

Висмутовые волоконные лазеры и усилители, работающие в области 1.3 мкм

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

Создан лазер на легированном висмутом волоконном световоде, генерирующий на длинах волн, лежащих во втором окне прозрачности волоконных световодов на основе кварцевого стекла. Показано, что фосфорогерманосиликатные световоды, легированные висмутом и не содержащие алюминий, при накачке на длинах волн в областях 800 и 1200 нм имеют полосу усиления 1275–1375 нм.

Ключевые слова: висмутовый лазер, волоконный лазер, волоконный усилитель, волоконная оптика.

Исследование природы широкополосной ИК люминесценции, обнаруженной сравнительно недавно в легированных висмутом стеклах и волоконных световодах (см. [1], а также обзор [2] и ссылки в нем), представляет значительный научный интерес, поскольку до настоящего времени нет удовлетворительной модели связанного с висмутом активного центра (висмутовый центр (ВЦ)). Кроме того, коррелирующая с подобными исследованиями задача создания оптических усилителей в диапазоне длин волн второго окна прозрачности волоконных световодов на основе кварцевого стекла (1260–1360 нм) и в более длинноволновой области имеет исключительно важное прикладное значение для построения будущих сверхширокополосных систем волоконно-оптической связи.

Реальное оптическое усиление (а именно превышение усиления над потерями) в легированном висмутом стекле до настоящего времени было продемонстрировано только в спектральном диапазоне 1.15–1.215 мкм, в котором излучают лазеры на алюмосиликатных волоконных световодах, легированных висмутом (далее – ASB-световоды) [3], в том числе и с достаточно высокой выходной мощностью [4]. В настоящей работе исследовались возможности смещения полосы усиления легированных висмутом стекол и волоконных световодов на их основе дальше в ИК область – в полосу длин волн 1260–1700 нм, которые используются сейчас лишь частично, но в перспективе могут применяться в сверхширокополосных волоконных системах связи.

В ASB-световодах, в которых до настоящего времени и наблюдалась лазерная генерация, спектр люминесценции охватывает диапазон длин волн 1000–1300 нм (рис.1, кривая 1). Для дальнейшего продвижения в ИК область спектра в качестве активной среды (и сердцевины волоконного световода) нами были выбраны фосфорогерманосиликатные стекла, легированные висмутом

(PGSB) и не содержащие оксида алюминия. Заготовки для PGSB-световодов изготавливались по MCVD-технологии. Массовая концентрация висмута была ниже порога регистрации на сканирующем электронном микроскопе JSM 5910LV с рентгеновским спектроанализатором (Oxford Instruments), составляющего 0.1 %. Вытянутые из заготовок одномодовые световоды имели диаметр сердцевины 4.5 мкм и диаметр поля моды 4.9 мкм на длине волны 1.3 мкм.

ИК люминесценция наблюдалась как в заготовках из стекла PGSB, так и в вытянутых из них волоконных световодах при оптической накачке на длине волны 808 или 1058 нм, причем спектры люминесценции заготовок и волоконных световодов практически не отличались друг от друга (рис.1, кривые 2, 4). Видно, что при накачке на $\lambda_p = 1058$ нм спектр люминесценции PGSB-световодов сдвинут в ИК область существенно дальше, чем спектр ASB-световодов. Спектры поглощения PGSB-световодов также существенно отличаются от спектров поглощения ASB-световодов (рис.2), которые, как известно,

