

## Висмутовый волоконный усилитель для диапазона длин волн 1300–1340 нм

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

*Впервые на основе легированных висмутом световодов создан волоконный усилитель, работающий в области второго окна прозрачности волоконных световодов из плавленого кварца. На экспериментальных образцах световодов получено усиление 24.5 дБ на длине волны 1320 нм при мощности накачки 460 мВт на длине волны 1230 нм. При этом полоса усиления составила 37 нм, мощность насыщения усилителя – около 10 мВт, шум-фактор был равен 5 дБ.*

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

Спектральная область, используемая для передачи информации в современных системах волоконно-оптической связи, определяется, главным образом, шириной полосы усиления эрбиевых волоконных усилителей и занимает область длин волн 1.53–1.61 мкм. В то же время спектральная область низких оптических потерь используемых в настоящее время волоконных световодов на основе кварцевого стекла значительно шире, и для передачи информации может быть использован диапазон длин волн 1.3–1.7 мкм, где оптические потери не превышают 0.3 дБ/км. Растущие потребности общества в передаче информации требуют разработки нового поколения волоконно-оптических систем связи со скоростью передачи информации по одному волоконному световоду 50–100 Тбит/с. Одним из путей решения этой задачи является использование всего спектрального диапазона 1.3–1.7 мкм [1], что требует разработки новой элементной базы и прежде всего – оптических усилителей для этой спектральной области. Особый интерес представляет спектральная область в окрестности 1.3 мкм, в которой дисперсия стандартных одномодовых световодов близка к нулю. До появления эрбиевых волоконных усилителей эта область с точки зрения передачи информации развивалась наиболее активно.

Ранее в качестве кандидатов на роль оптического усилителя для работы в области около 1.3 мкм предлагались волоконные усилители на ионах редкоземельных металлов: в 1988 г. – неодимовые [2, 3], а в 1991 г. – празеодимовые [4]. По усилительным характеристикам такие усилители существенно уступают эрбиевым, а кроме того, для их создания используются флюоридные или халькогенидные стекла, существенно более сложные в изготовлении и эксплуатации. В 1994 г. были предложены и реализованы первые волоконные ВКР-усилители на 1.3 мкм

[5, 6]. Такие усилители могут усиливать оптическое излучение на любой длине волны из спектрального диапазона прозрачности волоконных световодов, но для получения усиления 20–30 дБ им нужна сравнительно высокая мощность накачки (~1 Вт). Кроме того, для получения достаточно широкой полосы усиления необходимо накачивать ВКР-усилитель несколькими источниками с различными длинами волн.

В связи с этим недавнее обнаружение ИК люминесценции в стеклах, легированных висмутом [7], дало импульс исследованиям оптического усиления в этой области [8–11]. В 2005 г. были изготовлены первые волоконные световоды, легированные висмутом, и была впервые продемонстрирована лазерная генерация вблизи 1170 нм [12]. Позже смещение полосы оптического усиления и лазерной генерации в область 1300–1500 нм было достигнуто в легированных висмутом световодах различного состава [13–18] (см. также обзор [19]). В настоящей работе исследованы характеристики висмутового усилителя на основе фосфорогерманосиликатного волоконного световода, работающего в коротковолновой части этой спектральной области.

Волоконный световод для усилителя был изготовлен по MCVD-технологии. Разность показателей преломления сердцевин и оболочки составляла  $8.5 \times 10^{-3}$ , числовая апертура  $NA = 0.16$ , диаметр поля моды был равен 6.4 мкм. Длина волны отсечки второй моды лежала вблизи 1.2 мкм. Концентрация атомов висмута в сердцевине ВСВ не превышала 0.02 % по отношению к общему числу атомов (порог чувствительности нашей аппаратуры). Точное определение серых потерь было затруднено вследствие перекрытия спектров линий поглощения висмутовых центров в стекле.

Схема усилителя представлена на рис.1. Накачка и сигнал подавались в активный световод длиной 200 м через WDM-мультиплексор. Источником излучения накачки усилителя служил волоконный ВКР-лазер с длиной волны генерации 1230 нм и выходной мощностью до 500 мВт в непрерывном режиме. В качестве источников сигнала использовались широкополосный волоконный суперлюминесцентный источник с максимумом вблизи

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

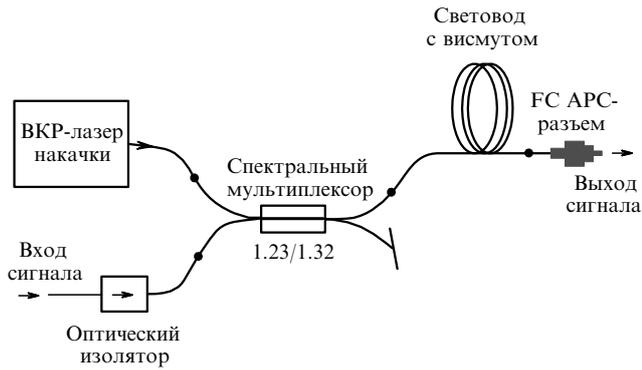


Рис.1. Схема висмутового волоконного усилителя. Точками обозначены места сварки световодов.

