

Иттербиевый волоконный лазер на основе световода с сердцевиной из высококонцентрированного Yb^{3+} -стекла

И.А.Буфетов, С.Л.Семенов, А.Ф.Косолапов, М.А.Мелькумов, В.В.Дудин, Б.И.Галаган, Б.И.Денкер, В.В.Осико, С.Е.Сверчков, Е.М.Дианов

Применение волоконных световодов с высокой концентрацией активных ионов в сердцевине позволяет сократить длину активного световода, повысить пороговые мощности развития различных нелинейных эффектов в световоде и, тем самым, увеличить максимальную выходную мощность волоконных лазеров. С этой целью в настоящей работе были созданы концентрированное иттербиевое ($\sim 1.0 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$) стекло на фосфатной основе для сердцевины активного волоконного световода и близкое по составу нелегированное стекло для его оболочки. Решена задача создания однододового световода из разработанных материалов. Продемонстрирована генерация иттербиевого волоконного лазера на таком световоде с дифференциальной эффективностью не менее 60% на длине волны 975 нм.

Ключевые слова: слова: волоконный лазер, фосфатное стекло, иттербий.

1. Введение

За последние несколько лет мощность излучения одномодовых волоконных лазеров многократно возросла, достигнув ~ 2 кВт в непрерывном режиме [1]. Выходную мощность таких волоконных лазеров ограничивает ряд физических явлений, среди которых – различные нелинейные оптические процессы, такие как вынужденное комбинационное рассеяние, четырехволновое взаимодействие и др. Коэффициенты усиления, соответствующие нелинейным процессам, пропорциональны длине лазерного световода, поэтому уменьшение длины волоконного лазера приводит к повышению порогов развития нелинейных эффектов в лазерном световоде и, тем самым, к росту максимальной мощности излучения волоконного лазера. Увеличение концентрации активных ионов в сердцевине лазерного световода позволяет поглощать мощность накачки на меньшей длине, а следовательно, уменьшать длину лазерного световода. Световоды на основе кварцевого стекла, обычно используемые для мощных лазеров, имеют сердцевину, которая состоит из SiO_2 с добавками Al_2O_3 или P_2O_5 и легирована ионами иттербия до уровня порядка $1 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Более высокие степени легирования редкоземельными ионами могут быть достигнуты в стеклах иного состава, например фосфатных [2]. В настоящей работе исследовались возможности создания иттербиевых волоконных лазеров на основе фосфатных стекол (ФС) и пути решения связанных с этим технологических проблем.

2. Стекла для сердцевины и оболочки световода

Задача разработки стекла с высокой концентрацией активных ионов для сердцевины лазерного волокна и стекла для его оболочки определила направление нашего поиска состава этих стекол в классе ФС. Известным преимуществом лазерных стекол на фосфатной основе перед стеклами на силикатной основе является возможность введения в них редкоземельных ионов высокой концентрации (до $4.2 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$; см., напр., [2]) без заметного ухудшения технологических свойств стекол и без формирования кластеров редкоземельных ионов, приводящих к сильному тушению люминесценции.

В настоящей работе в результате проведенных исследований были созданы устойчивые к кристаллизации и действию атмосферной влаги многокомпонентные стекла на фосфатной основе для сердцевины и оболочки световода. В состав стекол, помимо P_2O_5 (с массовой концентрацией $\sim 60\%$) и окислов редкоземельных элементов (иттербия и лантана в стекле для сердцевины и оптически не активного иттрия в стекле для оболочки) вошли также Na_2O , K_2O , CaO , BaO , SiO_2 и V_2O_3 . Необходимая разность показателей преломления стекол сердцевины и оболочки ($\Delta n \sim 10^{-2}$) обеспечивалась введением в стекло сердцевины окиси свинца с массовой концентрацией несколько процентов.

При выборе рабочей концентрации иттербия в стекле для сердцевины было принято решение ограничиться на первом этапе работы содержанием иттербия, равным $1 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$. Это связано с очень высокими требованиями, предъявляемыми к степени обезвоженности стекол с большим содержанием иттербия, т.к. при увеличении концентрации Yb^{3+} растет вероятность тушения его люминесценции на OH^- -группах, неизбежно присутствующих в стеклах на фосфатной основе (см. напр., [3]).

Для синтеза стекол была разработана оригинальная технология, позволяющая получать отливки стекла высокого оптического качества объемом 0.2–0.5 л. Техно-

И.А.Буфетов, С.Л.Семенов, А.Ф.Косолапов, М.А.Мелькумов, В.В.Дудин, Е.М.Дианов. Научный центр волоконной оптики при Институте общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: iabuf@fo.gpi.ru

Б.И.Галаган, Б.И.Денкер, В.В.Осико, С.Е.Сверчков. Научный центр лазерных материалов и технологий Института общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 117942 Москва, ул. Вавилова, 38

Поступило в редакцию 1 февраля 2006 г.