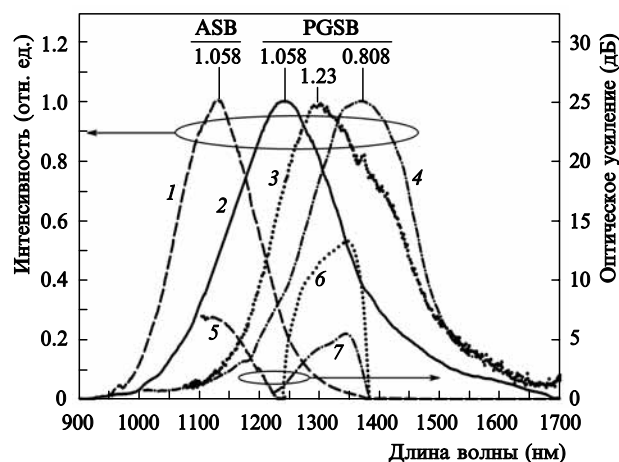


Рис.1. Спектры люминесценции легированных висмутом ASB- и PGSB-световодов при оптической накачке излучением с различными длинами волн (1–4) (длины волн накачки указаны над кривыми и даны в мкм); 5–7 – спектры усиления в ASB-световоде (5 – длина световода $L = 20$ м, $\lambda_p = 1058$ нм) и PGSB-световодах (6 – $L = 30$ м, $\lambda_p = 1230$ нм; 7 – $L = 13$ м, $\lambda_p = 808$ нм). Мощность накачки во всех случаях равна 50 мВт.

Е.М.Дианов, С.В.Фирстов, 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

Поступило в редакцию 3 июня 2008 г.

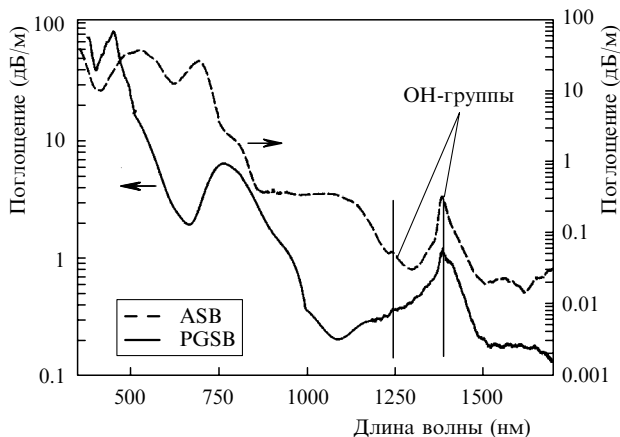


Рис.2. Оптические потери в волоконных ASB- и PGSB-световодах, легированных висмутом.

характеризуются наличием полос поглощения на 500, 700 и 800 нм, а также полосой поглощения в области 1000 нм. В PGSB-световодах полосы поглощения на 500 и 700 нм в явном виде отсутствуют, но существуют на 450, 800 и 950 нм; есть также сложная полоса поглощения в области 1100–1500 нм, которая, очевидно, включает в себя и поглощение присутствующих в сердцевине световода групп ОН на ~ 1240 и ~ 1400 нм. Значительный вклад в поглощение в данной полосе вносят, по-видимому, и ВЦ, поэтому при накачке в эту полосу также должна наблюдаться их ИК люминесценция. И действительно, при накачке на длине волны 1230 нм нами наблюдалась широкополосная люминесценция как в заготовках, так и в полученных из них волоконных световодах в полосе 1260–1460 нм (см. рис. 1, кривая 3).

Была измерена динамика релаксации люминесценции ВЦ в PGSB-световодах на длине волны 1300 нм при накачке на $\lambda_p = 808$ нм. Затухание люминесценции после выключения накачки с достаточной точностью описывалось одной экспонентой с временем затухания около 600 мкс. Отметим, что кривая спада люминесценции на 1300 нм в этом световоде не содержала быстрой компоненты (с временем релаксации не более 5 мкс), как, например, в алюмогермано-силикатных световодах, легированных висмутом [5]. Нами были измерены спектры оптического усиления (on/off) слабого сигнала в полосе 1100–1400 нм в PGSB-световодах и для сравнения – в ASB-световодах (рис. 1, кривые 5–7).

Полученные данные позволили создать висмутовый волоконный лазер на PGSB-световоде. Лазер был собран по стандартной схеме (см., напр., [4]). В качестве накачки использовалось излучение одномодового волоконного лазера на длине волны 1230 или 1205 нм, которое вводилось в сердцевину PGSB-световода. Источником накачки служил волоконный ВКР-лазер ($\lambda_p = 1230$ нм, [6]) или уже известный висмутовый волоконный лазер на ASB-световоде с длиной волны генерации 1205 нм [4]. В качестве активной среды для исследуемого висмутового волоконного лазера использовался отрезок PGSB-световода длиной 30 м с приваренными к нему волоконными брэгговскими решетками показателя преломления, служившими зеркалами. Во всех экспериментах одна из решеток имела коэффициент отражения, близкий к 100 %, а другая (выходная) – 50 %.

