

Висмутовые волоконные лазеры, генерирующие в диапазоне 1470–1550 нм

Е.М.Дианов, С.В.Фирстов, В.Ф.Хопин, О.И.Медведков, А.Н.Гурьянов, И.А.Буфетов

Впервые получена лазерная генерация в волоконных световодах, легированных висмутом, в спектральном диапазоне 1470–1550 нм. В качестве активной среды использовались легированные Вi фосфорогерманосиликатные и, впервые, германосиликатные волоконные световоды. Спектр усиления фосфорогерманосиликатных световодов охватывает диапазон 1300–1550 нм, который может быть использован для передачи информации волоконными системами связи следующего поколения.

Ключевые слова: висмут, волоконный световод, волоконный лазер, оптический усилитель.

Начиная с 2001 г., исследованию ИК люминесценции стекол, легированных висмутом, уделяется большое внимание [1]. Наличие ИК люминесценции указывает на потенциальную возможность получения усиления и лазерной генерации, что представляет несомненный интерес для расширения используемого диапазона длин волн в системах волоконной связи. Ранее было показано, что ИК люминесценция в стеклах, легированных висмутом, может наблюдаться в спектральном диапазоне 1000–1600 нм в зависимости от состава стекла и длины волны возбуждающего излучения (см. работу [2] и ссылки в ней). В 2005 г. были изготовлены первые волоконные световоды, легированные висмутом, и впервые получена на них лазерная генерация [3]. До недавнего времени существенное оптическое усиление и лазерная генерация в висмутовых алюмосиликатных световодах были зафиксированы лишь в диапазоне 1.15–1.215 мкм [3–6]. Оптический КПД лазеров достигал $\sim 30\%$.

Для систем волоконной связи наибольший интерес представляет диапазон 1300–1530 нм. Для получения в нем оптического усиления и генерации мы использовали в качестве материала сердцевинки фосфорогерманосиликатное стекло, легированное висмутом (стекло ФГСВ). Известно, что лазеры на таких световодах могут работать в диапазоне 1300–1345 нм [7] и до 1470 нм [8]. Кроме того, нами исследовались германосиликатные световоды, легированные висмутом (ГСВ-световоды). Они отличались от ФГСВ-световодов только отсутствием в составе сердцевинки сравнительно небольшой добавки фосфора. Целью настоящей работы было выяснить, насколько далеко в длинноволновую область может простирается полоса усиления висмутовых световодов. Для этого исследовалась возможность создания висмутовых ла-

ров на длины волн 1500, 1520 и 1550 нм. Отметим, что о реализации лазера на ФГСВ-световоде на $\lambda = 1500$ нм кратко сообщалось в [7]. Кроме того, возможность лазерной генерации на алюмосиликатном световоде, легированном висмутом, на длинах волн 1440–1460 нм была продемонстрирована в [9].

Световоды изготавливались по MCVD-технологии. Сердцевина световода состояла из кварцевого стекла с добавками Ge, P, Вi, атомные концентрации которых составляли соответственно 5%, 0.5% и 0.02% (последнее значение – порог чувствительности нашей аппаратуры). Спектр поглощения одномодового ФГСВ-световода представлен на рис.1. Спектр содержит полосы с максимумами на 450, 770, 950 нм и полосу сложной формы в диапазоне 1100–1500 нм. С целью поиска оптимальной длины волны накачки ФГСВ-световода для получения лазерной генерации в длинноволновой области были измерены спектры люминесценции этого световода при накачке в различные полосы поглощения. Полученные спектры люминесценции ФГСВ-световода при накачке на $\lambda_p = 532, 800, 925$ и 1230 нм также представлены на

