

Исследование факторов, снижающих эффективность иттербиевых волоконных лазеров и усилителей, работающих в спектральной области вблизи 0.98 мкм

С.С.Алешкина, Т.Л.Бардина, Д.С.Липатов, К.К.Бобков,
М.М.Бубнов, А.Н.Гурьянов, М.Е.Лихачев

Проведено исследование факторов, снижающих эффективность накачиваемых по оболочке иттербиевых волоконных лазеров и усилителей, работающих в спектральной области вблизи длины волны 0.98 мкм. Установлено, что неодномодовость сердцевины активного световода способствует ускоренному развитию усиленной спонтанной люминесценции в области $\lambda = 1.03$ мкм, что снижает максимально достижимую эффективность усилителя. Исследовано влияние спонтанной люминесценции, распространяющейся в первой отражающей оболочке. Теоретически показано, что максимальной эффективности преобразования излучения накачки в сигнал можно достичь при отношении диаметров сердцевины и оболочки многомодового активного световода, равном 0.7–1. Изготовлен и исследован волоконный световод с отношением 0.76 (при диаметрах сердцевины и оболочки 95 и 125 мкм соответственно), и достигнута эффективность 66%, что является рекордом для иттербиевых лазерных систем с накачкой по оболочке, излучающих в области $\lambda = 0.98$ мкм.

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

1. Введение

Совершенствование иттербиевых волоконных лазеров и усилителей в настоящее время является одним из наиболее активно развивающихся направлений волоконной оптики. Важное преимущество иона иттербия перед другими ионами редкоземельных элементов – наиболее простая схема энергетических уровней, исключая существование процессов концентрационного тушения, таких как ап-конверсия и поглощение из возбужденного состояния. Штарковское расщепление энергетических уровней иона иттербия обеспечивает генерацию излучения в области $\lambda > 1$ мкм по четырехуровневой лазерной схеме, характеризующейся низким порогом по накачке (низким уровнем инверсной населенности, необходимой для усиления). Как следствие, именно с использованием иттербиевых волоконных лазеров к настоящему моменту получены наибольшая эффективность и максимальные средняя и пиковая мощности на выходе.

В то же время схема уровней ионов иттербия позволяет осуществлять генерацию и по трехуровневой лазерной схеме в спектральном диапазоне около 0.98 мкм. Такие лазеры являются весьма перспективными для целого ряда применений. Мощные одномодовые лазеры, генерирующие излучение в области $\lambda = 0.98$ мкм, могут быть исполь-

зованы для накачки одномодовых иттербиевых и эрбиевых лазеров по сердцевине (для усиления импульсного излучения до высокой пиковой мощности и создания сверхкоротких резонаторов). Кроме того, удвоение и учетверение частоты излучения таких лазеров перспективно с целью замены аргонового лазера. Привлекательным подходом с практической точки зрения является замена полупроводниковых многомодовых диодов накачки многомодовыми волоконными лазерами, генерирующими вблизи длины волны 0.98 мкм. В последнем случае преимуществом волоконных источников перед их полупроводниковыми аналогами является то, что они обладают узким спектром излучения и более высокой стабильностью центральной длины волны, а также потенциально позволяют масштабировать выходную мощность до субкиловаттного уровня [1].

Следует отметить, что иттербиевым волоконным лазерам с длиной волны генерации около 0.98 мкм посвящено сравнительно небольшое число работ, и такие лазеры практически не используются в настоящее время. Это связано с тем, что для достижения высокой эффективности генерации иттербиевых лазеров, излучающих в области $\lambda = 0.98$ мкм, необходимо выполнение целого ряда требований. Одним из таких требований является сохранение высокой инверсной населенности (не менее 50%) вдоль всего активного световода. Второе важное требование – это подавление нежелательной люминесценции в области $\lambda > 1$ мкм. Для этой цели приходится сокращать рабочую длину иттербиевого световода, вследствие чего увеличивается доля непоглощенной накачки, и снижается полная эффективность волоконного лазера. Как показывают численные расчеты, основным методом увеличения эффективности работы лазеров, генерирующих излучение в указанной области, является увеличение соотношения диаметров сердцевины и оболочки, позволяющее повысить скорость поглощения накачки из оболочки и тем самым уменьшить долю непоглощенной накачки [2].

С.С.Алешкина, К.К.Бобков, М.М.Бубнов, М.Е.Лихачев. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: sv_alesh@fo.gpi.ru

Т.Л.Бардина. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141701 Долгопрудный, Институтский пер., 9

Д.С.Липатов, А.Н.Гурьянов. Институт химии высококичистых веществ им. Г.Г.Десятых РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Тропинина, 49

Поступила в редакцию 23 октября 2017 г.

