

## ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ

PACS 42.55.Tv; 42.55.Wd; 42.81.Bm; 42.81.Dp; 42.70.Qs

# Одномодовый волоконный световод с фотонной запрещенной зоной и сердцевиной из кварцевого стекла, легированного ионами иттербия

О.Н.Егорова, С.Л.Семенов, В.В.Вельмискин, М.Ю.Салганский,  
М.В.Яшков, А.Н.Гурьянов, Е.М.Дианов

*Изготовлен и исследован волоконный световод с фотонной запрещенной зоной и сердцевиной из кварцевого стекла, легированного ионами иттербия. Возможность получения в таких световодах одномодового режима в широком спектральном диапазоне при большом (свыше 20 мкм) диаметре поля моды делает их перспективными для использования в волоконных лазерах и усилителях. С целью получения высокого качества пучка, выходящего из световода, особое внимание уделено повышению оптической однородности стекла сердцевины, легированной ионами иттербия.*

**Ключевые слова:** волоконные световоды с фотонной запрещенной зоной, волоконные световоды с большим полем моды, иттербиевые волоконные световоды.

## 1. Введение

Одним из основных преимуществ волоконных лазеров и усилителей на основе световодов из кварцевого стекла является малая чувствительность к термооптическим искажениям и, как следствие, высокое качество пучка даже при больших мощностях. Однако, в отличие от объемных лазерных элементов, в волоконных лазерах и усилителях излучение, во-первых, сосредоточено в сердцевине световода, диаметр которой составляет всего несколько микрометров, и, во-вторых, распространяется по многометровой длине активного волоконного световода. Высокая интенсивность излучения и большая длина распространения приводят к существенному влиянию нелинейно-оптических эффектов, вызывающих нежелательное искажение спектра импульса волоконного лазера или усилителя. Один из способов уменьшения влияния нелинейно-оптических эффектов заключается в снижении интенсивности излучения за счет увеличения диаметра сердцевины. Для получения высокого качества пучка необходимо также, чтобы при увеличении диаметра сердцевины волоконный световод оставался одномодовым.

В настоящее время наиболее распространенной конструкцией, используемой для получения одномодовых волоконных световодов с большим диаметром сердцевины (свыше 20 мкм), являются дырчатые микроструктурированные световоды. Это связано с тем, что при определенных параметрах световода возможен режим, при котором световод остается одномодовым в очень широком спектральном диапазоне [1].

Одномодовый характер распространения излучения в широком спектральном диапазоне наблюдается также в волоконных световодах с фотонной запрещенной зоной и сердцевиной из кварцевого стекла [2]. Поперечное сечение такого световода изображено на рис.1. Его оболочка представляет собой двумерный фотонный кристалл и состоит из цилиндров из легированного оксидом германия кварцевого стекла, которые располагаются в чистом кварцевом стекле в гексагональном порядке. Показатель преломления стекла, легированного оксидом германия, выше показателя преломления чистого кварцевого стекла, относительная разность показателей преломления составляет 1% – 2%. Свет локализуется в сердцевине световода, образованной отсутствием одного (как на рис.1) или нескольких элементов оболочки, в областях, соответствующих запрещенным зонам фотонного кристалла.

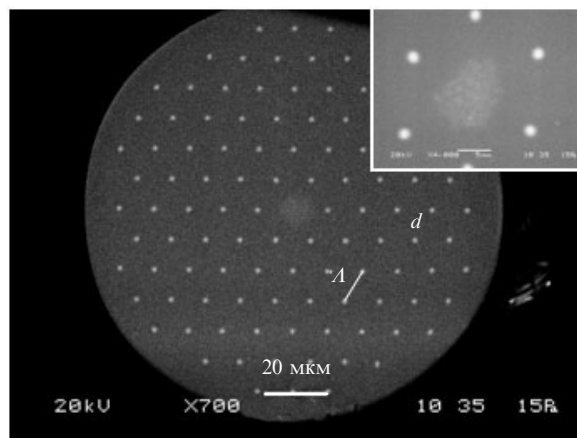


Рис.1. Фотография торца волоконного световода, полученная на электронном микроскопе; светлые области, расположенные в гексагональном порядке, – элементы фотонно-кристаллической оболочки, легированные оксидом германия ( $d$  – диаметр элемента оболочки,  $A$  – расстояние между центрами соседних элементов). На вставке – увеличенное изображение области сердцевины световода, легированной Yb.

