

Оптические свойства световодов с сердцевинной из алюмосиликатного стекла, высоколегированного иттербием и фтором

М.В.Яшков, А.Н.Абрамов, А.Н.Гурьянов, М.А.Мелькумов, А.В.Шубин, М.М.Бубнов, М.Е.Лихачев

Разработан модифицированный MCVD-метод, позволяющий изготавливать заготовки иттербиевых волоконных световодов с сердцевинной на основе алюмосиликатного стекла, легированного фтором. С использованием данной технологии продемонстрирована возможность одновременного введения в стекло ионов Yb^{3+} высокой концентрации (около 2 мас. %) при высоком уровне фторирования (2 мас. %), при концентрации оксида алюминия более 1.5 мол. % (для обеспечения высокой растворимости ионов иттербия) и рекордно низким показателе преломления стекла ($\Delta n \approx 0.000-0.003$). Создана серия световодов с сердцевинной состава $SiO_2-Al_2O_3-GeO_2-Yb_2O_3-F$ и исследованы их оптические характеристики. В частности, показана возможность достижения предельно высокой эффективности генерации (82.7% относительно поглощенной мощности накачки). Исследован уровень фотопотемнения в световодах в зависимости от концентрации иттербия. Показана возможность создания волоконных иттербиевых усилителей на основе разработанных световодов с предельно низким уровнем деградации выходной мощности (менее 20% после 10000 ч непрерывной работы).

Ключевые слова: иттербиевый световод, волоконный лазер, фотопотемнение, световоды с большим диаметром поля моды.

1. Введение

Световоды с увеличенным диаметром поля фундаментальной моды, легированные ионами редкоземельных элементов (РЗЭ), в настоящее время широко используются для создания волоконных лазеров и усилителей с высокой пиковой и средней мощностью. Основные требования к таким световодам – работа в одномодовом или маломодовом режиме, увеличенный диаметр сердцевины (и, как следствие, диаметр поля моды) и высокая концентрация ионов РЗЭ (с целью уменьшения рабочей длины световода). Следует отметить, что последние два требования, необходимые для снижения влияния нелинейных эффектов, являются взаимоисключающими. Дело в том, что при увеличении концентрации РЗЭ для улучшения их растворимости в стекло сердцевины необходимо ввести оксид Al_2O_3 либо P_2O_5 достаточно высокой концентрации [1]. Обе эти добавки, как и сами оксиды РЗЭ, значительно увеличивают показатель преломления кварцевого стекла ($\Delta n \approx 0.01$), в результате чего для обеспечения одномодового режима работы активного световода необходимо уменьшить диаметр сердцевины световода (и, соответственно, площадь поля моды). В результате происходит существенное снижение порога нежелательных нелинейных эффектов.

Для снижения показателя преломления сердцевины световода, легированной ионами РЗЭ до высоких концентраций, могут быть использованы два подхода. Первый за-

ключается в совместном легировании оксидами алюминия и фосфора, что приводит к снижению показателя преломления стекла почти до уровня кварца, и, как показали наши исследования, при этом растворимость ионов РЗЭ остается достаточно высокой [2]. Таким методом ранее нам удалось изготовить световод, легированный иттербием (2 мас. %), с показателем преломления сердцевины на уровне 0.0025 и высокой стойкостью к эффекту фотопотемнения [3]. Однако дальнейшее снижение показателя преломления при использовании фосфоралюмосиликатной матрицы невозможно без снижения уровня легирования оксида иттербия, который создает значительную рефрактивность (по разным данным около 0.0008–0.0012 на 1 мас. % [4, 5]).

Второй подход заключается в солегировании алюмосиликатной стеклянной матрицы фтором, который существенно снижает показатель преломления стекла. Несмотря на более высокую чувствительность алюмосиликатных стекол к фотопотемнению, второй подход представляется достаточно перспективным. Во-первых, предельный продемонстрированный уровень легирования фтором кварцевого стекла в MCVD-процессе позволяет достигать значительного снижения показателя преломления ($\Delta n = -0.012$) [6], что теоретически позволяет компенсировать рост показателя преломления при легировании оксидом алюминия и ионами РЗЭ до высоких концентраций. Во-вторых, сечение поглощения ионов иттербия может варьироваться в два раза в зависимости от матрицы стекла, и его максимальное значение имеют именно световоды на основе алюмосиликатного стекла [7]. Это приводит к большему коэффициенту поглощения излучения накачки при той же концентрации ионов иттербия и, следовательно, к меньшей оптимальной длине световода в лазере и более высокому порогу нелинейных эффектов.

