

Высокоэффективные лазер и усилитель на основе легированных оксидом эрбия световодов с накачкой в оболочку

Л.В.Котов, М.Е.Лихачев, М.М.Бубнов, О.И.Медведков, Д.С.Липатов,
Н.Н.Вечканов, А.Н.Гурьянов

Разработаны схемы лазера и усилителя на основе эрбиевых световодов с накачкой в оболочку. Оптимизация конструкции световода позволила достичь рекордной дифференциальной эффективности преобразования излучения накачки ($\lambda = 976$ нм) в лазерный сигнал, равной 40% относительно поглощенной мощности накачки, и выходной мощности 7.5 Вт. Продемонстрирована эффективная работа эрбиевого усилителя с максимальной эффективностью 32%.

Ключевые слова: эрбиевый волоконный световод, накачка в оболочку, дифференциальная эффективность.

1. Введение

Излучение спектрального диапазона в области 1.55 мкм используется во многих приложениях, таких как телекоммуникация, медицина, научное приборостроение и ряд других. При этом все более востребованными становятся источники излучения с высокой средней мощностью (1–100 Вт). Одним из преимуществ таких систем перед лазерами и усилителями, работающими в области 1 мкм, является то, что излучение с длиной волны ~ 1.55 мкм безопасно для глаз. В то же время существующие на сегодняшний момент волоконные источники лазерного излучения в этой спектральной области имеют существенные недостатки.

Наиболее распространенными источниками излучения в области 1.55 мкм являются лазеры и усилители на основе световодов, сердцевина которых легирована одновременно Er_2O_3 и Yb_2O_3 . Большое сечение поглощения ионов Yb^{3+} делает возможной накачку световодов в оболочку при помощи широко распространенных многомодовых лазерных диодов на длине волны $\lambda_p = 915$ или 975 нм, а передача энергии от ионов Yb^{3+} ионам Er^{3+} позволяет получать генерацию в области 1.55 мкм. Достигнутая в Er-Yb -лазерах и усилителях дифференциальная эффективность преобразования излучения мощности накачки в сигнал (далее просто эффективность) относительно введенной мощности достигает 32% в одномодовом и 40% в многомодовом режиме при выходной мощности лазера 100 и 200 Вт соответственно [1, 2]. В то же время существенным недостатком Er-Yb -лазеров и усилителей является появление паразитной генерации на длине волны $\lambda \sim 1$ мкм при достижении выходной мощности ~ 10 Вт [3, 4], что приводит к снижению эффективности их работы, а также к тому, что излучение таких лазеров и усилителей перестает быть безопасным для глаз.

Альтернативным источником излучения в области 1.55 мкм могут служить эрбиевые лазеры и усилители с накачкой в сердцевину излучением рамановского конвертора на длине волны $\lambda_p = 1.48$ мкм [5]. Однако максимальная достигнутая в настоящий момент эффективность преобразования с помощью рамановского конвертора многомодовой накачки на $\lambda_p = 976$ нм в одномодовое излучение накачки с длиной волны 1480 нм не превышает 32% при выходных мощностях 15–80 Вт [6]. В свою очередь эффективность преобразования одномодовой накачки с $\lambda_p = 1480$ нм в сигнал на 1550 нм в эрбиевых лазерах и усилителях не превышает 85% [7], что снижает до 27% эффективность преобразования многомодовой накачки с $\lambda_p = 976$ нм в излучение с длиной волны 1550 нм. Таким образом, использование эрбиевых световодов с накачкой рамановским конвертором приводит к заметному усложнению конструкции, но не позволяет превзойти по эффективности Er-Yb -системы.

Использование световодов, легированных только оксидом Er_2O_3 , в схемах с накачкой в оболочку затруднено из-за малого сечения поглощения эрбия и снижения эффективности преобразования накачки в сигнал при увеличении концентрации ионов эрбия. Наибольшая дифференциальная эффективность при накачке в оболочку была достигнута при использовании диодной накачки на длине волны $\lambda_p = 1532$ нм. Вследствие малости квантового дефекта, а также из-за того, что поглощение на данной длине волны примерно в три раза выше, чем поглощение на длине волны 980 нм, в таких системах была достигнута эффективность 69% при выходной мощности 88 Вт [8]. Однако высокая эффективность преобразования накачки в излучение сигнала нивелируется существенно более низким (в 1.6–2 раза) КПД таких диодов накачки по сравнению с КПД диодов, излучающих на 976 нм. Кроме того, стоимость источников накачки на длине волны 1532 нм в настоящий момент на порядок превышает стоимость диодов на 976 нм.

