

# Лазер на германосиликатном волоконном световоде, легированном висмутом, с выходной мощностью 20 Вт на длине волны 1460 нм

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

*Впервые в мире создан непрерывный висмутовый волоконный лазер на световоде из кварцевого стекла, легированного висмутом и солегированного германием, с выходной мощностью более 20 Вт на длине волны 1460 нм и оптическим КПД 50%. Лазер генерирует на переходе между уровнями энергии висмутового активного центра, ассоциированного с кремнием. Введение небольшого (~5 мол. %) количества германия в сердцевину световода из чистого кварцевого стекла, легированного висмутом, практически не изменяет спектр люминесценции световода, но снижает уровень оптических потерь, ограничивающих эффективность лазера.*

**Ключевые слова:** висмут, волоконный лазер, висмутовый волоконный световод.

Висмутные волоконные лазеры способны генерировать излучение в диапазоне 1150–1550 нм (см. обзор [1] и ссылки в нем). Этот диапазон длин волн попадает в промежуток между полосами генерации иттербиевых и эрбиевых волоконных лазеров, что определяет круг возможных применений висмутовых лазеров. Непрерывные висмутные волоконные лазеры на длинах волн 1160, 1270 и 1330 нм с выходной мощностью ~10 Вт были продемонстрированы ранее [2–4]. В более длинноволновом диапазоне (1400–1500 нм) выходная мощность висмутовых лазеров до настоящего времени не превышала 2 Вт [4]. Цель настоящей работы заключалась в создании мощного эффективного висмутового лазера, работающего в области длин волн около 1460 нм. Некоторые результаты работы были представлены в [5].

Наиболее интенсивная полоса люминесценции (около 1400 нм) наблюдается в легированных висмутом световодах из чистого кварцевого стекла (ВКС) и в германосиликатных световодах (ВГСС). Поэтому в настоящей работе свойства ВКС, изготовленного по порошковой технологии и исследованного в [6], сравнивались со свойствами ВГСС, изготовленного по МСVD технологии. Оба световода вытягивались из преформ при температуре  $T \approx 2000^\circ\text{C}$  и имели диаметр 125 мкм, концентрация висмута в них не превышала порога чувствительности нашей аппаратуры (0.02 ат. %). На рис. 1 приведены контурные графики зависимостей интенсивности люминесценции  $I_{lum}$  от длин волн возбуждения ( $\lambda_{ex}$ ) и эмиссии ( $\lambda_{em}$ ) для этих световодов в диапазоне 450–1600 нм. Условия измерения спектров аналогичны приведенным в [6]. Пики люминесценции А, А1, А2, В и В1 на рис. 1,а при-

