

ПИСЬМА

Передача сигнала со скоростью 25 Гб/с с использованием висмутового волоконного усилителя со сдвинутым на длину волны 1300 нм максимумом усиления

М.А.Мелькумов, В.Михайлов, А.М.Хегай, К.Е.Рюмкин, С.В.Фирстов, Ф.В.Афанасьев, А.Н.Гурьянов, М.Ф.Ян, Я.Сан, Дж.Луо, Дж.С.Пак, С.Д.Шенк, Р.С.Винделер, П.С.Вестбрук, Р.Л.Лингл, Д.Дж.ДиДжиованни, Е.М.Дианов

С использованием перестраиваемого в диапазоне 1130–1210 нм волоконного лазера на основе алюмосиликатного висмутового световода измерена зависимость спектров усиления в висмутовых фосфоросиликатных световодах в области 1220–1400 нм от длины волны излучения накачки. При накачке излучением на $\lambda = 1195$ нм получено смещение пика полосы усиления на $\lambda = 1300$ нм, что примерно соответствует центру полосы, стандартизированной для передачи сигнала О-диапазона (1270–1320 нм) в волоконно-оптических линиях связи, в том числе между дата-центрами. С использованием усилителя на основе фосфоросиликатного висмутового световода с накачкой излучением на $\lambda = 1195$ нм показано, что расстояние, на которое может быть передан сигнал от полупроводникового лазерного диода, замодулированного напрямую со скоростью 25 Гб/с (ООК (on-off keying) модуляция), может быть увеличено для световода стандарта G.652 со стандартных 10 км до 80 км и более.

Ключевые слова: висмутовый усилитель, передача информации, перестраиваемый лазер, висмутовый волоконный лазер, спектр усиления.

1. Введение

Одно из окон прозрачности волоконных световодов на основе кварцевого стекла, широко используемых в телекоммуникации для передачи информации, приходится на область вблизи 1.3 мкм. В оптической связи данную область принято обозначать как О-диапазон (O-band).

В настоящее время О-диапазон используется для передачи сигнала на расстояния до 120 км по схеме точка–точка, т. к. в связи с относительно низкой ценой волокна при использовании этой схемы достигается существенное сокращение капитальных и операционных расходов, обусловленное отсутствием дорогостоящих компонентов системы плотного спектрального уплотнения (DWDM) и простой конфигурацией системы связи. Примерно в эту же область попадает нуль дисперсии кварцевого стекла и, соответственно, длина волны нулевой дисперсии большого количества световодов на его основе, уже проложенных и прокладываемых в линиях передачи информации. В связи с этим при передаче в О-диапазоне отпадает необходимость компенсации дисперсии как в оптическом, так и в электронном доменах, что также существенно сокращает расходы.

В связи с увеличением скорости передачи данных путем увеличения как числа каналов в системах с грубым

спектральным уплотнением (CWDM), так и скорости передачи в каждом канале, происходит уменьшение доступной мощности в расчете на один канал, а также чувствительности приемника, что, в свою очередь, приводит к сокращению максимальной длины передачи без использования оптического усиления. Таким образом, наличие волоконно-оптического усилителя в О-диапазоне позволило бы и в дальнейшем увеличивать скорость передачи без перехода в С- и L-диапазоны (1530–1610 нм).

По указанным выше причинам интерес к висмутовым усилителям на основе фосфоросиликатных световодов, усиливающим вблизи $\lambda = 1.3$ мкм, не ослабевает с момента первой публикации [1]. Тем не менее долгое время одним из существенных ограничений в применении таких усилителей для передачи информации было несоответствие положения максимума полосы усиления, находящегося в диапазоне $\lambda = 1320–1340$ нм при использованных ранее длинах волн излучения накачки [2, 3], стандартам, принятым в отрасли [4], согласно которым полоса передачи приходится на диапазон 1270–1310 нм. При этом вся О-полоса простирается от 1270 до 1350 нм.

