

СВЕТОВОДЫ

Композитные световоды с эрбий-иттербиевой фосфатной сердцевиной и двойной кварцевой оболочкой для компактных усилителей

Б.И.Галаган, Б.И.Денкер, О.Н.Егорова, В.А.Камынин,
А.А.Поносова, С.Е.Сверчков, С.Л.Семенов, В.Б.Цветков

Представлены результаты исследования композитных световодов в качестве активной среды цельноволокнистых усилителей. Особенностью данных световодов является фосфатная сердцевина, легированная системой эрбий–иттербий, в двойной кварцевой оболочке. Высокая концентрация иттербия (более 10^{21} см⁻³ Yb³⁺) позволяет обеспечивать эффективное поглощение излучения накачки из оболочки на длинах световода менее 40 см и эффективную сенсibilизацию ионов эрбия. Кварцевая оболочка облегчает сварку световодов со стандартными волокнами. Продемонстрировано высокое удельное усиление в световодах, равное примерно 0.4–0.5 дБ/см на длине волны сигнала 1550 нм. Максимальный коэффициент усиления в композитном волокне длиной всего 36 см составил около 13.5 дБ для входного сигнала на $\lambda = 1550$ нм мощностью 0.37 мВт, при этом уровень усиленного спонтанного излучения был ниже усиливаемого сигнала на 10 дБ.

Ключевые слова: волоконный усилитель, композитные волокна, система Er³⁺/Yb³⁺, фосфатное лазерное стекло.

1. Введение

Волоконные эрбиевые усилители различных конфигураций широко используются в системах волоконно-оптических линий связи, а также для увеличения мощности волоконных лазеров со специальными спектральными и временными характеристиками излучения. Они позволяют усиливать оптический сигнал в диапазоне 1.53–1.6 мкм. В серийных эрбиевых усилителях типичные значения коэффициента усиления слабого сигнала находятся в районе 30 дБ [1]. Удельное усиление при этом составляет ~0.01–0.03 дБ/см.

В последнее время наблюдается интерес к оптическим усилителям с высоким коэффициентом усиления на единицу длины на основе оптических волокон и планарных волноводов, сильнолегированных ионами эрбия [2–4]. Высокая концентрация ионов эрбия в световедущей сердцевине позволяет существенно сократить длину активной среды по сравнению с усилителями на основе традиционных кварцевых волокон при идентичных значениях коэффициента усиления.

Б.И.Галаган, Б.И.Денкер, В.А.Камынин, С.Е.Сверчков. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: glasser@lst.gpi.ru, denker@lst.gpi.ru,
О.Н.Егорова, С.Л.Семенов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: egorova@fo.gpi.ru, sls@fo.gpi.ru
А.А.Поносова. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», Россия, 614007 Пермь, ул. 25 Октября, 106; e-mail: nastya-aleksi@mail.ru
В.Б.Цветков. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31; e-mail: tsvetkov@lsk.gpi.ru

Поступила в редакцию 15 февраля 2018 г.

Многокомпонентные фосфатные стекла являются наиболее подходящими материалами для иттербий-эрбиевой среды, обеспечивая как высокую растворимость редкоземельных ионов, так и эффективную сенсibilизацию ионов эрбия [5, 6].

Волокна из фосфатных стекол успешно зарекомендовали себя в качестве усиливающей среды [2, 7–9]. Можно отметить несколько работ, в которых получены выдающиеся результаты. Так, в работе [2] продемонстрирован волоконный усилитель с накачкой в сердцевину на основе эрбий-иттербиевого фосфатного волокна длиной всего 3 см с коэффициентом усиления слабого сигнала мощностью –30 дБм около 12.6 дБ на длине волны 1535 нм, соответствующей максимальному коэффициенту усиления данного волокна. Коэффициент усиления на длине волны 1550 нм при этом был равен ~5 дБ. Однако выходная мощность в волоконных усилителях на основе одномодовых оптических волокон с накачкой в сердцевину ограничена из-за использования маломощных одномодовых диодов накачки.