Следует отметить, что использование легированных оксидом эрбия световодов (не содержащих Yb_2O_3) позволяет достичь эффективности преобразования накачки на $\lambda_p = 976$ нм в сигнал в области 1550 нм более 59% [9], однако такая эффективность была продемонстрирована только при одномодовой накачке в сердцевину. Максимальная

Л.В.Котов, М.Е.Лихачев, М.М.Бубнов, О.И.Медведков. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: alterlk@yandex.ru
Д.С.Липатов, Н.Н.Вечканов, А.Н.Гурьянов. Институт химии высокочистых веществ РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Тропинина, 49

Поступила в редакцию 20 декабря 2011 г., после доработки – 20 марта 2012 г.

дифференциальная эффективность 30% для эрбиевых лазеров и усилителей с накачкой в оболочку на длине волны 976 нм и выходной мощностью более 1 Вт была достигнута за счет простого увеличения диаметра сердцевин, однако в этом случае генерируемое излучение становилось многомодовым [10, 11]. В одномодовых лазерах и усилителях с накачкой в оболочку и выходной мощностью более 1 Вт дифференциальная эффективность до недавнего времени не превышала 24% [12–15]. Лишь в нашей последней работе использование новой фосфоалюмосиликатной матрицы и увеличение отношения диаметра сердцевин к диаметру первой оболочки позволило достичь эффективности 28% [16].

Целью настоящей работы является оптимизация фосфоалюмосиликатного световода, легированного оксидом эрбия, для увеличения эффективности преобразования многомодового излучения накачки на длине волны 976 нм в одномодовое излучение в области 1550 нм. Помимо этого перед нами стояли задачи увеличения выходной мощности лазеров и реализации целиком волоконного (не содержащего объемных элементов) усилителя с накачкой в оболочку.

2. Оптимизация световода

Основным отличием световодов с накачкой в оболочку от обычных активных световодов, накачиваемых в сердцевину, является на порядок меньшее эффективное сечение поглощения накачки, что приводит к пропорциональному увеличению длины активного световода. Это сопровождается соответственным увеличением негативного влияния непроектируемых оптических потерь сигнала, в том числе потерь, обусловленных безызлучательной релаксацией части возбужденных ионов Er^{3+} вследствие кластеризации, а также серых потерь – оптических потерь вне полос поглощения, слабо зависящих от длины волны. Серые потери сигнала α_{gr} в активных световодах в лучшем случае составляют ~5 дБ/км. Потери накачки в первой отражающей оболочке достигают ~20 дБ/км. Величину потерь, связанных с кластеризацией в эрбиевом световоде, можно грубо оценить по формуле

$$\alpha_{cl} = 2kI\alpha, \tag{1}$$

где $2k$ – доля ионов, объединенных в пары; I – величина инверсной населенности (30%–40%); α – поглощение на длине волны сигнала при нулевой инверсии.

Мы рассмотрели три типа световодов – с низкой, средней и высокой концентрациями эрбия, для которых мы оценили необходимую длину световода, чтобы обеспечить 20 дБ поглощения накачки с $\lambda_p = 980$ нм в стандартной конфигурации (диаметры сердцевин и оболочки 10 и 125 мкм соответственно) и оценили величину потерь сигнала и накачки на данной длине световода. Значение k было взято из работы [17], результаты оценок приведены

в табл.1. Как видно из таблицы, высокие потери сигнала (а в случае низкой концентрации и высокие потери накачки) препятствуют использованию стандартных эрбиевых световодов в схемах с накачкой в оболочку. При этом увеличение концентрации ионов эрбия позволяет, с одной стороны, уменьшить рабочую длину световода, но с другой – приводит к гораздо более быстрому росту потерь, обусловленных кластеризацией этих ионов. Таким образом, для создания эффективных эрбиевых лазеров и усилителей необходимо уменьшать длину световода, увеличивая поглощение при накачке в оболочку, но не изменяя при этом концентрацию ионов эрбия.

Поглощение при накачке в оболочку можно оценить по формуле

$$\alpha_{clad} = \alpha_c \frac{d_c^2}{D_{clad}^2}, \tag{2}$$

где α_c – поглощение в сердцевине; d_c – диаметр сердцевин; D_{clad} – диаметр оболочки. Из этой формулы следуют два способа увеличения поглощения при накачке в оболочку: увеличение диаметра сердцевин и уменьшение диаметра оболочки. Рассмотрим каждый из этих способов.