Прямой численный расчет предсказывает возможность преобразования мощности излучения накачки на длине волны 0.92 мкм в излучение сигнала на длине волны 0.98 мкм с эффективностью, близкой к 80% относительно введенной мощности накачки. В то же время на практике в мощных лазерных системах (с выходной мощностью более нескольких ватт) столь высокое значение эффективности к настоящему моменту достигнуто не было. Наибольшая эффективность преобразования излучения накачки в сигнал на длине волны 0.98 мкм была продемонстрирована в лазере на основе микроструктурированного световода типа PCF (Photonic Crystal Fiber) с отношением диаметров сердцевин и оболочки 0.4 и составила около 50% [3]. Следует отметить работы [4, 5], в которых фактически реализован случай накачки непосредственно по многомодовой сердцевине, а близкий к одномодовому режим работы лазера получен путем создания конусной перетяжки с одной стороны световода. Данный подход представляется наиболее перспективным: теоретические расчеты предсказывают максимальную эффективность преобразования накачки в сигнал в случае, когда размер области, в которой распространяется накачка, равен размеру сердцевин. Однако достигнутая в [4, 5] эффективность одномодового лазера едва превышала 30%–35% (50% в случае работы в многомодовом режиме [5]). Эффективность преобразования, равная 81%, была получена только в маломощной схеме с накачкой по сердцевине, в которой в качестве активного элемента схемы использовался одномодовый волоконный световод с диаметром сердцевин 6 мкм [6].

Необходимо подчеркнуть, что к настоящему моменту применяемые для расчетов лазеров и усилителей скоростные уравнения выведены при условии, что световоды, используемые в схеме, являются одномодовыми на длинах волн люминесценции [7], однако это, вообще говоря, не верно. Так, в работах [3] и [8] исследовался идентичный световод типа PCF с размерами сердцевин и оболочки 80 и 200 мкм соответственно. В этих работах качество пучка M^2 варьировалось от 1.2 до 2.2 (использовалось селективное возбуждение фундаментальной моды при помощи объемной оптики), что свидетельствует о не одномодовости такой структуры. Еще более ярким примером являются конусные световоды, где одномодовый режим распространения получен посредством селективного возбуждения рабочей моды в сильно многомодовом световоде [4, 5].

Во всех перечисленных случаях люминесценция в области 1.03 мкм, генерируемая ионами иттербия, может свободно захватываться как фундаментальной модой, так и модами высшего порядка, что требует соответствующей модификации скоростных уравнений (большее число распространяющихся мод соответствует большей мощности захваченной люминесценции). Также вызывает вопрос возможность усиления спонтанной люминесценции, захваченной апертурой внутренней оболочки световода. Несмотря на меньший коэффициент усиления по сравнению с модами, распространяющимися по сердцевине световода, в данном случае можно ожидать более высокого (на несколько порядков) уровня «затравочного» сигнала спонтанной люминесценции вследствие того, что апертура первой отражающей оболочки существенно превышает апертуру сердцевин.

В настоящей работе проведено теоретическое и экспериментальное исследование влияния спонтанной люми-

несценции ионов иттербия с максимумом в области $\lambda = 1.03$ мкм на выходные характеристики волоконных лазерных систем, излучающих в спектральном диапазоне около 0.98 мкм. При расчетах учтена доля люминесценции, захваченная модами высшего порядка сердцевин, а также модами, удерживаемыми первой отражающей оболочкой. Определены оптимальные характеристики иттербиевых волоконных световодов, позволяющие получить максимальную эффективность генерации. В соответствии с проведенными расчетами реализован волоконный усилитель сигнала на длине волны 0.976 мкм на основе многомодового иттербиевого световода с оптимальными характеристиками. Достигнута рекордно высокая эффективность преобразования излучения накачки в сигнальное излучение по сравнению с эффективностью других мощных лазерных систем, работающих в области $\lambda = 0.98$ мкм и накачиваемых многомодовыми полупроводниковыми источниками.