Рекордные результаты в легированных Er/Yb фосфатных волокнах продемонстрированы в работе [9], в которой сообщается об усилителе на основе одномодового волокна с накачкой в оболочку. Максимальный коэффициент усиления на отрезке волокна длиной 8 см составил ~41 дБ для слабого сигнала мощностью –30 дБм на длине волны 1535 нм, а для сигнала мощностью 0 дБм усиление было около 15 дБ во всем С-диапазоне.

К сожалению, низкая стойкость фосфатных световодов к атмосферной влаге, а также сложность их сварки с традиционными кварцевыми волокнами препятствуют созданию цельноволокнистых лазерных систем.

В ИОФ РАН совместно с НВЦО РАН были разработаны композитные оптические волокна с фосфатной сердцевиной и кварцевой оболочкой. Такая конструкция оптического волокна позволяет использовать преимуще-

ства фосфатной усиливающей среды и высокую механическую и химическую стойкость кварцевых оптических волокон [10]. Применение кварцевой оболочки также способствует облегчению их сварки с традиционными кварцевыми волокнами [11].

Цель настоящей работы – оценить перспективы применения композитных оптических волокон с высоколегированной $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ фосфатной сердцевиной и кварцевой оболочкой для создания компактных полностью волоконных усилителей сигнала на длине волны $\lambda_s = 1550$ нм.

2. Экспериментальные волокна

Для изготовления сердцевины световода было сварено стекло, содержащее 65 мол.% P_2O_5 , 7 мол.% Al_2O_3 , 12 мол.% B_2O_3 , 9 мол.% Li_2O и 7 мол.% окислов редкоземельных элементов. Абсолютная концентрация активных ионов Yb^{3+} составила 1.7×10^{21} см $^{-3}$, а ионов Er^{3+} – 1.3×10^{20} см $^{-3}$ [10, 12]. Из фосфатного стекла были изготовлены стержни, и методом «стержень в трубке» сформирована заготовка оптического волокна. Из этой заготовки были вытянуты световоды, внутренняя кварцевая оболочка которых имела квадратное поперечное сечение со сторонами 100×100 и 80×80 мкм при диаметре сердцевины 13.5 и 10.5 мкм соответственно. В процессе вытяжки на волокно наносилось силиконовое покрытие с меньшим показателем преломления, чем показатель преломления кварцевой оболочки. Данная конструкция $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ -волокна позволяла вводить излучение накачки во внутреннюю оболочку. После вытяжки в результате взаимной диффузии компонентов сердцевины и оболочки концентрация P_2O_5 в сердцевине снизилась примерно до 30 мол.%, а концентрация оксида кремния в сердцевине достигла ~50 мол.%.

Разность показателей преломления между фосфатной сердцевиной и кварцевой оболочкой составила 0.035. На рабочей длине волны в области 1.55 мкм волокна были многомодовыми. Поглощение излучения на длине волны 971 нм при накачке в оболочку световода с диаметром сердцевины 13.5 мкм составило 0.3 дБ/см. Поглощение слабого сигнала в сердцевине на длине волны 1535 нм было 1.5 дБ/см [12].

3. Экспериментальные схемы и методика измерения

На рис.1 представлена схема экспериментальной установки для исследования усиления сигнала на $\lambda_s = 1.55$ мкм в композитном волокне. После объединителя усиливаемого сигнала и накачки излучение поступало в пассивное

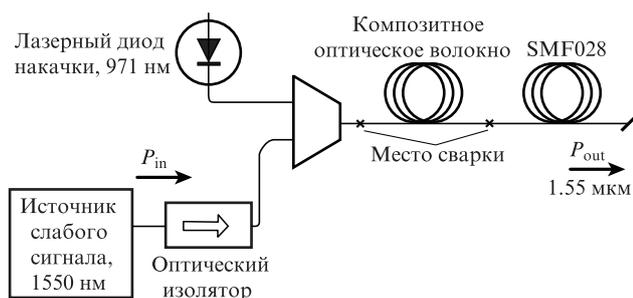


Рис.1. Экспериментальная схема волоконного усилителя сигнала на 1.55 мкм.