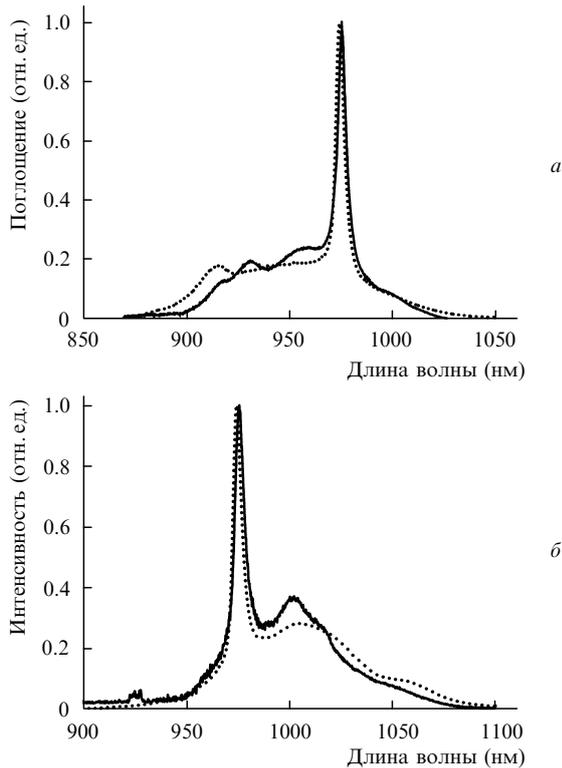


Рис. 1. Спектры поглощения (а) и люминесценции (б) ионов иттербия в ФС (сплошные линии) и в СПК (пунктир).

логия включала в себя процедуру «осушки» расплава стекла в процессе варки (коэффициент поглощения остаточных ОН-групп на длине волны 3.33 мкм в готовом стекле составлял не более 1 см^{-1}), благодаря чему время жизни люминесценции ионов иттербия не отличалось от радиационного ($\tau = 1.2 \text{ мс}$).

На рис. 1 представлены спектры поглощения и люминесценции разработанного иттербиевого ФС. Спектр поглощения был получен в режиме поглощения слабого сигнала. Спектр люминесценции регистрировался при накачке световода с сердцевиной из ФС диаметром менее 10 мкм излучением с $\lambda = 925 \text{ нм}$. Для исключения влияния эффекта перепоглощения регистрировалось только излучение люминесценции, распространяющееся в перпендикулярном оси световода направлении. Максимальный коэффициент поглощения излучения в ФС составил 5.2 дБ/мм на длине волны 975 нм. Основной пик в спектре люминесценции располагался на той же длине волны (с точностью до 1 нм). Максимум второго, более широкого пика люминесценции соответствовал длине волны 1002 нм. Небольшой пик, наблюдаемый в спектре люминесценции ФС в области 925 нм (рис. 1, б), соответствовал рассеянному излучению накачки. Спектры поглощения и люминесценции ФС существенно отличались по форме от спектров Yb^{3+} в световодах, изготовленных из стекла на основе плавленного кварца, легированного P_2O_5 (СПК) с молярной концентрацией несколько процентов [4]. Эти спектры также представлены на рис. 1. В волоконных световодах с сердцевиной из СПК с концентрацией Yb^{3+} около 10^{20} см^{-1} максимальный коэффициент поглощения на длине волны 975 нм составлял $\sim 0.5 \text{ дБ/мм}$. Несмотря на то что фосфор является существенным компонентом и ФС и СПК, различия в форме спектров указывают на различные величины расщепления штарковских подуровней $^2\text{F}_{5/2}$ и $^2\text{F}_{7/2}$ иона Yb^{3+} в матрицах этих стекол.

3. Волоконный световод

Стекла, разработанные для сердцевины и оболочки, были совместимы по своим химическим и термомеханическим характеристикам (температура размягчения, коэффициент термического расширения), что сделало возможным изготовление на их основе волоконного световода, близкого к одномодовому. С этой целью из образцов данных стекол были изготовлены стержни диаметром 15 мм и длиной $\sim 50 \text{ мм}$. В центре стержня из пассивного стекла (без иттербия) вдоль продольной оси было просверлено отверстие диаметром 2 мм. Стержень из стекла с иттербием был перетянут в пруток диаметром 800 мкм, вставленный затем в отверстие стержня из пассивного стекла. Полученная конструкция была перетянута в световод диаметром 170 мкм при среднем диаметре сердцевины из стекла с иттербием $\sim 9 \text{ мкм}$.

Для вытяжки использовалась специально созданная печь, оптимизированная для работы с не кварцевыми стеклами (рабочая температура поддерживалась в диапазоне 300–1000 °С с точностью не хуже 0.5 °С). Режим вытяжки был подобран так ($T \sim 600 \text{ °С}$), чтобы не возник воздушный зазор между сердцевиной и оболочкой. В первых опытах полимерное покрытие на световод не наносилось.

4. Лазерная генерация

Для оценки генерационных свойств иттербиевого световода без полимерного покрытия была выбрана оптическая схема с введением одномодового (по поперечным индексам) излучения накачки непосредственно в сердцевину (рис. 2). В качестве источника накачки использовался неодимовый волоконный лазер, генерирующий на длине волны 925 нм [5, 6]. Мощность излучения накачки, введенного в активный световод, не превышала 1 Вт. К выходу лазера накачки приваривался одномодовый световод с высокоотражающей ($\sim 100\%$) брэгговской решеткой (БР) показателя преломления на длине волны 975 нм. Ширина спектра отражения БР составляла 1 нм.

