

# Висмутовый волоконно-оптический усилитель для спектральной области 1600–1800 нм

С.В.Фирстов, С.В.Алышев, К.Е.Рюмки, В.Ф.Хопин,  
М.А.Мелькумов, А.Н.Гурьянов, Е.М.Дианов

*Сообщается о реализации первого висмутового волоконно-оптического усилителя (BDFA – Bismuth-Doped Fiber Amplifier) для спектральной области 1600–1800 нм, созданного по схеме с двунаправленной (встречной и попутной) накачкой лазерными диодами на длине волны 1550 нм. Разработанный висмутовый усилитель обладает максимальным коэффициентом усиления 23 дБ на длине волны 1710 нм, шум-фактором 7 дБ, шириной спектра усиления (по уровню 3 дБ) 40 нм и эффективностью усилителя 0.1 дБ/мВт.*

*Ключевые слова:* висмут, волоконно-оптический усилитель, лазер, световод.

## 1. Введение

В настоящее время существуют легированные висмутом волоконные световоды с люминесценцией в области длин волн 1000–1800 нм [1, 2]. Такие световоды рассматриваются как перспективная лазерная среда для эффективной генерации излучения в широком спектральном диапазоне, перекрывающем область между полосами усиления иттербиевых и тулиевых световодов (1150–1775 нм).

Разработка волоконных световодов на основе кварцевого стекла, легированного висмутом [3, 4], стала важным шагом на пути создания висмутовых лазеров и усилителей. За 10 лет, прошедших после демонстрации первого висмутового лазера [5], в этом направлении достигнут существенный прогресс [6]: созданы висмутовые волоконные световоды, способные обеспечить генерацию излучения в области длин волн 1150–1530 нм.

Кроме того, установлено, что на основе висмутовых световодов нового типа можно создавать непрерывные лазеры, излучающие в более длинноволновом диапазоне, а именно 1625–1775 нм [7]. Максимальная выходная мощность таких лазеров уже сейчас превышает 1 Вт [8]. В настоящей работе сообщается о реализации первого волоконно-оптического усилителя на основе таких висмутовых световодов (BDFA) для спектральной области 1600–1800 нм. Интерес к данному спектральному диапазону обусловлен перспективой его использования с целью расширения области передачи информации для увеличения пропускной способности современных волоконно-оптических систем связи. Актуальность развития данного направления подтверждается недавними публикациями о разработке оптических усилителей на основе световодов из кварцевого стекла, легированного тулием, для области 1640–1720 нм (см., напр., [9]).

**С.В.Фирстов, С.В.Алышев, К.Е.Рюмки, М.А.Мелькумов, Е.М.Дианов.** Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: fir@fo.gpi.ru  
**В.Ф.Хопин, А.Н.Гурьянов.** Институт химии высококичестных веществ РАН, Россия, 603600 Н.Новгород, ул. Тропинина, 49

Поступила в редакцию 29 октября 2015 г.

## 2. Схема висмутового усилителя

В качестве активной среды для BDFA использовался отрезок одномодового висмутового световода с внешним диаметром 125 мкм и диаметром сердцевинки около 2 мкм. Заготовка световода была изготовлена с помощью MCVD-технологии. Сердцевина световода состояла из легированного висмутом германосиликатного стекла с высоким содержанием оксида германия. Концентрация висмута была ~0.02 мас.%. Длина активного световода составляла 60 м при поглощении примерно 2 дБ/м и непросветляемых потерях 0.2 дБ/м на длине волны накачки 1550 нм.

Принципиальная схема BDFA изображена на рис.1,а. Усилитель собран по схеме с двунаправленной (попутной и встречной) накачкой. Источниками накачки BDFA были коммерчески доступные лазерные диоды с длиной волны 1550 нм и выходной мощностью не более 150 мВт каждый. Излучение накачки вводилось в сердцевину активного световода через волоконные спектрально-селективные разветвители (WDM). На входе и выходе BDFA были установлены два оптических изолятора: входной, используемый для ослабления влияния усиленного спонтанного излучения висмутового световода на источник сигнала, и выходной, предотвращающий возможное возникновение лазерной генерации. Точками указаны места сварных соединений активного световода и одномодового световода SMF-28, уровень потерь в которых составлял ~1 дБ.