волокно с двойной оболочкой, которое обеспечивало ввод излучения накачки в световедущую оболочку активного волокна, а ввод излучения усиливаемого сигнала на 1.55 мкм в сердцевину активного волокна. Для накачки использовался лазерный диод с многомодовым выходом с длиной волны излучения 971 нм и мощностью до 2.7 Вт. Источником усиливаемого сигнала служил непрерывный лазер с центральной длиной волны около 1550 нм и спектральной полушириной не более 0.15 нм, его мощность варьировалась от 0.37 до 4.25 мВт. Для предотвращения распространения отраженного сигнала в направлении источника сигнала в оптическую схему был включен оптический изолятор.

К выходному концу композитного волокна приваривалось одномодовое волокно SMF028 ($NA = 0.14$) с косым сколом. Это позволило исключить отражение сигнала от выходного торца устройства, а также привело к пространственной фильтрации выходного излучения усилителя от непоглощенного излучения накачки, распространяющегося по внутренней оболочке композитного волокна. В результате излучение накачки на выходе волоконного устройства, как и в работе [10], было меньше уровня исследуемого сигнала более чем на 30 дБ, поэтому при оценке характеристик волоконного усилителя оно не учитывалось. Кроме того, применение волокна SMF028 на выходе экспериментальной установки позволило получить одномодовое выходное излучение, несмотря на то что активное волокно было многомодовым.

Сварки композитных и кварцевых волокон выполнялись сварочным аппаратом Sumitomo Electric Type-36, предназначенным для работы со стандартными кварцевыми световодами. При подборе наиболее оптимального режима сварки потери в точках сварки были от 1.7 до 3.7 дБ, что близко к результатам, представленным в [13], где потери составили около 3 дБ. Потери в точках сварки оценивались методом обрыва волокна при проходящей мощности излучения с длиной волны 1550 нм до 70 мВт.

Измерения выходных параметров усилителя, спектров излучения и мощности проводились на выходе одномодового волокна SMF028 при различных мощностях накачки и уровнях входного сигнала. Спектры излучения регистрировались с помощью анализатора оптического спектра с разрешением 0.1 нм.

4. Результаты экспериментов и их обсуждение

Исследовались отрезки активных волокон длиной от 10 до 50 см, каждый из них сваривался с кварцевым световодом. К сожалению, потери в точках сварки не были неизменными при использовании стандартного сварочного аппарата и варьировались от 1.7 до 3.7 дБ. Это не позволило провести количественное сравнение результатов экспериментов с активными волокнами разной длины и оптимизировать длину композитного световода.

Наилучшие результаты были получены для световодов длиной 23 и 36 см с внутренней кварцевой оболочкой 100×100 и 80×80 мкм соответственно.

Для усилителя на основе композитного волокна 80×80 мкм длиной 36 см проводились измерения полной выходной мощности и спектрального состава излучения. На рис.2 представлены зависимости коэффициента усиления от мощности накачки, а также спектры излучения на выходе одномодового волокна при разных уровнях мощности задающего сигнала с длиной волны 1550 нм.