Наименьший внешний диаметр световода определяется в первую очередь апертурой его второй оболочки и характеристиками источника накачки. Так, в нашей предыдущей работе [16] внешний диаметр световода был уменьшен до 80 мкм (минимальный диаметр, при котором возможны скалывание и сварка световода стандартными устройствами), а в качестве источника накачки использовался многомодовый диодный лазер с волоконным выходом (сердцевина 105 мкм, числовая апертура 0.22) с выходной мощностью до 33 Вт. Вследствие этого апертура излучения накачки в световоде не превышала 0.3, что заведомо меньше апертуры большинства полимерных покрытий активных световодов. С другой стороны, в настоящее время достаточно сложно найти источники излучения накачки, обеспечивающие мощность более 20–35 Вт на выходе световода с диаметром 105 мкм и апертурой 0.22, поэтому выходная мощность волоконного лазера ограничилась уровнем 6.4 Вт при эффективности 28% [16].

Увеличить мощность накачки можно, используя источники накачки с большим размером световедущей сердцевин, например 200 мкм (при этом достигается мощность накачки до 500 Вт при числовой апертуре 0.22), либо объединители накачки и сигнала, на выходе которых излучение накачки распространяется по световоду с диаметром 125 мкм и апертурой 0.45. Применение объединителя накачки и сигнала также необходимо при создании схемы усилителя с накачкой в оболочку.

В настоящей работе для обеспечения минимального внешнего диаметра активного световода мы выбрали тефлоновое покрытие, позволившее получить числовую апертуру 0.6. В случае использования источников накачки с выходным световодом, имеющим диаметр сердцевин

Табл.1.

Концентрация ионов Er (10^{24} м^{-3})	Поглощение в сердцевине на $\lambda = 980$ нм (дБ/м)	k (%)	Необходимая длина световода L (м)	Потери α_{cl} (дБ/км)	Потери на один проход	
					Сигнал ($\lambda = 1580$ нм) $\alpha_{cl} + \alpha_{gr}$ (дБ)	Излучение накачки (дБ)
3	2.7	0.5	1157	2.4	2.8+5.8~8.6	23
8	7.2	2.5	440	40	17.6+2.2~19.8	8.8
100	69.8	8.5	45	680	30.6+0.2~30.8	0.9

200 мкм и апертуру 0.22, апертура накачки в эрбиевом световоде диаметром 80 мкм, исходя из закона сохранения яркости, будет составлять 0.55. Если же использовать объединители накачки и сигнала, то излучение накачки с апертурой 0.59 можно ввести в световод диаметром 95 мкм. Стоит отметить, что помимо высокой числовой апертуры тефлоновое покрытие обладает и другими достоинствами. Так, нагрев активного световода вследствие большого квантового дефекта является одной из основных проблем при больших мощностях накачки. Толщина тефлонового покрытия составляет 7–15 мкм, что обеспечивает на порядок лучший теплоотвод по сравнению с полимерными покрытиями, толщина которых, как правило, составляет 50–100 мкм. Другим преимуществом тефлонового покрытия являются низкие оптические потери во всем ближнем ИК диапазоне, в том числе в области 1530 нм, что позволяет эффективно использовать излучение накачки и на этой длине волны.

Для увеличения диаметра сердцевинки и работы световода в одномодовом режиме необходимо уменьшать показатель преломления сердцевинки. Следует отметить, что данные работы [18] позволяют рассчитывать на одномодовый режим работы на $\lambda = 1550$ нм вплоть до диаметра сердцевинки 40 мкм при разности показателей преломления 0.001. Проблема заключается в том, что в случае стандартной алюмосиликатной матрицы для получения столь малого (относительно оболочки) показателя преломления сердцевинки необходим крайне низкий уровень легирования ее оксидом алюминия (0.3–1 мол.%) даже при условии дополнительного солегирования фтором [19]. Это приводит к значительному ухудшению растворимости ионов эрбия и, следовательно, к росту влияния кластеризации и ухудшению эффективности световода [17, 19]. Выходом из данной ситуации может служить использование фосфоалюмосиликатной стекляннной матрицы, позволяющей сохранить низкий показатель преломления сердцевинки при приемлемой концентрации оксида эрбия без существенного снижения эффективности [19].