2. Теория

В первую очередь нами было проведено теоретическое исследование схемы иттербиевого волоконного усилителя с накачкой, распространяющейся по оболочке по направлению распространения сигнала. Моделирование выполнено путем решения стандартных скоростных уравнений, предполагающих наличие двух энергетических уровней, между которыми осуществляются переходы электронов, сопровождающиеся излучением или поглощением фотонов [7]. При расчетах учитывалось поглощение и излучение фотонов на длинах волн накачки ($\lambda = 0.915$ мкм), сигнала ($\lambda = 0.976$ мкм) и спонтанной люминесценции (спектр люминесценции от 0.915 до 1.1 мкм разбивался на 60 участков, изменение мощности люминесценции по длине световода рассчитывалось отдельно для каждого участка). Для простоты нами было сделано допущение, что интеграл перекрытия фундаментальной моды сердцевин световода с областью легирования (I_s) равен единице, а интеграл перекрытия мод оболочки с областью легирования (I_p) равен отношению площадей сердцевин (A_{core}) и оболочки (A_{clad}). Легированная область соответствовала области сердцевин.

Необходимо отметить, что с точки зрения скоростных уравнений для изменения сигнала по длине световода не имеет значения (с точностью до величины интеграла перекрытия), работает световод в многомодовом или одномодовом режиме; важны лишь плотности мощности распространяющегося излучения и накачки. Ситуация оказывается иной при расчете мощности усиленной спонтанной люминесценции. В случае многомодовой сердцевин нами было учтено, что с увеличением количества мод сердцевин увеличение мощности захваченной люминесценции происходит пропорционально их числу, которое определяется по формуле [7]

$$N_{core} = V_{core}^2/2, \quad (1)$$

где $V_{core} = \pi D_{core} NA_{core} \lambda_{lum}$ – нормализованная частота; D_{core} – диаметр сердцевин; NA_{core} – числовая апертура сердцевин; λ_{lum} – длина волны излучения. Кроме того, в расчетах учитывалось, что излучение спонтанной люминесценции распространяется как в прямом, так и в обратном направлении (относительно направления распространения сигнала).

Несколько иная ситуация имеет место при расчете спонтанной люминесценции, удерживаемой первой отражающей оболочкой. В этом случае излучающей областью является сердцевина, но захватывается все излучение люминесценции, попавшее в апертуру первой отражающей оболочки NA_{clad} . Число мод, распространяющихся по оболочке, может быть оценено при помощи формулы

$$N_{clad} = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi D_{clad} NA_{clad}}{\lambda_{lum}} \right)^2. \quad (2)$$

Доля захваченной спонтанной люминесценции пропорциональна произведению числа мод, распространяющихся по оболочке, и интеграла перекрытия мод оболочки с областью легирования: $N_{clad} I_p$. Для оценки влияния мод оболочки на выходные характеристики усилителя в систему скоростных уравнений были добавлены соответствующие уравнения. Уровень «серых» потерь принят равным 50 дБ/км.

В итоге скоростные уравнения имели следующий вид:

$$\frac{dP_p}{dz} = (N_2 \sigma_p^{(e)} - N_1 \sigma_p^{(a)}) I_p P_p - \alpha_p^0 P_p,$$

$$\frac{dP_s}{dz} = (N_2 \sigma_s^{(e)} - N_1 \sigma_s^{(a)}) I_s P_s - \alpha_s^0 P_s,$$

$$\begin{aligned} \frac{dP_A^+(v_j)}{dz} &= (N_2 \sigma_{v_j}^{(e)} - N_1 \sigma_{v_j}^{(a)}) I_s P_A^+(v_j) - \alpha_{v_j}^0 P_A^+(v_j) \\ &+ N_2 \sigma_{v_j}^{(e)} I_s v_j \Delta v_j N_{core}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dP_A^-(v_j)}{dz} &= - (N_2 \sigma_{v_j}^{(e)} - N_1 \sigma_{v_j}^{(a)}) I_s P_A^-(v_j) + \alpha_{v_j}^0 P_A^-(v_j) \\ &- N_2 \sigma_{v_j}^{(e)} I_s v_j \Delta v_j N_{core}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{dP_{Aclad}^+(v_j)}{dz} &= (N_2 \sigma_{v_j}^{(e)} - N_1 \sigma_{v_j}^{(a)}) I_p P_{Aclad}^+(v_j) \\ &- \alpha_{v_j}^0 P_{Aclad}^+(v_j) + N_2 \sigma_{v_j}^{(e)} I_p v_j \Delta v_j N_{clad}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dP_{Aclad}^-(v_j)}{dz} &= - (N_2 \sigma_{v_j}^{(e)} - N_1 \sigma_{v_j}^{(a)}) I_p P_{Aclad}^-(v_j) \\ &+ \alpha_{v_j}^0 P_{Aclad}^-(v_j) - N_2 \sigma_{v_j}^{(e)} I_p v_j \Delta v_j N_{clad}, \end{aligned}$$