М.В.Яшков, А.Н.Абрамов, А.Н.Гурьянов. Институт химии высоко-
чистых веществ РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Тропинина, 49
М.А.Мелькумов, А.В.Шубин, М.М.Бубнов, М.Е.Лихачев. Научный
центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вави-
лова, 38; e-mail: likhachev@fo.gpi.ru

Поступила в редакцию 20 октября 2017 г.

Несмотря на перспективность алюмосиликатной матрицы с высоким уровнем фторирования, в настоящее время используются активные алюмосиликатные иттербиевые световоды с относительно низким уровнем фторирования – не более 1 мас. % [8–11] (по разным данным это соответствует депрессии $\Delta n = -0.004 \pm 0.0004$ [8, 12, 13]), что связано с технологическими сложностями получения стекла такого состава.

Цель настоящей работы – разработка и исследование световодов со стеклом сердцевины состава $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--(GeO}_2\text{)--Yb}_2\text{O}_3$, дополнительно легированных фтором с концентрацией ~ 2 мас. %. Получены экспериментальные образцы световодов с рекордно высокой величиной поглощения накачки из оболочки и проведено исследование таких основных свойств световодов, как эффективность генерации и усиления, а также стойкость к эффекту фотопотемнения.

2. Изготовление опытных образцов заготовок и световодов

Заготовки волоконных световодов изготавливались методом химического осаждения из газовой фазы (MCVD-методом) [14]. В качестве исходных соединений для синтеза стекла сердцевины использовались высокочистые SiCl_4 , GeCl_4 , AlCl_3 , $\text{Yb}(\text{tdh})_3$. MCVD-установка была дополнительно оснащена оборудованием для испарения и подачи AlCl_3 и летучих комплексов РЗЭ при температурах $\sim 130\text{--}200^\circ\text{C}$. В качестве опорных труб применялись кварцевые трубы марки Suprasil F-300 (Heraeus). SiF_4 использовался как фторагент, что является оптимальным, т.к. исключает промежуточную стадию образования SiF_4 при использовании других прекурсоров (CF_2Cl_2 , $\text{C}_2\text{F}_3\text{Cl}_3$, C_6F_{14} , SF_6), приводящую к потере SiO_2 (в результате травления) и усложняющую контроль Δn в заготовке. В процессе формирования заготовки все компоненты парогазовой смеси подавались одновременно по обогреваемым магистралям в зону реакции с образованием частиц оксидов и последующим их проплавлением горелкой до прозрачного слоя стекла. Диаметр сердцевины определялся величиной расходов прекурсоров и числом нанесенных слоев стекла.

Проведенные исследования выявили сложности совместного легирования стекла фтором, алюминием и иттербием, заключающиеся в том, что введение SiF_4 в парогазовую смесь приводит к образованию высоколетучих соединений AlF_3 и YbF_3 , снижающих эффективность и равномерность осаждения компонентов стекла по длине заготовки. Данные соединения образовывались не только в зоне реакции основных компонентов парогазовой смеси, но и до зоны реакции при более низких температурах. В результате происходила преждевременная их конденсация на стенках опорной трубки по мере ее остывания. Вследствие этого, концентрация оксида алюминия по длине заготовки становилась неоднородной, что в свою очередь приводило к вариациям показателя преломления. Дополнительный подогрев части опорной трубы, на которой происходила неконтролируемая конденсация AlF_3 и/или YbF_3 , подбор состава и скорости потоков реагентов позволили получить заготовки с достаточно равномерным распределением легирующих добавок по длине.

В настоящее время практически во всех мощных волоконных лазерах накачка осуществляется через оболочку [10, 11, 15]. Разработанная технология синтеза стекол со-

става $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--GeO}_2\text{--Yb}_2\text{O}_3\text{--F}$ с показателем преломления, близким к кварцевому стеклу, позволяет изготавливать волоконные световоды с частично легированной Yb отражающей оболочкой, имеющей показатель преломления, равный показателю преломления нелегированного кварцевого стекла. Световоды такой конструкции обладают повышенным поглощением излучения накачки, распространяющейся по оболочке. На рис.1 представлены профиль показателя преломления такой заготовки и ее элементный состав. Как видно из рисунка, слой стекла в диапазоне радиусов 0.95–1.15 мм является отражающей оболочкой, легированной Yb. По нашим оценкам, наличие такого слоя практически не приводит к увеличению длины волны отсечки, однако увеличивает поглощение из оболочки как минимум на 50%.

