

# Полностью волоконный одномодовый усилитель слабого сигнала для спектрального диапазона около 0.976 мкм

С.С.Алешкина, Д.С.Липатов, Т.А.Кочергина, В.В.Вельмискин, В.Л.Темялко, Л.В.Котов, Т.Л.Бардина, М.М.Бубнов, А.Н.Гурьянов, М.Е.Лихачев

*Разработана и реализована конструкция сохраняющего поляризацию одномодового иттербиевого волоконного световода для усиления излучения на длине волны около 0.976 мкм в полностью волоконной схеме. Особенностью разработанного световода являются низкие потери на сварку со стандартными одномодовыми световодами, имеющими диаметр сердцевины 10 мкм, что позволило создать полностью волоконный усилитель слабого сигнала с порогом усиления около 3 Вт и дифференциальной эффективностью преобразования излучения накачки в сигнал 9.8% в режиме насыщения. Показано, что разработанный усилитель подходит для усиления слабого сигнала. Так, при усилении на 20 дБ сигнала мощностью около 1 мВт соотношение усиленного сигнала к интегральной мощности люминесценции в области 0.976 мкм превышает 20 дБ. Продемонстрировано усиление на 40 дБ сверхслабого сигнала мощностью ~ 10 мкВт.*

**Ключевые слова:** иттербиевый волоконный световод, световод с большой площадью поля моды, иттербиевый усилитель.

## 1. Введение

В последнее время волоконные Yb-лазеры, излучающие в спектральной области около 0.98 мкм, вызывают все больший интерес в связи с перспективой их практического применения в медицине (на эту длину волны приходится пик поглощения воды), а также для замены громоздких промышленных газовых лазеров (на аргоне и эксимерного на криптоне) путем удвоения и учетверения частоты излучения. Большинство работ по созданию волоконных Yb-лазеров на длину волны  $\lambda = 0.98$  мкм посвящено созданию непрерывных источников лазерного излучения с высокой средней мощностью и высокой эффективностью [1–4]. Отметим, что ввиду отсутствия мощных одномодовых источников накачки (мощность коммерчески доступных одномодовых лазерных диодов (ЛД) на  $\lambda = 0.915$  мкм не превышает 300 мВт) все схемы для генерации и усиления на длине волны около 0.976 мкм и сами активные световоды адаптированы для случая распространения излучения накачки по оболочке [1–6]. Кроме того, в лазерах и усилителях, работающих в районе  $\lambda = 0.976$  мкм, фактором, ограничивающим эффективность преобразования накачки в сигнал, является усиление спонтанной люминесценции ионов Yb в спектральной области около 1.03 мкм. Последнее, как правило, решается путем уменьшения длины активного световода (при максимальной

инверсии коэффициент усиления в области 0.976 мкм в несколько раз выше коэффициента усиления на  $\lambda = 1.03$  мкм) и увеличения скорости поглощения излучения накачки из оболочки за счет увеличения соотношения диаметров сердцевины и оболочки. В результате существующие конструкции активных световодов зачастую не позволяют создать полностью волоконные лазерные схемы: большой размер сердцевины, а также необходимость селективного возбуждения фундаментальной моды требуют применения в схеме объемной оптики, что нарушает целостность лазерной конструкции и нивелирует преимущества схем на основе волоконных световодов (компактность, надежность и дешевизна) [1–4]. Более того, даже в случае полностью волоконных конструкций [5] большой размер активной сердцевины приводит к высоким порогам генерации (десятки ватт) и высоким потерям на сварку со стандартными одномодовыми световодами, диаметр сердцевины которых в области 0.976 мкм не превышает 10 мкм, что неприемлемо как для усилителей слабого сигнала, так и для полностью волоконных схем задающих импульсных лазеров.

Для создания усилителей слабого сигнала гораздо более перспективным является уменьшение размеров кварцевой оболочки, однако и этот подход имеет ограничения. Во-первых, коммерчески доступное оборудование (сварочные аппараты, скальпители и пр.) позволяет работать со световодами, диаметр кварцевой оболочки которых составляет 80 мкм и более. Кроме того, уменьшение диаметра кварцевой оболочки активного световода менее 125 мкм исключает возможность использования в схеме коммерчески доступных объединителей мощности сигнала и накачки, которые изготавливаются на основе световодов с двойной оболочкой с внешним диаметром 125 мкм.