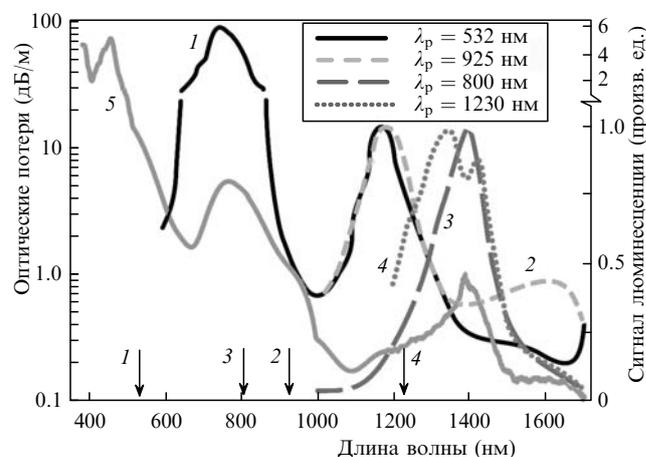


Рис.1. Спектры люминесценции одномодового ФГСВ-световода при возбуждении на длинах волн 532 (1), 925 (2), 800 (3) и 1230 нм (4); 5 – спектр оптических потерь ФГСВ-световода. Длины волн накачки отмечены стрелками.

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

В.Ф.Хопин, А.Н.Гурьянов. Институт химии высокочистых веществ РАН, Россия, 603600 Н. Новгород, ул. Тропинина, 49

Поступила в редакцию 13 февраля 2009 г.

рис.1. Спектры люминесценции нормированы на единицу относительно полос люминесценции в области $\lambda > 1000$ нм.

При накачке на $\lambda_p = 532$ нм люминесценция наблюдается в очень широком диапазоне длин волн – от 600 до 1700 нм. При накачке на $\lambda_p = 532$ и 925 нм наблюдается полоса люминесценции с длиной волны $\lambda_{max} = 1180$ нм. Более длинноволновая полоса люминесценции (1200–1500 нм, $\lambda_{max} = 1400$ нм) возбуждалась при $\lambda_p = 800$ и 1230 нм. Причем при $\lambda_p = 800$ нм наблюдалась только длинноволновая часть этой полосы, отвечающая висмутовым активным центрам (ВАЦ) в материале сердцевинны, ассоциированным с атомами германия и кремния [10]. При $\lambda_p = 1230$ нм возбуждалась как коротковолновая, так и длинноволновая часть этой полосы, что указывает на одновременное возбуждение ВАЦ, связанных с атомами фосфора и атомами германия [10]. Кроме того, при $\lambda_p = 925$ нм наблюдалась еще одна полоса люминесценции ФГСВ-световода с $\lambda_{max} \approx 1600$ нм. (Впервые о подобной полосе люминесценции при накачке на $\lambda_p = 976$ нм в германосиликатном световоде, легированном висмутом, сообщалось в [11].)

Следует отметить, что форма спектра люминесценции стекла сердцевинны ФГСВ-световода (особенно соотношение амплитуд полос люминесценции с $\lambda_{max} \approx 1180$ и ~ 1600 нм) существенно зависела от интенсивности излучения накачки I_p (рис.2). Из сердцевинны преформы световода и многомодового волоконного световода из ФГСВ-стекла при сравнительно низкой интенсивности накачки на $\lambda_p = 925$ нм наблюдалось, главным образом, излучение с пиком на 1600 нм (рис.2, линии 1 и 2). Повышение интенсивности накачки в многомодовом и одномодовом световодах приводило к относительному возрастанию пика с $\lambda_{max} \approx 1180$ нм. Интенсивность же люминесценции на 1600 нм в одномодовом световоде была примерно в 2.5 раза ниже, что может свидетельствовать о различии интенсивностей насыщения переходов в ВАЦ, ответственных за указанные полосы люминесценции.

На основании полученных данных о люминесценции мы выбрали для дальнейших экспериментов с волоконными лазерами на ФГСВ-световодах длины волн накачки $\lambda_p = 925$ и 1230 нм.

