

# Волоконные Yb-, Er – Yb- и Nd-лазеры на световодах с многоэлементной первой оболочкой

И.А.Буфетов, М.М.Бубнов, М.А.Мелькумов, В.В.Дудин, А.В.Шубин, С.Л.Семенов, К.С.Кравцов, А.Н.Гурьянов, М.В.Яшков, Е.М.Дианов

*Создан ряд волоконных одномодовых непрерывных Yb-, Er – Yb- и Nd-лазеров на световодах сложной конструкции (несколько световодов на основе кварцевого стекла находятся в оптическом контакте друг с другом и окружены общей полимерной оболочкой). Такая конструкция позволяет вводить излучение от нескольких источников накачки в один активный световод, что обеспечивает увеличение выходной мощности волоконного лазера. Рассмотрены волоконные Yb-лазеры с выходной мощностью более 50 Вт при эффективности около 65 %, волоконные Er – Yb-лазеры на длину волны 1.608 мкм с накачкой в полосу поглощения Yb и впервые реализованные на световодах подобной конструкции волоконные Nd-лазеры с длинами волн генерации в области 0.92 и 1.06 мкм.*

**Ключевые слова:** волоконный лазер, световод с двойной оболочкой, иттербий, эрбий, неодим.

## 1. Введение

В последние годы выходная мощность непрерывных волоконных лазеров на основе световодов с двойной оболочкой постоянно растет. В режиме генерации основной (поперечной) моды она превысила 600 Вт [1, 2], а в маломодовом режиме достигла уровня 1 кВт [1]. Главными преимуществами мощных волоконных лазеров с диодной накачкой является высокая эффективность (КПД от электросети 20 % и более), простота и долговечность конструкции (по сравнению с газовыми и обычными твердотельными лазерами), а также существенно более низкие требования к охлаждению активной среды, что обусловлено геометрией волоконных световодов. Наибольшее внимание уделяется увеличению мощности одномодовых [2, 3] и маломодовых [4–7] лазеров, излучение которых затем можно объединить в одном многомодовом световоде для получения выходной мощности 10 кВт [8] и более.

В качестве активной среды в мощных волоконных лазерах используются, как правило, световоды на основе плавленного кварца, легированные Yb [3, 4] или Yb и Nd [5]. Длина волны генерации волоконных Yb-лазеров лежит в диапазоне 0.98–1.17 мкм. Для расширения спектра генерируемых длин волн используются лазеры и на других редкоземельных ионах, но их КПД существенно ниже [9].

Генерация в области длин волн около 1.6 мкм достигается с помощью Er – Yb-лазеров. Накачка осуществляется в полосу поглощения ионов Yb, что позволяет получить значительно больший коэффициент поглощения

излучения накачки из первой оболочки по сравнению с чисто эрбиевым световодом, поскольку возбужденные ионы Yb при определенных условиях эффективно передают энергию ионам Er, на которых и происходит генерация.

Для расширения диапазона генерации волоконных лазеров в область коротких длин волн (до 0.92 мкм) можно использовать Nd-лазер, работающий по трехуровневой схеме (переход  ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{9/2}$ ). Известно, что в обычных волоконных Nd-лазерах с накачкой через первую оболочку генерация идет по четырехуровневой схеме на переходе  ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$  (область 1.06 мкм). Поэтому для получения генерации в области 0.92 мкм необходимо подавлять усиление излучения на длине волны 1.06 мкм.

До недавнего времени эффективная лазерная генерация на переходе  ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{9/2}$  при мощности излучения порядка нескольких ватт и комнатной температуре имела место лишь в кристаллических матрицах YAG и YVO<sub>4</sub> [10]. Волоконный лазер на переходе  ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{9/2}$  с накачкой через оболочку генерировал только при температуре жидкого азота и переходе к четырехуровневой схеме возбуждения [11]. И лишь недавно была получена эффективная лазерная генерация с высокой выходной мощностью в нормальных условиях по квазитрехуровневой схеме, соответствующей переходу  ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{9/2}$  уровней ионов Nd<sup>3+</sup> в волоконном световоде на основе плавленного кварца с легированной сердцевиной и двойной оболочкой [12–14]. В этих работах эффективное подавление усиления в области 1.06 мкм достигалось благодаря использованию W-образного профиля показателя преломления (ППП) сигнального световода, внесению дополнительных потерь за счет изгиба световода, а также выбору матрицы стекла сердцевины.

Известно [15–18], что в световодах с W-образным PPP основная мода имеет конечную длину волны отсечки (в отличие от световодов со ступенчатым PPP без области депрессии). Следовательно, выбирая такие параметры волоконного световода, чтобы длина волны отсечки основной моды лежала в спектральном диапазоне 0.92–1.06 мкм, можно добиться прохождения по сердце-

И.А.Буфетов, М.М.Бубнов, М.А.Мелькумов, В.В.Дудин, А.В.Шубин, С.Л.Семенов, К.С.Кравцов, Е.М.Дианов. Научный центр волоконной оптики при Институте общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; тел.: (095)132 82 56, факс: (095)135 81 39, e-mail: iabuf@fo.gpi.ru  
А.Н.Гурьянов, М.В.Яшков. Институт химии высококипящих веществ РАН, Россия, 603600 Н. Новгород, ул. Тропинина, 49

вине световода излучения с  $\lambda = 0.92$  мкм и значительных потерь на вытекание излучения с  $\lambda = 1.06$  мкм. Дополнительные потери на 1.06 мкм можно вносить изгибом и скручиванием волоконного световода. Отметим, что впервые W-образная форма ППП световода применялась в [19] для подавления пика усиления на 1530 нм в эрбиевом усилителе и достижения усиления в S-полосе (диапазон 1.48–1.52 мкм).