Цель настоящей работы – оптимизация и создание полностью волоконного усилителя слабого сигнала для спектральной области около 0.976 мкм. Конструкция иттербиевого световода была оптимизирована как для до-

С.С.Алешкина, Т.А.Кочергина, В.В.Вельмискин, М.М.Бубнов, М.Е.Лихачев. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: sv\_alesh@fo.gpi.ru  
Д.С.Липатов, А.Н.Гурьянов. Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г.Десятых РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Тропинина, 49  
V.L.Temyanko, L.V.Kotov. College of Optical Sciences, University of Arizona, 1630 E. University Blvd, AZ 85721-0094 Tucson, USA  
Т.Л.Бардина. Московский физико-технический институт, Россия, Московская обл., 141701 Долгопрудный, Институтский пер., 9

стижения высокой эффективности работы в заданной спектральной области, так и для обеспечения низких потерь на сварку со стандартными одномодовыми световодами, имеющими диаметр сердцевины 10 мкм. Для создания полностью волоконной схемы усилителя был специально разработан объединитель мощности сигнала и накачки, размер сердцевины сигнальной жилы которого составил 10 мкм, а кварцевой оболочки – 80 мкм. Исследованы особенности усиления слабого сигнала на длине волны вблизи 0.976 мкм в иттербиевых световодах.

## 2. Дизайн активного световода

Для численного моделирования профиля показателя преломления (ППП) активного световода нами создана программа по решению скоростных уравнений, учитывающая радиальное распределение интенсивности поля моды, а также распределение легирующей добавки по сечению световода. Распределение интенсивности полей фундаментальной моды и мод высшего порядка получено путем решения скалярного волнового уравнения. Расчет выполнен в предположении, что световод является цилиндрически симметричным.

Основной проблемой существующих конструкций световодов для генерации или усиления излучения в области 0.976 мкм является то, что они не позволяют обеспечить эффективный ввод усиленного сигнала из активной сердцевины в стандартные пассивные одномодовые световоды, используемые для изготовления волоконно-оптических компонентов. По этой причине в настоящей работе рассматривается случай, когда диаметр сердцевины активного световода равен 10 мкм, а разность показателей преломления сердцевины и оболочки  $\Delta n$  составляет 0.002, что обеспечивает одномодовый режим работы световода. Нами выбрана конструкция световода с двойной отражающей оболочкой, причем первая оболочка с внешним диаметром 80 мкм выполнена из нелегированного кварцевого стекла, а вторая представляла собой полимерное покрытие с низким показателем преломления. Концентрация легирующей добавки составляла  $10^{26} \text{ м}^{-3}$  (0.23 мол. %), при другой концентрации ионов иттербия обратно пропорционально изменялась оптимальная длина световода, что не влияло на эффективность его работы на оптимальной длине. В настоящей работе проведено моделирование усилителя с накачкой ( $\lambda = 0.915 \text{ мкм}$ ) по оболочке, распространяющейся попутно распространению сигнала. Мощность накачки была выбрана равной 10 Вт (достаточной для преодоления порога усиления), а мощность задающего сигнала – 0.5 Вт (работа усилителя в режиме насыщения). При расчете учитывалась люминесценция, распространяющаяся в направлении распространения сигнала и против него.

Одним из способов увеличения эффективности генерации иттербиевого световода в области 0.976 мкм является кольцевое легирование волноведущей структуры [7] при нелегированной ионами  $\text{Yb}^{3+}$  центральной области сердцевины. Это позволяет достичь максимального уровня инверсии ионов иттербия при фиксированном соотношении мощности накачки и сигнала и тем самым обеспечить преимущественные условия для усиления излучения на длине волны 0.976 мкм. В настоящей работе исследовалась эффективность данного метода. Были рассмотрены три варианта легирования световода ионами  $\text{Yb}^{3+}$  (рис.1): легирование только сердцевины (случай I); леги-

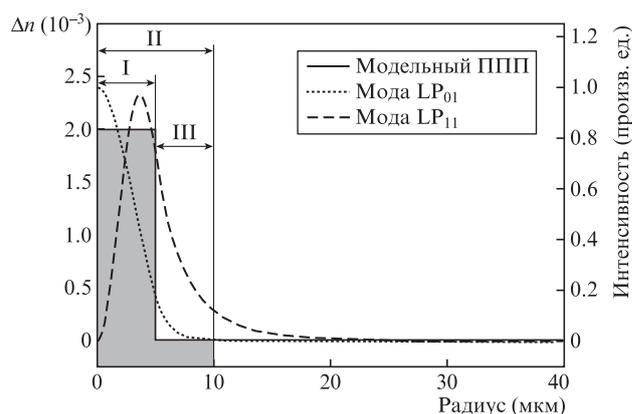


Рис.1. Модельный профиль показателя преломления световода и распределение интенсивности полей мод  $LP_{01}$  и  $LP_{11}$ . Серым цветом указаны области легирования (I – легирована только сердцевина, II – легирована сердцевина и прилегающая область оболочки, III – легирована только прилегающая к сердцевине область оболочки).

