

ПИСЬМА

Оптический усилитель с полосой более 200 нм на основе германосиликатного волоконного световода, легированного ионами висмута и эрбия

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

Впервые на основе волоконного световода, легированного ионами висмута и эрбия, реализован оптический усилитель с усилением ~ 10 дБ в широкой спектральной области (1520–1770 нм), перекрывающей телекоммуникационные C-, L- и U-диапазоны.

Ключевые слова: волоконно-оптическая связь, волоконный усилитель, висмут.

1. Введение

В настоящее время передача данных в современных волоконно-оптических системах связи может осуществляться со скоростями до 10 Тбит/с. В экспериментальных системах скорости могут быть на порядок выше (до ~ 100 Тбит/с). Тем не менее становится понятным, что для обеспечения потребности современного общества в информации, которая ежегодно растет на 30%–40%, уже через несколько лет имеющихся скоростей будет недостаточно. Следует отметить, что существенное повышение скорости передачи информации по существующим системам связи не представляется возможным из-за фундаментального предела, который определяется рядом факторов, включая предел Шеннона, оптическую нелинейность волоконных световодов, полосу оптических усилителей [1–3]. Все вышеперечисленное указывает на необходимость поиска путей увеличения скорости передачи информации по волоконно-оптическим системам связи.

Вследствие этого в последние годы стало появляться множество работ, обсуждающих возможные способы увеличения скорости передачи информации по волоконному световоду до уровня ~ 1 Пбит/с и выше (см., напр., [4] и ссылки в ней). На прошедшей Европейской конференции по оптической связи (ECOC'2016, 18–22 сентября 2016 г., Дюссельдорф, Германия) этой проблеме было уделено большое внимание. Одним из предлагаемых путей ее решения является использование более широкого спектрального диапазона для передачи информации по волоконному световоду. Известно, что в настоящее время подавляющее большинство протяженных высокоскоростных волоконно-оптических систем связи используют довольно узкую спектральную область 1530–1610 нм, включающую C-диапазон (1530–1565 нм) и L-диапазон (1565–1625 нм),

которая определяется полосой усиления эрбиевого волоконного усилителя (ЭВУ). Отметим, что, в принципе, для передачи информации можно использовать всю спектральную область 1300–1700 нм (шириной 400 нм), в которой оптические потери телекоммуникационных световодов достаточно малы – менее 0.4 дБ/км. Однако до недавнего времени для данной спектральной области отсутствовали эффективные оптические волоконные усилители, которые являются ключевыми элементами современных волоконно-оптических систем связи. И только в последние годы такие оптические усилители были реализованы на основе световодов, легированных тулием, и световодов, легированных висмутом [5–8]. К сожалению, эти оптические усилители не вызвали большого интереса у разработчиков в области волоконно-оптических систем связи, поскольку они обладают довольно узкой полосой усиления, которая не перекрывается с полосой усиления ЭВУ. С этой точки зрения наибольший практический интерес представляют оптические усилители с более широкой полосой, чем у ЭВУ (~ 80 нм), и перекрывающие C- и L-диапазоны. Следует отметить, что в этом случае имеющейся элементной базы уже проложенных линий связи будет достаточно для успешного внедрения такого усилителя без привлечения существенных финансовых вложений.

Учитывая актуальность проблемы, мы провели исследования по разработке прототипа такого оптического усилителя. Для этого был изготовлен германосиликатный волоконный световод, легированный ионами висмута и эрбия с концентрациями ~ 100 ppm. За основу был взят легированный висмутом германосиликатный волоконный световод с высоким ($\sim 50\%$) содержанием GeO_2 (основные характеристики такого световода детально описаны в работе [9]), который уже использовался для создания оптического усилителя, работающего в области 1700 нм [7]. Низкое содержание ионов эрбия в световоде было обусловлено двумя причинами. Это предотвращение концентрационного тушения люминесценции и достижение уровня оптического усиления, близкого к величине усиления висмутовых активных центров. Последнее условие было важным для получения широкой полосы оптического усиления без возникновения паразитной лазерной генерации в области усиления ионов эрбия.

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

Поступила в редакцию 7 октября 2016 г.

