

# Висмутовый волоконный суперлюминесцентный источник ИК излучения для области длин волн 1700–1750 нм

С.В.Фирстов, К.Е.Рюмкин, В.Ф.Хопин, С.В.Альшев,  
М.А.Мелькумов, А.Н.Гурьянов, Е.М.Дианов

*Сообщается о реализации первого суперлюминесцентного волоконного источника (СВИ) ИК излучения для спектральной области 1700–1750 нм на основе высокогерманатного световода, легированного висмутом. Основные выходные характеристики СВИ: центральная длина волны 1730 нм, ширина полосы выходного излучения 50 нм при выходной мощности  $\sim 7$  мВт, оптическая эффективность  $\sim 1\%$ .*

**Ключевые слова:** висмут, суперлюминесценция, световод, ИК излучение.

## 1. Введение

Волоконные световоды, легированные активными ионами, являются уникальными лазерно-активными средами, на базе которых могут быть реализованы оптические устройства для различных практических применений. Одними из таких устройств являются суперлюминесцентные волоконные источники (СВИ). Интерес к СВИ постоянно растет, что обусловлено широким кругом их потенциальных применений (волоконно-оптические гироскопы в аэрокосмической отрасли [1], когерентная томография в медицине [2] и др.), а также преимуществами СВИ (стабильность выходных параметров излучения, низкая чувствительность к температуре и магнитному полю и др.) перед суперлюминесцентными источниками других типов.

В настоящее время широко используются СВИ на волоконных световодах с редкоземельными ионами (Er, Tm, Ho и т.д.) [3]. Появление новых и развитие существующих научных и прикладных направлений стимулирует поиск активных сред для разработки СВИ в ранее недоступных спектральных диапазонах. Это стало причиной создания СВИ на световодах нового типа, в частности на световодах, легированных висмутом. К настоящему времени разработаны СВИ, работающие в областях длин волн около 1340 нм [4] и около 1440 нм [5], с использованием соответственно фосфоро- и германосиликатных (с низким содержанием германия) световодов. Оптическая эффективность и максимальная выходная мощность СВИ на 1440 нм достигали  $\sim 30\%$  и 82 мВт, а у СВИ на 1340 нм – около 10% и 48 мВт соответственно. Ширина спектра

выходного излучения СВИ в обоих случаях составляла 26–28 нм.

В настоящей работе мы сообщаем о реализации нового висмутового суперлюминесцентного источника ИК излучения в спектральной области 1700–1750 нм.

## 2. Эксперимент

В качестве активной среды для СВИ использовался световод с высоким содержанием германия на кварцевом стекле, легированном висмутом, на основе которого уже созданы оптический усилитель и семейство лазеров в диапазоне длин волн 1625–1775 нм [6–9]. Заготовка висмутового световода была изготовлена MCVD методом. Концентрация  $\text{GeO}_2$  в сердцевине составляла  $\sim 50$  мол. %, а концентрация  $\text{Bi}$  – менее 0.1 мас. %. Из полученной заготовки был вытянут одномодовый световод с внешним диаметром 125 мкм и длиной волны отсечки около 1.1 мкм, диаметр сердцевины световода составлял примерно 2 мкм.

Спектр поглощения такого световода (рис.1, кривая 1) состоит из двух полос на 1400 и 1650 нм, которые, как ранее было установлено, относятся к висмутовым центрам с различными полосами люминесценции с максимумами

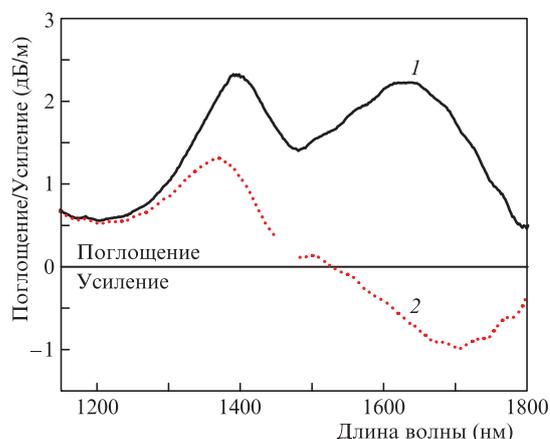


Рис.1. Спектры поглощения активного световода в отсутствие накачки (1) и при накачке излучением на 1460 нм (2).