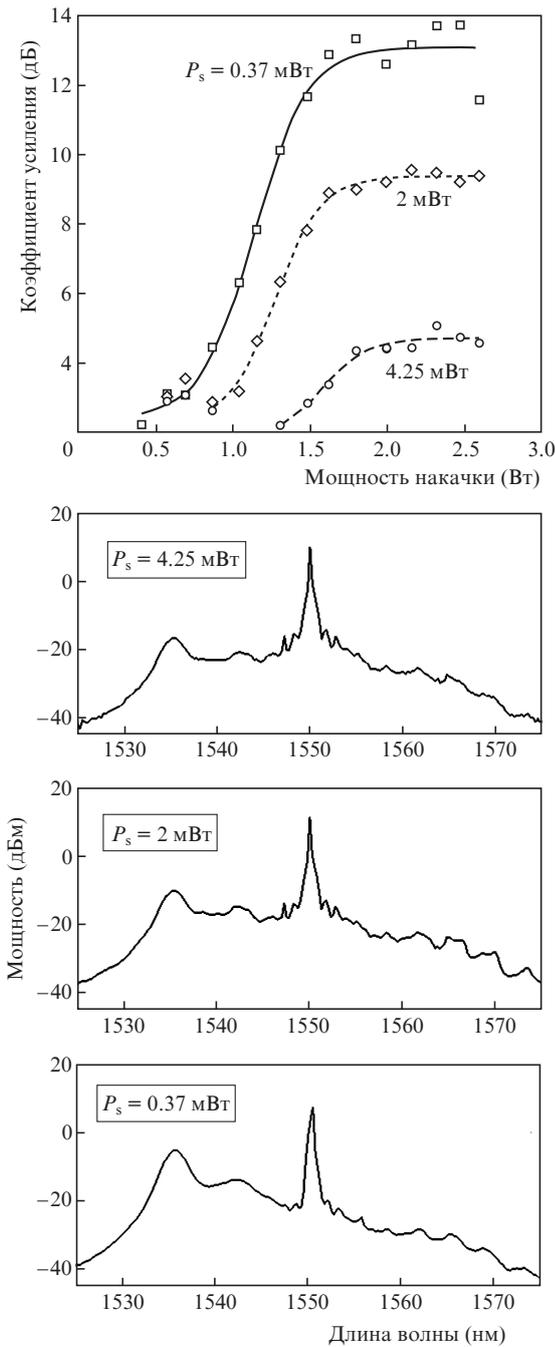


Рис.2. Зависимость коэффициента усиления от введенной мощности накачки (композитное волокно 80 × 80 мкм, длина световода 36 см) (а) и спектры излучения на выходе экспериментальной установки при мощности накачки лазерного диода 2.5 Вт и различных мощностях усиливаемого сигнала P_s (б).

Поскольку спектр на выходе помимо спектра усиленного сигнала содержит и спектр спонтанного излучения в области люминесценции ионов эрбия, то для определения коэффициента усиления сигнала на $\lambda_s = 1550$ нм по выходным спектрам оценивались доли мощностей, соответствующие усиливаемому сигналу и усиленному спонтанному излучению. Для коэффициента усиления имеем выражение

$$G = 10 \log \frac{P_{out} - P_{ASE}}{P_{in}} = 10 \log P_{out} \frac{1 - \alpha_{ASE}}{P_{in}}$$

где P_{in} – мощность источника излучения сигнала; P_{out} – выходная суммарная мощность излучения; P_{ASE} – выходная мощность усиленного спонтанного излучения; α_{ASE} – доля мощности усиленного спонтанного излучения от общей мощности на выходе экспериментальной установки.

Максимальное усиление около 13.2 дБ было получено для сигнала мощностью 0.37 мВт при мощности накачки 1.75 Вт. Увеличение мощности накачки до 2.7 Вт привело к росту коэффициента усиления до 13.5 дБ, т. е. усилитель перешел в режим насыщения.

При малых мощностях сигнала наблюдается существенное увеличение вклада мощности спонтанного излучения, что может приводить к ухудшению отношения сигнал/шум. Из рис.2,б видно, что уровень усиленного спонтанного излучения ниже уровня сигнала примерно на 10 дБ при мощности сигнала 0.37 мВт и около 30 дБ при входном сигнале 4.25 мВт и максимальной мощности накачки около 2.5 Вт.