На основе данной заготовки был создан световод с многоэлементной первой оболочкой [15] (рис.2,а), в котором диаметры активной и пассивной жил составляли 90 и 115 мкм соответственно. В случае как активной, так и пассивной жилы световода диаметры были выбраны

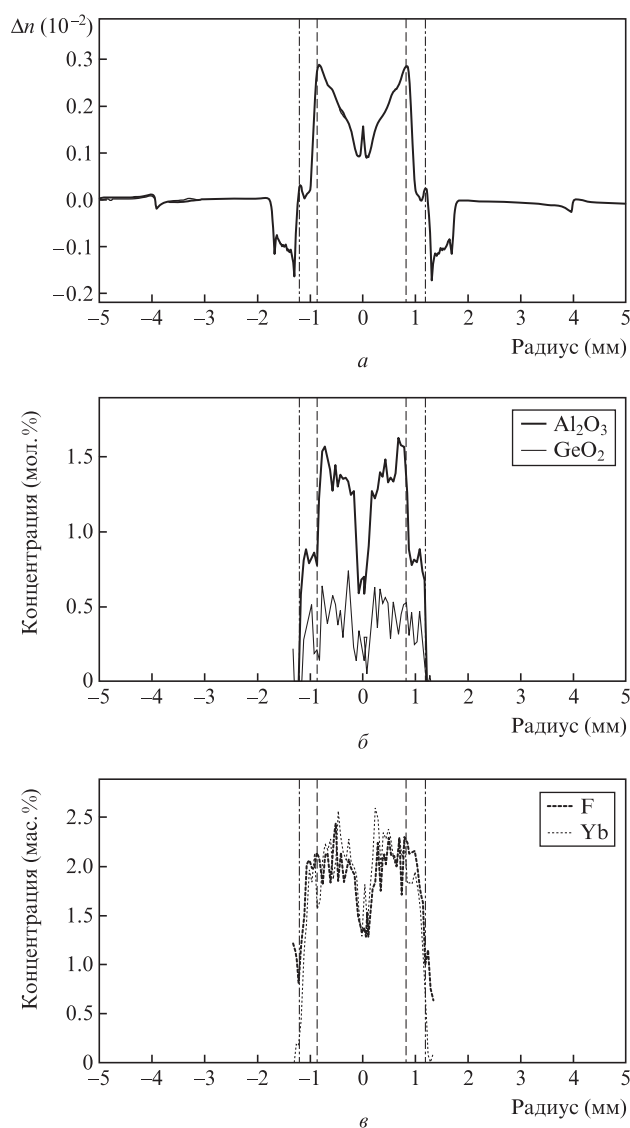


Рис.1. Профиль показателя преломления заготовки Y408, полученный при помощи анализатора заготовок York Technology P102 (а), а также элементный состав сердцевины заготовки, измеренный рентгеновским микроанализатором спектра JSM-5910LV фирмы JEOL (центр коллективного пользования ИЦВО РАН) (б и в).

близкими к минимально возможным с целью обеспечения максимального поглощения из оболочки (поглощение растет с уменьшением площади нелегированного кварцевого стекла). Стандартные средства скалывания и сварки световодов допускают работу с диаметрами кварцевых волокон не менее 80 мкм, в нашем случае диаметр активной жилы был 90 мкм. Выходные световоды диодов накачки имеют сердцевину диаметром 105–110 мкм, поэтому с целью минимизации потерь на сварку диаметр пассивной жилы (используемой для ввода накачки) был выбран равным 115 мкм.

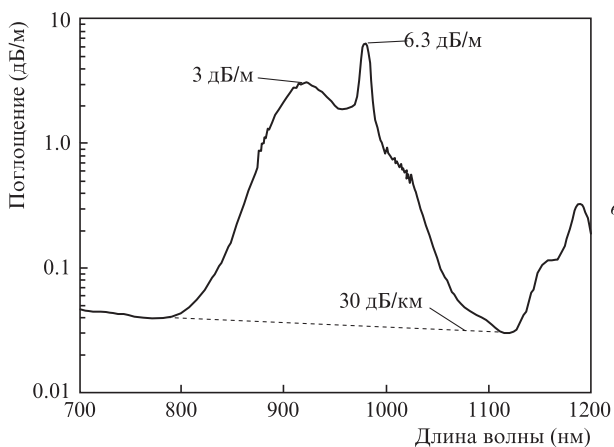
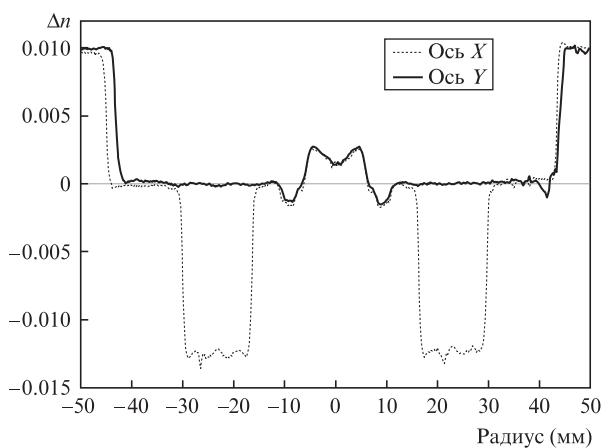
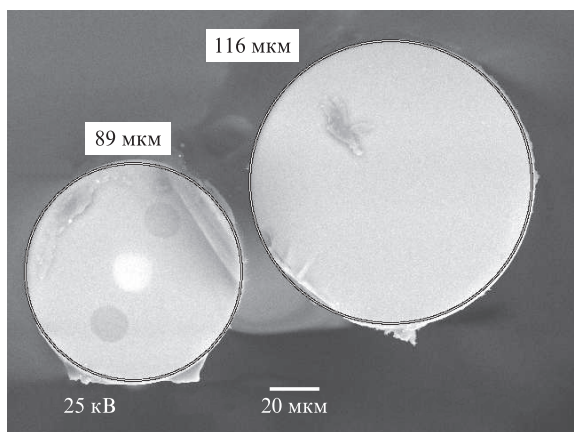