В экспериментах по измерению спектра усиления BDFA в качестве сигнала использовалось излучение, спектр которого имел вид гребенки, образованной 13 узкими (~1 нм) полосами с максимумами на длинах волн от 1615 до 1775 нм с шагом 15 нм. Данная форма сигнала была «вырезана» из спектра суперлюминесцентного висмутового источника света, выходное излучение которого, проходя через волоконный циркулятор, отражалось от последовательно записанных волоконных брэгговских решеток на соответствующих длинах волн. Исходный спектр излучения суперлюминесцентного висмутового источника представлен штриховой кривой на рис.1,б. Для изучения влияния мощности входного сигнала на усиле-

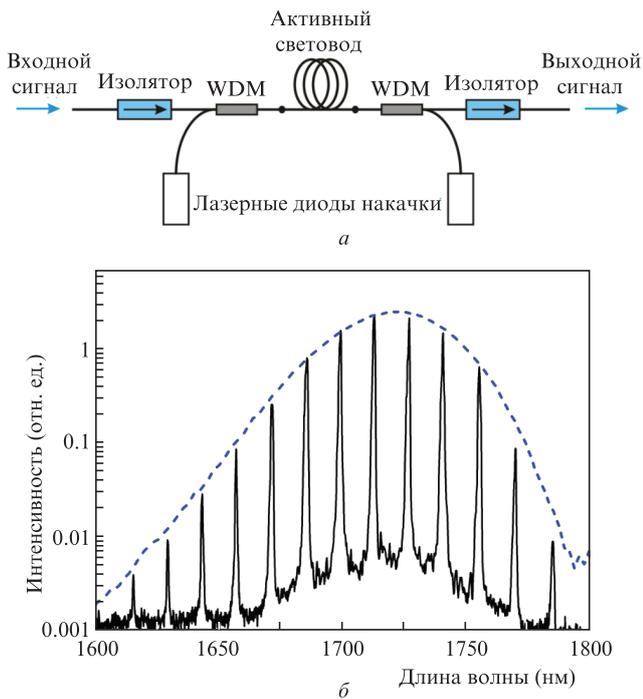


Рис.1. Схема висмутового волоконно-оптического усилителя (а) и спектры выходного излучения висмутового суперлюминесцентного источника (штриховая кривая) и сигнала на входе в усилитель (сплошная кривая) (б).

ние BDFA использовалось излучение висмутового лазера, генерирующего на длине волны 1680 нм.

Спектры исходного и усиленного сигналов в области 1500–1700 нм измерялись оптическим спектроанализатором HP 70950B, а в области 1700–1800 нм – с помощью решеточного монохроматора, снабженного InGaAs-фотоприемником. Все измерения выполнялись при комнатной температуре.

### 3. Результаты экспериментов

На рис.2,а показаны спектральные зависимости коэффициента оптического усиления и шум-фактора BDFA. Представленные зависимости получены при мощности суммарной накачки 300 мВт и мощности сигнала не выше –25 дБм в каждой полосе. Шум-фактор BDFA был рассчитан из экспериментально полученных спектров сигнала и спонтанной люминесценции (более подробно см. в [10]). Видно, что максимальное усиление BDFA достигало 23 дБ на длине волны 1710 нм. Ширина полученного спектра (по уровню 3 дБ) составляла 40 нм. Наблюдаемая несимметричность контура усиления обусловлена потерями в длинноволновой области, вносимыми разветвителем. Мы полагаем, что выбор оптимального разветвителя приведет к заметному увеличению ширины спектра усилителя.

Минимальный шум-фактор усилителя в диапазоне длин волн 1670–1730 нм составил около 7 дБ. В данном случае усилитель работал в режиме усиления слабого сигнала. Это подтверждается экспериментально полученной зависимостью усиления от мощности входного сигнала на длине волны 1680 нм (рис.2,б). Мощность входного сигнала, при которой обеспечивается насыщение усилителя, составляла примерно –10 дБм. На рис.2,б приведена также зависимость эффективности преобразования мощно-