В качестве активного элемента лазера использовался отрезок иттербиевого световода длиной 22 мм – длина выбиралась из условия полного поглощения излучения накачки. Поскольку температура размягчения ФС существенно ниже, чем кварцевого, из которого в основном состоит световод с БР, то эти два световода не сваривались, а просто состыковывались, т. е. параллельные торцы световодов подводились друг к другу на возможно меньшее расстояние (порядка нескольких микрон), которое определялось неидеальностью сколов торцов.

Резонатор для иттербиевого лазера был образован БР на $\lambda = 975 \text{ нм}$ и отражением на границе стекло–воздух на выходном торце иттербиевого световода. При введении в Yb -световод излучения накачки возникала

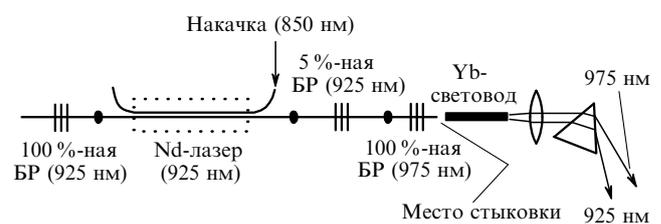


Рис. 2. Схема эксперимента.

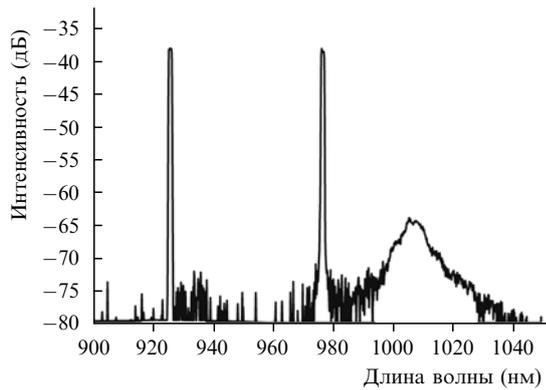


Рис.3. Спектр выходного излучения иттербиевого лазера на волоконном световоде из ФС.

генерация на длине волны, определяемой БР. Пороговая мощность излучения накачки составляла ~ 140 мВт. Спектр излучения на выходе схемы при небольшом превышении порога представлен на рис.3. Отметим, что кроме узких линий непоглощенного излучения накачки (925 нм) и излучения генерации иттербия (975 нм) наблюдается сравнительно широкий пик люминесценции ионов Yb^{3+} (и, возможно, ионов Nd^{3+} лазера накачки) в области около 1050 нм. При отсутствии в схеме (рис.2) БР на $\lambda = 975$ нм генерация также возникала (в этом случае в роли обоих зеркал резонатора выступали сколы торцов световода), но спектр ее был более широким, а центр линии располагался на $\lambda = 978$ нм.

Для измерения мощности излучения на выходе иттербиевого лазера на разных длинах волн излучение на выходе световода с помощью линзы преобразовывалось в почти параллельный пучок, который затем разлагался

призмой на спектральные компоненты. В схеме с БР на $\lambda = 975$ нм при мощности излучения накачки 670 мВт на выходе Nd-лазера мощность генерации достигала 250 мВт, при этом непоглощенная мощность накачки составляла 125 мВт. Таким образом, по отношению к поглощенной мощности КПД был равен не менее 45%, а дифференциальный КПД превышал 60%. В расчетах КПД не учитывались оптические потери излучения и генерации в точке стыковки световодов, что занижает полученный результат.

Итак, в настоящей работе сообщается о создании волоконного световода на основе нового лазерного материала – концентрированного иттербиевого стекла на основе ФС. Эксперименты по созданию волоконных лазеров на световодах из указанного стекла показали его хорошие генерационные свойства, что свидетельствует о перспективности волоконных лазеров вообще и мощных волоконных лазеров на световодах данного типа в частности.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы президиума РАН «Фундаментальные основы высокочистых оптических материалов» и гранта НШ-962.2003.2 Совета по грантам Президента РФ.

1. Gapontsev V., Gapontsev D., Platonov N., et al. *Proc. CLEO/Europe-2005* (Munich, Germany, 2005, CJ1-1-THU).
2. Denker B., Galagan B., Osiko V., Sverchkov S. *Laser Phys.*, **12** (4), 104 (2002).
3. Karlson G., Laurell F., Tellefsen J., et al. *Appl. Phys. B*, **75**, 41 (2002).
4. Мелькумов М.А., Буфетов И.А., Кравцов К.С. и др. *Квантовая электроника*, **34**, 843 (2004).
5. Буфетов И.А., Дудин В.В., Шубин А.В. и др. *Квантовая электроника*, **33** (12), 1035 (2003).
6. Буфетов И.А., Бубнов М.М., Мелькумов М.А. и др. *Квантовая электроника*, **35**, 328 (2005).