С учетом вышесказанного нами были изготовлены два активных световода для реализации целиком волоконного лазера и усилителя с диаметрами сердцевинки и оболочки 25/80 мкм и 22/95 мкм соответственно. Сердцевина в обоих световодах имела практически идентичный состав: 9 мол.% Al_2O_3 , 9 мол.% P_2O_5 , 1.5 мол.% GeO_2 и ~0.1 мол.% Er_2O_3 . Для улучшения поглощения из оболочки форма сечения световодов была выбрана квадратной. Профили

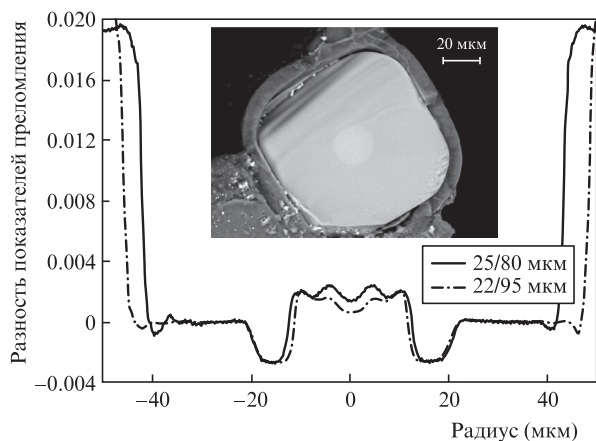


Рис.1. Профили показателя преломления световодов указанных сечений. На вставке – фотография торца световода.

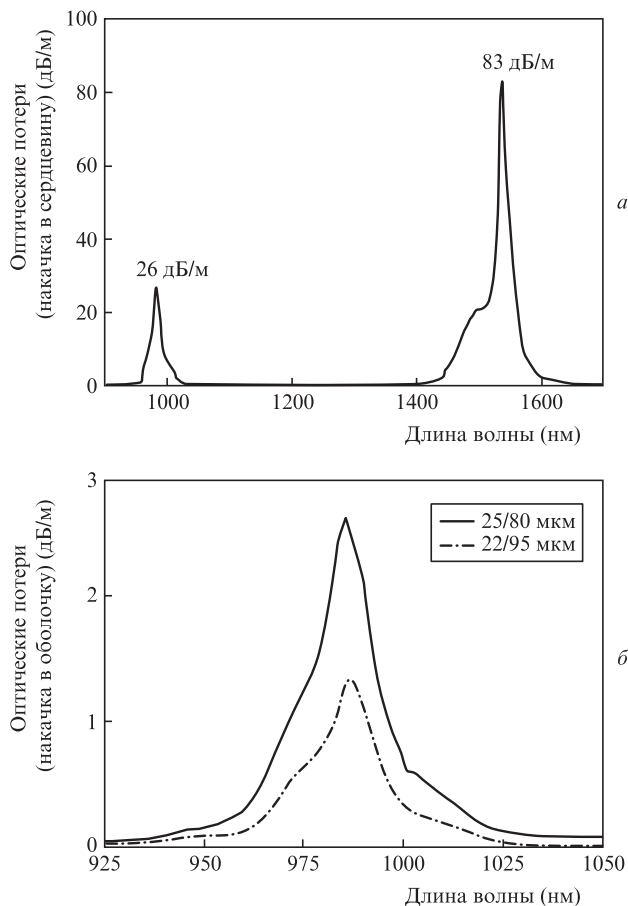


Рис.2. Спектры оптических потерь слабого сигнала, распространяющегося по сердцевине (а) и оболочке (б), для двух световодов.

показателя преломления и фотография торца световода представлены на рис.1, спектры оптических потерь слабого сигнала, распространяющегося по сердцевине и оболочке, – на рис.2. Световоды с отражающим тефлоновым покрытием имели числовую апертуру 0.6.

3. Экспериментальные результаты

3.1. Волоконный лазер с накачкой в оболочку

Использованная в эксперименте схема волоконного лазера, аналогичная схемам из работ [16, 20], показана на рис.3,а. Излучение многомодового источника накачки 1 на длине волны 980 нм выходило из световодящей сердцевинки с диаметром 105 мкм и апертурой 0.22 и вводилось в волоконный конус 2, диаметр которого уменьшался от 105 до 80 мкм на длине порядка 30 см. Выходящее из конуса (диаметр 80 мкм, апертура 0.29) излучение накачки вводилось в волоконный резонатор, который был образован высокоотражающей брэгговской решеткой 3 и торцом 5 эрбиевого световода 4 диаметром 80 мкм. Длина волны максимального отражения брэгговской решетки (1570 нм) была оптимизирована с целью получения наибольшей эффективности лазерной генерации. Брэгговская решетка была записана в одномодовом германосиликатном световоде с диаметрами сердцевинки и оболочки 16 и 80 мкм.