Зеркалами резонаторов лазеров могут быть волоконные брэгговские решетки (БР) показателя преломления, записанные непосредственно в сердцевине световода, или напыленные на торцы световода диэлектрические зеркала.

Для создания мощных волоконных лазеров наиболее часто используют световоды с двойной оболочкой (рис.1). В таких световодах излучение накачки вводится в первую оболочку, выполненную обычно из плавленого кварца и окруженную второй оболочкой с более низким показателем преломления. Вторая оболочка может быть изготовлена из полимера или из плавленого кварца, легированного фтором. Первая оболочка является многомодовым световодом для излучения накачки. По мере распространения по первой оболочке излучение накачки поглощается активными ионами, которыми легирована сердцевина.

## 2. Способы введения излучения накачки в первую оболочку лазерного световода

До настоящего времени реализовано несколько способов ввода излучения накачки в лазерный световод с двойной оболочкой.

1. Непосредственный ввод излучения накачки через один торец волоконного световода (рис.1); при этом второй торец световода используется для вывода лазерного излучения. Возможен также ввод накачки через оба торца лазерного световода с двойной оболочкой [1], что позволяет удвоить вводимую мощность. Однако для реализации этого варианта ввода требуется использование в конструкции лазера таких неволоконных элементов, как лин-

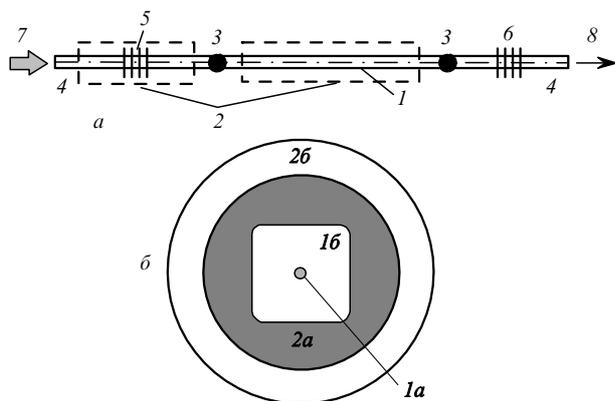


Рис.1. Схема лазера на световоде с двойной оболочкой с накачкой в торец (а) и поперечное сечение световода с двойной оболочкой (сечение первой оболочки в форме квадрата) (б):

1 – кварцевый световод с сердцевинкой, легированной активными ионами (1а – сердцевина, 1б – первая оболочка); 2 – полимерная оболочка (2а – полимер с низким показателем преломления (вторая оболочка), 2б – защитная оболочка); 3 – точки сварки лазерного световода со световодом 4, на котором записана БР; 5 – высокоотражающая БР; 6 – выходная БР; 7 – вход излучения накачки; 8 – выход лазерного излучения.

3 Квантовая электроника, т.35, № 4

зы и многослойные зеркала, что существенно усложняет эксплуатацию устройства и снижает его надежность.

2. Ввод излучения накачки через боковую поверхность световода с помощью V-образной канавки [20]. Данный способ технологически сложен и имеет ограничения по вводимой мощности, поскольку используется только половина поперечного сечения световода.

3. Ввод излучения накачки через боковую поверхность световода (такая схема, как правило, применяется в блочных твердотельных лазерах) без использования световедущих свойств первой оболочки [21]. Данный способ применим, по-видимому, только для многомодовых световодов, что обусловлено низким поглощением излучения накачки в одномодовых световодах.

4. Ввод через боковую поверхность с использованием многомодовых объединителей [22]. Такие устройства имеют несколько многомодовых входов и один многомодовый выход с большей апертурой и большим диаметром по сравнению с входными световодами и представляют собой несколько световодов, сваренных или сплавленных в один. Эти устройства коммерчески доступны и обладают низкими потерями, однако не позволяют оперировать большими мощностями накачки (не более 20 Вт на каждый вход) и существенно (до двух раз и более) снижают яркость излучения. До настоящего времени в литературе сообщений о конкретной реализации подобных устройств немного [22, 23], что связано, вероятно, с технологическими трудностями создания таких объединителей. Возможно, что дальнейшее усовершенствование подобных устройств позволит эффективно использовать их и в мощных волоконных лазерах.

5. Ввод излучения накачки с использованием световода с двойной оболочкой, в котором, в отличие от конструкции на рис.1, первая оболочка состоит из нескольких световодов (рис.2). В дальнейшем изложении мы будем ссылаться на световоды этого типа как на световоды с многоэлементной первой оболочкой (МПО-световоды, или GTWave-световоды [24]).

МПО-световод представляет собой структуру, состоящую из активного (сигнального) волоконного световода, находящегося в оптическом контакте с одним или более параллельными ему многомодовыми кварцевыми световодами. При этом все световоды такой структуры окружены общей полимерной оболочкой, показатель преломления которой ниже показателя преломления плавленого кварца. Схема поперечного сечения трехэлементного световода представлена на рис.2. Все отдельные многомодовые световоды (элементы) оптически свя-

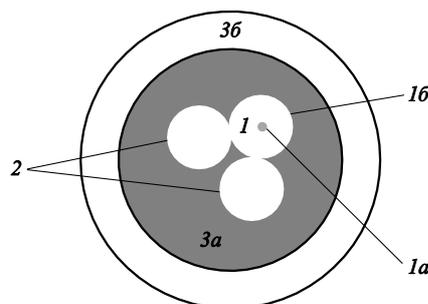


Рис.2. Схема поперечного сечения МПО-световода: 1 – сигнальный световод (1а – сердцевина, 1б – первая оболочка); 2 – пассивные световоды; 3а – общая оболочка с низким показателем преломления; 3б – защитная оболочка.