рованию сердцевины и прилегающей к ней области оболочки (II); легирование только области оболочки, прилегающей к сердцевине (сама сердцевина оставалась нелегированной) (III). Во всех трех случаях концентрация легирующей примеси была одинаковой. В табл.1 приведены полученные в результате моделирования расчетные параметры  $\text{Yb}$ -световода ( $I_s$  – интеграл перекрытия моды с областью легирования,  $I_p$  – интеграл перекрытия области распространения накачки с легированной областью,  $L_{opt}$  – оптимальная длина активного световода,  $\eta$  – эффективность усиления). Из таблицы видно, что наибольшую эффективность усиления фундаментальной моды можно получить при легировании только оболочки, когда интеграл перекрытия поля моды (на длине волны сигнала и люминесценции) и легированной области минимален, что находится в полном соответствии с работой [7]. В то же время особенностью рассмотренной нами конструкции световода является уменьшенный диаметр первой отражающей оболочки и наличие второй отражающей оболочки. В данном случае важным фактором, оказывающим влияние на модовый состав усиленного сигнала, является интеграл перекрытия легированной области и мод высшего порядка, формально находящихся за длиной волны отсечки, но распространяющихся в первой отражающей оболочке за счет отражения от второй. Из литературы известно, что при определенных условиях такие моды могут эффективно усиливаться, приводя к существенному ухудшению качества выходного пучка [8]. Как видно из табл.1, интеграл перекрытия моды  $LP_{11}$  (формально находящейся за длиной волны отсечки относительно первой отражающей оболочки) и области, легированной иттербием, при легировании только оболочки (случай III, см. рис.1) больше интеграла перекрытия для фундаментальной моды  $LP_{01}$ , что говорит о большем коэффициенте усиления моды  $LP_{11}$ . Поэтому можно ожидать, что коль-

Табл.1. Расчетные параметры  $\text{Yb}$ -световода.

Область легирования	$I_s (LP_{01})$	$I_s (LP_{11})$	$I_p$	$L_{opt} \text{ (м)}$	$\eta \text{ (\%)}$
I	0.8344	0.3697	0.0156	7	9.5
II	0.9969	0.7993	0.0692	6.5	21.96
III	0.1672	0.4352	0.0538	25	40.39

цевое легирование приведет не к повышению эффективности генерации фундаментальной моды на  $\lambda = 0.976$  мкм, а обеспечит маломодовый режим усиления сигнала, что неприемлемо в нашем случае. В связи с этим в рамках настоящей работы мы выбрали дизайн световода с одновременным легированием сердцевинки и оболочки (случай II).

### 3. Конструкция активного световода и его характеристики

Еще одной проблемой создания световодов для генерации в области 0.976 мкм является высокая скорость фотопотемнения, обусловленная высокой степенью инверсии ионов  $Yb^{3+}$  [9]. Поэтому для легирования была выбрана нечувствительная к эффекту фотопотемнения стеклянная матрица  $P_2O_5-Al_2O_3-SiO_2$ , которая также обеспечивает высокую растворимость ионов иттербия и низкий показатель преломления сердцевинки [10]. Концентрация оксида  $Yb$  в сетке стекла составила 0.16 мол.%. Следует отметить, что низкая чувствительность к эффекту фотопотемнения в фосфороалюмосиликатной стеклянной матрице обеспечивается только при избыточном легировании оксидом фосфора [10–11], что и было сделано для гарантированного подавления эффекта фотопотемнения; в результате показатель преломления области легированной ионами иттербия, оказался выше, чем нелегированного кварцевого стекла. В связи с этим описанный выше профиль показателя преломления был модифицирован – сердцевина была составлена из двух областей, легированных иттербием, причем центральная имела повышенный показатель преломления, что уменьшало диаметр поля фундаментальной моды.

Заготовка спроектированного волоконного световода изготавливалась методом MCVD. Для сохранения поляризации в оболочку заготовки были вставлены боросиликатные стержни. Из заготовки был вытянут световод с диаметром кварцевой оболочки 80 мкм. В процессе вытяжки световод покрывался отражающим полимером, обеспечивающим числовую апертуру  $NA \sim 0.45$ . Профиль показателя преломления световода приведен на рис.2; на вставке к рисунку показано изображение торца световода. Видно, что в процессе вытяжки световода произошла деформация сердцевинки – она стала эллиптической.