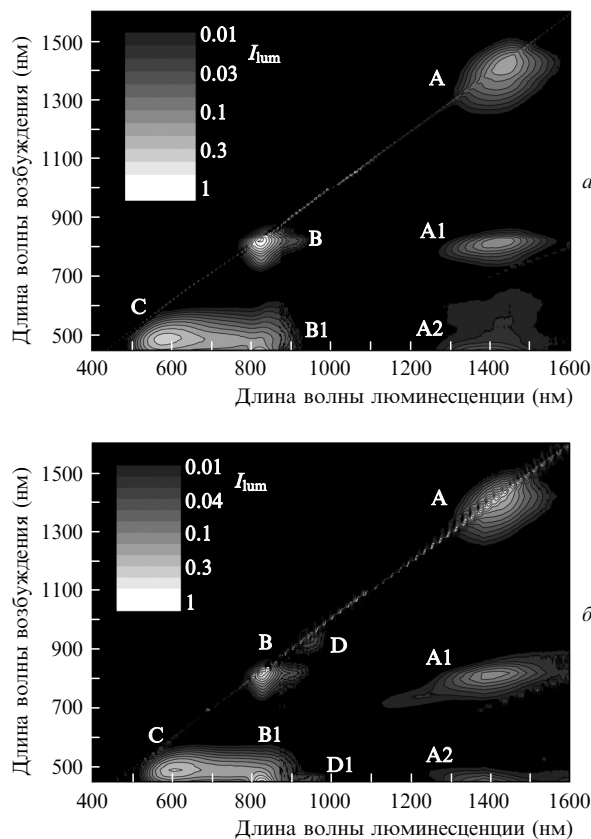


Рис. 1. Контурные графики  $I_{lum}(\lambda_{em}, \lambda_{ex})$  для ВКС [6] (а) и ВГСС (б).

надлежат ИК висмутовым активным центрам (ВАЦ), тогда как пик С отвечает люминесценции ионов  $\text{Bi}^{2+}$  [7–9].

В ВГСС, содержащем 5 мол. %  $\text{GeO}_2$ , спектр люминесценции (рис. 1,б) практически не изменяется по сравнению со спектром ВКС. Но кроме уже существующих пиков (рис. 1,а) в спектре ВГСС появляются дополнительные максимумы, D ( $\lambda_{ex}^{\max} = 925$  нм,  $\lambda_{em}^{\max} = 955$  нм) и D1 (460 нм, 955 нм) (рис. 1,б). Здесь  $\lambda_{ex}^{\max}$  и  $\lambda_{em}^{\max}$  – длины волн

С.В.Фирстов, А.В.Шубин, М.А.Мелькумов, И.А.Буфетов, О.И.Медведков, Е.М.Дианов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: shubin@fo.gpi.ru, iabuf@fo.gpi.ru  
В.Ф.Хопин, А.Н.Гурьянов. Институт химии высокочистых веществ РАН, Россия, 603600 Н.Новгород, ул. Троицына, 49

возбуждения и эмиссии, соответствующие максимуму люминесценции. Появление максимумов D и D1 можно объяснить формированием нового типа висмутового активного центра, образующегося в ВГСС в результате введения германия.

На оптические свойства ВАЦ в стекле сердцевинны световода влияют не только состав стекла, но и его окислительно-восстановительные свойства, наличие окислительной или восстановительной атмосферы на различных технологических этапах, температурные режимы, скорость охлаждения стекла (особенно процесс вытяжки световода) и т. п. Например, в некоторых случаях люминесцентные свойства преформы и световода, вытянутого из этой же преформы, существенно различаются [10, 11]. Если же технологические условия изготовления световодов отличающихся составов близки, то можно считать, что их оптические свойства определяются, главным образом, составом сердцевинны световода. Только с такой точки зрения здесь можно говорить о ВАЦ, ассоциированных с кремнием (ВАЦ-Si, которым принадлежат пики А и В) в ВКС и ВГСС, или с германием (ВАЦ-Ge, к которым относятся пики D) в ВГСС.

Таким образом, как ВКС, так и ВГСС имеют пики люминесценции в области около 1400 нм (причем в обоих световодах это люминесценция ВАЦ-Si) и могут рассматриваться в качестве кандидатов на роль лазерной среды. В световодах таких составов ранее была продемонстрирована принципиальная возможность получения генерации на переходе ВАЦ-Si, соответствующем пику А на рис.1 [6, 12, 13]. Однако, как показали наши

измерения, ВГСС имеет более низкий уровень неселективных оптических потерь (рис.2). Что еще более важно, под действием излучения накачки с  $\lambda_{ex} = 1340$  нм световоды ВКС и ВГСС просветляются, причем в ВГСС оптические потери снижаются примерно в 60 раз, а в ВКС – в 7 раз (рис.2). Причиной этого является, по-видимому, как собственно солегирование германием, так и снижение уровня легирования висмутом ВГСС по сравнению с ВКС (судя по амплитудам пиков поглощения на длинах волн 425, 800 и 1410 нм). Поэтому для мощного лазера на 1460 нм был выбран ВГСС с длиной волны отсечки второй моды 1.2 мкм и разностью показателей преломления сердцевинны и оболочки  $7 \times 10^{-3}$ .