Рис.2. Фотография торцов кварцевых жил изготовленного световода с многоэлементной первой оболочкой, полученная при помощи электронного микроскопа (а); профиль показателя преломления световода, измеренный анализатором EXPO NR200HR по оси X (проходящей через боросиликатные стержни) и оси Y (перпендикулярной плоскости стержней) (б); спектр поглощения из первой оболочки (в).

Для создания анизотропии в области сердцевины и придания световоду способности сохранять поляризацию активная жила на всем протяжении имела вставки из боросиликатного стекла. Профили показателя преломления активной жилы в плоскости, проходящей через боросиликатные стержни, и в перпендикулярной плоскости представлены на рис.2,б. Поглощение из оболочки в разработанном световоде превысило 3 дБ/м на длине волны 915 нм (рис.2,в), что как минимум в полтора раза превышает соответствующую величину для коммерчески доступных световодов (одножильных с размерами сердцевины и оболочки 10–12 и 125 мкм (см., например, световоды компании Nufern, www.nufern.com)). В световодах с многоэлементной оболочкой объем кварцевого стекла несколько увеличен по сравнению с одножильными световодами, что связано с наличием дополнительной кварцевой жилы, используемой для ввода накачки. При идентичных условиях (если бы существующие коммерчески доступные световоды были выполнены в конфигурации световода с многоэлементной оболочкой) выигрыш оказывается еще выше. В этом случае поглощение из оболочки будет превышать аналоги в два раза.

3. Оптические характеристики волокон

В созданном световоде была измерена эффективность преобразования мощности излучения накачки в сигнал в схеме лазера со встречной накачкой (рис.3,а). Волоконная

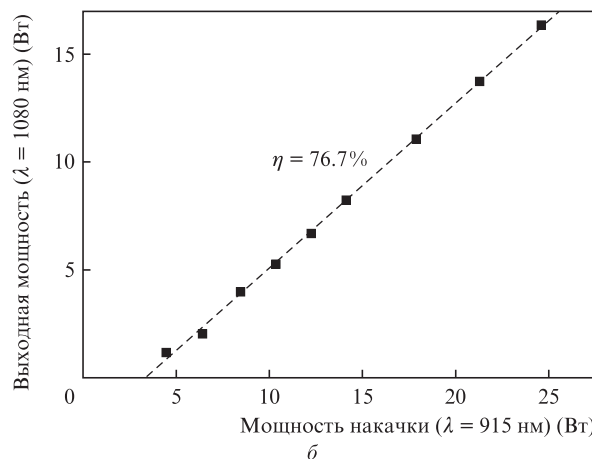
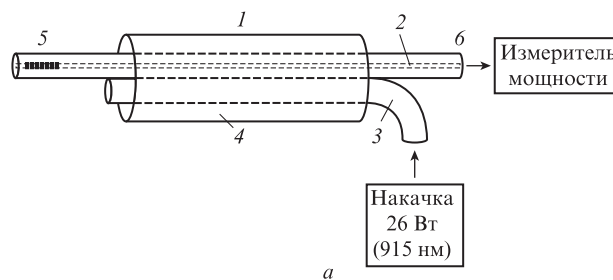


Рис.3. Лазер на основе изготовленного световода с многоэлементной оболочкой: а – схема лазера (1 – тестируемый световод с многоэлементной первой оболочкой длиной 6.2 м; 2 – жила с сердцевиной, легированной иттербием, вытянутая из заготовки Y408; 3 – кварцевая жила для ввода излучения накачки; 4 – общая полимерная отражающая оболочка с апертурой NA > 0.4; 5 – внутриволоконная брэгговская решетка (R = 99%); 6 – прямой скол торца световода, обеспечивающий 4%-ное френелевское отражение); б – эффективность преобразования мощности накачки в лазерный сигнал.