**С.В.Фирстов.** Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; Институт физики и химии, Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Россия, 430005 Саранск, ул. Большевикская, 68; e-mail: fir@fo.gpi.ru  
**К.Е.Рюмкин, С.В.Альшев, М.А.Мелькумов, Е.М.Дианов.** Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38

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

Поступила в редакцию 11 июля 2016 г.

на 1430 и 1700 нм. Детальная информация об оптических свойствах световодов такого типа опубликована в работах [10, 11]. Следует отдельно отметить тот факт, что данный тип световодов имеет низкий уровень чувствительности к ионизирующему излучению [12], что позволяет использовать такие световоды и устройства на их основе при разработке космической техники.

Для получения люминесценции/усиления световод накачивался излучением с длиной волны свыше 1460 нм, попадающим в длинноволновую полосу поглощения. На рис.1 показан также спектр поглощения, измеренный в световоде при его накачке излучением висмутового волоконного лазера с длиной волны 1460 нм (кривая 2). Мощность излучения накачки составляла 300 мВт и выбиралась такой, чтобы обеспечить предельную инверсную населенность по всей длине активного световода. На представленном спектре, кроме области поглощения, наблюдается и область оптического усиления. Видно, что усиление в таких высокогерманатных световодах с висмутом возникает в области длин волн от 1550 до более чем 1800 нм. Максимальное усиление при длине волны накачки световода 1460 нм излучением мощностью около 300 мВт составляло 1 дБ/м на  $\lambda = 1700$  нм.

Полученный световод был использован для создания СВИ, реализованного по однопроходной схеме со встречной накачкой (рис.2). Длина активного световода составляла  $\sim 60$  м. Источником излучения накачки служил волоконный Er–Yb-лазер с длиной волны 1568 нм. Излучение накачки вводилось в сердцевину активного световода через спектрально-селективный ответвитель 1550/1700 нм. На другом конце активного световода был сделан косой скол торца для предотвращения обратного отражения. На выходе устройства устанавливался оптический волоконный изолятор, препятствующий возникновению лазерной генерации и уменьшению воздействия обратного сигнала на параметры выходного сигнала СВИ. Место сварного соединения активного световода со стандартным световодом типа SMF-28 (потери на соединении составляли  $\sim 1$  дБ) отмечено на рис.2. Остальные соединения световодов на рис.2 не показаны, поскольку оптические потери на них были пренебрежимо малы (менее 0.1 дБ).

Регистрация спектров выходного излучения СВИ осуществлялась с помощью спектроанализатора Agilent (в области длин волн до 1700 нм) и спектрофлуориметра FLSP920 (в области 1700 – 1800 нм). Выходная мощность измерялась оптическим измерителем мощности Ophir Nova II с сенсором 3A-FS. Все измерения проводились при комнатной температуре.

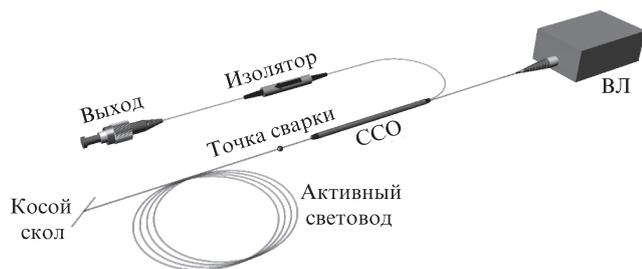


Рис.2. Схема суперлюминесцентного источника ИК излучения на основе висмутового световода (ВЛ – волоконный Er–Yb-лазер; ССО – спектрально-селективный ответвитель).