Висмутовые волоконные лазеры (ВВЛ) были собраны по стандартной для таких экспериментов линейной схеме

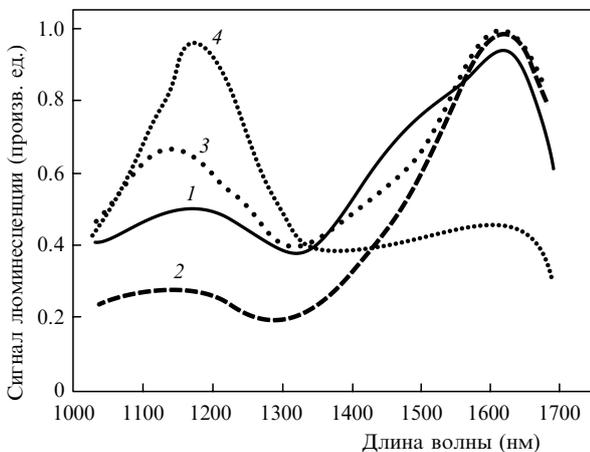


Рис.2. Спектры люминесценции стекла сердцевинны ФГСВ-световода при накачке на $\lambda_p = 925$ нм в заготовке, $I_p = 50$ Вт/см² (1), в многомодовом световоде, $I_p = 80$ Вт/см² (2), в многомодовом световоде, $I_p = 4$ кВт/см² (3) и в одномодовом световоде, $I_p = 400$ кВт/см² (4).

с брэгговскими решетками (БР) показателя преломления в качестве зеркал (подробное описание схемы лазера можно найти, напр., в [8]). Длина волны генерации λ_g определялась резонансной длиной волны БР. В качестве источника излучения накачки использовался волоконный ВКР-лазер с $\lambda_p = 1230$ нм или неодимовый волоконный лазер [12] с $\lambda_p = 925$ нм. В обоих случаях излучение накачки было одномодовым и вводилось непосредственно в сердцевину активного висмутового световода. Использовались 30- и 13-метровые отрезки ФГСВ-световода при накачке на 1230 и 925 нм соответственно. Коэффициент отражения одной из БР был близок 100 %, а у другой составлял ~ 90 %.

При $\lambda_p = 1230$ нм мы наблюдали лазерную генерацию на длинах волн $\lambda_g = 1500$ и 1520 нм при комнатной температуре, пороговая мощность излучения накачки составляла 200–300 мВт. Зависимости выходной мощности от мощности накачки и спектры генерации этих ВВЛ представлены на рис.3. В этих же условиях получить генерацию на $\lambda = 1550$ нм нам не удалось. Порог генерации на данной длине волны превышал 4 Вт.

Спектр поглощения ГСВ-световода (рис.4) качественно похож на спектр поглощения ФГСВ-световода. Здесь присутствует ИК полоса поглощения в диапазоне 1200–1500 нм, при накачке в которую наблюдается ИК люминесценция в полосе 1300–1500 нм. Используя излучение накачки с $\lambda_p = 1230$ нм и схему волоконного лазера, описанную выше, нам удалось получить лазерную генерацию на 30-метровом отрезке ГСВ-световода на длине волны 1500 нм. Порог генерации составил 60 мВт, дифференциальный КПД при комнатной температуре был равен 3 %.

Для получения генерации в еще более длинноволновой области нами использовалось излучение накачки с $\lambda_p = 925$ нм. Была собрана схема ВВЛ на ФГСВ-световоде с накачкой на 925 нм и получена генерация на длине волны 1550 нм. Пороговая мощность накачки составила около 200 мВт. Спектр излучения на выходе лазера представлен на рис.3 (вставка). Определить КПД лазера не удалось, поскольку в данных экспериментах максимальная мощность накачки была лишь незначительно выше пороговой.