где P_p – мощность накачки; P_s – мощность сигнала; $P_A^{+(-)}(v_j)$ – мощность люминесценции сердцевины, распространяющейся соответственно в (против) направлении распространения сигнала; $P_{Aclad}^{+(-)}(v_j)$ – мощность люминесценции оболочки, распространяющейся соответственно в (против) направлении распространения сигнала; $N_1 = A/(A + B)$ – населенность нижнего лазерного уровня; $N_2 = N_0 - N_1$ – населенность верхнего лазерного уровня; N_0 – концентрация редкоземельного элемента в сетке стекла; $\sigma_{s(p,v_j)}^{(e),(a)}$ – сечение излучения (поглощения)

сигнала (накачки, люминесценции); $\alpha_{s(p,v_j)}^0$ – «серые» потери на длинах волн сигнала (накачки, люминесценции);

$$\begin{aligned} A &= A_c + W_{se} + W_{ASE}^c + W_{ASEback}^c \\ &+ W_{ASEclad}^c + W_{ASEcladback}^c + R_{pe}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B &= W_{sa} + W_{ASE}^a + W_{ASEback}^a + W_{ASEclad}^a \\ &+ W_{ASEcladback}^a + R_{pa}; \end{aligned}$$

$A_c = 1/\tau$ – вероятность спонтанного перехода;

$$W_{se(sa)} = P_s \frac{\sigma_s^{(e(a))} I_s}{h\nu_s A_{core}}; \quad R_{pe(pa)} = P_p \frac{\sigma_p^{(e(a))} I_p}{h\nu_p A_{core}};$$

$$W_{ASE(ASEback)}^{(a)} = \int P_A^{+(-)}(v) \frac{\sigma_v^{(e(a))} I_s}{h\nu A_{core}} dv;$$

$$W_{ASEclad(ASEcladback)}^{(a)} = \int P_{Aclad}^{+(-)}(v) \frac{\sigma_v^{(e(a))} I_p}{h\nu A_{core}} dv.$$

На рис.1 приведены рассчитанные зависимости эффективности усиления сигнала на длине волны 0.976 мкм от соотношения диаметров сердцевины и оболочки для световодов с одномодовой и многомодовой сердцевины. В расчетах использовались следующие параметры: содержание иттербия в сердцевине $0.88 \times 10^{25} \text{ м}^{-3}$, разность показателей преломления сердцевины и оболочки $\Delta n = 0.0025$, апертура отражающей оболочки $NA = 0.46$. В качестве матрицы сердцевины активного световода была выбрана нечувствительная к эффекту фотопотемнения фосфоросиликатная матрица [9]. Сечения люминесценции и поглощения были взяты из работы [10]. Уровень входного сигнала в каждом случае подбирался таким образом, чтобы усилитель работал в режиме насыщения (изменение уровня входного сигнала в два раза приводит

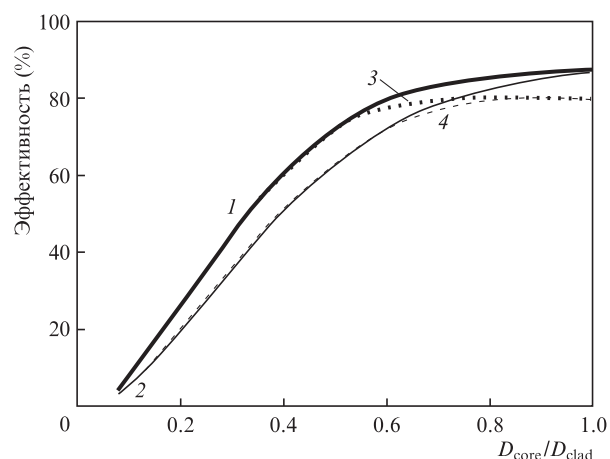


Рис.1. Рассчитанная зависимость эффективности усиления сигнала в иттербиевом волоконном световоде от соотношения диаметров сердцевины и оболочки в предположении одномодовой сердцевины (1), сердцевины, поддерживающей многомодовый режим распространения на длинах волн люминесценции (2), а также одномодовой (3) и многомодовой (4) сердцевины на длинах волн люминесценции с учетом захвата спонтанной люминесценции модами первой отражающей оболочки.