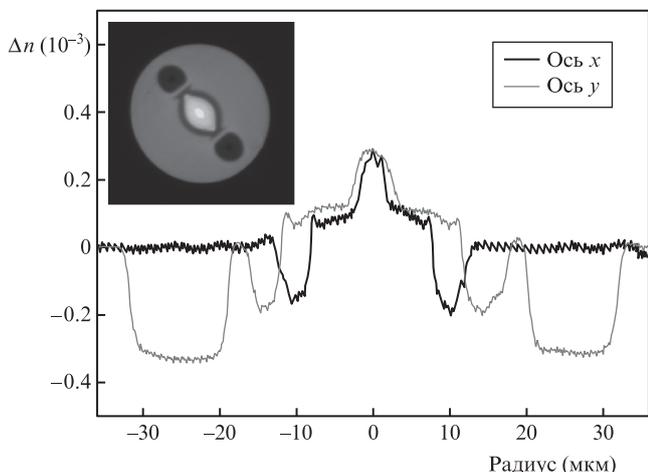


Рис.2. Профиль показателя преломления световода, измеренный по осям  $x$  и  $y$ . На вставке – изображение торца световода.

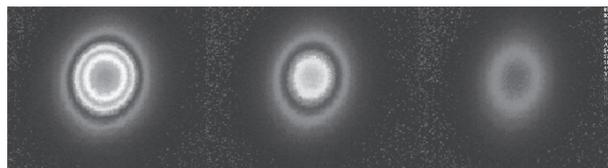


Рис.3. Модовый состав сердцевинки исследуемого световода, измеренный методом сканирующего пучка.

Исследование модового состава сердцевинки световода проводилось методом сканирующего пучка на  $\lambda = 1.06$  мкм, что обусловлено интенсивным поглощением излучения ионами  $Yb^{3+}$  на длине волны 0.976 мкм и спонтанной люминесценцией в области 1.03 мкм. Для возбуждения направляемых мод реализованного  $Yb$ -световода использовалось излучение, доставляемое одномодовым световодом со ступенчатым ППП и размером сердцевинки 6 мкм, который перемещался вдоль диаметра исследуемого  $Yb$ -световода. Установлено, что смещение возбуждающего световода относительно исследуемого не приводит к возбуждению мод высшего порядка (рис.3), а только способствует плавному уменьшению интенсивности выходного пучка; это позволяет говорить о работе активного  $Yb$ -световода на  $\lambda = 1.06$  мкм в одномодовом режиме. Диаметр поля фундаментальной моды по осям  $x$  и  $y$  составил 12 и 14 мкм соответственно. Такое различие, очевидно, связано с эллиптичностью сердцевинки, вызванной ее деформацией в процессе консолидации заготовки световода с боросиликатными стержнями.

Поглощение излучения из оболочки измерялось методом последовательного уменьшения длины. На длине волны накачки (0.915 мкм) поглощение из оболочки составило 3.4 дБ/м. Потери на сварку исследуемого световода со световодом со ступенчатым ППП и диаметром поля моды около 10 мкм ( $\Delta n = 0.002$ ) не превышали 0.35 дБ. При возбуждении фундаментальной моды излучением, поляризованным вдоль одной из осей световода, на выходе отрезка световода длиной 1 м коэффициент поляризации экстинкции превысил 23 дБ.

### 4. Усилитель слабого сигнала на основе созданного световода

Иттербиевый световод был протестирован в схеме усилителя слабого сигнала (рис.4). В качестве узкополосного источника сигнала ( $\Delta\lambda \sim 0.06$  нм) использовался полупроводниковый лазерный диод с волоконным выводом излучения. Стабилизация длины волны ЛД обеспечивалась слабоотражающей (15%–20%) волоконной брэгговской решеткой, находящейся на расстоянии 1 м от лазерного диода. Изменение длины волны сигнала осуществлялось путем замены брэгговской решетки. Мощность сигнала, подводимого к активному световоду, оценивалась

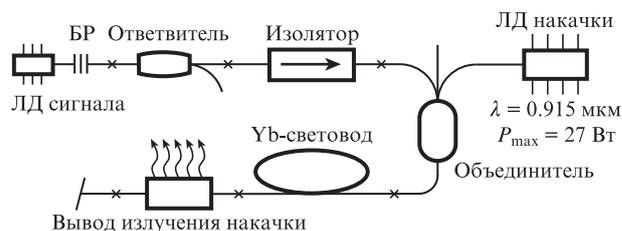


Рис.4. Схема усилителя (БР – брэгговская решетка).

по мощности сигнала на свободном конце ответвителя, приваренного к выходному концу брэгговской решетки (см. рис.4), с учетом потерь на сварках и элементах схемы. Чтобы предотвратить повреждение сигнального ЛД люминесценцией на  $\lambda = 0.98$  мкм, перед усилительной частью схемы использовался изолятор.

