

ВОЛОКОННЫЕ И НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

PACS 42.55.Wd; 42.60.Da; 42.81.Wg

Висмутовый суперлюминесцентный волоконный источник на длину волны 1.34 мкм**К.Е.Рюмкин, М.А.Мелькумов, А.В.Шубин, С.В.Фирстов, И.А.Буфетов, В.Ф.Хопин, А.Н.Гурьянов, Е.М.Дианов**

Впервые создан висмутовый суперлюминесцентный волоконный источник, работающий в области 1.34 мкм. В двухпроходной схеме с усилителем выходная мощность составила 48 мВт при накачке на $\lambda = 1240$ нм. Форма спектра близка к гауссовой, при максимальной мощности ширина спектра на полувывоте составляет 26 нм.

Ключевые слова: висмут, световод, суперлюминесцентный волоконный источник.

Суперлюминесцентные волоконные источники (СВИ) находят широкое применение во многих областях науки и техники: в волоконных оптических гироскопах, в офтальмологии, в оптической рефлектометрии, в оптических телекоммуникациях, в приборах, нуждающихся в сигнале с низкой временной когерентностью при сохранении высокой пространственной когерентности. Требования к СВИ обусловлены областью их применения. Так, для работы точных волоконно-оптических гироскопов необходимо, чтобы ширина выходного спектра СВИ превышала 15 нм, а выходная мощность составляла не менее 10 мВт при достаточно высоком оптическом КПД. Кроме того, при изменении температуры и других внешних факторов сигнал должен обладать стабильной средневзвешенной длиной волны.

Большинству этих характеристик соответствуют суперлюминесцентные волоконные источники, легированные редкоземельными металлами; наиболее распространенными из них являются эрбиевые, иттербиевые, тулиеые и неодимовые [1].

Разработка волоконных широкополосных источников в районе 1.3 мкм затруднена отсутствием редкоземельных элементов, имеющих переходы с высоким коэффициентом усиления в данной области. В этом диапазоне длин волн сообщалось только об одном СВИ на основе фторциконатного (ZBLAN) волоконного световода, легированного празеодимом [2]. Усиленное спонтанное излучение (УСИ) на переходе ${}^1G_4 \rightarrow {}^3H_5$ наблюдалось на длине волны 1.306 мкм при непосредственном возбуждении метастабильного уровня 1G_4 излучением титан-сапфирового лазера на 1.017 мкм. В однопроходной конфигурации выходная мощность СВИ составляла всего 0.166 мВт при мощности накачки 540 мВт. Столь малая эффективность преобразования обусловлена низким квантовым выходом люминесценции (около 3%).

К.Е.Рюмкин, М.А.Мелькумов, А.В.Шубин, С.В.Фирстов, И.А.Буфетов, Е.М.Дианов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: riumkin@fo.gpi.ru
В.Ф.Хопин, А.Н.Гурьянов. Институт химии высокочистых веществ РАН, Россия, 603950, Н.Новгород, ул. Тропина, 49

Поступила в редакцию 30 мая 2014 г., после доработки – 19 июня 2014 г.

Возможным решением проблемы представляются полупроводниковые суперлюминесцентные лазерные диоды, производимые практически на любую длину волны между 0.4 и 2.0 мкм. Однако они имеют ряд недостатков. Это ограниченная выходная мощность, низкая температурная стабильность средневзвешенной длины волны, заметная модуляция спектра излучения, низкий коэффициент преобразования энергии на больших длинах волн, а также остаточная поляризация выходного излучения.

Световоды, легированные висмутом, имеют достаточно высокий КПД и представляются перспективной активной средой для создания СВИ в новых оптических диапазонах. Дополнительным преимуществом является то, что различные матрицы стекла позволяют получать усиление в разных диапазонах длин волн: 1.14–1.22 мкм (алюмосиликатная матрица), 1.25–1.35 мкм (фосфоросиликатная), 1.32–1.55 мкм (германосиликатная) и 1.63–1.77 мкм (силикогерманатная) [3–6].

Первый СВИ на германосиликатном световоде, легированном висмутом, был продемонстрирован в работе [7]. Средневзвешенная длина волны СВИ составляла 1.44 мкм, ширина спектра – 25 нм при выходной мощности 82 мВт, оптический КПД был равен 31%.