брэгговская решетка (ВБР) на длину волны 1080 нм была записана на отдельном световоде Flex1060 и приварена к активной жиле тестируемого световода. Для накачки использовался диодный модуль PUMA (производства компании «МИЛОН») с волоконным выходом, с длиной волны излучения ~ 915 нм и выходной мощностью до 26 Вт. Дифференциальная эффективность лазерной генерации составила 76.7% относительно введенной мощности накачки (рис.3,б) и 82.7% относительно поглощенной мощности. Полученная эффективность близка к предельно возможной квантовой эффективности преобразования накачки на длине волны 915 нм в сигнал с $\lambda = 1080$ нм, которая равна 84.7%. Это подтверждает высокое качество изготовленного световода и свидетельствует в пользу того, что выбранная концепция, при которой значительная часть активных ионов Yb находится по сути вне сердцевины (вне области с повышенным относительно оболочки Δn), хорошо работает. Такой прием стал возможен только благодаря введению в легированную Yb и Al область световода фтора высокой концентрации.

На рис.4 представлены схема усилителя и измеренная эффективность преобразования излучения накачки в усиливаемый сигнал, генерируемый одномодовым иттербиевым лазером ($\lambda = 1064$ нм) мощностью до 200 мВт. Дифференциальная эффективность преобразования мощности накачки в сигнал в этом случае составила около 63%, что также является хорошим показателем.

Одной из важнейших характеристик иттербиевых световодов является скорость фотопотемнения (медленного увеличения оптических потерь при непрерывной работе

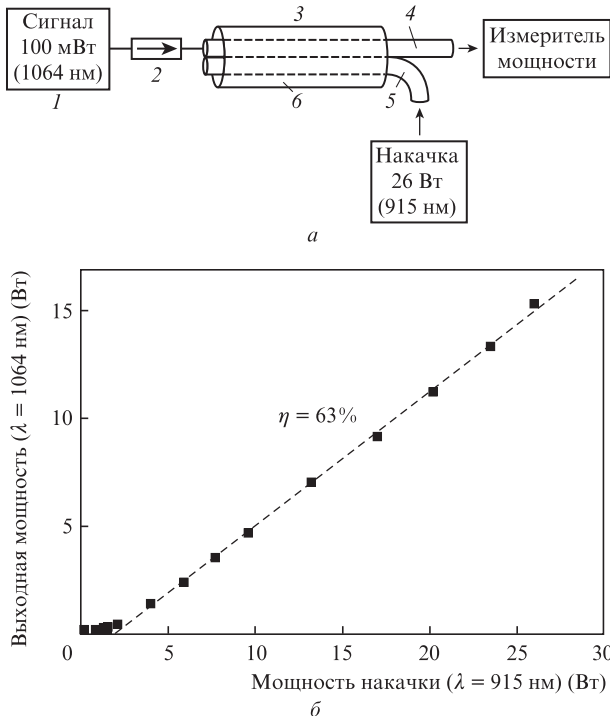


Рис.4. Усилитель лазерного сигнала со встречной накачкой на основе изготовленного световода с многоэлементной оболочкой:

а – схема усилителя (1 – волоконный непрерывный Yb-лазер (100 мВт, 1064 нм); 2 – изолятор; 3 – тестируемый световод с многоэлементной первой оболочкой; 4 – жила с сердцевиной, легированной иттербием, вытянутая из заготовки Y408; 5 – кварцевая жила для ввода излучения накачки; 6 – общая полимерная отражающая оболочка с апертурой $NA > 0.4$); б – измеренная эффективность преобразования мощности накачки в усиливаемый лазерный сигнал.

световода в лазере или усилителе [16]). В волоконных источниках излучения эффект фотопотемнения активных световодов проявляется в постепенном снижении выходной мощности по мере их работы. После выключения накачки активный световод может лишь частично восстановить исходные свойства. Скорость фотопотемнения определяет скорость увеличения наведенных оптических потерь в световоде, а значит, и время, которое он сможет проработать в устройстве. Уровень насыщенных потерь и скорость наведения потерь в Yb-световодах зависят от уровня инверсной населенности и состава световода. Скорость фотопотемнения может быть оценена при помощи ускоренного теста (потемнения короткого отрезка световода при высоком (около 50% и более) уровне инверсии ионов иттербия) и затем путем моделирования работы иттербиевого световода с учетом уровня потерь, наводимых при меньшем уровне инверсии.