В настоящей работе исследовано влияние длины волн излучения накачки на положение максимума полосы усиления висмутовых активных центров в фосфоросиликатных световодах для длин волн возбуждения 1130–1210 нм, ранее не использовавшихся для накачки усилителей на основе таких световодов. Для целей данного эксперимента был создан (впервые, по нашим данным) перестраиваемый в указанном диапазоне длин волн волоконный лазер на основе алюмосиликатного висмутового световода. Перестройка осуществлялась с помощью дифракционной решетки. Необходимость создания такого лазера продиктована отсутствием на рынке достаточно мощных (200–300 мВт) одномодовых непрерывных лазерных диодов, длины волн излучения которых перекрывают весь указанный диапазон. Отметим, что существуют и ком-

М.А.Мелькумов, С.В.Фирстов, А.М.Хегай, К.Е.Рюмкин, Е.М.Дианов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: melkoumov@fo.gpi.ru

Ф.В.Афанасьев, А.Н.Гурьянов. Институт химии высококачественных веществ РАН им. Г.Г.Десятых, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Тропинина, 49

V.Mikhailov, M.F.Yan, Y.Sun, J.Luo, G.S.Puc, S.D.Shenk, R.S.Windeler, R.L.Lingle, P.S.Westbrook, D.J.DiGiovanni. OFS Laboratories, 19 Schoolhouse Rd., Somerset, NJ 08873, USA

Поступила в редакцию 25 октября 2018 г.

мерчески доступные лазерные диоды, излучающие в отдельных участках этого диапазона, однако стоимость их весьма высока.

С использованием полученных данных был реализован висмутовый усилитель с коэффициентом усиления 19 дБ на $\lambda \approx 1300$ нм с накачкой излучением на $\lambda = 1195$ нм. Данный усилитель был использован для демонстрации возможности тестовой передачи сигнала со скоростью модуляции 25 Гб/с в формате ООК (on-off keying).

2. Перестраиваемый лазер на основе алюмосиликатного висмутового световода

Схема перестраиваемого висмутового лазера на основе алюмосиликатного световода представлена на рис.1. Резонатор лазера образован дифракционной решеткой, установленной на поворотном столике, и кольцевым зеркалом, реализованным с помощью волоконного ответвителя. Ширина спектра излучения (по уровню 3 дБ), возвращаемого дифракционной решеткой (600 штр./мм) в резонатор, составляла ~ 0.5 нм, кольцевое зеркало обеспечивало широкий спектр отражения. Для минимизации потерь на дифракционной решетке служил контроллер поляризации, позволяющий подстраивать плоскость поляризации излучения в резонаторе. Для накачки использовалось излучение одномодового волоконного Yb-лазера на $\lambda = 1.08$ мкм с мощностью до 6 Вт в непрерывном режиме. Накачка активного световода осуществлялась по сердцевине через сплавной спектрально-селективный ответвитель (ССО). Максимальная мощность используемого излучения накачки была ограничена оптической стойкостью ответвителя и составляла ~ 2 Вт.

В качестве активной среды лазера был использован изготовленный методом МСVD алюмосиликатный световод, легированный висмутом в концентрации менее 0.01 мас.%, подобный описанному в работе [5], но с увеличенным до 0.7 дБ/м на $\lambda = 1.06$ мкм коэффициентом поглощения в полосе активных висмутовых центров. Длина активного висмутового световода составляла 45 м, что обеспечивало поглощение излучения накачки более 10 дБ.