В трех схемах волоконных лазеров, различающихся резонансными длинами волн брэгговских решеток и дли-

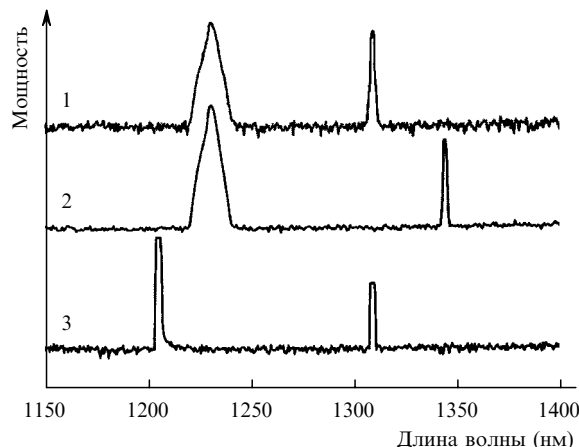


Рис.3. Оптические спектры излучения на выходе висмутовых волоконных лазеров при генерации на длине волны $\lambda_g = 1310$ нм и накачке на $\lambda_p = 1230$ нм (лазер 1), $\lambda_g = 1345$ нм и $\lambda_p = 1230$ нм (2) и $\lambda_g = 1310$ нм и $\lambda_p = 1205$ нм (3).

нами волн накачки, нами наблюдалась генерация лазерного излучения в полосе усиления PGSB-световода (рис. 3). В лазере 1 накачкой служило излучение на 1230 нм, а генерация наблюдалась на 1310 нм. Пороговая мощность накачки P_{th} составляла около 150 мВт. Дифференциальная эффективность генерации η (далее – просто эффективность) по отношению к поглощенной мощности составляла $\sim 3.2\%$ при комнатной температуре и мощности накачки $P_p < 1$ Вт. Оказалось, что эффективность лазера на PGSB-световоде существенно зависит от температуры световода (как и в случае ASB-световодов [4, 7]) и от мощности накачки. При охлаждении активного PGSB-световода до температуры 77 К при $P_p < 1$ Вт η повышалась до 5.4 %, а P_{th} снижалась до 100 мВт. При более высоких мощностях накачки эффективность лазера росла и при $P_p = 6$ Вт достигала 19 % ($T = 300$ К) и 29 % ($T = 77$ К), т.е. наблюдалась нелинейная зависимость мощности лазерного излучения от мощности накачки. Максимальная выходная мощность лазера P_{max} составляла 400 мВт ($T = 300$ К) и 1.6 Вт ($T = 77$ К). Причиной такого роста η с увеличением мощности накачки является то, что частотный сдвиг между излучением накачки и генерации в лазере 1 соответствовал максимальному значению коэффициента ВКР-усиления в световодах на основе плавного кварца (в данном случае – 490 см^{-1}). И при высоких мощностях накачки ВКР-усиление существенно влияло на процесс генерации. Такой вывод сделан на основании выполненного нами численного моделирования работы висмутового лазера с учетом ВКР-усиления, подобного проведенному в [4].

Чтобы резко уменьшить влияние ВКР-усиления в световоде, мы увеличили сдвиг между частотами накачки ($\lambda_p = 1230$ нм) и генерации ($\lambda_g = 1345$ нм, лазер 2). В этом случае частотный сдвиг между излучением лазера и накачкой достигал 700 см^{-1} , что более чем на порядок снижало коэффициент ВКР-усиления в световоде. Кроме того, длина волны 1345 нм соответствовала максимуму коэффициента усиления висмутового световода (см. рис. 1, кривая 6). В схеме лазера 2 наблюдалась линейная зависимость выходной мощности висмутового лазера от мощности накачки во всем исследованном диапазоне P_p . Эффективность висмутового лазера в такой схеме оказалась существенно ниже и при $T = 300$ К составила 0.8 %, P_{th} равнялась ~ 200 мВт, а P_{max} была равна 30 мВт при

$P_p = 3.7$ Вт. Интересно отметить, что, в отличие от предыдущего случая, эффективность лазера при охлаждении до $T = 77$ К не повысилась, а понизилась до 0.6 % с возрастанием P_{th} до 350 мВт.