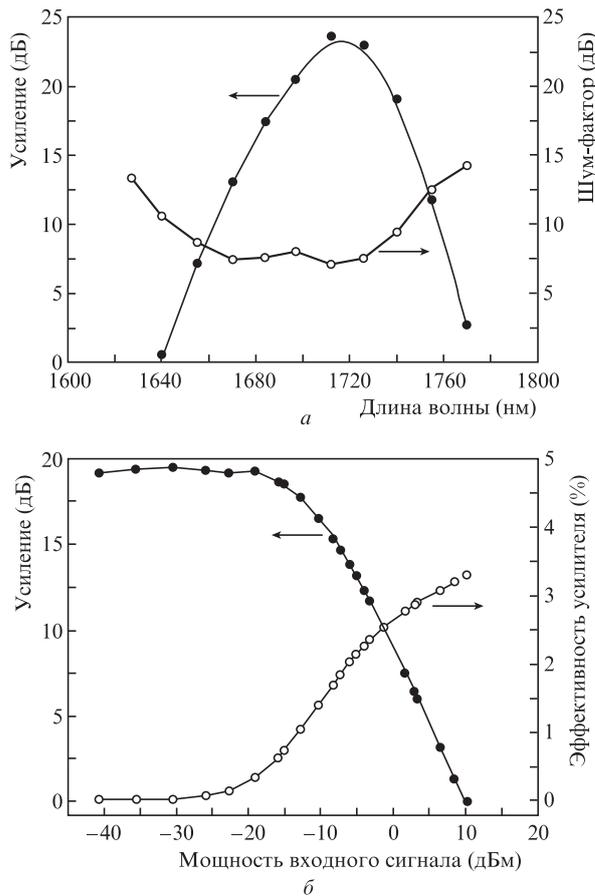


Рис.2. Спектральные зависимости коэффициента усиления и шум-фактора висмутового усилителя (а) и зависимости оптического усиления и эффективности преобразования накачки в сигнал от мощности введенного сигнала на длине волны 1680 нм (б). Все результаты получены при входной мощности излучения накачки 300 мВт.

сти накачки в выходной сигнал; ее максимальное значение у разработанного усилителя составляло примерно 3% при мощности входного сигнала ~5 дБм.

Зависимость оптического усиления BDFA на длине волны 1700 нм от введенной суммарной мощности накачки показана на рис.3. В данном случае мощность встречной накачки оставалась неизменной на уровне 150 мВт, а мощность попутной накачки варьировалась. В такой схе-

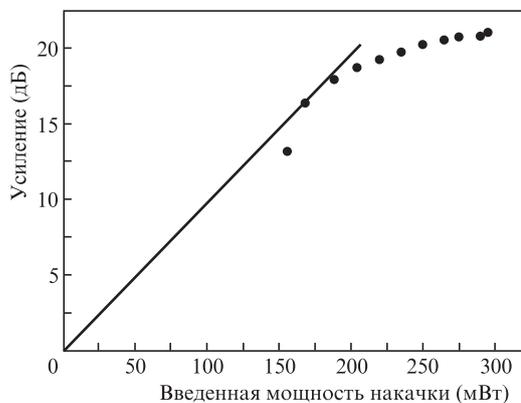


Рис.3. Зависимость оптического усиления сигнала на длине волны 1700 нм от введенной суммарной мощности (мощность попутной накачки варьировалась, мощность встречной накачки оставалась неизменной и составляла 150 мВт).

ме BDFА обладал максимальной эффективностью, равной 0.1 дБ/мВт.

Таким образом, в настоящей работе продемонстрирован висмутовый волоконно-оптический усилитель для спектральной области 1600-1800 нм, реализованный по схеме с двунаправленной (встречной и попутной) накачкой лазерными диодами на длине волны 1550 нм. Максимальный коэффициент усиления 23 дБ на длине волны 1710 нм был получен при мощности накачки 300 мВт. Ширина полосы усиления BDFА (по уровню 3 дБ) достигала 40 нм, минимальный шум-фактор составлял  $\sim 7$  дБ, эффективность была равна 0.1 дБ/мВт, а предельная эффективность преобразования мощности накачки в сигнал – около 3%.

Авторы выражают благодарность О.И.Медведкову за запись волоконных брэгговских решеток. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований № 24 Президиума РАН.

1. Dianov E.M. *J. Lightwave Technol.*, **31**, 681 (2013).

2. Firstov S.V., Alyshev S.V., Riumkin K.E., Melkumov M.A., Medvedkov O.I., Dianov E.M. *Opt. Lett.*, **39**, 6927 (2014).
3. Dvoyrin V.V., Mashinsky V.M., Dianov E.M., Umnikov A.A., Yashkov M.V., Guryanov A.N. *Proc. ECOC* (Glasgow, UK, 2005, paper Th. 3.3.5).
4. Haruna T., Kakui M., Taru T., Ishikawa Sh., Onishi M. *Proc. Conf. Optical Amplifiers and their Applications* (Budapest, Hungary, 2005, paper MC3).
5. Дианов Е.М., Двойрин В.В., Машинский В.М., Умников А.А., Яшков М.В., Гурьянов А.Н. *Квантовая электроника*, **35** (12), 1083 (2005).
6. Bufetov I.A., Melkumov M.A., Firstov S.V., Riumkin K.E., Shubin A.V., Khopin V.F., Guryanov A.N., Dianov E.M. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **20**, 0903815 (2014).
7. Дианов Е.М., Фирстов С.В., Алышев 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).
8. Firstov S.V., Alyshev S.V., Riumkin K.E., Melkumov M.A., Medvedkov O.I., Dianov E.M. *Opt. Lett.*, **40**, 4360 (2015).
9. Li Z., Jung Y., Daniel J.M.O., Simakov N., Shardlow P.C., Heidt A.M., Clarkson A., Alam Sh., Richardson D.J. *OFC 2015 Technical Digest (online)* (Anaheim, USA, 2015, paper Tu2C.1).
10. Desurvire E. *Erbium-Doped Fiber Amplifier* (Hoboken: John Wiley&Sons Inc., 2002, p. 354).