заны друг с другом и представляют собой первую (внешнюю) оболочку сердцевинки сигнального световода. Поскольку многомодовые световоды механически не связаны между собой (их объединяет только полимерная оболочка), то их можно отделить друг от друга и независимо соединить с пассивными световодами, подводящими излучение накачки, а активный световод – с одномодовыми световодами для ввода и вывода лазерного излучения.

Строение МПО-световодов позволяет сравнительно просто собирать чисто волоконные конструкции как лазеров (рис.3,а), приваривая к концам активного световода отражающие элементы в виде волоконных БР, так и волоконных усилителей, обеспечивая удобный доступ к обоим выходам активного световода. Волоконные схемы, собранные на основе МПО-световодов, могут содержать несколько точек ввода накачки (световод с двумя элементами – две точки ввода, с тремя – четыре и т. д.), что позволяет суммировать мощность излучения накачки, введенного в различных точках, и конструировать волоконные лазеры с высокой выходной мощностью.

Другим существенным преимуществом МПО-световодов по сравнению с обычными световодами с двойной оболочкой является изначально асимметричная геометрия поперечного сечения (рис.3). Поэтому, в отличие от обычных световодов с двойной оболочкой, в которых, как правило, для эффективного поглощения сердцевинкой излучения всех мод накачки приходится использовать квадратную (или прямоугольную, шестигранную, D-образную и т. п.) форму поперечного сечения первой оболочки [25], в МПО-световодах поперечное сечение сигнального и пассивных световодов может быть круглой формы. Это существенно упрощает саму сварку световодов и позволяет снизить потери в точках сварки сигнального световода с отрезками световодов, в которых записаны БР.

Таким образом, конструкция МПО-световодов весьма перспективна с точки зрения возможных приложений. В настоящей работе мы сообщаем о создании Yb-, Er-

Yb- и Nd-лазеров на основе световодов такого типа. В частности нами реализованы Yb-лазеры на световодах с двухэлементной и трехэлементной первой оболочкой с излучением в диапазоне 1057–1085 нм, Er – Yb-лазеры на двухэлементных МПО-световодах на длину волны 1608 нм и Nd-лазеры на двухэлементных МПО-световодах, генерирующие в областях 0.92 и 1.06 мкм.

### 3. Волоконные Yb-лазеры мощностью более 50 Вт

Научным центром волоконной оптики при ИОФ им. А.М.Прохорова РАН совместно с Институтом химии высокочистых веществ РАН были созданы лазерные МПО-световоды с двух- и трехэлементной первой оболочкой. Один из световодов, входящих в конструкцию, имел сердцевину из плавленного кварца, легированную редкоземельными ионами. Другие световоды не имели сердцевинки и полностью состояли из нелегированного плавленного кварца марки Suprasil F-300. Сборка отдельных световодов в МПО-световод проводилась непосредственно в процессе вытяжки световодов. Вторая оболочка – общая для всех световодов структуры – состояла из полимера с низким показателем преломления и для излучения, распространяющегося по первой оболочке, обеспечивала числовую апертуру  $\sim 0.39$ . Экспериментально измеренная длина связи между пассивным световодом и первой оболочкой сигнального световода составляла около 0.5 м.

Yb-лазеры были реализованы на двух- и трехэлементных МПО-световодах с алюмо- или фосфоросиликатной сердцевинкой [26]. Диаметр каждого кварцевого световода внутри МПО-структуры был равен 125 мкм. Диаметр сердцевинки сигнального световода в разных лазерах составлял от 4.4 до 11.5 мкм. В качестве источников накачки использовались диодные модули фирмы NewOptics с волоконным выходом. При полной мощности накачки длина волны излучения модуля была равна около 978 нм, а ширина линии излучения по половине высоты составляла  $\sim 6$  нм. Максимальная мощность каждого модуля на выходе световода с диаметром сердцевинки 200 мкм и числовой апертурой 0.22 достигала  $\sim 35$  Вт. В пассивные световоды МПО-структуры излучение накачки вводилось через волоконные тейперы, обеспечивающие согласование апертур и диаметров световодов.

При использовании двухэлементного МПО-световода лазер имел две точки ввода накачки, трехэлементного МПО-световода – четыре точки ввода. Резонатор лазера был образован парой БР с коэффициентами отражения  $\sim 100\%$  и  $\sim 5\%$ . Ширины спектра отражения высокоотражающих БР на уровне  $-10$  дБ составляли 0.8–3 нм. БР были записаны в сердцевине одномодового световода. Длины резонаторов выбирались исходя из коэффициента поглощения излучения накачки и лежали в пределах 25–50 м. Длина волны лазерной генерации находилась в диапазоне 1057–1085 нм.

Несмотря на высокий ( $\sim 99.9\%$ ) коэффициент отражения БР на одном из концов резонатора, существенная часть (до 10% и более) мощности лазерного излучения все же проходила сквозь нее. Это объясняется тем, что благодаря нелинейным эффектам и в особенности четырехволновому взаимодействию, спектр излучения лазерной генерации становится шире спектра отражения БР.

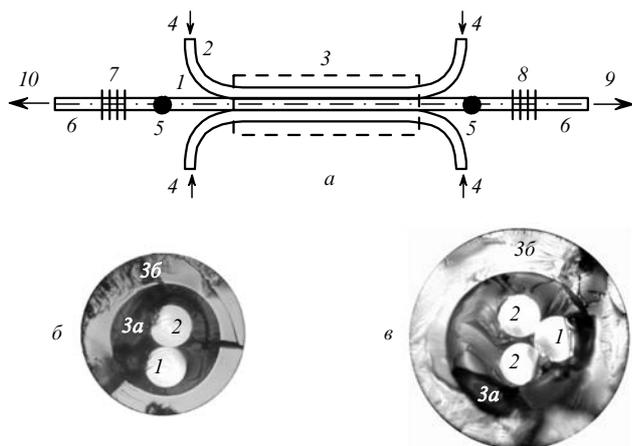


Рис.3. Схема лазера на трехэлементном МПО-световоде (а) и фотографии поперечных сечений двух- (б) и трехэлементного световодов:

1 – сигнальный световод; 2 – пассивный световод; 3 – общая оболочка (3а – оболочка с низким показателем преломления, 3б – защитная оболочка); 4 – излучение накачки; 5 – точки сварки сигнального световода со световодом б, на котором записана БР; 7 – высокоотражающая БР; 8 – БР с коэффициентом отражения  $\sim 5\%$ ; 9 – излучение на выходе лазера; 10 – излучение лазера, прошедшее сквозь высокоотражающую БР.