### 3. Результаты эксперимента

Спектры излучения СВИ при различных мощностях излучения (от 0.5 до 7 мВт) показаны на рис.3. Следует отметить их колоколообразную форму, которая с хорошей точностью аппроксимируется гауссовой кривой (функция Гаусса также представлена на рис.3). Видно, что максимум выходного излучения, расположенный на  $\sim 1730$  нм, как и его средневзвешенная длина волны, слабо зависит от мощности накачки. Иная ситуация с шириной спектра излучения СВИ: при увеличении мощности накачки спектр его излучения сужается. Зависимость ширины спектра выходного излучения СВИ от введенной мощности накачки показана на рис.4. Ширина спектра излучения СВИ при максимальной выходной мощности составляет  $\sim 50$  нм, что почти в два раза больше ширины спектров ранее разработанных СВИ на висмутовых световодах.

На рис.5 показана зависимость выходной мощности излучения СВИ от введенной мощности накачки. Видно, что мощность выходного излучения СВИ растет линейно с мощностью накачки. Максимальная достигнутая мощность составила 7 мВт при мощности накачки 650 мВт, пороговая мощность в этом случае равна примерно 50 мВт.

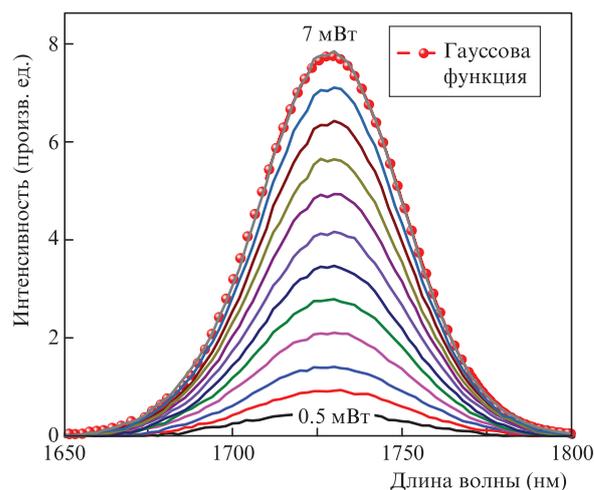


Рис.3. Спектры излучения СВИ при выходных мощностях от 0.5 до 7 мВт.

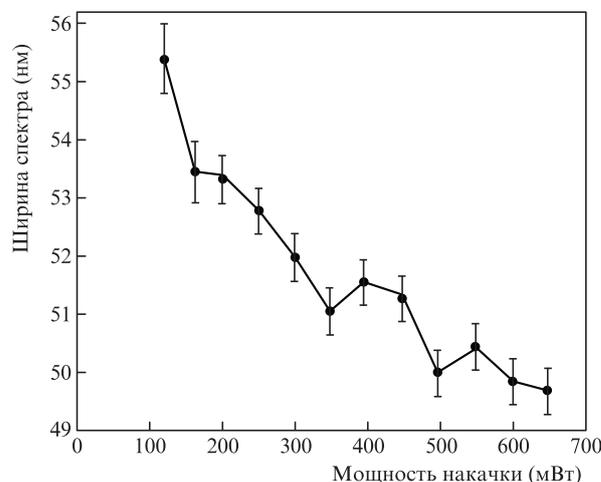


Рис.4. Зависимость ширины спектра выходного излучения СВИ от введенной мощности накачки.

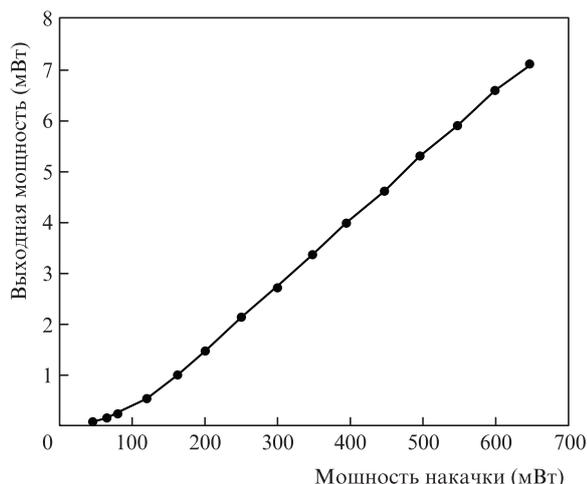


Рис. 5. Зависимость выходной мощности излучения СВЛ от введенной мощности накачки.