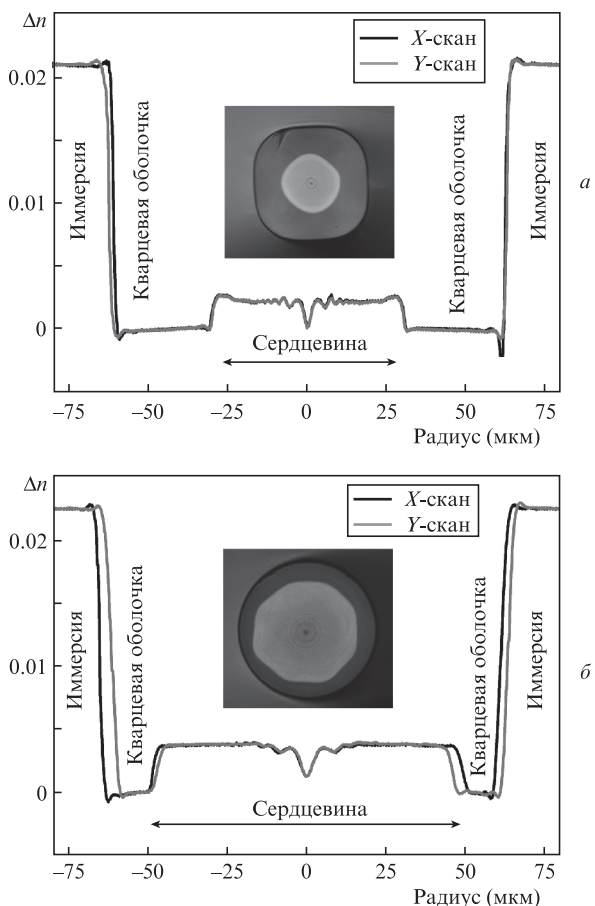


Рис.2. Измеренные профили показателя преломления световодов с отношением диаметров сердцевины и оболочки 0.43 (а) и 0.76 (б). На вставке показаны изображения торцов световодов, зарегистрированные посредством оптического микроскопа.

ло к изменению генерируемой усилителем мощности сигнала не более чем на несколько процентов). Оценка эффективности проводилась при мощности излучения накачки, превышающей приблизительно на порядок пороговое значение усиления сигнала (в том числе с учетом захвата спонтанной люминесценции модами первой отражающей оболочки). Из рисунка видно, что увеличение соотношения диаметров сердцевины и оболочки приводит к росту эффективности иттербиевых лазеров, излучающих на длине волны 0.976 мкм, что можно объяснить увеличением поглощения накачки из оболочки. При этом неодномодовость сердцевины световода выступает фактором, существенно снижающим эффективность преобразования излучения накачки в сигнал. Возрастание числа распространяющихся мод в сердцевине приводит к увеличению захвата сердцевинной люминесценции в области 1.03 мкм и, соответственно, к более быстрому росту ее мощности. Таким образом, для подавления нежелательной генерации на длине волны 1.03 мкм требуется соответствующее уменьшение рабочей длины активного световода, что способствует сокращению доли поглощенной накачки и снижению эффективности всей лазерной системы.

Аналогичная ситуация наблюдается и в случае учета захваченной люминесценции, распространяющейся по первой отражающей оболочке. Однако согласно проведенным расчетам влияние люминесценции, распространяющейся в оболочке, становится заметным только при

отношении диаметров сердцевины и оболочки, близком к единице. Отметим, что при таком соотношении диаметров влияние многомодовости сердцевины наоборот существенно снижается (см. рис.1). Это связано с тем, что из-за высокой скорости поглощения накачки из оболочки большая часть накачки поглощается на длине активного световода, меньшей, чем длина, которая требуется для развития спонтанной люминесценции в области $\lambda = 1.03$ мкм. Многомодовость сердцевины в этом случае существенной роли не играет (по крайней мере при относительно низкой апертуре сердцевины, использованной в расчетах).

Как следует из рис.1, оптимальное отношение диаметров сердцевины и оболочки, обеспечивающее максимальную эффективность генерации, составляет 0.7–1. В этом случае величина поглощения из оболочки является достаточной для того, чтобы поглотить большую часть накачки, в то время как моды оболочки усиливаются слабо и не могут оказать существенного влияния на эффективность лазерного источника.

3. Эксперимент

Эксперимент по усилению лазерного излучения на длине волны 976 нм в многомодовых волоконных световодах проводился с целью проверки основных выводов, полученных в разд.2 настоящей работы. Для этого были созданы два многомодовых световода с отношением средних диаметров сердцевины и оболочки 0.43 и 0.76.