Для подведения излучения сигнала и накачки к активному световоду применялся специально разработанный сплавной волоконный объединитель мощности (конфигурация 2 + 1 в 1), сигнальный световод которого имел диаметры сердцевинки и оболочки, равные 10 и 80 мкм соответственно. Числовая апертура сердцевинки сигнального световода составила 0.08. В качестве портов накачки использовался многомодовый световод 105/125 с  $NA = 0.22$ . Потери мощности излучения накачки, распространяющегося по оболочке, в объединителе накачки и сигнала составили 0.8 дБ. Потери мощности сигнала, распространяющегося по сердцевинке, составили 2.9 дБ. Источником накачки служил коммерчески доступный многомодовый ЛД с волоконным выходом (105/125), с длиной волны излучения около 0.915 мкм и максимальной выходной мощностью 27 Вт. Непоглощенное излучение накачки выводилось из системы с помощью специально разработанного вывода, изготовленного на основе световода 10/125 [12]; затем этот вывод стыковался со световодом с теми же диаметром (10 мкм) и  $NA$  сердцевинки, но вытянутым в полимере с высоким показателем преломления, что позволяло удалить оставшееся излучение накачки из оболочки. Выходной конец данного световода был сколот под углом около  $8^\circ$  для подавления обратного отражения сигнала. Длина активного световода, обеспечивающая максимальную эффективность усиления в области 0.976 мкм, составила 45 см.

## 5. Результаты и их обсуждение

На рис.5 приведена зависимость эффективности усиления сигнала в исследуемом световоде от длины волны распространяющегося излучения, измеренная в режиме насыщения (мощность входного сигнала 50 мВт). Видно, что максимум усиления лежит в области 0.977 мкм, эффективность усиления в этом случае составила 9.7% (рис.6). При этом порог непрерывной генерации по накачке не превышал 3 Вт, что существенно меньше, чем у известных усилителей на основе специальных волоконных световодов с

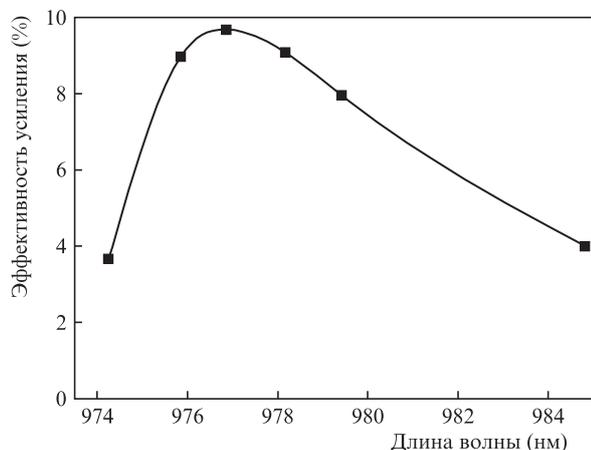


Рис.5. Эффективность усиления сигнала, измеренная в режиме насыщения, при максимальной мощности накачки.

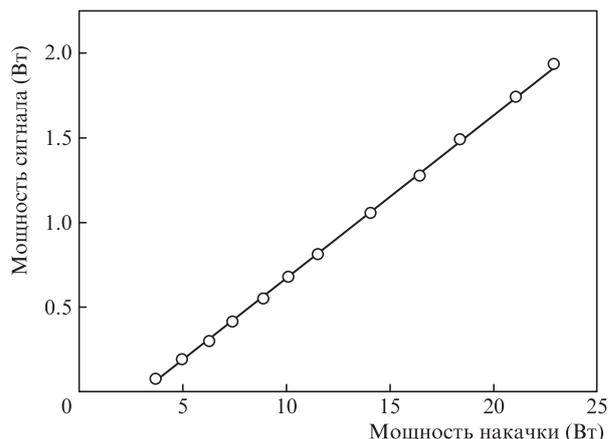


Рис.6. Зависимость мощности сигнала ( $\lambda = 0.977$  мкм) на выходе усилителя от мощности накачки.

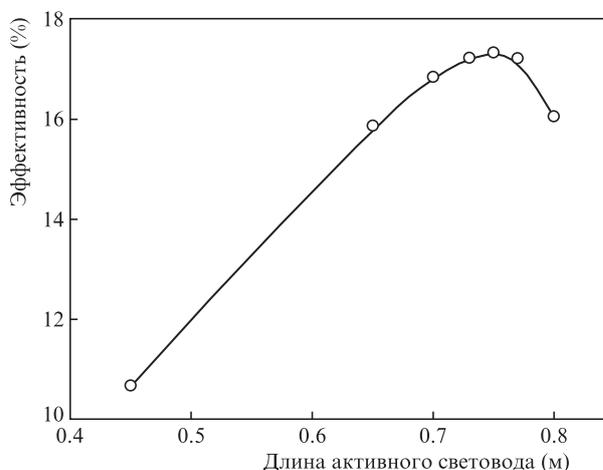


Рис.7. Усиление сигнала по длине активного световода, рассчитанное с учетом распределения легирующей добавки по сечению световода и с учетом условий проведенного эксперимента.