О.Н.Егорова, С.Л.Семенов, В.В.Вельмискин, Е.М.Дианов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: egorova@fo.gpi.ru  
М.Ю.Салганский, М.В.Яшков, А.Н.Гурьянов. Институт химии высококипящих веществ РАН, Россия, 603950 Н. Новгород, ул. Тропинина, 49; e-mail: misalgan@yandex.ru

Поступила в редакцию 20 сентября 2010 г., после доработки – 11 октября 2010 г.

Первый волоконный световод с фотонной запрещенной зоной и сердцевинной из кварцевого стекла был продемонстрирован в работе [3]. Отношение диаметра элемента оболочки  $d$  к расстоянию между центрами соседних элементов  $\Lambda$  в этой работе и ряде последующих работ на эту тему составило 0.34 и более. В работе [2] нами показано, что данный вид волоконных световодов локализует излучение и имеет относительно низкие оптические потери также и при малом ( $\leq 0.12$ ) значении  $d/\Lambda$ . При этом световод может иметь большой диаметр поля моды (свыше 20 мкм) и быть одномодовым в широком спектральном диапазоне. Этот факт дает основание для проведения исследования по поводу применимости таких волоконных световодов в качестве элементов лазеров и усилителей. Отсутствие отверстий в поперечном сечении делает их привлекательными с точки зрения простоты изготовления и эксплуатации по сравнению с дырчатыми микроструктурированными волоконными световодами [1].

Настоящая работа посвящена созданию и исследованию волоконного световода с фотонной запрещенной зоной и сердцевинной, легированной ионами иттербия. При создании активного волоконного световода для лазера или усилителя изменение показателя преломления и оптическая неоднородность стекла сердцевинной, которые возникают при введении легирующих добавок, не должны оказывать влияние на волноводные свойства световода. Поэтому особое внимание уделено созданию однородного стекла сердцевинной с помощью метода сборки и перетяжки. Исследованы модовый состав, оптические потери и генерационные характеристики полученного волоконного световода.

## 2. Теоретическое моделирование волноводных свойств

Как уже отмечалось, оболочка исследуемого волоконного световода является двумерным фотонным кристаллом, а сердцевина – дефектом кристалла. Поэтому описание свойств волоконных световодов с фотонной запрещенной зоной удобно проводить с помощью зонных диаграмм [4]. На рис.2 показана зонная диаграмма для волоконного световода с отношением диаметра элемента оболочки к расстоянию между соседними элементами  $d/\Lambda = 0.12$  и разностью показателей преломления в оболочке 0.028. Сердцевина образована отсутствием одного из стержней. Зонная диаграмма представлена в координатах  $(\beta - kn_0)\Lambda$ ,  $\lambda/\Lambda$ , где  $\beta$  – постоянная распространения моды;  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $n_0$  – показатель преломления кварцевого стекла. Расчеты зонных диаграмм проводились методом плоских волн [5] при помощи пакета программ MIT Photonic-Bands (MPB) [6].

Серым цветом на рис.2 обозначены области, в которых существуют моды оболочки световода (фотонного кристалла). Структура этих зон определяется только структурой периодической оболочки и не зависит от существования и формы сердцевинной световода. Белым цветом обозначены три первые запрещенные зоны. Наличие запрещенных зон, разделенных областями, в которых существуют моды оболочки, приводит к тому, что спектр пропускания волоконного световода состоит из ряда областей с высоким пропусканием (соответствуют запрещенным зонам фотонного кристалла), разделенных областями, в которых мода сердцевинной световода не локализуется.