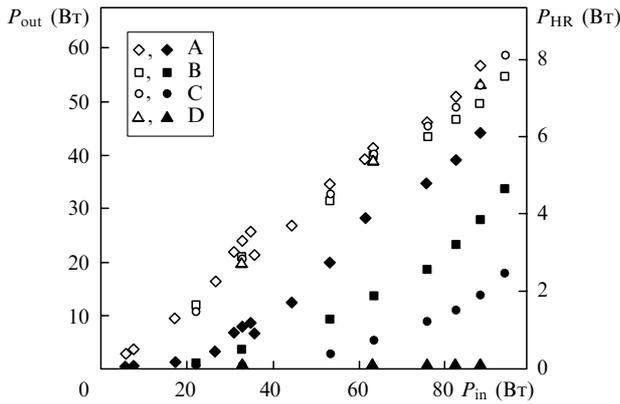


Рис.4. Зависимости мощности излучения лазерной генерации  $P_{out}$  (светлые точки) и мощности излучения  $P_{HR}$ , прошедшего сквозь высокоотражающую БР (темные точки), от мощности излучения накачки  $P_{in}$  для различных лазеров на трехэлементном МПО-световоде:

А – лазер с  $D_{mfd} = 6.8$  мкм без БР на выходном конце; В – лазер с  $D_{mfd} = 8.0$  мкм без БР на выходном конце; С – лазер с  $D_{mfd} = 8.0$  мкм и 5%-ной БР на выходном конце; D – лазер с  $D_{mfd} = 8.0$  мкм с высокоотражающей БР с  $\Delta\lambda \sim 3$  нм и 5%-ной БР на выходном конце.

Были измерены выходные характеристики лазеров с диаметрами поля моды  $D_{mfd} = 6.8$  и  $8.0$  мкм. Зависимости мощности лазерной генерации и мощности излучения, прошедшего сквозь высокоотражающую БР, от мощности накачки для лазеров на трехэлементном МПО-световоде представлены на рис.4. Резонатор лазера на световоде с  $D_{mfd} = 6.8$  мкм был образован высокоотражающей волоконной БР со спектральной шириной  $\Delta\lambda \sim 1$  нм и перпендикулярным сколом волоконного световода (коэффициент отражения  $\sim 3.5\%$ ; обозначение А). Световод с  $D_{mfd} = 8.0$  мкм был основой для лазеров с тремя различными резонаторами: резонатором, образованным 100%-ной БР с  $\Delta\lambda \sim 1$  нм и перпендикулярным сколом (В), резонатором, образованным 100%-ной БР с  $\Delta\lambda \sim 1$  нм и 5%-ной БР (С), и резонатором, образованным 100%-ной БР с  $\Delta\lambda \sim 3$  нм и 5%-ной БР (D).

Как видно из рис.4, увеличение диаметра поля моды ведет к снижению мощности излучения, проходящего сквозь высокоотражающую БР. К снижению теряемой мощности ведет также наличие БР на выходном конце резонатора или использование высокоотражающей БР с более широким спектром отражения. Максимальная мощность лазерной генерации достигала 60 Вт при эффективности относительно введенной мощности накачки около 65%.

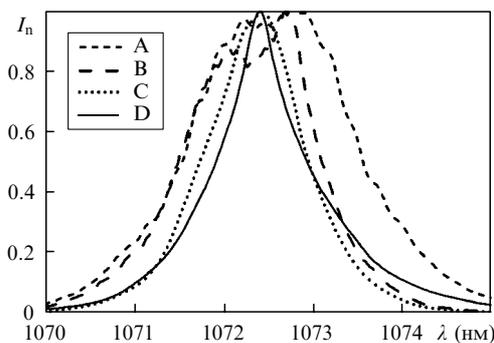


Рис.5. Нормированные спектры излучения волоконных Yb-лазеров на трехэлементном МПО-световоде (обозначения А–D соответствуют обозначениям на рис.4).

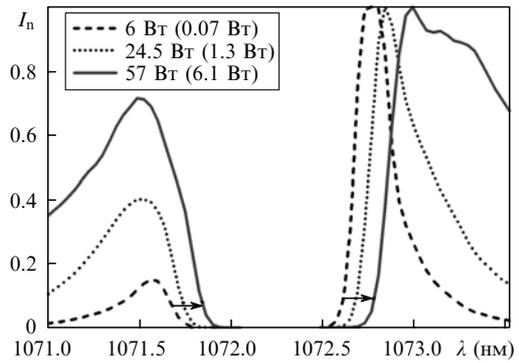


Рис.6. Нормированные спектры излучения волоконного Yb-лазера на трехэлементном МПО-световоде, полученные за высокоотражающей БР при различных мощностях излучения лазера (в скобках приведена мощность прошедшего через БР излучения). Стрелками показаны сдвиги спектра отражения высокоотражающей БР.

На рис.5 изображены нормированные спектры лазерной генерации для каждой из рассмотренных схем. Видно, что при увеличении диаметра поля моды и изменении других параметров резонатора наряду со снижением мощности излучения, проходящего сквозь БР, сужается ширина спектра лазерной генерации. В наших экспериментах, кроме указанного уширения спектра, проявлений каких-либо других нелинейных эффектов (ВКР, ВРМБ) не наблюдалось.