Для получения заготовок многомодовых иттербиевых волоконных световодов использовался метод модифицированного химического осаждения из газовой фазы (MCVD). Введение ионов иттербия в сетку стекла осуществлялось методом газовой пропитки [11]. Для наилучшего перемешивания мод оболочки нами была нарушена цилиндрическая симметрия заготовок. Световоды были вытянуты в отражающем полимере, обеспечивающем распространение света по первой оболочке с апертурой 0.46. Первый световод имел в сечении форму квадрата со стороной около 125 мкм, что обеспечивало совместимость световода со стандартными объединителями накачки и сигнала; средние диаметры сердцевины и оболочки составляли 60 и 140 мкм соответственно. Второй световод был выполнен с отношением средних диаметров сердцевины и оболочки 95/125. Изначально предполагалось изготовление восьмиугольной внешней оболочки, однако из-за большого объема легкоплавкого стекла в процессе вытяжки внешняя оболочка «скруглилась». Разность показателей преломления сердцевины и оболочки составляла 0.0025 в случае первого световода и 0.0038 в случае второго световода. На рис.2 приведены измеренные профили показателей преломления световодов, а также показаны изображения торцов световодов, полученные с помощью оптического микроскопа. Выбор структур с достаточно низким показателем преломления сердцевины был обусловлен стремлением уменьшить число распространяющихся мод в сердцевине световода с целью достижения максимальной эффективности генерации в области $\lambda = 0.98$ мкм.

Схема установки для измерения эффективности усиления состояла из задающего лазера и усилителя мощности на основе одного из исследуемых многомодовых световодов (рис.3). В качестве задающего источника применялся полностью волоконный лазер, конструкция которого

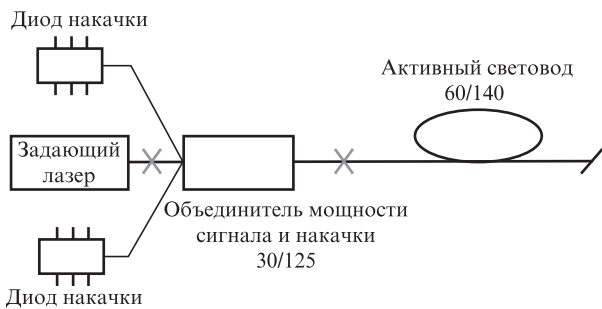


Рис.3. Схема усилительной части установки.

была аналогична схеме, разработанной в [12], с максимальной выходной мощностью до 5.5 Вт. Дополнительное подавление излучения на 1.03 мкм на выходе такого волоконного лазера достигалось путем внесения в схему волоконного спектрально-селективного фильтра, гарантирующего затухание на длине волны 1.03 мкм около 50 дБ и имеющего низкие потери на длине волны сигнала (0.976 мкм).

Излучение одномодового задающего лазера и излучение накачки вводились в исследуемый многомодовый световод посредством объединителя мощностей сигнала и накачки (имеющего конфигурацию 2 + 1 в 1). Исследуемый активный световод подваривался непосредственно к выходному концу объединителя. Непоглощенная накачка выводилась путем помещения небольшого участка выходного конца многомодового световода в иммерсионную жидкость с высоким показателем преломления. Для устранения обратного отражения выходной конец иттербиевого световода был сколот под углом около 8° так, чтобы отраженное излучение имело апертуру, превышающую апертуру сердцевины световода. Регистрация выходной мощности сигнала осуществлялась измерителем мощности OPHIR Photonics FL250A-BB-35, излучение на выходе из световода регистрировалось спектроанализатором Yokogawa AQ6370C.

На первом этапе нами было проведено исследование световода 60/140 с отношением диаметров сердцевины и оболочки, равным 0.43 (согласно расчетам в этом случае наиболее явно выражено влияние неодномодовости сердцевины на эффективность лазера). На рис.4 показаны зависимости эффективности преобразования излучения накачки на длине волны 0.915 мкм в излучение сигнала на длине волны 0.976 мкм от длины световода, полученные теоретически с учетом многомодовости сердцевины световода (сплошная кривая) и экспериментально (точки). Расчет был проведен при мощности сигнала от задающего источника 0.8 Вт, что соответствует мощности, использованной в схеме. Пунктирной кривой на рис.4 показаны результаты расчетов для случая, когда сердцевина световода имеет тот же диаметр, но работает в одномодовом режиме. Видно, что расчетные данные, отвечающие случаю многомодовой сердцевины, хорошо согласуются с экспериментом. Сопоставление кривых эффективности, полученных для световодов с одномодовой и многомодовой сердцевиной, позволяет заключить, что снижение эффективности лазерных источников связано в первую очередь с уменьшением оптимальной длины активного световода и вызвано более быстрым ростом спонтанной люминесценции для структур, поддерживающих распространение в сердцевине на длинах волн люминесценции нескольких мод. Следует отметить, что некоторое сниже-