накачкой по оболочке [1–5]. Таким образом, для достижения относительно небольшой выходной мощности (на уровне 1 Вт) в нашем случае требуется минимальная (по сравнению с другими конструкциями световодов, предназначенных для усиления в области 0.976 мкм) мощность накачки.

Стоит отметить, что эффективность усиления, рассчитанная для реального ППП, с учетом измеренного распределения ионов иттербия по радиусу световода (радиус легируемой области был выбран как среднее между минимальным (по оси  $x$ ) и максимальным (по оси  $y$ ) радиусами области легирования), а также условий эксперимента (мощности излучения накачки и мощности входного сигнала) составила 17%; оптимальная длина световода была 75 см (рис.7). При этом, согласно расчету, при длине активного световода 45 см эффективность усиления равна 10.7%, что близко к значению, полученному в настоящей работе. Несоответствие расчетной и экспериментально полученной оптимальной длины (в эксперименте наблюдался более быстрый рост люминесценции на длине волны 1.03 мкм) можно объяснить «захватом» люминесценции оболочечными модами, которые вследствие малого диаметра первой отражающей оболочки могут иметь заметное перекрытие с сердцевинкой световода. Ранее нами было установлено, что многомодовый

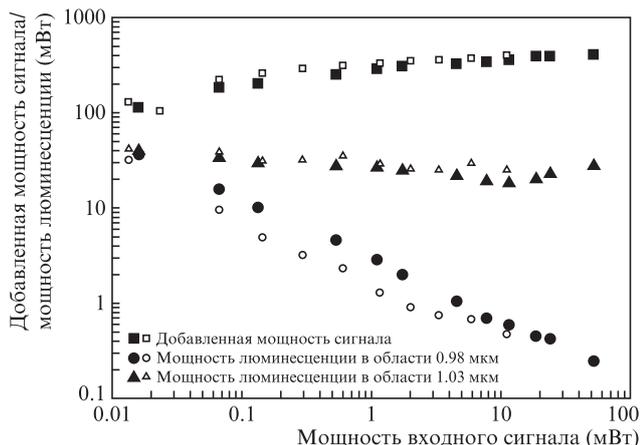


Рис.8. Зависимости мощности сигнала на выходе усилителя, а также люминесценции в области 0.98 и 1.03 мкм от мощности входного сигнала. Входной сигнал обеспечивается одним (976.9 нм, темные точки) или двумя (975.8 и 977.3 нм, светлые точки) источниками, длины волн излучения которых попадают в область максимума усиления ионов  $Yb^{3+}$ .

режим распространения излучения на длине волны люминесценции приводит к снижению оптимальной длины активного световода, усиливающего в области длин волн 0.976 мкм [13]. Дополнительным фактором снижения эффективности могла служить эллиптичность сердцевины и неравномерное распределение ионов  $Yb^{3+}$  по сечению световода (центральная область сердцевины имела более высокую концентрацию  $Yb^{3+}$ ).

Для оценки возможности применения световода в качестве усилителя слабого сигнала было проведено исследование влияния мощности входного сигнала на отношение сигнал/шум на выходе усилителя (отношение мощности усиленного сигнала к интегральной мощности люминесценции вблизи 0.976 мкм). Уровень люминесценции с максимумом в области 1.03 мкм не учитывался из-за возможности эффективной фильтрации излучения в этой спектральной области с помощью коммерчески доступных волоконных фильтров. Измерения проводились в спектральном диапазоне 0.974–0.985 мкм. Чтобы обеспечить одинаковые параметры входного сигнала, в схему был интегрирован аттенуатор входного сигнала, который позволял изменять мощность сигнала от 10 мкВт до 50 мВт.

В качестве примера на рис.8 показаны зависимости от мощности входного сигнала добавленной мощности

на длине волны 976.9 нм, генерируемой мощности люминесценции на 0.98 мкм и люминесценции на 1.03 мкм. Приведенные зависимости определяют наилучшее отношение сигнал/шум, поскольку длина волны задающего сигнала отвечает максимуму усиления. Таким образом, при мощности входного сигнала около 1 мВт может быть достигнуто отношение сигнал/шум более 20 дБ, что для большинства применений вполне достаточно. Спектральная зависимость отношения сигнал/шум, измеренная для узкополосного источника при мощности входного сигнала 1 мВт, приведена на рис.9. Исследование спектров усиления при уровне входного сигнала 10 мкВт показало возможность достижения усиления  $\sim 40$  дБ. Отметим, что в данном случае высокое отношение сигнал/шум можно обеспечить, используя спектральные фильтры, подавляющие излучение люминесценции на длинах волн, отличных от длины волны усиливаемого сигнала (что наиболее эффективно при усилении одночастотного либо узкополосного сигнала). На рис.10 показана измеренная спектральная зависимость коэффициента усиления для слабого сигнала мощностью 10 мкВт, из которой следует, что усиление более 25 дБ реализуется в спектральном диапазоне 974–980 нм.