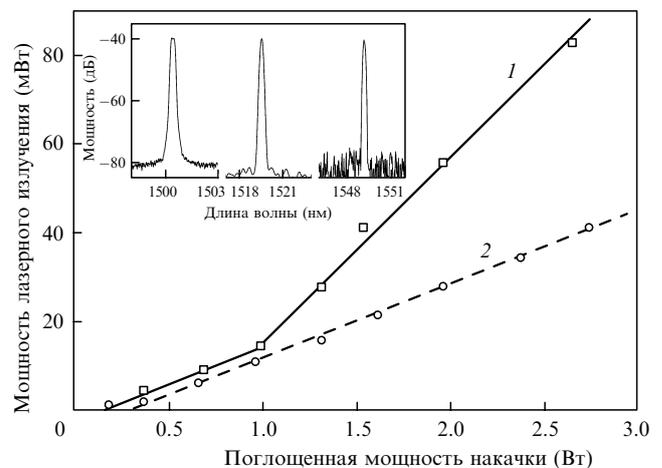


Рис.3. Зависимости мощности излучения ВВЛ на $\lambda_g = 1500$ нм, дифференциальный КПД 4.2 % (1) и на $\lambda_g = 1520$ нм, дифференциальный КПД 1.6 % (2) от мощности накачки с $\lambda_p = 1230$ нм. На вставке показаны спектры излучения генерации ВВЛ на ФГСВ-световоде с $\lambda_g = 1500$ нм ($\lambda_p = 1230$ нм), $\lambda_g = 1520$ нм ($\lambda_p = 1230$ нм) и $\lambda_g = 1550$ нм ($\lambda_p = 925$ нм).

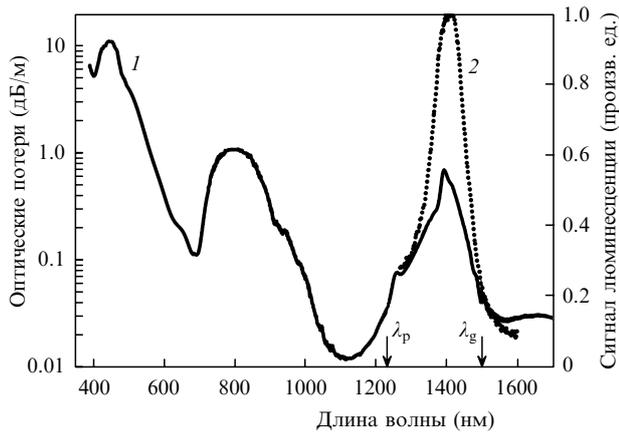


Рис.4. Спектры оптических потерь (1) и люминесценции (2) ГСВ-световода при накачке на $\lambda_p = 1230$ нм.

Таким образом, в настоящей работе впервые созданы висмутовые волоконные лазеры с длинами волн генерации в диапазоне 1470–1550 нм. Продемонстрирована возможность использования полосы поглощения с центром на ~ 950 нм для накачки волоконных лазеров на ФГСВ-световодах. Создание в настоящей и предыдущих работах [7–9] лазеров на висмутовых световодах, генерирующих в диапазоне 1300–1550 нм, является прямой демонстрацией наличия реального оптического усиления

на этих длинах волн. Тем самым показана принципиальная возможность применения волоконных световодов, легированных висмутом, в качестве широкополосных усилителей в диапазоне 1300–1550 нм, т. е. одновременно в O-, E-, S- и частично в C-диапазонах окна прозрачности телекоммуникационных световодов.

1. Fujimoto Y., Nakatsuka M. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40**, L279-L281 (2001).
2. Dianov E.M. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6890**, 68900H-1-11 (2008).
3. Dianov E.M., Dvoyrin V.V., Mashinsky V.M., et al. *Quantum Electron.*, **35**, 1083 (2005).
4. Razdobreev I., Bigot L., Pureur V., et al. *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 031103-1-3 (2007).
5. Dianov E.M., Shubin A.V., Melkumov M.A., et al. *J. Opt. Soc. Am. B*, **24**, 1749 (2007).
6. Dvoirin V.V., Mashinsky V.M., Dianov E.M. *IEEE J. Quantum Electron.*, **44**, 834, (2008).
7. Dianov E.M., Firstov S.V., Khopin V.F., et al., *Quantum Electron.*, **38**, 615 (2008)
8. Bufetov I.A., Firstov S.V., Khopin V.F., et al. *Opt. Lett.*, **33**, 2227 (2008).
9. Dvoirin V.V., Medvedkov O.I., Mashinsky V.M., et al. *Opt. Express*, **16**, 16971 (2008).
10. Dianov E.M., Firstov S.V., Medvedkov O.I., et al. *Techn. Dig. Opt. Fiber Commun. Conf. (San Diego, CA, USA, 2009, OWT3)*.
11. Qiu Y, Shen Y. *Opt. Mater.*, **31**, 223 (2008).
12. Буфетов И.А., Дудин В.В., Шубин А.В. и др. *Квантовая электроника*, **33**, 1035 (2003).