1.31 мкм и ВКР-лазер с длиной волны генерации около 1318 нм. С помощью широкополосного источника измерялся спектр усиления, а ВКР-лазер применялся для исследования влияния мощности сигнала на усиление.

На рис.2 представлены спектр усиления висмутового волоконного усилителя при мощности накачки 460 мВт на длине волны  $\lambda_p = 1230$  нм и шум-фактор (NF) данного усилителя, рассчитанный по измеренным значениям усиленной спонтанной люминесценции и сигнала на выходе усилителя (аналогично [20]). Шум-фактор характеризует шумовые характеристики усилителя и определяется как отношение величин сигнал/шум на входе и выходе усилителя. Минимальный шум-фактор данного усилителя составил  $\sim 5$  дБ.

Положительный коэффициент усиления наблюдался в диапазоне длин волн сигнала  $\lambda_s = 1283 - 1372$  нм. Пик усиления находился на длине волны  $\lambda_{max} = 1321$  нм и составил 24.5 дБ. Ширина полосы усиления по уровню  $-3$  дБ  $\Delta\lambda_{0.5} = 37$  нм. Как было показано ранее [15], оптическое усиление в области вблизи 1320 нм обеспечивают активные висмутовые центры, связанные с присутствием фосфора в сердцевине световода.

На рис.3 показана зависимость усиления вблизи его пика от мощности накачки  $P_p$ . Максимальная эффективность усиления  $g_{max}$  определяется наклоном штриховой линии, проходящей через начало координат, и составляет  $\sim 0.09$  дБ/мВт.

Зависимость коэффициента усиления от мощности сигнала ( $\lambda_s = 1318$  нм) при мощности накачки 350 и 460

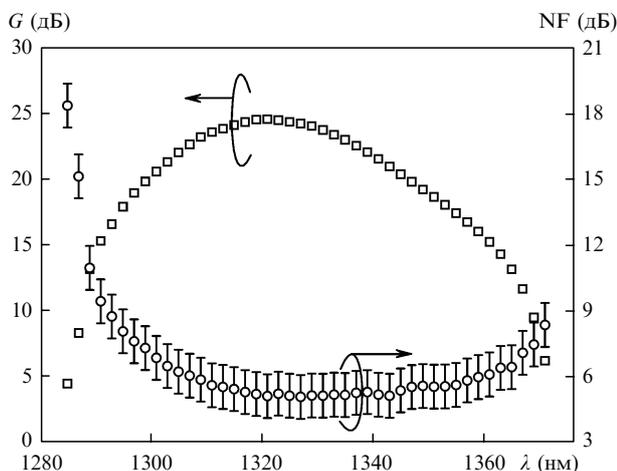


Рис.2. Спектр усиления  $G$  и шум-фактор  $NF$  висмутового волоконного усилителя при  $P_p = 460$  мВт,  $\lambda_p = 1230$  нм.

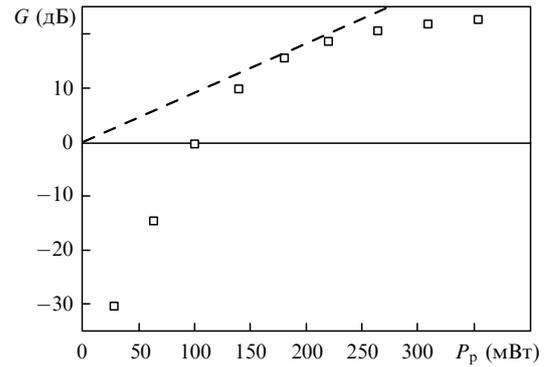


Рис.3. Зависимость усиления сигнала ( $\lambda_s = 1318$  нм) от мощности накачки ( $\lambda_p = 1230$  нм).

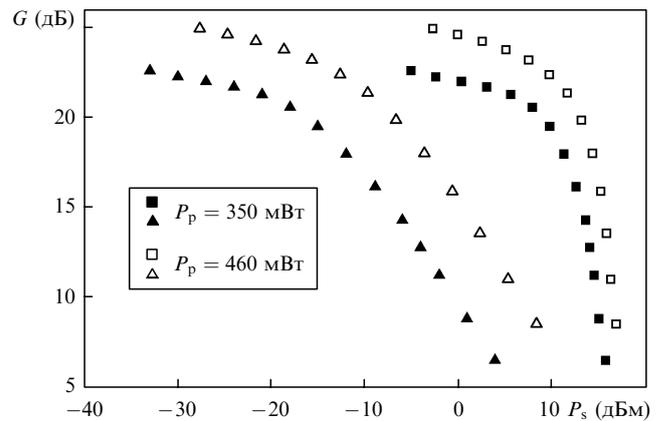


Рис.4. Зависимость усиления  $G$  от мощности сигнала  $P_s$  ( $\lambda_s = 1318$  нм) на выходе усилителя (квадраты) и на его входе (треугольники).