Для расчетов была использована степенная зависимость скорости фотопотемнения от инверсии ионов иттербия с показателем степени, равным шести [17]. К такому методу оценки скорости потемнения приходится прибегать из-за длительности проведения прямых тестов на фотопотемнение, которые могут продолжаться от нескольких недель до года в зависимости от стойкости световода к потемнению. Все это время образец должен находиться в режиме работы при максимальной мощности накачки. В ускоренном тесте, длящемся от нескольких десятков минут до нескольких часов, определяются коэффициенты в соотношении, описывающем уровень наведенных при фотопотемнении потерь от времени и инверсной населенности. В нашем случае использовалось соотношение в виде растянутой (stretched) экспоненты [16]:

$$T(t) = A \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau}\right)^\beta\right] + (1 - A),$$

где T – нормированное на единицу пропускание образца; τ – постоянная времени; β – дисперсионный параметр; $(1 - A)$ – уровень пропускания световода после достижения насыщения потерь из-за фотопотемнения. Дисперсионный параметр β не меняется в зависимости от уровня инверсии, тогда как постоянная времени зависит от уровня инверсии:

$$\tau(n) = \tau_0 (N/N_0)^6,$$

где N – инверсная населенность; τ_0 – постоянная времени при инверсной населенности N_0 .

Из полученной экспериментально зависимости $T(t)$ определялись параметры τ_0 , β и A , после чего вычислялось значение τ для случая низкой инверсии (лазера/усилителя). В тесте ускоренного потемнения величина N_0 оценивалась исходя из известных сечений переходов иттербия и дополнительно проверялась по уровню люминесценции. В случае лазера или усилителя уровень инверсии вычисляется численными методами в каждой точке по длине световода [18]. Изменение инверсии по поперечному сечению волокна в расчетах не учитывалось.

На рис.5,а приведена схема установки для измерения характеристик фотопотемнения в световодах в ускоренном режиме. При использовании накачки через оболочку мощностью 26 Вт ($\lambda = 915$ нм) уровень инверсии в световоде длиной 0.5–10 см достигает 90%, что позволяет проводить измерения приблизительно за один час. Длина све-

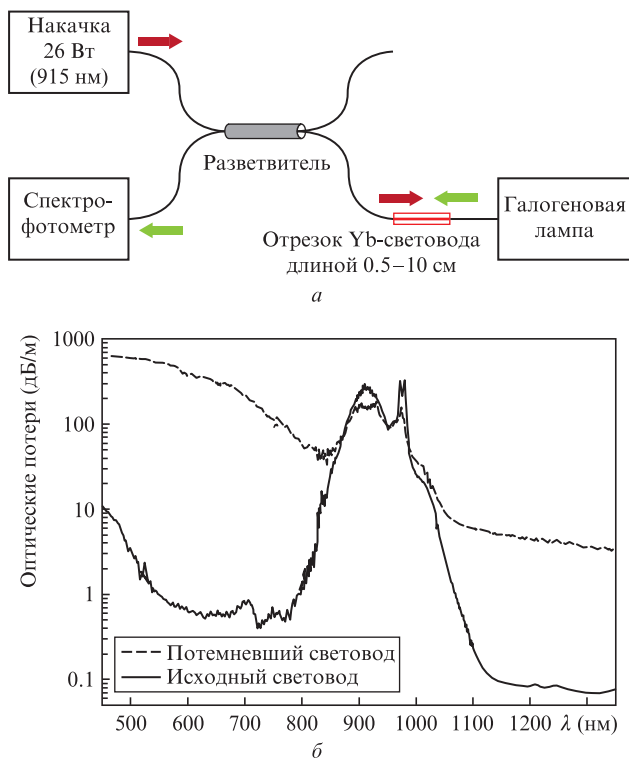


Рис.5. Схема измерения фотопотемнения активного световода в ускоренном режиме (а) и спектры оптических потерь в Yb-световоде со фтором до и после фотопотемнения (б).