Для оценки влияния мощности генерации на высокоотражающие БР измерялись спектры выходного излучения за решеткой при различных мощностях генерации (рис.6). Оказалось, что с ростом мощности генерации спектр отражения БР смещается в длинноволновую область. Максимальное смещение составляет  $\sim 0.2$  нм при мощности генерации лазера 57 Вт, при этом сквозь БР выходит излучение мощностью около 6 Вт. Очевидно, что причиной смещения спектра БР в длинноволновую область является нагрев решетки лазерным излучением. Экспериментально установлено, что смещение спектра отражения решетки на 0.2 нм соответствует ее нагреву на  $\sim 20^\circ\text{C}$ .

#### 4. Волоконные лазеры на основе световодов, легированных ионами $\text{Er}^{3+}$ и $\text{Yb}^{3+}$

Хотя ионы  $\text{Er}^{3+}$  имеют пик поглощения в области 0.98 мкм, эффективно накачивать через первую оболочку лазер, легированный только ионами эрбия, на данной длине волны весьма затруднительно, поскольку, как правило, не удается одновременно поднять концентрацию ионов  $\text{Er}^{3+}$  в сердцевине до уровня, достаточного для эффективного поглощения накачки из первой оболочки, и сохранить при этом приемлемый уровень оптических потерь. Дополнительное легирование Er-световодов ионами  $\text{Yb}^{3+}$  позволяет существенно увеличить поглощение накачки из первой оболочки (до единиц дБ/м) и сохранить оптические потери на достаточно низком уровне (десятки дБ/км). При таком способе легирования излучение накачки поглощается в основном ионами  $\text{Yb}^{3+}$ , т.к. их можно ввести примерно в 10 раз больше и они обладают значительно (в 5–10 раз) большим сечением поглощения на 0.975 мкм, чем ионы  $\text{Er}^{3+}$ . Возбужденные ионы  $\text{Yb}^{3+}$  передают энергию ионам  $\text{Er}^{3+}$ , на переходах которых осуществляется генерация. Таким образом, при

совместном легировании световодов ионами  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Yb}^{3+}$  накачка осуществляется так же, как и в  $\text{Yb}$ -лазерах.

Эффективность передачи энергии  $\text{Yb} \rightarrow \text{Er}$  зависит от типа стекла (фосфоросиликатное, алюмосиликатное и др.) и от абсолютных концентраций ионов  $\text{Yb}^{3+}$  и  $\text{Er}^{3+}$ . Как правило, чем ближе расположены активные ионы в матрице, тем быстрее (эффективнее) они обмениваются энергией друг с другом. Для достижения высоких мощностей генерации в  $\text{Er}-\text{Yb}$ -лазерах важную роль играет время релаксации ионов  $\text{Er}^{3+}$  из состояния  $^4I_{11/2}$  на верхний лазерный уровень  $^4I_{13/2}$ : чем оно меньше, тем более высокая мощность может быть достигнута. В свою очередь время релаксации зависит от максимальной энергии фонона в матрице стекла: чем она больше, тем меньше время релаксации. С этой точки зрения для мощных лазеров более пригодной является фосфоросиликатная матрица, в которой максимальная энергия фононов ( $\sim 1330 \text{ см}^{-1}$ ) втрое превышает аналогичный параметр для алюмосиликатной матрицы.

Нами было реализовано несколько лазеров на двухэлементных МПО-световодах с фосфоросиликатной сердцевиной, легированной ионами  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Yb}^{3+}$  в различных концентрациях. Диаметр каждого из кварцевых световодов внутри МПО-структуры составлял 125 мкм. Накачка осуществлялась таким же источником, как и в случае  $\text{Yb}$ -лазеров. Излучение накачки вводилось только с одной стороны – навстречу выходному излучению – и только по пассивному световоду. В некоторых случаях для повышения поглощенной мощности накачки концы пассивного и активного световодов МПО-структуры со стороны, противоположной вводу накачки, сваривались друг с другом для обеспечения возврата излучения накачки в лазер (рис.7). (Это эквивалентно применению выходного зеркала, возвращающего излучение накачки в световод, в волоконных лазерах на обычных световодах с двойной оболочкой (см., напр., [27]); при этом БР записывается в сердцевине световода с двойной оболочкой.) Схема с возвратом непоглощенного излучения накачки обеспечивает более равномерное поглощение ее излучения и более равномерное распределение возбужденных ионов по длине лазера по сравнению со случаем, когда применяется стандартный световод с двойной оболочкой без зеркала, возвращающего излучение накачки.

Длины резонаторов выбирались исходя из коэффициента поглощения излучения накачки и лежали в пределах 7–25 м, а сами резонаторы были образованы высокоотражающей БР с длиной волны максимума отражения на 1608 нм с одной стороны и перпендикулярным сколом световода или слабоотражающей решеткой – с другой.

Подавление паразитной генерации и суперлюминесценции ионов  $\text{Yb}^{3+}$  осуществлялось посредством минимизации обратной связи для излучения, не совпадающего с длиной волны 1608 нм. Для этого к отрезку волокна



Рис.7. Схема лазера на двухэлементном МПО-световоде с возвратом излучения накачки.