При комнатной температуре перестройка длины волны излучения лазера могла осуществляться в диапазоне 1130–1210 нм. Выходная мощность при этом варьировалась от 30 мВт на краях диапазона до 55 мВт в его центре. Такой мощности явно недостаточно для измерения спектров усиления висмутовых фосфоросиликатных световодов, поэтому с учетом сильной температурной зависимости КПД генерации висмутовых алюмосиликатных световодов [6] было решено охладить активный световод до температуры жидкого азота (77 К). Для этого активный световод лазера в виде бухты помещался в емкость с жидким азотом. На рис.2,а показаны спектры генерации лазера при различных углах поворота дифракционной решетки. Область спектральной перестройки, как и в случае

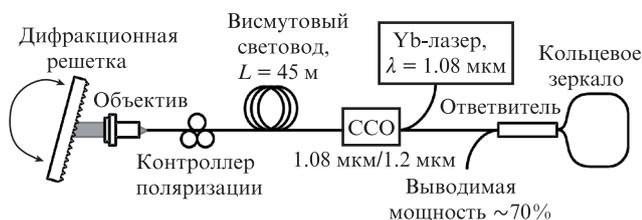


Рис.1. Схема перестраиваемого висмутового волоконного лазера.

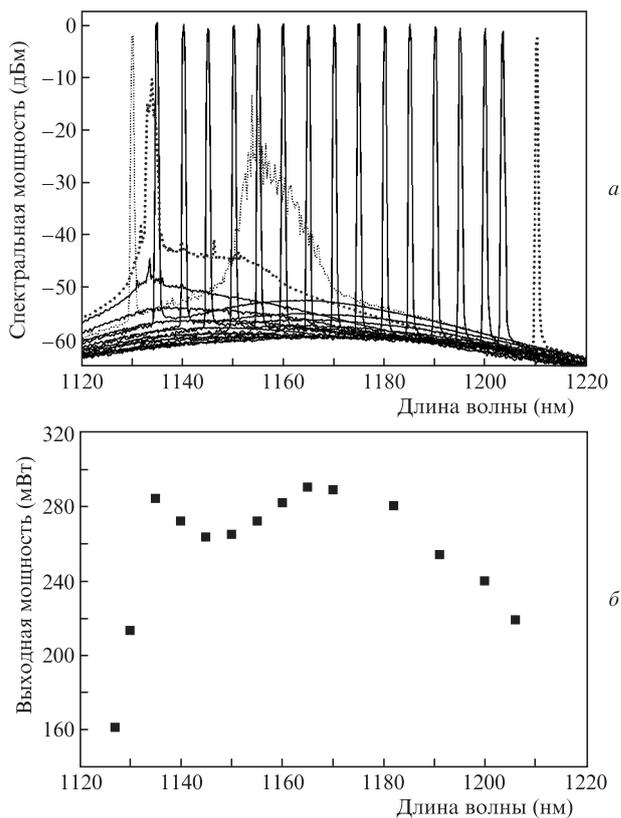


Рис.2. Спектры генерации висмутового волоконного лазера, измеренные с разрешением 1 нм при последовательном повороте дифракционной решетки (а), и зависимость мощности генерации от длины волны при охлаждении световода жидким азотом (б).

комнатной температуры, составила ~ 80 нм (1130–1210 нм), типичная ширина линии генерации – 0.2 нм. При положениях решетки, соответствующих краям диапазона перестройки, наряду с основной линией наблюдалась свободная генерация в области 1.14–1.16 мкм (на рисунке такие спектры изображены пунктирными линиями).

На рис.2,б представлена зависимость выходной мощности генерации лазера от длины волны для случая охлаждения световода жидким азотом. Мощность накачки составляла 2 Вт, при этом в диапазоне $\lambda = 1130$ –1206 нм мощность генерации превышала 200 мВт, что достаточно для измерения спектров усиления.

3. Влияние длины волны излучения накачки на спектр усиления

Используя разработанный перестраиваемый висмутовый лазер и ВКР-лазер, излучающий на $\lambda = 1230$ нм, измерили спектры усиления висмутового фосфоросиликатного световода с параметрами, близкими к приведенным в работе [2]. На рис.3 приведены спектры усиления и положения максимумов λ_{\max} этих спектров для различных длин волн излучения накачки λ_p . Видно, что уменьшение λ_p приводит к смещению пика усиления в коротковолновую область. При этом в диапазоне длин волн накачки 1200–1230 нм амплитуда пика неизменна. Использование более коротковолновой накачки приводит к уменьшению амплитуды пика усиления. Полученные данные свидетельствуют о наличии значительного неоднородного уширения в спектрах поглощения и усиления висмутовых фосфоросиликатных световодов. Важным