2. Полученные результаты

На рис.1,*а* показаны спектры поглощения волоконного световода, легированного висмутом, и аналогичного по составу световода, легированного висмутом и эрбием. Видно, что введение ионов эрбия в световод, легированный висмутом, приводит к появлению характерной полосы поглощения с максимумом около 1535 нм. Известно, что полосы поглощения на 1400 и 1650 нм, наблюдаемые в спектрах обоих световодов, принадлежат висмутым активным центрам.

Характерные спектры люминесценции таких световодов представлены на рис.1,*б*. Для световода, содержащего ионы висмута и эрбия, наблюдается увеличение ширины полосы люминесценции более чем на 70 нм по сравнению с аналогичной шириной полосы для световода с висмутом. В итоге суммарная ширина полосы люминесценции световода с эрбием и висмутом (FWHM) достигает более 200 нм. Полученные результаты показывают потенциальную возможность создания волоконного оптического усилителя с исключительно широкой полосой усиления [10].

Используя разработанный световод, был создан оптический усилитель, схема которого приведена на рис.2. Для ввода/вывода излучения сигнала и накачки использовался спектрально-селективный ответвитель. На входе и выходе усилителя размещались оптические изоляторы для подавления нежелательной лазерной генерации. В качестве источника накачки использовался коммерчески доступный лазерный диод, излучающий на длине волны 1460 нм с выходной мощностью 350 мВт. Выбор данной

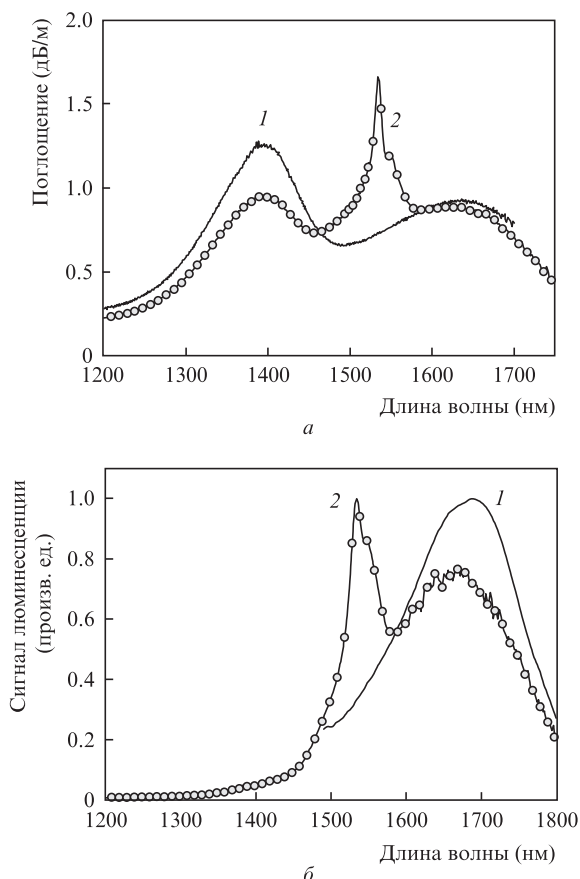


Рис.1. Спектры поглощения (*а*) и люминесценции (*б*) световода, легированного висмутом (1) и висмутом с эрбием (2).

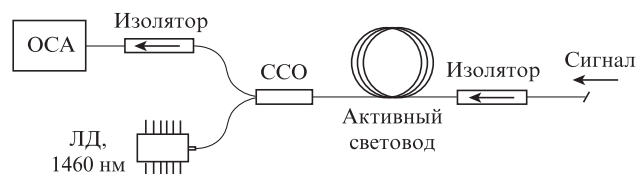


Рис.2. Схема волоконного оптического усилителя на эрбий-висмутовом активном световоде: ССО – спектрально-селективный ответвитель; ЛД – лазерный диод; ОСА – оптический спектроанализатор.

длины волны был обусловлен тем, что она попадает одновременно в полосы поглощения и ионов эрбия, и висмутовых активных центров, а потому не требуется использования дополнительных источников накачки.