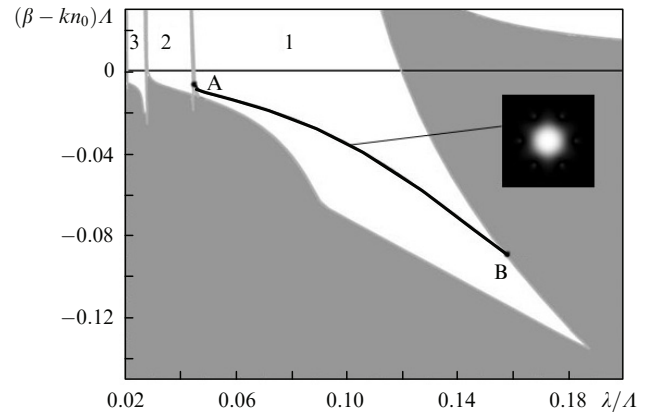


Рис.2. Зонная диаграмма волоконного световода с отношением  $d/\Lambda = 0.12$  и разностью показателей преломления в оболочке 0.028 ( $\beta$  – постоянная распространения моды,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $n_0$  – показатель преломления кварцевого стекла). Области, в которых существуют моды оболочки, показаны серым цветом, запрещенные зоны – белым; дисперсионная кривая – жирная линия. Точки А и В – точки отсечки фундаментальной моды сердцевинной. На вставке – распределение интенсивности моды сердцевинной.

В настоящей работе мы исследовали только наиболее длинноволновую, или фундаментальную, запрещенную зону (обозначена на рис.2 цифрой 1).

Дисперсионная кривая моды сердцевинной (дефекта) находится в пределах запрещенной зоны. Расчеты показывают, что в волоконном световоде с заданными параметрами в пределах запрещенной зоны находится только одна дисперсионная кривая моды сердцевинной, следовательно, световод является одномодовым во всей фундаментальной запрещенной зоне. Распределение интенсивности моды сердцевинной световода, показанное на вставке рис.2, имеет центральную и шесть боковых частей. Дисперсионная зависимость моды сердцевинной пересекает края запрещенных зон в точках А и В, в которых мода сердцевинной испытывает отсечку. Из зонной диаграммы следует, что существует как длинноволновая (в точке В), так и коротковолновая (в точке А) отсечка фундаментальной моды сердцевинной, поэтому в исследуемом световоде спектральный диапазон существования моды составляет приблизительно 0.6–1.8 мкм (при  $\Lambda = 11.4$  мкм).

## 3. Изготовление и исследование световода

Процесс изготовления волоконного световода состоит из двух этапов – изготовления заготовки и затем вытяжки световода. Для получения заготовки волоконного световода использовался метод сборки из стержней [7]. Стержни, образующие элементы оболочки заготовки, были получены путем перетяжки заготовки, изготовленной методом MCVD, с сердцевинной, легированной оксидом германия. Диаметр стержней составил примерно 1 мм.

В качестве сердцевинной использовался стержень того же диаметра из кварцевого стекла, легированного ионами иттербия. В данном случае, как и в случае «дырчатых» микроструктурированных волоконных световодов, усредненный показатель преломления легированного материала сердцевинной должен быть равен показателю преломления нелегированного кварцевого стекла. При этом для достижения высокого качества пучка волоконного лазера или усилителя необходимо, чтобы материал серд-

цевины имел достаточно однородное распределение показателя преломления по поперечному сечению (области изменения показателя преломления в сердцевине световода не должны превышать 1 мкм). Однако, как правило, распределение показателя преломления по диаметру сердцевины световода, полученного методом MCVD, содержит крупные по размеру кольцевые неоднородности ( $\Delta n \approx \pm 0.001$ , толщина колец несколько микрометров), обусловленные вариациями концентрации легирующих добавок, возникающими при послойном нанесении легированного стекла. Поэтому для изготовления стержня, предназначенного для сердцевины заготовки световода, использовалась методика, позволяющая повысить оптическую однородность стекла сердцевины по сравнению с однородностью сердцевины заготовок, полученных в процессе MCVD.