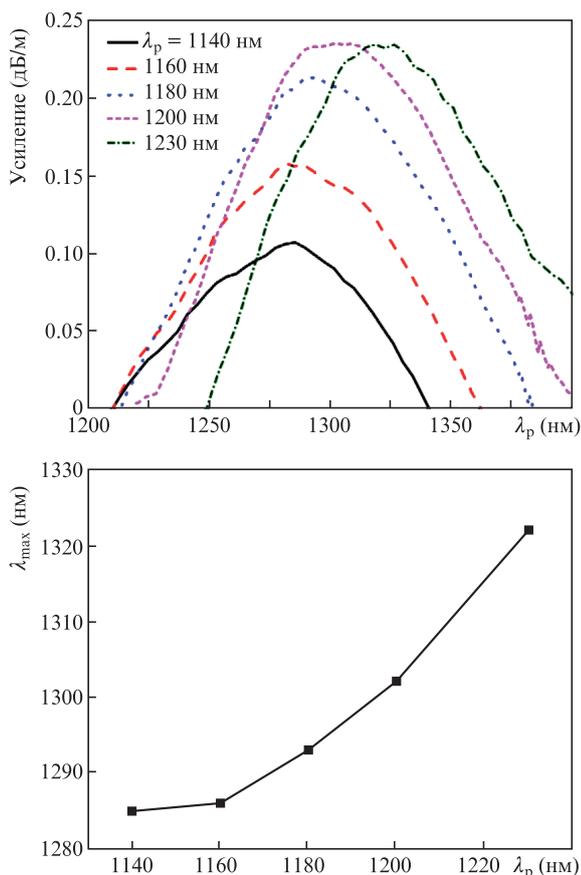


Рис.3. Спектры усиления (а) и положения пиков усиления (б) при различных длинах волн излучения накачки.

следствием полученных результатов является вывод о том, что, используя излучение накачки с длиной волны вблизи $\lambda = 1200$ нм, можно получить спектр усиления, хорошо перекрывающийся с О-полосой, задействованной для передачи сигнала в волоконно-оптических линиях связи. Также важным следствием сильного неоднородного уширения висмутовой полосы является то, что одновременное использование для накачки излучений на нескольких длинах волн, например на $\lambda = 1200$ и 1270 нм, должно, вероятно, почти вдвое увеличить ширину полосы усиления: с 40 до ~ 75 нм.

На основе полученных данных об оптимальной длине волны излучения накачки мы провели эксперимент по тестовой передаче сигнала через волоконно-оптическую линию с использованием висмутового волоконного усилителя.

4. Передача сигнала в О-диапазоне с помощью висмутового усилителя

Впервые передача тестового сигнала с использованием висмутового усилителя была продемонстрирована в области вблизи 1.45 мкм в работе [7], где оптический сигнал, промодулированный с помощью электрооптического модулятора в формате ООК со скоростью 10.6 Гб/с, передавался на расстояние 80 км. Недавно группой авторов из Саутгемптона [8] была представлена тестовая передача набора сигналов на нескольких длинах волн в диапазоне 1.32–1.37 мкм, промодулированных с помощью электрооптических модуляторов со скоростью 9.9 Гб/с. Передача

на расстояния 100 и 120 км осуществлялась с помощью висмутового усилителя на основе фосфоросиликатного световода длиной 150 м. Авторы использовали накачку излучением на двух длинах волн – 1240 и 1267 нм, что позволило получить усиление 22 дБ в максимуме полосы на $\lambda = 1.35$ мкм. Однако задействованные для передачи длины волн не соответствуют принятым в отрасли стандартам, регламентирующим работу в диапазоне 1270–1310 нм.