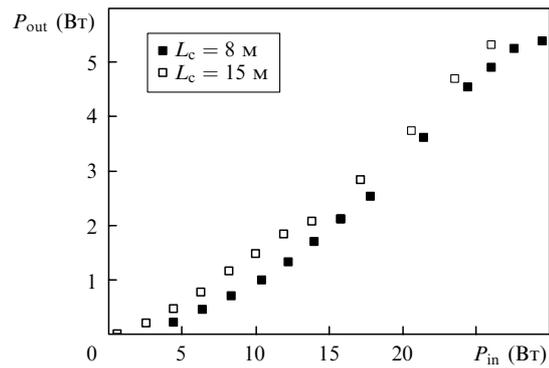


Рис.8. Зависимость мощности генерации на длине волны 1608 нм от введенной мощности накачки на 975 нм для двух различных  $\text{Er}-\text{Yb}$ -лазеров с длиной резонатора  $L_c = 8$  и 15 м.

за глухой БР приваривался световод без сердцевины, конец которого погружался в глицерин.

На рис.8 представлены зависимости выходной мощности  $\text{Er}-\text{Yb}$ -лазеров на различных световодах с длиной резонаторов  $L_c = 8$  и 15 м ( $\lambda = 1.6$  мкм) от введенной мощности ( $\lambda \approx 0.97$  мкм). Массовая концентрация ионов  $\text{Yb}^{3+}$  ( $\text{Er}^{3+}$ ) в лазере с  $L_c = 8$  м составляла 2.2 (1.0) %, в лазере с  $L_c = 15$  м она была равна 1.6 (0.3) %. Видно, что эффективность обоих лазеров практически одинакова и составляет  $\sim 20$  %. По-видимому, такая низкая эффективность (в три раза ниже квантовой) обусловлена наличием в сердцевине ионов  $\text{Yb}^{3+}$ , не передающих энергию ионам  $\text{Er}^{3+}$ , что проявляется в возникновении суперлюминесценции, а по мере увеличения мощности накачки – и в генерации на ионах  $\text{Yb}^{3+}$  в диапазоне 1.05–1.06 мкм, несмотря на меры по подавлению обратной связи. Присутствие значительного количества (по оценкам, от 10 % до 50 %) ионов  $\text{Yb}^{3+}$ , не передающих энергию ионам  $\text{Er}^{3+}$ , свидетельствует о возможности дальнейшего совершенствования технологии изготовления световодов и повышения эффективности лазеров.

## 5. Волоконные Nd-лазеры в областях 0.92 и 1.06 мкм

В отличие от предыдущих работ, в данной работе для создания неодимовых лазеров на длины волн 0.92 и 1.06 мкм были использованы МПО-световоды. Такой подход позволяет не только повысить мощность вводимого в лазер излучения накачки, но и за счет использования активного световода с круглым сечением существенно снизить потери в точках сварки этого световода со световодами, на которых записаны БР, а следовательно, повысить эффективность лазерной генерации. Кроме того, использование МПО-световода позволяет осуществлять накачку активной среды с двух сторон (см. рис.3) или с разворотом излучения накачки (см. рис.7). Это обеспечивает более равномерное распределение ионов  $\text{Nd}^{3+}$ , находящихся в возбужденном состоянии, по длине лазера, что ведет к увеличению оптимальной длины лазера и позволяет поглотить большую мощность излучения накачки.

В данной работе на МПО-световодах с двухэлементной первой оболочкой реализованы эффективные одномодовые неодимовые волоконные лазеры, работающие в областях 0.92 и 1.06 мкм в непрерывном режиме при комнатной температуре. Излучение накачки на длине волны

805 нм вводилось с двух сторон в пассивный световод от двух диодных модулей фирмы NewOptics. Резонатор был сформирован высокоотражающей БР в отрезке световода, приваренного к сигнальному световоду, и перпендикулярным сколом одномодового световода, приваренного к сигнальному световоду с другой стороны.

**5.1. Неодимовый лазер на диапазон 0.92–0.93 мкм**

Сигнальный световод лазера на длину волны 0.92 мкм имел сердцевину с W-образным ППП с разностью между максимумами показателей преломления сердцевины и кварцевой оболочки  $\Delta n^+ = 5 \times 10^{-3}$  и разностью показателей преломления области депрессии и кварцевой оболочки  $\Delta n^- = 2.5 \times 10^{-3}$  (рис.9). Диаметры сердцевины и области депрессии составляли 6 и 13.5 мкм соответственно, диаметр кварцевых оболочек сигнального и пассивного световодов был равен 82 мкм. Длина резонатора составляла 15 м, при этом коэффициент поглощения из первой оболочки (на  $\lambda = 805$  нм) достигал 0.55 дБ/м. Увеличение длины резонатора приводило к падению эффективности генерации, тогда как использование резонатора длиной менее 15 м могло привести к воздействию излучения встречных накачек друг на друга, а следовательно, к возможности повреждения диодных модулей, т.к. в этом случае существенная часть мощности излучения накачки не поглощается в активном элементе лазера.

Основная сложность использования световода с W-образным ППП для получения лазерной генерации в области 0.92 мкм состоит в том, что наряду с эффективным подавлением усиления в области 1.06 мкм необходимо сохранить приемлемый уровень потерь на  $\lambda = 0.92$  мкм, что на практике достигается подбором оптимального радиуса изгиба лазерного световода. С целью дополнительного подавления усиления в области 1.06 мкм световод был намотан на катушку радиусом 10 см.