мВт представлена на рис.4. Мощность насыщения усилителя  $P_{sat}$  оказалась равной 8.9 мВт (9.5 дБм) при  $P_p = 350$  мВт и 11.2 мВт (10.5 дБм) при  $P_p = 460$  мВт.

Полученные данные позволяют оценить эффективность преобразования накачки в режиме усилителя мощности, которая достигла 9% при усилении около 10 дБ. Такая сравнительно низкая эффективность обусловлена, на наш взгляд, высоким уровнем серых потерь и, возможно, поглощением из возбужденного состояния, которые в сумме дают непроектлируемые потери  $\sim 30$  дБ/км.

Таким образом, в настоящей работе впервые продемонстрирован висмутовый волоконный усилитель, работающий в области 1300–1340 нм, с максимальным коэффициентом усиления 24.5 дБ на длине волны 1320 нм при мощности накачки 460 мВт на  $\lambda_p = 1230$  нм и  $NF = 5$  дБ. В качестве активной среды использовались недавно разработанные фосфорогерманосиликатные волоконные световоды, легированные висмутом. Оптимизация состава световодов, технологии их изготовления, накачки и длины световода позволят улучшить характеристики разработанных усилителей.

Работа поддержана Программой фундаментальных исследований Президиума РАН № 27.

1. Desurvire E. *Proc. ECOC 2005* (UK, Glasgo, 2005, paper Mo2.1.3).
2. Miniscalco W.J., Andrews L.J., Thompson B.A. *Electron. Lett.*, **24**, 28 (1988).
3. Brierley M.C., Millar C.A. *Electron. Lett.*, **24**, 438 (1988).
4. Ohishi Y., Kanamori T., Kitagawa T., Takahashi S., Snitzer E., Sigel G.H., Jr. *Proc. OFC 1991*, postdeadline paper PD2 (1991).

5. Dianov E.M., Fursa D.G., Abramov A.A., Belovolov M.I., Bubnov M.M., Shipulin A.V., Prokhorov A.M., Devyatykh G.G., Gur'yanov A.N., Khopin V.F. *Quantum Electron.*, **24**, 749 (1994); *Proc. 20th ECOC* (Firenze, Italy, 1994, Vol. 1, p. 427).
6. Grubb S., Erdogan T., Mizrahi V., Strasser T., Cheung W.Y., Reed W.A., Lemaire P.J., Miller A.E., Kosinski S.G., Nykolak G., Becker P.C. *Proc. Top. Meet. Opt. Amplifiers Appl.* (Breckenridge, USA, 1994).
7. Fujimoto Y., Nakatsuka M. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40**, L279 (2001).
8. Fujimoto Y., Nakatsuka M. *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 3325 (2003).
9. Kishimoto S., Tsuda M., Sakaguchi K., Fujimoto Y., Nakatsuka M. *Proc. XX ICG* (Kyoto, 2004, paper O-14-29).
10. Dvoyrin V.V., Mashinsky V.M., Dianov E.M., Umnikov A.A., Yashkov M.V., Guryanov A.N. *Proc. ECOC 2005* (UK, Glasgow, 2005, paper Th 3.3.5).
11. Seo Y.-S., Fujimoto Y., Nakatsuka M. *Opt. Commun.*, **266**, 169 (2006).
12. Дианов Е.М., Двойрин В.В., Машинский В.М., Умников А.А., Яшков М.В., Гурьянов А.Н. *Квантовая электроника*, **35**, 1083 (2005).
13. Дианов Е.М., Фирстов С.В., Хопин В.Ф., Гурьянов А.Н., Буфетов И.А. *Квантовая электроника*, **38**, 615 (2008).
14. Bufetov I.A., Firstov S.V., Khopin V.F., Medvedkov O.I., Guryanov A.N., Dianov E.M. *Opt. Lett.*, **33**, 2227 (2008).
15. Firstov S.V., Bufetov, I.A. Khopin V.F., Shubin A.V., Smirnov A.M., Iskhakova L.D., Vechkanov N.N., Guryanov A.N., Dianov E.M. *Laser Phys. Lett.*, **6**, 665 (2009)
16. Dianov E.M., Firstov S.V., Medvedkov O.I., Bufetov I.A., Khopin V.F., Guryanov A.N. *Proc. OFC Conf.* (USA, San Diego, CA, 2009, paper OWT3).
17. Mashinsky V.M., Dvoyrin V.V. *Proc. IEEE Photonics Ann. Meeting* (Belek-Antalya, Turkey, 2009, p. 775).
18. Firstov S.V., Bufetov I.A., Shubin A.V., Smirnov A.M., Iskhakova L.D., Khopin V.F., Guryanov A.N., Dianov E.M. *18th Int. Laser Phys. Workshop* (Barcelona, 2009, paper 9.2.3).
19. Bufetov I.A., Dianov E.M. *Laser Phys. Lett.*, **6**, 487 (2009).
20. Desurvire E. *Erbium Doped Fiber Amplifiers* (Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons Inc., 2002, p. 354, Ch. 5).