В настоящей работе мы сообщаем о создании и тестировании для передачи информации висмутового усилителя на основе фосфоросиликатного световода с полосой усиления, оптимизированной под имеющиеся стандарты. Такой усилитель с накачкой излучением на $\lambda = 1195$ нм был использован нами для тестовой передачи сигнала со скоростью 25 Гб/с через волокно, удовлетворяющее спецификации G.652. Полупроводниковый лазер (ПЛ) с длиной волны излучения 1310 нм и выходной мощностью 6 дБм был напрямую промодулирован псевдослучайной последовательностью логических нулей и единиц длиной $2^{31} - 1$ (рис.4,а) в формате ООК. Электрический сигнал обеспечивался устройством для генерации псевдослучайных последовательностей и подсчета уровня ошибок – Viavi ONT-604 (BER (Bit Error Rate) tester). Оптический сигнал вводился в «пролет» волокна длиной ~ 80 км (потери 0.33 дБ/км, длина волны нулевой дисперсии ~ 1320 нм) и после прохождения линии усиливался в висмутовом волоконном усилителе (ВВУ). Для простоты, использовался усилитель, состоящий из четырех компонентов: оптического изолятора (ОИ), спектрально-селективного ответвителя (ССО), лазера накачки (мощность 800 мВт, $\lambda_p = 1195$ нм) и фосфоросиликатного световода длиной 80 м, легированного висмутом (рис.4,б). Заметим, что пик пропускания ССО был выбран вблизи $\lambda = 1272$ нм и, таким образом, ССО также играл роль фильтра, выравнивающего спектр усиления, и обеспечивал равномерность усиления на уровне 2 дБ в диапазоне 1270–1310 нм.

Коэффициент усиления усилителя равнялся 19 дБ, максимальная мощность – 20 дБм и шум-фактор – 5 дБ. Перед детектированием сигнал проходил через перестраиваемый оптический ослабитель (ПОО), при этом спонтанное излучение отфильтровывалось полосовым оптическим фильтром (ПОФ) с шириной полосы 4 нм (такие фильтры используются в стандартах CWDM и LAN-WDM) и затем детектировался с помощью фотодетектора (ФД). На рис.5 показаны зависимости уровня ошибок (BER) от мощности сигнала на приемнике. Несмотря на различие зависимостей для случаев наличия в схеме те-

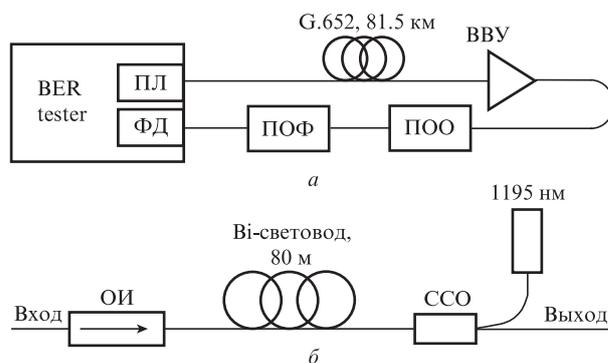


Рис.4. Схема тестирования передачи (а) и схема висмутового волоконного усилителя (б).

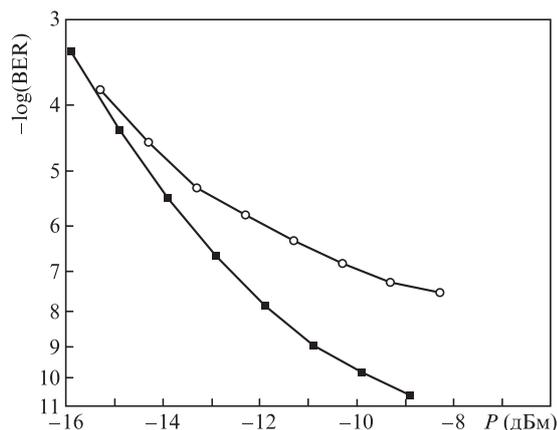


Рис.5. Зависимости количества ошибок от мощности сигнала на приемнике при наличии в схеме тестирования волокна длиной 81.5 км (о) и в его отсутствие (■).