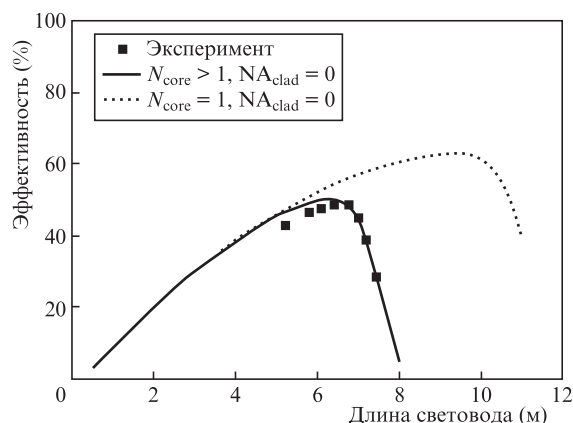


Рис.4. Рассчитанная и измеренная зависимости эффективности усиления на $\lambda = 976$ нм от длины иттербиевого световода (средние диаметры сердцевины и оболочки 60 и 125 мкм, $\Delta l = 0.0025$, $NA = 0.46$).

ние максимальной расчетной эффективности преобразования накачки в сигнал относительно предельно возможной (см. рис.1) обусловлено тем, что мощности «затраченного» сигнала (0.8 Вт) было недостаточно для полного насыщения усилителя.

На рис.5 показаны рассчитанная и измеренная зависимости усиления сигнала для световода с параметрами сердцевины и оболочки 95/125 ($D_{core}/D_{clad} = 0.76$), при которых согласно расчетам можно ожидать максимальной эффективности преобразования излучения накачки в сигнал. Показатель преломления сердцевины относительно кварцевой оболочки в световоде составил 0.0038. Входная мощность сигнала была увеличена до максимально возможной (5.5 Вт) с тем, чтобы обеспечить работу усилителя в режиме насыщения. Следует отметить, что проведенные расчеты хорошо предсказывают оптимальную длину световода, однако экспериментально измеренная эффективность усилителя оказалась несколько меньше расчетной. Это различие может быть связано с тем, что в результате технологической ошибки в процессе изготовления световода внешняя оболочка имела форму круга, из-за чего существенно снизилась эффективность перемешивания мод оболочки и, как следствие, эффективность поглощения накачки из оболочки.

Несмотря на данный недостаток, использование световода 95/125 в качестве активного элемента усилителя позволило получить дифференциальную эффективность

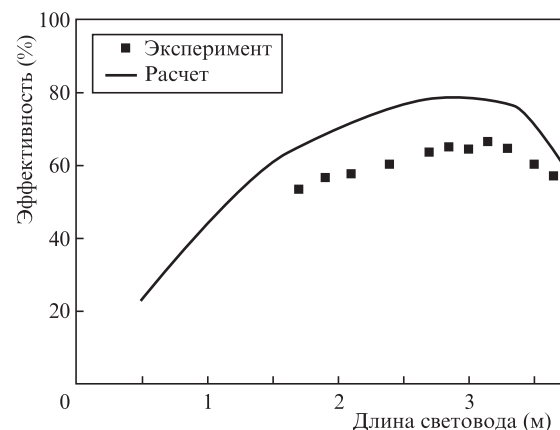


Рис.5. Рассчитанная и измеренная зависимости эффективности усиления на 976 нм от длины иттербиевого световода (средние диаметры сердцевины и оболочки 95 и 125 мкм, $\Delta l = 0.0038$, $NA = 0.46$).

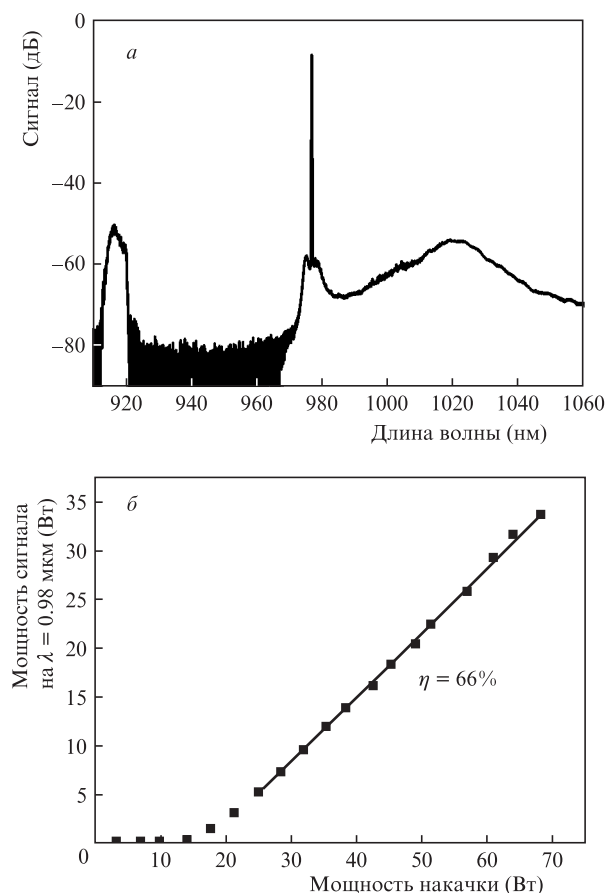


Рис.6. Спектр (а) и зависимость мощности сигнала от мощности накачки (б), измеренные на выходе световода с отношением диаметров сердцевин и оболочки 0.76.