Благодаря высокому поглощению введенного в оболочку излучения накачки, оптимальная длина эрбиевого световода, обеспечивающая максимальную эффективность лазерной генерации, составила всего 5 м. Зависимость вы-

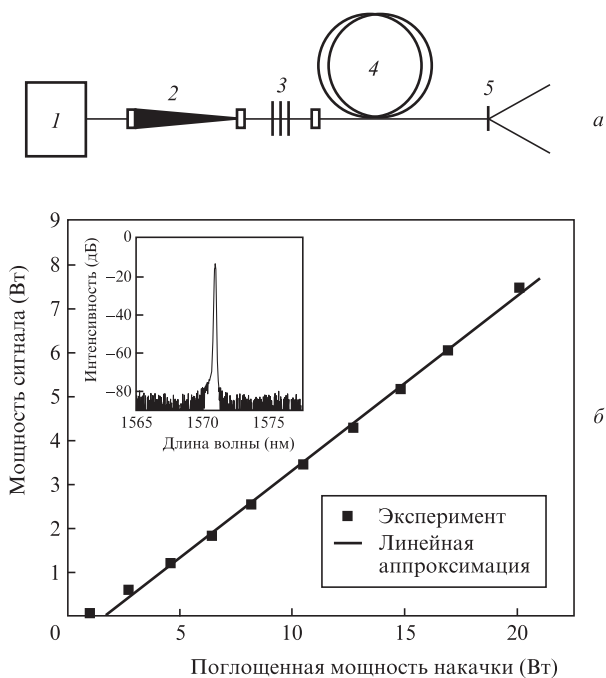


Рис.3. Схема лазера (а) и зависимость мощности сигнала от поглощенной мощности накачки (дифференциальная эффективность 40%), на вставке – спектр излучения сигнала (б).

ходной мощности сигнала на длине волны 1570 нм от поглощенной мощности накачки, а также спектр излучения сигнала показаны на рис.3,б. При поглощенной мощности накачки 21 Вт и введенной мощности 26 Вт максимальная мощность одномодового излучения волоконного лазера превысила 7.5 Вт. Дифференциальные эффективности относительно поглощенной и введенной мощностей накачки составили 40% и 35% соответственно. Одномодовость излучения волоконного лазера контролировалась наблюдением модового пятна в дальнем поле.

Достигнутая нами эффективность является рекордной для эрбиевых волоконных лазеров с накачкой активного световода в оболочку и не уступает лучшим результатам, полученным с помощью Er–Yb-световодов. Следует отметить, что выходная мощность в предложенной конструкции лазера может быть еще больше увеличена за счет использования более мощных диодов накачки с выходным световодом, имеющим диаметр световедущей сердцевины 200 мкм. В этом случае будет необходимо использовать волоконный конус с внешним диаметром, изменяющимся от 200 до 80 мкм.

3.2. Волоконный усилитель с накачкой в оболочку

Схема усилителя приведена на рис.4,а. Для создания целиком волоконной схемы усилителя мы использовали объединитель излучения накачки и сигнала 3. Излучение накачки 1 и сигнала 2 вводилось в объединитель 3, а затем с помощью волоконного конуса 4 (125/95 мкм) поступало в эрбиевый световод 5 диаметром 95 мкм. Необходимо отметить, что использованный нами волоконный конус имел сердцевину диаметром 6 мкм на входе, которая уменьшалась до 4 мкм на выходе. Для стыковки волоконного конуса с эрбиевым световодом, диаметр сердцевины которого был существенно больше, использовался промежуточный световод-адаптер поля моды. Суммарные потери сигнала от задающего источника 2 на ввод в

эрбиевый световод 5 не превышали 3 дБ. Выходной торец б эрбиевого световода был сколот под небольшим углом для устранения френелевского отражения и подавления генерации. Источник сигнала 2 представлял собой волоконный лазер, длина волны которого могла изменяться от 1550 до 1600 нм путем замены брэгговских решеток, а выходная мощность равнялась нескольким сотням милливатт, что обеспечивало работу усилителя в режиме насыщения по мощности сигнала.