В настоящей работе демонстрируются СВИ на фосфоросиликатном волоконном световоде со средневзвешенной длиной волны выходного излучения 1336 нм. Заготовка световода изготовлена методом MCVD, разность показателей преломления сердцевинки и оболочки $\Delta n = 5.5 \times 10^{-3}$, концентрация Вi в сердцевине менее 0.1 мас.%. Длина волны отсечки световода составляет примерно 0.9 мкм. Спектры поглощения и усиления световода изображены на рис.1. Оптическое поглощение слабого сигнала в световоде на длине волны накачки 1240 нм равна 0.6 дБ/м, при мощности сигнала более 50 мВт поглощение падает до 0.09 дБ/м. При накачке на 1240 нм максимальное усиление составляет 0.2 дБ/м на 1320 нм.

СВИ состоит из двух каскадов: источника сигнала и усилителя. Первый каскад построен по двухпроходной схеме со встречной накачкой (рис.2, левая верхняя часть). Выбор схемы обусловлен более высоким КПД и низким порогом УСИ по сравнению с однопроходными СВИ. В качестве источника накачки использовался лазерный диод на 1240 нм с выходной мощностью до 300 мВт. Излучение накачки вводилось в активный световод через спектраль-

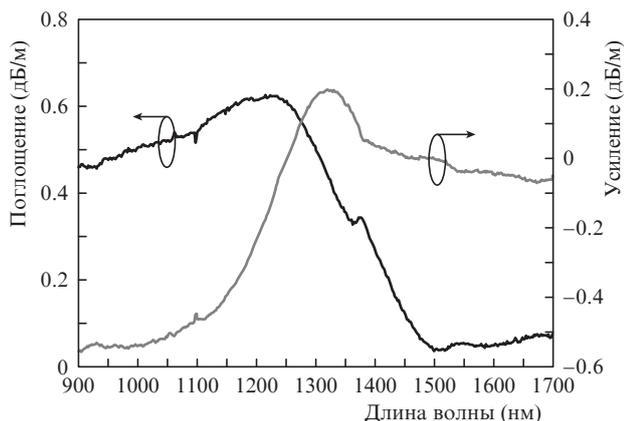


Рис.1. Спектры поглощения и усиления световода.

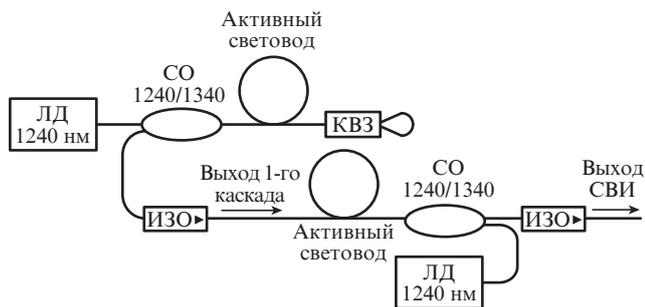


Рис.2. Схема СВИ:
ЛД – лазерный диод; СО – спектральный ответвитель; ИЗО – оптический изолятор; КВЗ – кольцевое волоконное зеркало.

но-селективный ответвитель 1240/1340 нм. Длина активного световода выбиралась такой, чтобы максимизировать эффективность СВИ для заданной мощности накачки, и составляла 150 м. На конце световода находилось кольцевое волоконное зеркало (широкополосный разветвитель 50/50 со сваренными выходными каналами), служившее отражателем. На выходе 1-го каскада для уменьшения действия обратного сигнала был установлен оптический волоконный изолятор.

Спектры выходного сигнала измерялись спектроанализатором Agilent 86140В, а выходная мощность – оптическим тестером EXFO FPM-600.

Спектры выходного сигнала СВИ при различных мощностях накачки показаны на рис.3. При увеличении мощности выходной спектр сужается и средневзвешенная длина волны смещается в длинноволновую область (рис.4). При малых мощностях накачки усиление в световоде мало и, поскольку используется схема со встречной накачкой, на выходе первого каскада присутствует в основном неусиленная люминесценция с небольшого участка активного световода, в котором поглощается большая часть накачки. Пик этой люминесценции приходится на 1.32 мкм и несколько смещен относительно максимума (на 1.3 мкм) люминесценции висмута в фосфоросиликатной матрице за счет перепоглощения. По мере увеличения мощности накачки инверсная населенность достигается на все большей длине световода, появляется УСИ и спектр выходного сигнала смещается вправо в область максимума усиления висмутовых активных центров. При мощности накачки 260 мВт средневзвешенная длина волны стабилизируется и в дальнейшем с ростом мощности практически не меняется. Условный порог возникновения УСИ составляет примерно 150 мВт. Зависимость выходной мощности СВИ от мощности накачки изображена на рис.5.