Максимальный коэффициент усиления полностью волоконного усилителя с композитным волокном 80 × 80 мкм составил примерно 13.5 дБ для входного сигнала мощностью 0.37 мВт и около 9 дБ для сигнала мощностью 2 мВт. Для сравнения в работе [2] на той же длине волны (1550 нм) в фосфатном световоде с накачкой в сердцевину получено максимальное усиление 5 дБ для сигнала мощностью 1 мкВт. Таким образом, использование накачки в оболочку позволило существенно повысить коэффициент усиления.

Однако известно, что в традиционных кварцевых световодах коэффициент усиления слабого сигнала достигает 30 дБ, а разность между уровнями усиленного спонтанного излучения и сигнала составляет более 30 дБ. Меньшее усиление и меньший контраст между уровнями сигнала и усиленного спонтанного излучения, зарегистрированные в настоящей работе, могут быть обусловлены следующими факторами: 1) потерями в точках сварки композитного и кварцевого волокон (от 1.7 до 3.7 дБ); 2) существенным вкладом распространяющихся в модах высших порядков усиленного спонтанного излучения и части усиливаемого сигнала. В то же время удельное усиление в нашей схеме достигает 0.4 дБ/см, тогда как в кварцевых волокнах оно составляет 0.01–0.03 дБ/см.

Для усилителя на основе композитного волокна с внутренней кварцевой оболочкой сечением 100 × 100 мкм

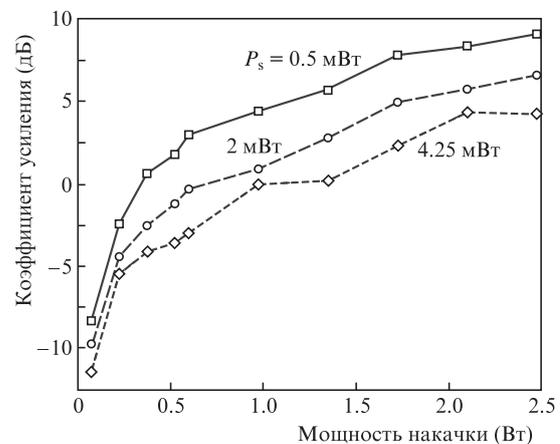


Рис.3. Зависимости коэффициента усиления от введенной мощности накачки (композитное волокно 100 × 100 мкм, длина световода 23 см) при различных мощностях сигнала P_s .

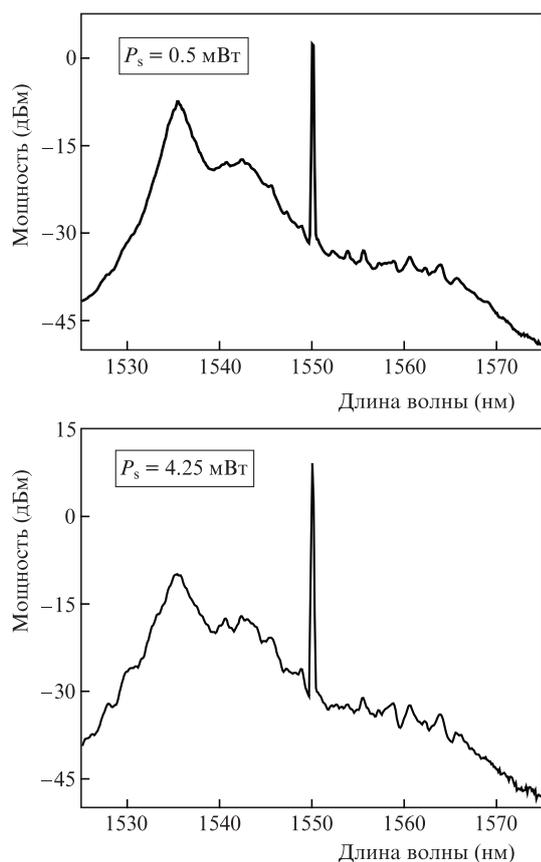


Рис.4. Спектры излучения на выходе экспериментальной установки (композитное волокно 100×100 мкм, длина световода 23 см) при различных мощностях введенного сигнала и мощности накачки 2.5 Вт.