Исследования зависимости эффективности усилителя от длины световода и длины волны усиливаемого излучения показали, что наибольшая выходная мощность (7.2 Вт) была получена на $\lambda = 1585$ нм при длине световода 12 м. Дифференциальная эффективность относительно поглощенной и введенной мощности накачки составила 32% и 31% соответственно. На рис.4,б приведены зависимость выходной мощности от поглощенной мощности накачки и спектр усиленного излучения. Из 33-х ватт мощности из-

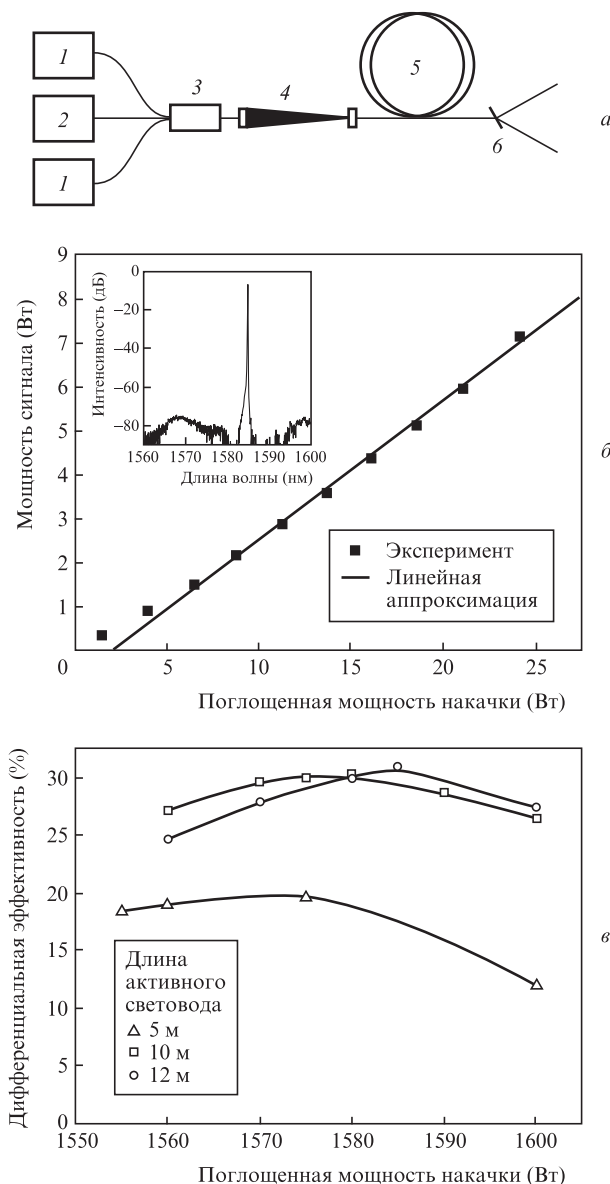


Рис.4. Схема усилителя (а), зависимость мощности сигнала от поглощенной мощности накачки (дифференциальная эффективность 32%), на вставке – спектр сигнала (б) и зависимости дифференциальной эффективности усиления относительно введенной мощности накачки от длины волны (в).

лучения накачки потери в объединителе 3 составили 4 Вт, в волоконном конусе – 3 Вт, непоглощенная в активном световоде мощность накачки оказалась равной 2.5 Вт. Усилитель эффективно работал в диапазоне 1560–1600 мкм, при этом наибольшую выходную мощность удалось получить при длинах активного световода 10 и 12 м. На рис.4, в приведена зависимость дифференциальной эффективности волоконного усилителя относительно введенной мощности накачки от длины волны усиливаемого излучения для длин световода 12, 10 и 5 м. Видно, что уменьшение длины световода позволяет сместить длину волны, на которой наблюдается максимальное усиление, в коротковолновую область. В то же время вследствие увеличения доли непоглощенного излучения накачки происходит заметное падение эффективности усиления.

Как и в случае волоконного лазера, излучение на выходе волоконного усилителя было одномодовым. Стоит также отметить возможность дальнейшего увеличения выходной мощности усилителя за счет подключения еще одного (при использовании объединителя накачки и сигнала в формате 2 + 1 в 1) или пяти (формат 6 + 1 в 1) диодов накачки.

