

## 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 фосфорogerманосиликатные 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 (висмутый 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 алмосиликатных 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 фосфорogerманосиликатные 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,

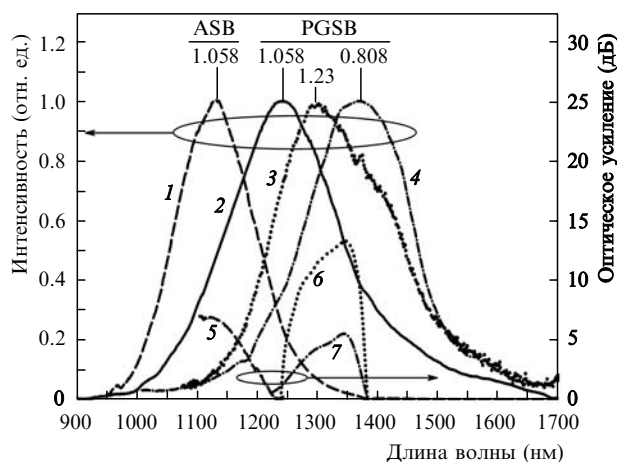


Рис.1. Спектры люминесценции легированных висмутом ASB- и PGSB-световодов при оптической накачке излучением с различными длинами волн (1–4) (длины волн накачки указаны над кривыми и даны в мкм); 5–7 – спектры усиления в ASB-световоде (5 – длина световода  $L = 20$  м,  $\lambda_p = 1058$  нм) и PGSB-световодах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

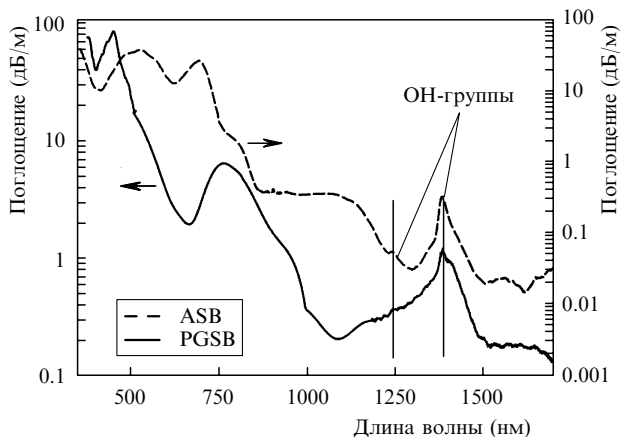


Рис.2. Оптические потери в волоконных ASB- и PGSB-световодах, легированных висмутом.

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  $\sim 1240$  и  $\sim 1400$  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-

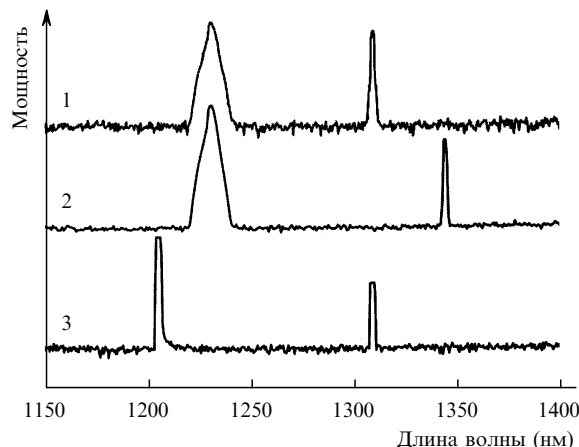


Рис.3. Оптические спектры излучения на выходе висмутовых волоконных лазеров при генерации на длине волны  $\lambda_g = 1310$  нм и накачке на  $\lambda_p = 1230$  нм (лазер 1),  $\lambda_g = 1345$  нм и  $\lambda_p = 1230$  нм (2) и  $\lambda_g = 1310$  нм и  $\lambda_p = 1205$  нм (3).

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  $\eta$  (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  $\eta$  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  $\eta$  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 –  $490 \text{ см}^{-1}$ ). 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  $700 \text{ см}^{-1}$ , 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  $\sim 200$  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  $\eta$  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  $\text{SiO}_2$  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 ( $\sim 1$  %) 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).