Схема лазера приведена на рис.3. Низкая концентрация висмута в сердцевинне активного световода не позволяла использовать накачку по оболочке, поэтому накачка осуществлялась в сердцевинну активного световода. В качестве источника накачки использовался однокаскадный рамановский лазер, работающий на 1340 нм, который в свою очередь накачивался с помощью иттербиевого лазера на 1137 нм. На выходе рамановского лазера мощность излучения составляла 43 Вт. Резонатор висмутового лазера состоял из активного световода длиной 93 м и брэгговской решетки с коэффициентом отражения примерно 100%. Выходным зеркалом лазера служил сколотый торец активного световода. Зависимость выходной мощности висмутового лазера от введенной мощности накачки приведена на рис.4. Дифференциальная эффективность такого лазера составляла 58% при мощности накачки менее 15 Вт. С ростом уровня накачки данная зависимость отклонялась от линейной, что связано, по-видимому, с нагревом световода и с

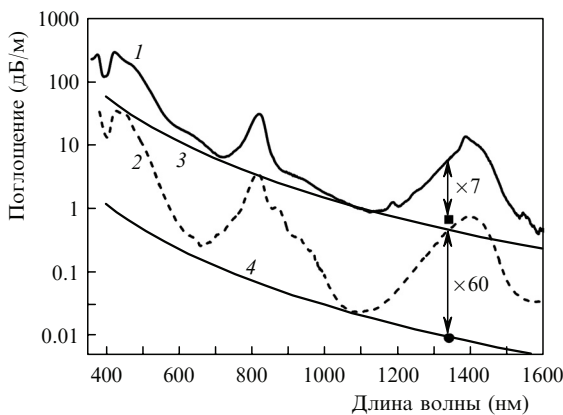


Рис.2. Спектры поглощения ВКС (1) и ВГСС (2). Точками обозначены уровни ненасыщающихся потерь в световодах на длине волны 1340 нм; 3, 4 – уровни спектрально-неселективных потерь.

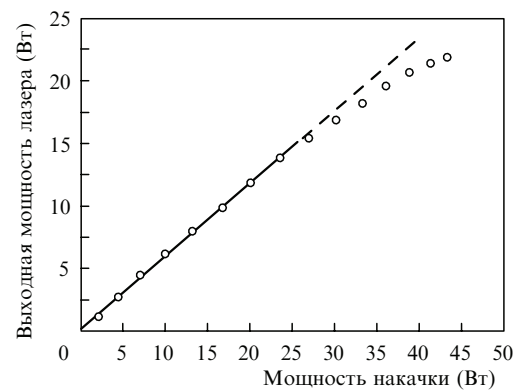


Рис.4. Зависимость выходной мощности висмутового волоконного лазера на  $\lambda = 1460$  нм от мощности накачки на  $\lambda = 1340$  нм.