Мы исследовали также возможность использования более коротковолнового излучения для накачки висмутового лазера на PGSB-световоде. В лазере 3 для накачки использовалось излучение висмутового лазера на ASB-световоде ($\lambda_p = 1205$ нм), а лазерный резонатор был настроен на длину волны 1310 нм (как в лазере 1). При $T = 300$ К эффективность η составила 1.4 % при $P_{th} \sim 200$ мВт. С охлаждением активного световода до 77 К эффективность лазера возрастала до 5 % при снижении P_{th} до 170 мВт. Мощность накачки лазера 3 не превышала 400 мВт, поэтому P_{max} на 1310 нм составляла 2 мВт ($T = 300$ К) и 6 мВт ($T = 77$ К).

Таким образом, в настоящей работе созданы легированные висмутом волоконные световоды на основе SiO_2 с добавлением германия и фосфора, демонстрирующие ИК люминесценцию и усиление оптических сигналов в диапазоне длин волн второго окна прозрачности. Спектр поглощения таких световодов содержит полосы поглощения на 450, 800 и 950 нм, а также полосу 1100–1500 нм. При накачке на длинах волн 808 и 1230 нм наблюдается on/off-усиление оптических сигналов в диапазоне 1275–1375 нм. Усиление в этой полосе при накачке на 1205 и 1230 нм превышает потери в световоде, что позволило впервые осуществить генерацию висмутовых лазеров в области свыше 1300 нм. Низкая (~ 1 %) эффективность лазеров может объясняться как высоким уровнем нерезонансных оптических потерь в первых эксперименталь-

ных световодах, так и, возможно, диссипацией мощности накачки в самих ВЦ. На сложную природу висмутовых центров указывает существенное изменение эффективности лазера при вариации длин волн накачки и генерации, а также значительное различие в наблюдаемых при этом зависимостях $\eta(T)$ (вплоть до изменения знака эффекта). Демонстрация принципиальной возможности получения на висмутовых световодах реального усиления в спектральном диапазоне, который используется в системах волоконной связи, является существенным продвижением к решению задачи создания эффективных широкополосных оптических усилителей для этой области спектра.

Авторы выражают глубокую благодарность Н.Н. Вечканову, О.И. Медведкову и М.А. Мелькумову за ценные консультации и большую помощь в проведении экспериментов. Работа выполнялась в рамках программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Фемтосекундная оптика и новые оптические материалы».

1. Fujimoto Y., Nakatsuka M. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40**, L279 (2001).
2. Dianov E.M. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6890**, 68900H (2008).
3. Дианов Е.М., Двойрин В.В., Машинский В.М., Умников А.А., Яшков М.В., Гурьянов А.Н. *Квантовая электроника*, **35**, 1083 (2005).
4. Dianov E.M., Shubin A.V., Melkumov M.A., Medvedkov O.I., Bufetov I.A. *J. Opt. Soc. Am. B*, **24**, 1749 (2007).
5. Firstov S.V., Bufetov I.A., Khopin V.F., Gur'yanov A.N., Dianov E.M. *Book of Abstracts 17th Intern. Laser Phys. Workshop (LPHYS'08)* (Trondheim, Norway: NTNU, 2008, p. 528).
6. Bufetov I.A., Bubnov M.M., Larionov Y.V., et al. *Laser Phys.*, **13**, 234 (2003).
7. Mashinsky V.M., Dvoyrin V.V., Dianov E.M. *Tech. Dig. Opt. Fiber Commun. Conf.* (San Diego, CA, USA, 2008, OThN1).