преобразования излучения накачки в сигнал, равную 66%, что является рекордом для мощных лазеров/усилителей с многомодовой накачкой, работающих в области $\lambda = 0.98 \mu\text{м}$. На рис.6 приведены спектр и зависимость выходной мощности от мощности накачки, измеренные на оптимальной длине световода. Доля люминесценции в области длины волны 1.03 $\mu\text{м}$, оцененная по спектру выходного излучения, не превышала 0.5% от полной выходной мощности.

4. Заключение

В настоящей работе теоретически показано, что возможность распространения высших мод в сердцевине ит-

тербиевого световода при усилении излучения в области $\lambda = 0.98 \mu\text{м}$ может приводить к заметному снижению эффективности преобразования излучения накачки в сигнал. Эксперименты, проведенные с многомодовым световодом с отношением диаметров сердцевин и оболочки 0.43, подтвердили результаты расчетов. Показано, что для достижения максимальной эффективности преобразования накачки в сигнал необходимо использовать световоды с отношением диаметров сердцевин и оболочки, равным 0.7–1. Реализован многомодовый световод с сердцевинной, средний диаметр которой составил 95 $\mu\text{м}$, и оболочкой диаметром 125 $\mu\text{м}$. На его основе создан многомодовый усилитель сигнала на длине волны 0.976 $\mu\text{м}$ с рекордно высокой для схем с многомодовой накачкой дифференциальной эффективностью, равной 66%.

Авторы благодарят научного руководителя НЦВО РАН Е.М.Дианова за проявленный интерес к работе и оказанную поддержку.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 16-12-10553).

1. Kotov L.V., Aleshkina S.S., Khudyakov M.M., Bubnov M.M., Medvedkov O.I., Lipatov D.S., Guryanov A.N., Likhachev M.M. *J. Lightwave Technol.*, **35** (20), 4540 (2017); doi: 10.1109/JLT.2017.2748924.
2. Nilsson J., Minelly J.D., Paschotta R., Tropper A.C., Hanna D.C. *Opt. Lett.*, **23**, 355 (1998).
3. Boulet J., Zaouter Y., Desmarchelier R., Cazaux M., Salin F., Saby J., Bello-Doua R., Cormier E. *Opt. Express*, **16**, 17891 (2008).
4. Minelly J.D., Zenteno L.A., Dejneka M.J., Miller W.J., Kuksenkov D.V., Davis M.K., Crigler S.G., Bardo M.E. *Proc. Opt. Fiber Commun. Conf.* (Baltimore, MD, USA, 2000, Vol. 4, pp 172–174).
5. Leich M., Jäger M., Grimm S., Hoh D., Jetschke S., Becker M., Hartung A., Bartelt H. *Laser Phys. Lett.*, **11** (4), 045102 (2014).
6. Laroche M., Bartolacci C., Hervé G., Sylvain G., Robin T., Cadier B., in *Advances in Optical Materials* (OSA, 2011, paper ATuB9).
7. Becker P.M., Olsson A.A., Simpson J.R. *Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Fundamentals and Technology* (London: Acad. Press, 1999).
8. Röser F., Jauregui C., Limpert J., Tünnermann A. *Opt. Express*, **16**, 17310 (2008).
9. Shubin A., Yashkov M., Melkumov M., Smirnov S., Bufetov I., Dianov E. *Proc. Conf. CLEO/Europe-IQEC 2007* (Munich, Germany, 2007, CJ3-1-THU).
10. Мелькумов М.А., Буфетов И.А., Кравцов К.С., Шубин А.В., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **34** (9), 843 (2004) [*Quantum Electron.*, **34** (9), 843 (2004)].
11. Абрамов А.Н., Бубнов М.М., Вечканов Н.Н., Гурьянов А.Н., Зотов К.В., Липатов Д.С., Лихачев М.Е., Яшков М.В. *Неорганические материалы*, **46** (4), 501 (2010).
12. 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).