Для повышения эффективности генерации лазера с длиной волны 930 нм было осуществлено кольцевое легирование сердцевины сигнального световода ионами неодима. Такое распределение активных ионов позволяет понизить коэффициент усиления на единицу длины сигнального световода за счет уменьшения интеграла перекрытия между полем основной моды и распределением активных ионов. В то же время число ионов нео-

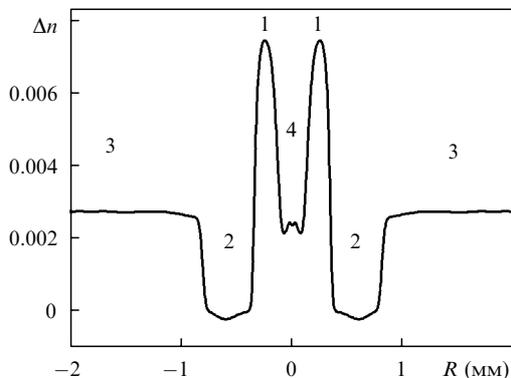


Рис.9. Профиль показателя преломления активного световода, измеренный в заготовке (по оси абсцисс отложена радиальная координата заготовки, по оси ординат – изменение показателя преломления): 1 – область сердцевины, легированная окислами Nd, Al и Ge; 2 – область депрессии показателя преломления, легированная фтором; 3 – область нелегированного плавленого кварца; 4 – область сердцевины без легирования.

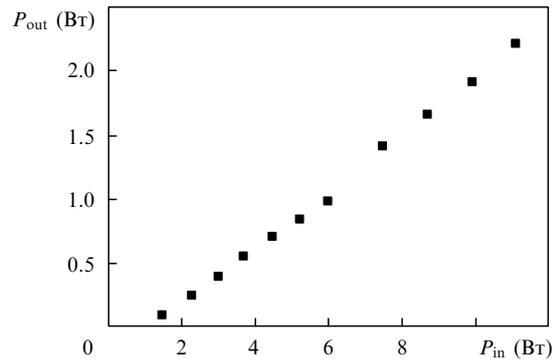
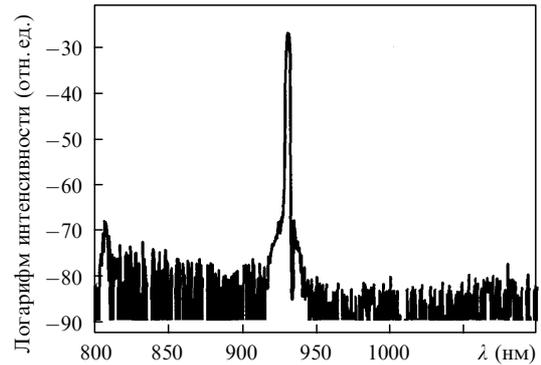


Рис.10. Обзорный спектр излучения на выходе Nd-лазера (а) и зависимость мощности генерации на  $\lambda = 930$  нм от введенной мощности накачки на  $\lambda = 805$  нм (б).

дима на единицу длины сохраняется, поэтому остается неизменным коэффициент поглощения накачки из первой оболочки, а коэффициент усиления на единицу длины снижается для излучения в области как 0.92 мкм, так и 1.06 мкм. При этом для подавления генерации на  $\lambda = 1.06$  мкм требуется существенно меньший уровень внесенных потерь на единицу длины, что ведет к снижению внесенных потерь на рабочей длине волны и позволяет использовать более длинный сигнальный световод, а следовательно, повышает коэффициент поглощения излучения накачки на длине активного световода.

Схожий способ кольцевого легирования был использован для получения лазерной генерации на  $\lambda = 0.975$  мкм в одномодовом иттербиевом лазере с накачкой через первую оболочку [28].

В неодимовом лазере на  $\lambda = 0.93$  мкм пороговая мощность накачки составляла 1 Вт, а максимальная мощность лазерного излучения достигала 2.2 Вт. Дифференциальная эффективность относительно введенной мощности излучения накачки была равна 22%. Обзорный спектр излучения на выходе лазера и его выходные характеристики представлены на рис.10. Видно, что излучение в области 1.06 мкм практически отсутствует, что свидетельствует об эффективном подавлении усиления в этом диапазоне.

**5.2. Неодимовый лазер с  $\lambda = 1.06$  мкм**

Для оценки эффективности лазерных световодов с W-образным ППП нами были созданы волоконные неодимовые лазеры с  $\lambda = 1.06$  мкм и приблизительно прямоугольным ППП. Такие световоды не вносят дополнительных потерь на длине волны генерации. В качестве активного световода для лазера на переходе  $^4F_{3/2} - ^4I_{11/2}$  (1.06 мкм) использовался двухэлементный МПО-свето-

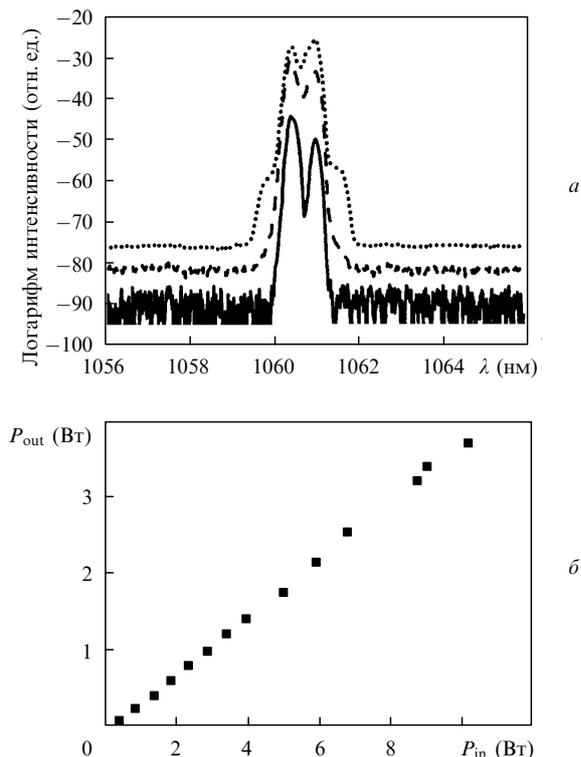


Рис.11. Спектры излучения на выходе Nd-лазера при различных уровнях мощности накачки (а) и зависимость мощности генерации на  $\lambda = 1060$  нм от введенной мощности накачки на  $\lambda = 805$  нм (б).