товода выбиралась в зависимости от концентрации Yb таким образом, чтобы исключить появление генерации и высокого уровня усиленной люминесценции и в то же время сохранить приемлемую точность измерения наведенных потерь. Спектры исходных оптических потерь и потерь после фотопотемнения (уровень насыщения потерь) представлены на рис.5,б. Для рассматриваемого световода были получены следующие значения параметров: $\tau_0 = 6.9$ мин, $\beta = 0.71$ и $A = 730$ дБ/м на длине волны 500 нм. Измерение временной зависимости наведенных потерь проводилось на длине волны 500 нм, что удобнее и точнее, чем прямое измерение наведенных потерь на рабочих длинах волн (915 и 1064 нм), поскольку они попадают в полосы поглощения Yb, и прямое измерение не всегда возможно. Затем, зная типичный спектр наведенных потерь для данного типа световода (рис.5,б), осуществлялся пересчет потерь с $\lambda = 500$ нм на рабочие длины волн 915 и 1064 нм. Полученные параметры использовались в расчетах деградации выходной мощности усилителя, работающего по схеме, приведенной на рис.4,а. Результаты расчетов зависимости выходной мощности усиливаемого сигнала от времени (при встречной накачке мощностью 20 Вт и мощности сигнала на входе 100 мВт) представлены на рис.6,а. Пересчитанная скорость фотопотемнения в случае усилителя оказалась достаточно низкой, и заметного падения эффективности (~ 20%) можно ожидать лишь через 10000 ч непрерывной работы лазера. Активный световод с такими характеристиками полностью удовлетворяет современным требованиям.

Для полноты исследования нами была изготовлена серия световодов сходной геометрии с различной концентрацией иттербия, но с одинаковой концентрацией алюминия и фтора. Измерялся предельный уровень потерь на $\lambda = 500$ нм при фотопотемнении для всей серии Yb-све-

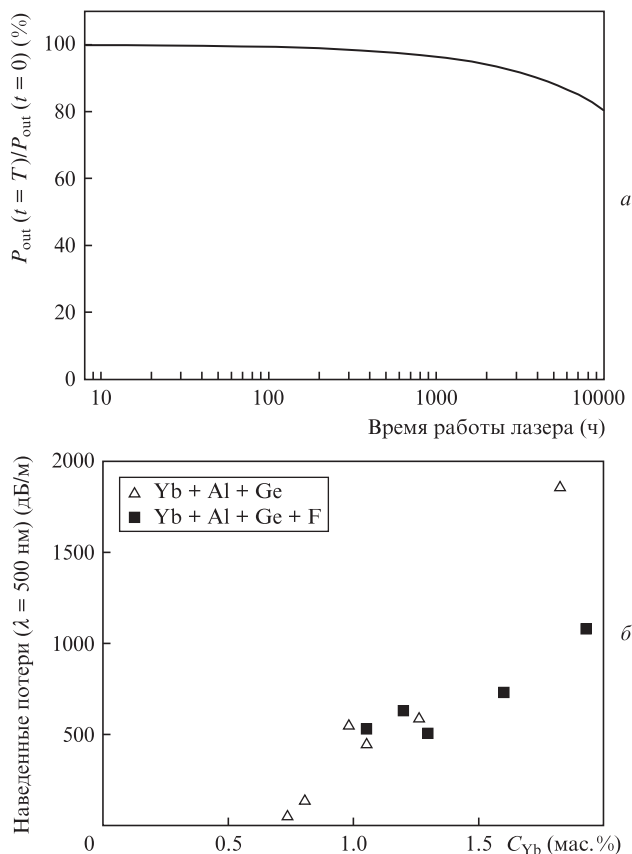


Рис.6. Расчетная зависимость выходной мощности усилителя от времени в условиях фотопотемнения (а) и влияние концентрации Yb и состава стекла световода на предельный уровень наведенных потерь при фотопотемнении (б).

товопроводов как с фторированной, так и с нефторированной сердцевинной. Такие эксперименты необходимы для того, чтобы понять, как фтор может влиять на чувствительность световода к фотопотемнению. На рис.6,б представлены полученные данные для серии световодов со фтором и без него при различных концентрациях иттербия. Во всех световодах концентрация алюминия находилась в пределах 1.5–2.1 мол.%, а концентрация германия составляла от 0.3 до 0.5 мол.%. Показатель преломления сердцевинной в световодах со фтором варьировался в пределах 0.002–0.0025, а в световодах без фтора – в пределах 0.006–0.007. Как видно из рис.6, предельный уровень потерь при фотопотемнении для серии световодов с сердцевинной, легированной фтором, при средних концентрациях иттербия ~1.5 мас.% не превышает уровня потерь для обычных алмосиликатных световодов, а при более высоких концентрациях Yb потери даже становятся несколько меньше. Это коррелирует с результатами работы [8], в которой было показано, что фтор способствует повышению устойчивости к фотопотемнению. Таким образом, разработанная технология введения фтора в алмосиликатные иттербиевые световоды позволяет существенно понизить показатель преломления сердцевинной (с 0.007 до 0–0.0025) без какого-либо ухудшения свойств таких световодов (эффективности и стойкости к фотопотемнению).