Оптическая эффективность такого СВЛ составила примерно 1%. Основной причиной низкой эффективности устройства является высокий уровень непросветленных потерь, обусловленных висмутом [6], на длинах волн сигнала и накачки. Усовершенствование технологии изготовления высокогерманатных световодов с висмутом и поиск оптимального состава стекла сердцевины таких световодов позволят разработать активную среду для СВЛ с улучшенными характеристиками. Необходимость выбора оптимальной длины волны накачки также является важной составляющей повышения эффективности СВЛ.

#### 4. Заключение

Итак, в настоящей работе приведены характеристики созданного суперлюминесцентного источника ИК излучения в области 1700 – 1750 нм на основе высокогерманатного световода, легированного висмутом. В качестве источника излучения накачки использовался волоконный Er–Yb-лазер с длиной волны 1568 нм. Средневзвешенная длина волны выходного излучения СВЛ была равна 1730 нм, максимальная выходная мощность СВЛ достигала ~7 мВт при мощности накачки 650 мВт. Ширина

спектра выходного излучения разработанного СВЛ составляла 50 нм, что примерно вдвое больше, чем у существующих СВЛ на висмутовых световодах.

Важно отметить, что в настоящей работе продемонстрирована одна из возможных конфигураций СВЛ в спектральной области 1700–1750 нм. В зависимости от требований к характеристикам выходного излучения (стабильность средневзвешенной длины волны, ширина спектра и мощность выходного излучения, т.д.) схема СВЛ может быть оптимизирована.

В дальнейших исследованиях будет изучаться стабильность выходных характеристик разработанного СВЛ под действием ионизирующего излучения, что важно для практических задач.

Работа была выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 16-12-10230).

1. Sandoval-Romero G.E. *J. Opt. Technol.*, **74** (8), 573 (2007).
2. Chong S.P., Merkle C.W., Cooke D.F., Zhang T., Radhakrishnan H., Krubitzer L., Srinivasan V.J. *Opt. Lett.*, **40** (21), 4911 (2015).
3. Digonnet M.J.F., in *Rare-Earth-Doped Fiber Lasers and Amplifiers* (Ed. by M.J.F. Digonnet) (Marcel Dekker, 2001, p. 313–337).
4. Рюмкин К.Е., Мелькумов М.А., Шубин А.В., Фирстов С.В., Буфетов И.А., Хопин В.Ф., Гурьянов А.Н., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **44** (7), 700 (2014).
5. Riumkin K.E., Melkumov M.A., Bufetov I.A., Shubin A.V., Firstov S.V., Khopin V.F., Guryanov A.N., Dianov E.M. *Opt. Lett.*, **37**, 4817 (2012).
6. Firstov S.V., Alyshev S.V., Riumkin K.E., Khopin V.F., Guryanov A.N., Melkumov M.A., Dianov E.M. *Sci. Rep.*, **6**, 28939 (2016).
7. Firstov S.V., Alyshev S.V., Riumkin K.E., Melkumov M.A., Medvedkov O.I., Dianov E.M. *Opt. Lett.*, **40**, 4360 (2015).
8. Фирстов С.В., Алышев С.В., Рюмкин К.Е., Хопин В.Ф., Мелькумов М.А., Гурьянов А.Н., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **45** (12), 1083 (2015).
9. Firstov S., Alyshev S., Melkumov M., Riumkin K., Shubin A., Dianov E. *Opt. Lett.*, **39** (24), 6927 (2014).
10. Dianov E.M., Firstov S.V., Khopin V.F., Alyshev S.V., Riumkin K.E., Gladyshev A.V., Melkumov M.A., Vechkanov N.N., Guryanov A.N. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **9728**, 97280U (2016).
11. Фирстова Е.Г., Буфетов И.А., Хопин В.Ф., Вельмискин В.В., Фирстов С.В., Буфетова Г.А., Ницев К.Н., Гурьянов А.Н., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **45** (1), 59 (2015).
12. Firstov S.V., Khopin V.F., Alyshev S.V., Riumkin K.E., Melkumov M.A., Dianov E.M. *Proc. LPHYS'16* (Yerevan, Armenia, 11-15 July, 2016, p. S8.3).