Отметим также, что форма спектров усиленной спонтанной люминесценции изменялась с длиной волны усиливаемого сигнала. Мы полагаем, что это связано с неоднородным уширением спектров люминесценции ионов  $Yb^{3+}$ , в результате чего снятие инверсной населенности и снижение люминесценции происходит неравномерно и наблюдается преимущественно на длинах волн сигнала и прилегающих длинах волн [4]. Полученные данные позволяют предположить, что использование широкополосного излучения позволит дополнительно снизить уровень люминесценции на 0.98 мкм.

Для проверки этого предположения был проведен эксперимент по усилению сигнала на двух длинах волн (975.8 нм – 1-я компонента и 977.3 нм – 2-я компонента), попадающих в область максимума усиления. Исследовалось усиление излучения на данных длинах волн как по отдельности, так и одновременно. В каждом случае интегральная мощность входящего в световод сигнала была неизменной. В эксперименте с одновременным усилением «широкополосного» сигнала, состоящего из двух спектральных компонент, мощности обеих компонент составлялись одинаковыми. Запись всех спектров осуществлялась при неизменных положениях световодов и элемен-

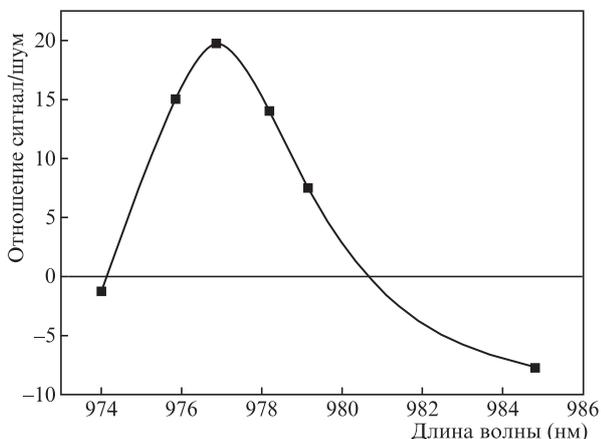


Рис.9. Спектральная зависимость интегрального отношения сигнал/шум при мощности входного сигнала 1 мВт.

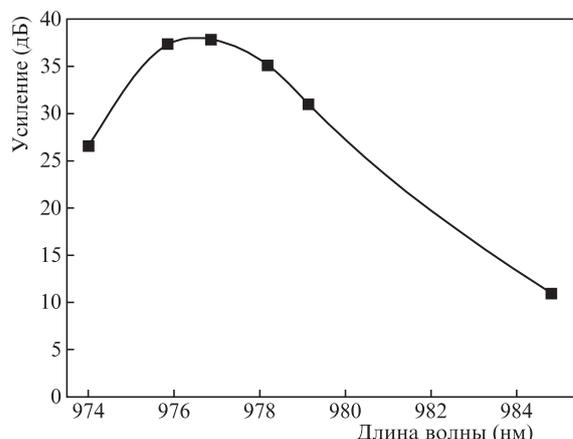


Рис.10. Зависимость усиления сигнала мощностью 10 мкВт от длины волны.

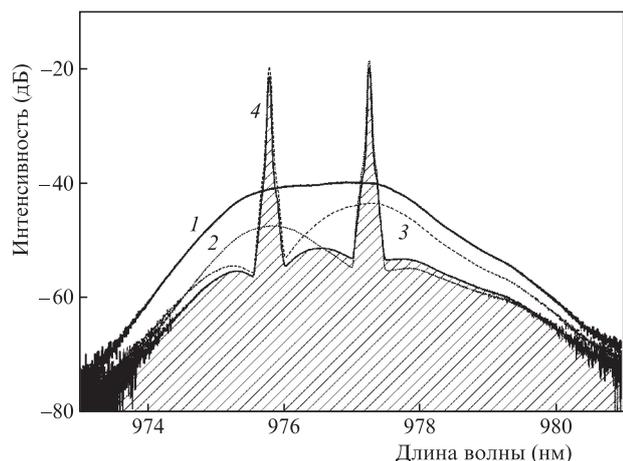


Рис.11. Спектры на выходе усилителя: 1 – люминесценции в отсутствие задающего сигнала; 2 – сигнала на  $\lambda = 975.8$  нм; 3 – сигнала на  $\lambda = 977.3$  нм; 4 – «широкополосного» сигнала, состоящего из двух сигналов на  $\lambda = 975.8$  и  $977.3$  нм. Мощность накачки равна 8.9 Вт, интегральная мощность сигнала составила 140 мкВт.