стирования отрезка волокна длиной 81.5 км и его отсутствия, в области вблизи лимита алгоритма коррекции ошибок в стандарте KP4-FEC ($\text{BER} = 2.6 \times 10^{-4}$) переданный через отрезок волокна сигнал имеет штраф по мощности менее 0.5 дБ.

В ближайшее время будут завершены работы и опубликованы наши результаты по тестированию такого усилителя на линии, состоящей из восьми стандартных LAN-WDM-каналов в O-диапазоне, сигналами, промодулированными на скорости ~ 25 Гбод/с в формате PAM-4 (четыре уровня мощности), что обеспечит суммарную скорость передачи ~ 400 Гб/с.

5. Заключение

С помощью перестраиваемого в диапазоне $\lambda = 1130\text{--}1210$ нм излучения висмутового лазера на основе алюмосиликатного световода исследовано влияние длины волны излучения накачки на спектр усиления в фосфоросиликатных висмутовых световодах. Проведенные тесты показывают, что использование оптимизированной накачки позволяет сместить максимум усиления в таких

световодах на длину волны ~ 1300 нм. Используя такой оптимизированный усилитель, мы продемонстрировали тестовую передачу сигнала на расстояние ~ 80 км на длине волны 1310 нм со скоростью 25 Гб/с при прямой модуляции передающего лазерного диода. Измеренный штраф по мощности вблизи лимита алгоритма коррекции ошибок в стандарте KP4-FEC ($\text{BER} = 2.6 \times 10^{-4}$) составил менее 0.51 дБ с минимальным $\text{BER} \approx 2 \times 10^{-7}$, что оставляет значительный запас при проектировании системы связи и позволяет надеяться на дальнейшее увеличение длины передачи. Продемонстрированный усилитель дает возможность увеличить дальность передачи сигнала в стандарте IEEE 802.3bs-2017 на указанной скорости со стандартных 10 до 80 км. Важно отметить, что в представленном нами эксперименте были использованы коммерчески доступные для данного диапазона приемопередающие компоненты, уже применяемые в волоконно-оптических линиях связи. Таким образом, использование такого усилителя не потребует принятия новых стандартов и разработки новых компонентов.

1. Дианов Е.М., Мелькумов М.А., Шубин А.В., Фирстов С.В., Хопин В.Ф., Гурьянов А.Н., Буфетов И.А. *Квантовая электроника*, **39** (12), 1099 (2009) [*Quantum Electron.*, **39** (12), 1099 (2009)].
2. 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*, **7580**, 758014-1 (2010).
3. Thipparapu N.K., Umnikov A.A., Barua P., Sahu J.K. *Opt. Lett.*, **41** (7), 1518 (2016).
4. IEEE 802.3bs-2017 - IEEE Standard for Ethernet Amendment 10: Media Access Control Parameters, Physical Layers, and Management Parameters for 200Gb/s and 400 Gb/s Operation, IEEE Standard (2017).
5. Dianov E.M., Shubin A.V., Melkumov M. A., Medvedkov O.I., Bufetov I.A. *J. Opt. Soc. Am. B*, **24**, 1749 (2007).
6. Shubin A.V., Bufetov I.A., Melkumov M.A., Firstov S.V., Medvedkov O.I., Khopin V.F., Guryanov A.N., Dianov E.M. *Opt. Lett.*, **37** (13), 2589 (2012).
7. Melkumov M.A., Mikhailov V., Hegai A.M., Riumkin K.E., Westbrook P.S., DiGiovanni D.J., Dianov E.M. *Electron. Lett.*, **53** (25), 1661 (2017).
8. Taengnoi N., Bottrill K., Thipparapu N.K., Umnikov A.A., Sahu J.K., Petropoulos P., Richardson D.J. *Proc. Europ. Conf. Optical Communication* (Roma, Italy, 2018, September 23-27, Mo3E.2).