вод со следующими параметрами: разность максимумов показателей преломления сердцевин и кварцевой оболочки  $9.7 \times 10^{-3}$ , диаметр сердцевин 7 мкм, диаметры кварцевых оболочек пассивного и сигнального световодов 80 мкм. Длина световода составляла 21 м и была выбрана для достаточного поглощения излучения накачки (максимум пика поглощения в оболочке на длине волны 805 нм был равен около 1 дБ/м). Высокоотражающая волоконная БР имела максимум коэффициента отражения на  $\lambda = 1.06$  мкм. Порог генерации составил около 0.2 Вт, а максимальная мощность генерации достигла 3.7 Вт. Дифференциальная эффективность лазерной генерации на  $\lambda = 1.06$  мкм относительно введенной мощности накачки составила 38 %. Спектры генерируемого излучения при различных уровнях мощности накачки и выходная характеристика лазера представлены на рис.11. Эффективность этого лазера была примерно в 1.7 раза выше, чем лазера на 0.93 мкм, что, по-видимому, свидетельствует о присутствии в лазере с W-образной структурой ППП дополнительных потерь на длине волны генерации 0.93 мкм и указывает на возможность дальнейшего совершенствования лазеров такого типа.

## 6. Заключение

В настоящей работе создан и исследован ряд одномодовых иттербиевых, эрбий-иттербиевых и неодимовых волоконных лазеров на световодах с многоэлементной первой оболочкой. Использование МПО-световодов позволяет реализовывать эффективные полностью воло-

конные лазеры с накачкой сразу от нескольких источников, что удобно при их практическом применении и позволяет не только наращивать мощность генерации, но и предотвращать повреждение диодных источников накачки излучением волоконного лазера, проходящим сквозь высокоотражающую брэгговскую решетку. Полученные результаты свидетельствуют о том, что конструкция МПО-световодов является весьма перспективной с точки зрения возможных приложений в волоконной оптике.

Авторы выражают искреннюю благодарность О.И. Медведкову за изготовление волоконных брэгговских решеток для лазеров и А.Е.Ракитину – за помощь при проведении экспериментов. Работа была частично поддержана грантом Президента РФ № НШ-962.2003.2.

- Jeong H, Sahu J.K., Baek S., et al. *Proc. CLEO'2004* (Baltimore, MD, USA, 2004, CMS1).
- Liu C.-H., Galvanuskas A., Ehlers B., et al. *Proc. CLEO'2004* (Baltimore, MD, USA, 2004, CMS2).
- Platonov N.S., Gapontsev D.V., Shumilin V. *Proc. CLEO'2002* (Long Beach, CA, 2002, CPDC3).
- Jeong Y., Sahu J.K., Williams R.B., et al. *Electron. Lett.*, **39**, 977 (2003).
- Limpert J., Liem A., Zellmer H., Tunnerman A. *Electron. Lett.*, **39**, 645 (2003).
- Jeong Y., Sahu J.K., Payne D.N., Nilsson J. *Proc. ASSP'2004* (Santa Fe, New Mexico, 2004).
- Norman S., Zervas M., Jeong Y., et al. *Photonics West'2004* (San Jose, CA, 2004).
- Fomin V., Sivov B. *II International Symposium on High-Power Fiber Lasers and Their Applications* (St.-Petersburg, Russia, 2003, 2.1).
- Sahu J.K., Jeong Y., Richardson D.J., Nilsson J. *Opt. Commun.*, **227**, 159 (2003).
- Zeller P., Peuser P. *Opt. Lett.*, **25**, 34 (2000).
- Dawson J.W., Drobshoff A., Liao Z., et al. *Proc. SPIE Int. Opt. Eng.*, **4974**, 75 (2003).
- Буфетов И.А., Дудин В.В., Шубин В.В. и др. *Квантовая электроника*, **33**, 1035 (2003).
- Soderlund M.J., Tammela S.K.T. *Proc. OFC'2004* (Los Angeles, CA, USA, 2004, FJ4).
- Soh D.B.S., Yoo S.W., Nilsson J., et al. *IEEE J. Quantum Electron.*, **9**, 1275 (2004).
- Kawakami S., Nishida S. *IEEE J. Quantum Electron.*, **4**, 130 (1975).
- Monerie M. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **4**, 381 (1982).
- Унгер Х.-Г. *Планарные и волоконные оптические волноводы* (М.: Мир, 1980, с. 344).
- Cohen L.G., Marcuse D., Mammel W.L. *IEEE J. Quantum Electron.*, **18**, 1467 (1982).
- Arbore M.A., Zhou Y., Keaton G., Kane T. *Proc. ECOC'2002* (Copenhagen, Denmark, 2002, 2.2.2).
- Ripin D.J., Goldberg L. *Electron. Lett.*, **31**, 2204 (1995).
- Li C., Song J., Kim N.S., Ueda Ken-ichi. *Proc. SPIE Int. Opt. Eng.*, **3862**, 246 (1999).
- Hakimi F., Hakimi H. *CLEO'2001* (Baltimore, MD, USA, 2001, CTUD2).
- Ou P., Yan P., Gong M.L., et al. *Electron. Lett.*, **40**, 7 (2004).
- Grudin A.B., Turner P.W., Codemard C., et al. *Proc. ECOC'2002* (Copenhagen, Denmark, 2002, PD1.6).
- Doya V. *Opt. Fiber Technol.*, **6**, 324 (2001).
- Мелькумов М.А., Буфетов И.А., Кравцов К.С. и др. *Квантовая электроника*, **34** (9), 843 (2004).
- Дианов Е.М., Белов А.В., Буфетов И.А. и др. *Квантовая электроника*, **24**, 3 (1997).
- Nilsson J., Minelly J.D., Paschotta A.C., et al. *Opt. Lett.*, **23**, 355 (1998).