Для измерения спектра усиления созданного оптического усилителя использовался изготовленный нами излучатель на основе висмутового и эрбиевого суперлюминесцентных волоконных источников, который обладал спектром излучения в диапазоне от 1500 до 1800 нм. Сигнал на входе усилителя имел вид гребенки, состоящей из отдельных пиков шириной 1 нм, которая «вырезалась» из спектра излучения вышеуказанного излучателя при отражении от совокупности брэгговских решеток с коэффициентами отражения, близкими к 100% для различных длин волн (с устройством излучателя сигнала подробнее можно ознакомиться в работе [7]). Мощность входного сигнала составляла 30 мкВт, т.е. исследуемый усилитель работал в режиме усиления малого сигнала.

Оптическое усиление рассчитывалось из сравнения интенсивностей входного сигнала и сигнала после усилителя. Измерения спектров излучения входного и усиленного сигналов проводились с помощью оптического спектроанализатора. Полученный спектр усиления световода с висмутом и эрбием при накачке излучением на 1460 нм с мощностью 300 мВт приведен на рис.3. Хотя максимум оптического усиления (~30 дБ) находится в области 1535 нм, видно, что в достаточно широкой спектральной области (1520–1770 нм) удается получить оптическое усиление около 10 дБ. Для сравнения на рис.3 изображен спектр усиления световода, легированного только висмутом. Снижение оптического усиления в области 1650–1750 нм в солегированном висмутом и эрбием световоде, в результате чего спектр оптического усиления приобретал более гладкую форму, происходило в результате процес-

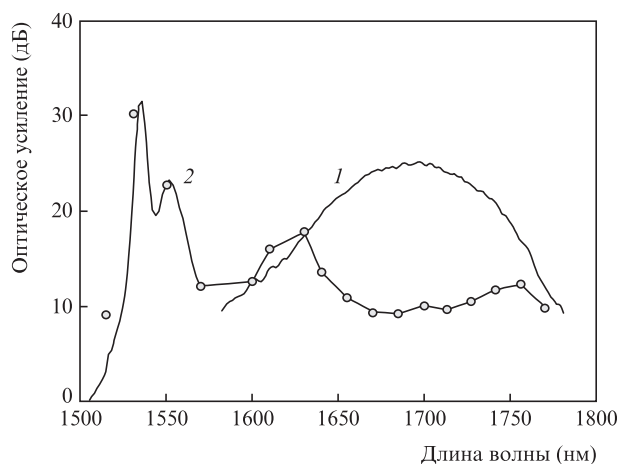


Рис.3. Спектры оптического усиления световода, легированного висмутом (1) и висмутом с эрбием (2).

сов поглощения сигнала ионами эрбия, находящимися в возбужденном состоянии [10].

Следует отметить, что в настоящем сообщении изложены пионерские результаты, полученные в данном направлении. Мы полагаем, что дальнейшие исследования, связанные с разработкой световодов с оптимальным соотношением активных элементов (эрбия и висмута), приведут к получению сред с улучшенными выходными характеристиками.

Итак, впервые реализован оптический усилитель с шириной полосы оптического усиления более 200 нм в спектральной области 1500–1800 нм на основе германо-силикатного световода, легированного висмутом и эрбием,

при накачке лазерным диодом на длине волны 1460 нм с мощностью ~ 300 мВт.

1. Desurvire E.B. *J. Lightwave Technol.*, **24**, 4697 (2006).
2. Morioka T. *Proc. OECC'09* (Hong Kong, China, 2009, paper FT4).
3. Essiambre R.-J. et al. *J. Lightwave Technol.*, **28**, 662 (2010).
4. Дианов Е.М. *УФН*, **183**, 511 (2013).
5. Дианов Е.М., Мелькумов М.А., Шубин А.В. и др. *Квантовая электроника*, **39** (12), 1099 (2009).
6. Melkumov M.A. et al. *Opt. Lett.*, **36**, 2408 (2011).
7. Firstov S.V. et al. *Sci. Rep.*, **6**, 28239 (2016).
8. Li Z. et al. *Opt. Lett.*, **41**, 2197 (2016).
9. Firstov S.V. et al. *Opt. Lett.*, **39**, 6927 (2014).
10. Firstov S.V. et al. *Proc. ECOC'16* (Dusseldorf, Germany, 2016, paper W. 4.P1.SC1.4).