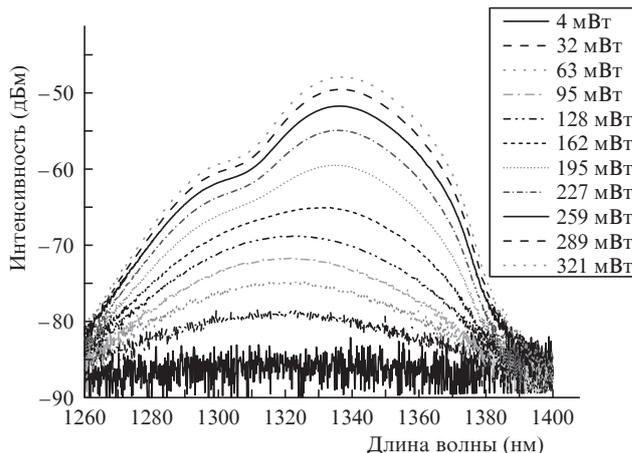


Рис.3. Спектры выходного сигнала первого каскада СВИ при различных мощностях накачки.

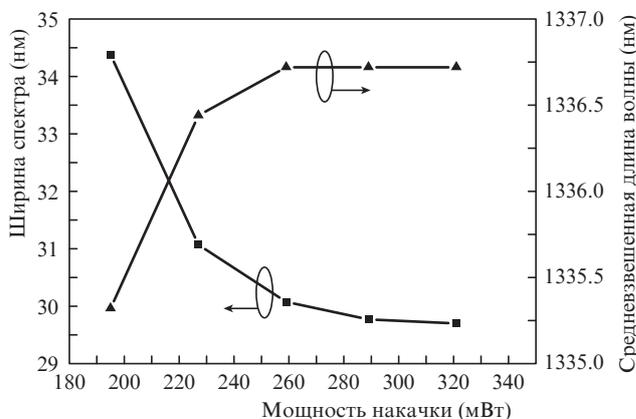


Рис.4. Зависимости ширины $\Delta\lambda_{FWHM}$ и средневзвешенной длины волны выходного спектра первого каскада СВИ от мощности накачки.

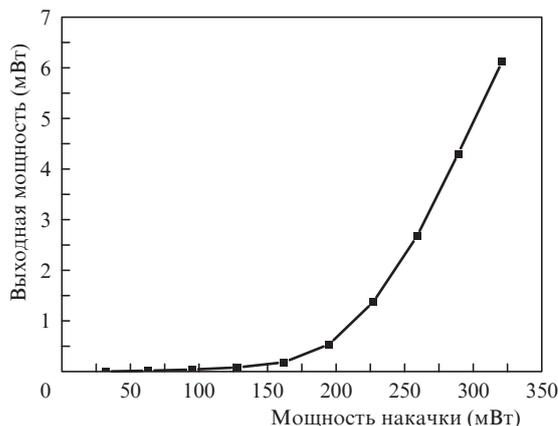


Рис.5. Зависимость мощности выходного сигнала первого каскада СВИ от мощности накачки.

Для достижения более высокой выходной мощности СВИ в схеме использовался дополнительный каскад усиления, который представлял собой активный висмутовый световод длиной 120 м, накачиваемый лазерным диодом на 1240 нм. На выходе каскада для предотвращения возникновения лазерной генерации и уменьшения воздействия обратного сигнала на параметры выходного сигнала СВИ установлен оптический волоконный изолятор.

Спектры выходного сигнала СВИ при различных мощностях накачки второго каскада усиления, а также спектр сигнала на входе в усилитель изображены на рис.6.

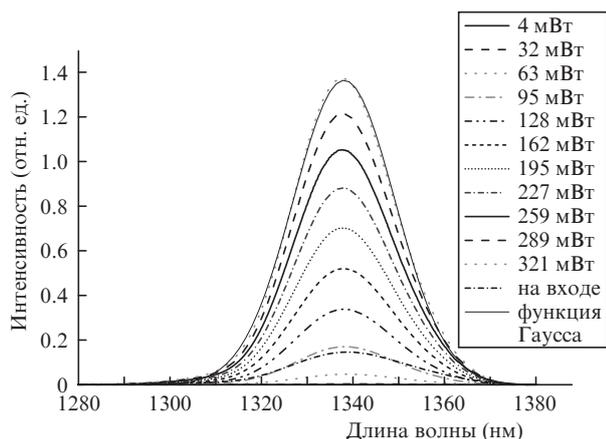


Рис.6. Спектры выходного сигнала СВИ при различных мощностях накачки (спектры для выходного сигнала при мощностях накачки 4 и 32 мВт при данном увеличении практически совпадают с осью абсцисс).

