 (2005).
2. Dianov E.M. *J. Lightwave Technol.*, **31**, 681 (2013).
3. Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **42** (9), 754 (2012).
4. Bufetov I.A. et al. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **20**, 1 (2014).
5. Melkumov M.A. et al. *Opt. Lett.*, **36**, 2408 (2011).
6. Firsov S.V. et al. *Opt. Express*, **19**, 19551 (2011).
7. Shubin A.V. et al. *Opt. Lett.*, **37**, 2589 (2012).
8. Riumkin K.E. et al. *Opt. Lett.*, **39**, 2503 (2014).