наилучшие результаты были получены при использовании отрезка волокна длиной 23 см. На рис.3 представлены зависимости коэффициента усиления от мощности накачки при разных мощностях усиливаемого сигнала. Максимальное усиление ~ 9.1 дБ получено при мощности сигнала 0.5 мВт, удельное усиление составило около 0.4 дБ/см.

При малых мощностях сигнала, как и для световода 80×80 мкм, наблюдается существенное увеличение вклада мощности спонтанного излучения в общую выходную мощность. На рис.4 представлены спектры выходного излучения при различных мощностях усиливаемого сигнала. Уровень усиленного спонтанного излучения ниже усиливаемого сигнала примерно на 10 дБ при мощности

сигнала 0.5 мВт и на 20 дБ при мощности входного сигнала 4.25 мВт.

5. Заключение

В работе продемонстрированы полностью волоконные компактные усилители сигнала на основе композитных волокон с высоколегированной $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ фосфатной сердцевиной и кварцевой оболочкой. Использование сердцевины из фосфатного стекла с высокой концентрацией ионов эрбия позволило значительно сократить длину активной среды по сравнению с длинами, характерными для аналогичных схем на основе активных кварцевых волокон.

Исследованное волокно позволило получить практически значимый коэффициент усиления ~ 13.5 дБ. К достоинствам разработанных световодов относится высокое удельное усиление (около 0.4 дБ/см), которое на порядок выше, чем в традиционных кварцевых волокнах.

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН I.16П «Сверхчувствительные сенсоры и гигантское усиление полей метаматериалами».

1. Курков А.С., Наний О.Е. *Lightwave Russian Edition*, **1**, 14 (2003).
2. Hu Y., Jiang S., Luo T., Seneschal K., Morrell M., Smektala F., Honkanen S., Lucas J., Peyghambarian N. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **13** (7), 657 (2001).
3. Shoostari A., Meshkinfam P., Touam T., Andrews M.P., Najafi S.I. *Opt. Eng.*, **37** (4), 1188 (1998).
4. Yan Y.C., Faber A.D., De Waal H., Kik P.G., Polman A. *Appl. Phys. Lett.*, **71** (20), 2922 (1997).
5. Li L. et al. *Appl. Phys. Lett.*, **85**, 2721 (2004).
6. Буфетов И.А., Семенов С.Л., Косолапов А.Ф., Мелькумов М.А., Дудин В.В., Галаган Б.И., Денкер Б.И., Осико В.В., Сверчков С.Е., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **36** (3), 189 (2006) [*Quantum Electron.*, **36** (3), 189 (2006)].
7. Nandi P., Jose G. *Opt. Fiber Tech.*, **14** (14), 275 (2008).
8. Scarpignato G.C., Milanese D., Lousteau J., Boetti N.G., Mura E. *J. Engineering*, ID 858341 (2013).
9. Shan-Hui X., Zhong-Min Y., Zhou-Ming F., Qin-Yuan Z., Zhong-Hong J., Wen-Cheng X. *Chin. Phys. Lett.*, **26** (4), 047806 (2009).
10. Галаган Б.И., Денкер Б.И., Егорова О.Н., Камынин В.А., Поносова А.А., Сверчков С.Е., Семенов С.Л., Цветков В.Б. *Прикладная фотоника*, **3** (2), 146 (2016).
11. Martin R.A., Knight J.C. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **18** (4), 574 (2006).
12. Egorova O.N., Semjonov S.L., Velmiskin V.V., Yatsenko Yu.P., Sverchkov S.E., Galagan B.I., Denker B.I., Dianov E.M. *Opt. Express*, **22** (7), 7625 (2014).
13. Denker B.I., Galagan B.I., Kamynin V.A., Kurkov A.S., Sadovnikova Y.E., Semenov S.L., Sverchkov S.E., Velmiskin V.V., Dianov E.M. *Laser Phys. Lett.*, **10** (5), 055109 (2013).