Мощность выходного сигнала СВИ растет линейно с мощностью накачки второго каскада и при мощности его накачки 300 мВт достигает 48 мВт (рис.7). Средневзвешенная длина волны составляет 1336 нм, ширина спектра $\Delta\lambda_{FWHM} \approx 26$ нм (рис.8). При малых мощностях накачки второго каскада в большей части световода инверсная населенность не достигается и излучение первого каскада частично поглощается активными центрами, в результате чего в спектре на выходе остается длинноволновая часть излучения, т. е. пик излучения смещен вправо относительно входного сигнала. Излучение висмутовых активных центров второго каскада при этом заметно меньше, чем проходящее излучение первого каскада. С увеличением мощности накачки инверсная населенность достигается вдоль всего световода, и спектр выходного сигнала смещается влево в область максимума усиления висмута.

Итак, продемонстрирована работа СВИ на активном волоконном световоде, легированном ионами висмута. Средневзвешенная длина волны выходного излучения составляет 1336 нм, ширина спектра на полувысоте – 26 нм при максимальной мощности. Выходная мощность равна 48 мВт при суммарной мощности накачки 600 мВт. Форма спектра близка к гауссовской (аппроксимация спектра функцией Гаусса при мощности накачки 320 мВт представлена на рис.6). Впервые продемонстрирован СВИ, работающий в области второго окна прозрачности (1.3 мкм) оптических волоконных световодов на основе кварцевого стекла, эффективность которого сопоставима с эффективностью широко используемых СВИ на редкоземельных элементах. Следует отметить, что это лишь одна из возможных реализаций СВИ на висмутовом фосфоросиликатном световоде; схему можно оптимизировать в соответствии с требованиями к характеристикам выходного сигнала.

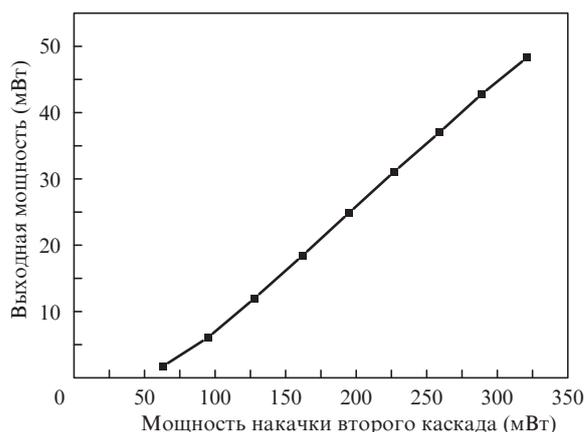


Рис.7. Зависимость мощности выходного сигнала СВИ от мощности накачки.

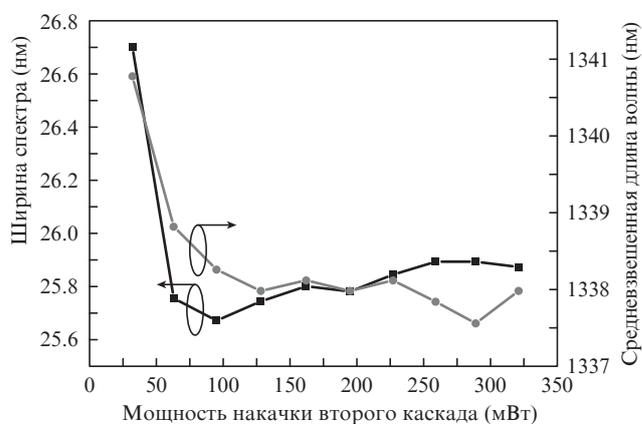


Рис.8. Зависимости ширины $\Delta\lambda_{FWHM}$ и средневзвешенной длины волны выходного спектра СВИ от мощности накачки.

Работа выполнена в рамках программы №24 Президиума РАН и поддержана РФФИ (грант № 13-02-01320А).

1. Digonnet M.J.F. *Rare-Earth-Doped Fiber Lasers and Amplifiers* (New York: Marcel Dekker, Inc., 2001).
2. Ohishi Y., Kanamori T., Takahashi S. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **30**, L1282 (1991).
3. Дианов Е.М., Мелькумов М.А., Шубин А.В., Фирстов С.В., Хопин В.Ф., Гурьянов А.Н., Буфетов И.А. *Квантовая электроника*, **39**, 1099 (2009).
4. Bufetov I.A., Melkumov M.A., Khopin V.F., Firstov S.V., Shubin A.V., Medvedkov O.I., Guryanov A.N., Dianov E. M. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7580**, 758014 (2010).
5. Bufetov I.A., Dianov E.M. *Laser Phys. Lett.*, **6**, 487 (2009).
6. Дианов Е.М., Фирстов С.В., Альшев С.В., Рюмкин К.Е., Шубин А.В., Хопин В.Ф., Гурьянов А.Н., Медведков О.И., Мелькумов М.А. *Квантовая электроника*, **44** (6), 503 (2014).
7. 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).