тов схемы, устройств регистрации спектра и мощности излучения накачки. Результаты эксперимента представлены на рис.11. Здесь же приведен спектр люминесценции, зарегистрированный при той же мощности излучения накачки, но в отсутствие задающего сигнала. Видно, что усиление узкополосного сигнала приводит к существенному изменению спектра люминесценции выходного сигнала с характерным «проседанием» спектра в области, прилегающей к рабочей длине волны. Спектр усиления «широкополосного» сигнала содержит спектральные компоненты, аналогичные тем, которые наблюдаются при независимом усилении каждого из сигналов, однако, как видно из рисунка, в области, расположенной между спектральными компонентами, имеет место значительное «проседание» спектра люминесценции. Таким образом, широкополосный спектр задающего сигнала позволяет уменьшить интегральную мощность люминесценции в области 0.98 мкм. Спектр люминесценции, зарегистрированный в отсутствие задающего сигнала, соответствует максимальной интенсивности люминесценции при заданной мощности накачки.

В режиме усиления «широкополосного» сигнала (состоящего из двух спектральных компонент) были проведены измерения уровня выходного сигнала и интегральной люминесценции в области 0.976 и 1.03 мкм. В этом режиме при усилении слабого сигнала отношение сигнал/шум

улучшается почти на 4.5 дБ по сравнению с усилением узкополосного сигнала (см. рис.8).

## 6. Заключение

Разработана и реализована конструкция чисто кварцевого активного световода, предназначенного для усиления излучения на  $\lambda = 0.98$  мкм и создания на его основе полностью волоконных схем лазеров и усилителей с накачкой по оболочке. Основная идея, развитая в настоящей работе, состояла в дополнительном легировании оболочки световода с целью увеличения скорости поглощения излучения накачки из оболочки. Разработанный световод протестирован в схеме полностью волоконного усилителя слабого сигнала. Показана перспективность применения предложенного световода для усиления слабого сигнала. Установлена зависимость отношения сигнал/шум от спектральной ширины усиливаемого сигнала.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-79-00187).

- Boulet J., Zaouter Y., Desmarchelier R., Cazaux M., Salin F., Saby J., Bello-Doua R., Cormier E. *Opt. Express*, **16** (22), 17891 (2008).
- Röser F., Jauregui C., Limpert J., Tünnermann A. *Opt. Express*, **16** (22), 17310 (2008).
- Leich M., Jäger M., Grimm S., Hoh D., Jetschke S., Becker M., Bartelt H. *Laser Phys. Lett.*, **11** (4), 045102 (2014).
- Matniyaz T., Li W., Kalichevsky-Dong M., Hawkins T.W., Parsons J., Gu G., Dong L. *Opt. Lett.*, **44**, 807 (2019).
- Aleshkina S.S., Likhachev M.E., Lipatov D.S., Medvedkov O.I., Bobkov K.K., Bubnov M.M., Guryanov A.N. *Proc. SPIE*, **9728**, 97281C (2016).
- Aleshkina S.S., et al. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **30** (1), 127 (2018).
- Nilsson J., Minelly J.D., Paschotta R., Tropper A.C., Hanna D.C. *Opt. Lett.*, **23**, 355 (1998).
- Eidam T., Rothhardt J., Stutzki F., Jansen F., Hädrich S., Carstens H., Jauregui C., Limpert J., Tünnermann A. *Opt. Express*, **19** (1), 255 (2011).
- Koponen J., Laurila M., Hotoleanu M. *Appl. Opt.*, **47** (25), 4522 (2008).
- Likhachev M., Aleshkina S., Shubin A., Bubnov M., Dianov E., Lipatov D., Guryanov A. *Proc. CLEO/Europe and EQEC 2011* (Munich, 2011, paper CJ\_P24).
- Unger S., Schwuchow A., Jetschke S., Reichel V., Scheffel A., Kirchhof J. *Proc. SPIE*, **6890**, 689016 (2008).
- Aleshkina S.S., Kochergina T.A., Bobkov K.K., Kotov L.V., Bubnov M.M., Park J., Likhachev M.E. *Proc. CLEO 2016* (San Jose, USA, 2016, paper JTU5A.106).
- Алешкина С.С., Бардина Т.Л., Липатов Д.С., Бобков К.К., Бубнов М.М., Гурьянов А.Н., Лихачев М.Е. *Квантовая электроника*, **47** (12), 1109 (2017) [*Quantum Electron.*, **47** (12), 1109 (2017)].