4. Заключение

В работе впервые изготовлены алмосиликатные световоды с высоким уровнем фторирования (до 2 мас.%),

высоким уровнем легирования ионами Yb^{3+} (до 2 мас. %) и низким показателем преломления сердцевин. Исследованы свойства и измерены параметры таких световодов: поглощение по оболочке, эффективность генерации в схеме лазера и усилителя, параметры фотопотемнения при высокой инверсной населенности и на основе модели степенной зависимости скорости фотопотемнения от инверсной населенности; оценена скорость деградации выходной мощности усилителя вследствие эффекта фотопотемнения при низком уровне инверсной населенности. Показана высокая перспективность предложенной конструкции световода, которая обеспечивает высокую скорость поглощения накачки из оболочки (приблизительно в два раза выше, чем в коммерчески доступных световодах такой же геометрии) и низкий уровень фотопотемнения (снижение выходной мощности лазера на 20% можно наблюдать лишь через 10000 ч). Проведено сравнение стойкости к фотопотемнению Yb -световодов с фторированной сердцевинной и сердцевинной, не легированной фтором, при различных концентрациях иттербия.

Полученные результаты показывают, что разработанная технология позволяет вводить высокие концентрации фтора в алюмосиликатные иттербиевые световоды без какого-либо ухудшения их свойств (эффективности генерации и скорости фотопотемнения). При этом снижение показателя преломления сердцевин позволяет создавать световоды со значительно увеличенным диаметром сердцевин, что важно с точки зрения повышения порога нелинейных эффектов.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного фонда (грант №17-13-01343).

1. Arai K., Namikawa H., Kumata K., Honda T., Ishii Y., Handa T. *J. Appl. Phys.*, **59** (10), 3430 (1986).
2. Likhachev M.E., Bubnov M.M., Zotov K.V., Lipatov D.S., Yashkov M.V., Guryanov A.N. *Opt. Lett.*, **34**, 3355 (2009).
3. Likhachev M., Aleshkina S., Shubin A., Bubnov M., Dianov E., Lipatov D., Guryanov A. *Proc. CLEO/Europe-IQEC 2011*, (Munich, Germany, 2011, paper CJ.P.24).
4. Kirchhof J., Unger S., Schwuchow A., Jetschke S., Knappe B. *Proc. SPIE*, **5723**, 261 (2005).
5. Kirchhof J., Unger S. *Proc. OFC Conf. 1999* (San Diego, CA, USA, 1999, paper WM1).
6. Гурьянов А.Н., Салганский М.Ю., Хопин В.Ф., Косолапов А.Ф., Семенов С.Л. *Неорганические материалы*, **45** (7), 1 (2009).
7. Мелькумов М.А., Буфетов И.А., Кравцов К.С., Шубин А.В., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **34**, 843 (2004) [*Quantum Electron.*, **34**, 843 (2004)].
8. Schuster K., Grimm S., Kalide A., Dellith J., Leich M., Schwuchow M., Langner A., Schötz G., Bartelt H. *Opt. Mater. Express*, **5** (4), 887 (2015).
9. Xu W., Yu C., Wang S., Lou F., Feng S., Wang M., Zhou Q., Chen D., Hu L., Guzik M. *Opt. Mater.*, **42**, 245 (2015).
10. Ballato J., Petit V., Tumminelli R.P., Minelly J.D., Khitrov V. *Proc. SPIE*, **9728**, 97282R (2016).
11. Wenbin Xu, Zhiquan Lin, Meng Wang, Suya Feng, Lei Zhang, Qinling Zhou, Danping Chen, Liyan Zhang, Shikai Wang, Chunlei Yu, Lili Hu. *Opt. Lett.*, **41**, 504 (2016).
12. Takahashi H., Oyobene A., Kosuge M. *Proc. 11th ECOC' 86* (Barcelona, 1986, pp 3–6).
13. Аксенов В.А., Иванов Г.А., Исаев В.А., Лихачев М.Е. *Неорганические материалы*, **46**, 1106 (2010).
14. Nagel S.R., MacChesney J.B., Walker K.L. *IEEE J. Quantum Electron.*, **18**, 459 (1982).
15. Мелькумов М.А., Буфетов И.А., Бубнов М.М., Шубин А.В., Семенов С.Л., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **35** (11), 996 (2005) [*Quantum Electron.*, **35** (11), 996 (2005)].
16. Koponen J., Soderlund M., Tammela S., Po H. *Proc. SPIE*, **5990**, 599008 (2005).
17. Shubin A.V., Yashkov M.V., Melkumov M.A., Smirnov S.A., Bufetov I.A., Dianov E.M. *Proc. CLEO/Europe-IQEC 2007* (Munich, Germany, 2007, paper CJ3–1).
18. Kelson Ido, Hardy Amos A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **34** (9), 1570 (1998).