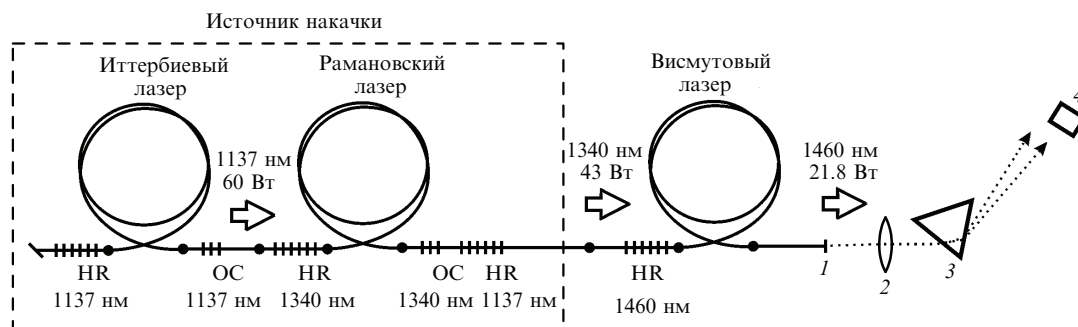


Рис.3. Схема висмутового волоконного лазера, работающего на длине волны 1460 нм: 1 – выходной торец световода лазера, выполняющий роль выходного зеркала; 2 – коллимирующий объектив; 3 – стеклянная призма; 4 – измеритель мощности; HR и ОС – глухая и выходная брэгговские волоконные решетки соответственно

нелинейными процессами (спектр генерации лазера уширялся с увеличением выходной мощности). Тем не менее оптический КПД висмутового лазера составил 50 %. Максимальная выходная мощность лазера достигала 21.8 Вт. Отметим, что в процессе наших экспериментов никакие специальные меры для охлаждения лазерного световода не принимались.

Таким образом, в настоящей работе показано, что введение небольшой (~5 мол. %) добавки оксида германия в сердцевину ВКС не нарушает в ней систему ВАЦ-Si. Солегирование германием позволяет более эффективно (по сравнению с ВКС [6]) использовать ВАЦ-Si для генерации в диапазоне около 1400 нм. Впервые продемонстрирован эффективный волоконный висмутовый лазер на длине волны 1460 нм с выходной мощностью более 20 Вт и рекордным (для генерации при комнатной температуре) оптическим КПД 50 %.

1. Bufetov I.A., Dianov E.M. *Laser Phys. Lett.*, **6**, 487 (2009).
2. Dianov E.M., Shubin A.V., Melkumov M.A., Medvedkov O.I., Bufetov I.A. *J. Opt. Soc. Am. B*, **24**, 1749 (2007).
3. Bufetov I.A., Shubin A.V., Firstov S.V., Melkumov M.A., Khopin V.F., Guryanov A.N., Dianov E.M., in *Proc. CLEO/Europe 2011* (Munich, 2011, paper CJ8.2 THU).
4. Dianov E.M., Melkumov M.A., Firstov S.V., Shubin A.V., Medvedkov O.I., Bufetov I.A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7580**, 755014-1 (2010).
5. Firstov S.V., Shubin A.V., Khopin V.F., Bufetov I.A., Guryanov A.N., Dianov E.M., in *Proc. CLEO/Europe 2011* (Munich, 2011, paper PDA7. TUE).
6. Bufetov I.A., Melkumov M.A., Firstov S.V., Shubin A.V., Semenov S.L., Vel'miskin V.V., Levchenko A.E., Firstova E.G., Dianov E.M. *Opt. Lett.*, **36**, 166 (2011).
7. Srivastava A.M. *J. Luminesc.*, **78**, 239 (1998).
8. Gaft M., Reisfeld R., Panczer G., Boulon G., Saraidarov T., Erlich S. *Opt. Mater.*, **16**, 279 (2001).
9. Буфетов И.А., Семенов С.Л., Вельмискин В.В., Фирстов С.В., Буфетова Г.А., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **40**, 639 (2010).
10. Razdobreev I., Bigot L., Pureur V., Favre A., Bouwmans G., Douay M. *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 031103 (2007).
11. Wu J., Chen D., Wu X., Qiu J. *Chinese Opt. Lett.*, **9**, 071601 (2011).
12. Dianov E.M., Firstov S.V., Medvedkov O.I., Bufetov I.A., Khopin V.F., Guryanov A.N. *Proc. Conf. OFC-2009* (San Diego, USA, 2009, paper OWT3).
13. Zlenko A.S., Dvoyrin V.V., Mashinsky V.M., Denisov A.N., Iskhakova L.D., Mayorova M.S., Medvedkov O.I., Semenov S.L., Vasiliev S.A., Dianov E.M. *Opt. Lett.*, 2011 (to be published).1