4. Заключение

В настоящей работе продемонстрирована возможность получения рекордно высоких эффективностей преобразования излучения накачки в сигнал в эрбиевом лазере и усилителе с накачкой в оболочку. Полученная эффективность лазерной генерации (40%) не уступает достигнутой в лучших образцах Er–Yb-лазеров. Высоких эффективностей генерации и усиления удалось достичь благодаря использованию разработанной нами фосфоалюмосиликатной стеклянной матрицы в сочетании с высокоапертурным тефлоновым покрытием и малым внешним диаметром активного световода.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта Президента РФ поддержки молодых кандидатов наук № МК-1459.2011.2.

Авторы благодарят М.А.Мелькумова (НЦВО РАН) за помощь при выполнении работы, а также Е.М.Дианова (НЦВО РАН) за постоянную поддержку и интерес, проявленный к настоящей работе.

1. Jeong Y., Yoo S., Coderaard C.M., Nilsson J., Sahu J.K., Payne D.N., Horley R., Turner P.W., Hickey L., Harker A., Lovelady M., Piper A. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **13** (3), 573 (2007).
2. Jeong Y., Sahu J.K., Soh D.B.S., Codemard C.A., Nilsson J. *Opt. Lett.*, **30** (22), 2997 (2005).
3. Yahel E., Hardy A., *J. Lightwave Technol.*, **21** (9), 2044 (2003).
4. Sobon G., Kaczmarek P., Antonczak A., Sotor J., Abramski K.M. *Opt. Express*, **19**, 19104 (2011).
5. Курков А.С., Парамонов В.М., Егорова О.Н., Медведков О.И., Дианов Е.М., Яшков М.В., Гурьянов А.Н., Залевский И.Д., Гончаров С.Е. *Квантовая электроника*, **31** (9), 801 (2001).
6. Nicholson J.W., Yan M.F., Wisk P., Fleming J., DiMarcello F., Monberg E., Taunay T., Headley C., DiGiovanni D.J. *Opt. Lett.*, **35** (18), 3069 (2010).
7. Dubinskii M., Zhang J., Ter-Mikirtychev V. *Electron. Lett.*, **45** (8), 400 (2009).
8. Zhang J., Fromzel V., Dubinskii M. *Opt. Express*, **19** (6), 5574 (2011).
9. Laming R.I., Townsend J.E., Payne D.N., Meli F., Grasso G., Tarbox E.J. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **3** (3), 253 (1991).
10. Kuhn V., Kracht D., Neumann J., Wessels P. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **23** (7), 432 (2011).
11. Курков А.С., Парамонов В.М., Яшков М.В., Гончаров С.Е., Залевский И.Д. *Квантовая электроника*, **37** (4), 343 (2007).
12. Dubinskii M., Ter-Mikirtychev V., Zhang J., Kudryashov I. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6952**, 695205, (2008).
13. Kuhn V., Kracht D., Neumann J., Weßels P., *Opt. Lett.*, **36** (16), 3030 (2011).
14. Bousselet P., Bettiati M., Gasca L., Leplingard F., Bayart D., Lambelet P., in *Optical Amplifiers and their Applications* (Stresa, Italy: OSA Techn. Dig. Ser., 2001, paper OWC3).
15. Kuhn V., Kracht D., Neumann J., Weßels P. *Techn. Digest CLEO/Europe and EQEC 2011 Conf.* (Munich, Germany, 2011, paper CJ7_5).
16. Likhachev M.E., Kotov L.V., Bubnov M.M., Medvedkov O.I., Lipatov D.S., Guryanov A.N. *Proc SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7914**, 791424 (2011).
17. Плоцкий А.Ю., Курков А.С., Яшков М.Ю., Бубнов М.М., Лихачев М.Е., Сысолятин А.А., Гурьянов А.Н., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **35** (6), 559 (2005).
18. Machewirth D., Khitrov V., Manyam U., Tankala K., Carter A., Abramczyk J., Farroni J., Guertin D., Jacobson N. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5335**, 140 (2004).
19. Likhachev M.E., Bubnov M.M., Zotov K.V., Lipatov D.S., Yashkov M.V., Guryanov A.N. *Opt. Lett.*, **34** (21), 3355 (2009).
20. Gruk D.A., Kurkov A.S., Paramonov V.M., Yashkov M.Yu. *Abstracts of the 13th Intern. Laser Physics Workshop* (Trieste, Italy, 2004, p.218).