Стержень был изготовлен следующим образом: с нескольких заготовок, полученных методом MCVD, с сердцевиной, легированной ионами иттербия, при помощи травления плавиковой кислотой удалялась вся нелегированная оболочка. Затем полученные стержни-сердцевины были вытянуты в стерженьки меньшего диаметра (1 мм). Из 30 отрезков таких стерженьков формировалась сборка, которая затем была помещена в трубку из кварцевого стекла и при помощи нагрева сплавлена в монолитный стержень; последний был перетянут в стержень требуемого для сборки заготовки диаметра (около 1 мм). В результате, характерный размер оптических неоднородностей, обусловленных флуктуациями концентрации легирующих элементов, в полученном стержне был существенно (более чем в пять раз) меньше размера неоднородностей в исходных заготовках.

Из полученных стержней для элементов оболочки и сердцевины световода была сформирована сборка, которая затем помещалась в трубку из кварцевого стекла и при помощи нагрева сплавлена в монолитный стержень-заготовку. Из этой заготовки и был вытянут исследуемый волоконный световод. В этом световоде отношение диаметра элементов фотонно-кристаллической оболочки (стержней, легированных оксидом германия) к расстоянию между центрами соседних стержней  $d/\Lambda = 0.12$ , расстояние между центрами соседних стержней  $\Lambda = 11.4$  мкм, разность показателей преломления в оболочке  $\Delta n = 0.028$ . Диаметр световода составил 135 мкм, диаметр легированной ионами иттербия части – 10 мкм. Для создания вокруг сердцевины световедущей оболочки, по которой может распространяться излучение диодной накачки, на волоконный световод было нанесено полимерное покрытие с показателем преломления ниже, чем у кварцевого стекла. Числовая апертура волоконного световода, образованного полным внутренним отражением на границе стекло – полимер, составила 0.4.

Для исследования модового состава сердцевины в световод вводилось излучение с различной длиной волны, распределение интенсивности излучения на выходном торце световода регистрировалось CCD-камерой. При различных условиях возбуждения в диапазоне 850–1200 нм наблюдаемое распределение интенсивности на выходном торце волоконного световода хорошо аппроксимировалось гауссовым распределением (высших мод при этом не наблюдалось). Диаметр поля моды составил 18 мкм.

В пределах первой запрещенной зоны был измерен спектр оптических потерь, которые, в свою очередь, оп-

ределялись методом облома, когда сравниваются мощности излучения, прошедшего через два отрезка световода различной длины, при неизменных условиях ввода излучения в световод. Поскольку элементы оболочки могут направлять излучение за счет полного внутреннего отражения, при измерении оптических потерь особое внимание уделялось тому, чтобы возбуждалась только мода сердцевины. С этой целью на вход и выход исследуемого отрезка световода приваривался обычный одномодовый волоконный световод с диаметром поля моды 6 мкм. Измерения проводились на отрезках длиной 2 и 45 м, а длина короткого отрезка сравнения исследуемого световода в обоих случаях составляла 0.5 м.

Измерения оптических потерь на двухметровом отрезке позволили оценить границы фундаментальной запрещенной зоны в исследуемом световоде. Как видно из рис.3,а, зона пропускания лежит в диапазоне 850–1400 нм. На границах зоны пропускания оптические потери увеличиваются. Резкий рост оптических потерь в окрестности 1 мкм связан с поглощением ионами иттербия. Указанный диапазон лежит внутри спектрального диапазона существования моды сердцевины, полученного с помощью теоретического моделирования (600–1800 мкм). Сужение измеренного диапазона по сравнению с расчетным связано с тем, что мода сердцевины волоконного световода испытывает большие оптические потери вблизи границ запрещенной зоны.

Измерения потерь на отрезке длиной 45 м позволили определить минимальные оптические потери, которые приходились на область 1100–1200 нм и составляли 80 дБ/км. При этом для предотвращения резкого возрастания потерь, связанного с микроизгибами, волоконный световод был сложен в бухту из свободных витков диаметром 33 см без намотки на катушку. В работе [2] в аналогичном световоде с сердцевиной из чистого кварцевого стекла уровень минимальных оптических потерь составил 20 дБ/км.

Для измерения максимального поглощения ионами иттербия излучение от источника белого света вводилось

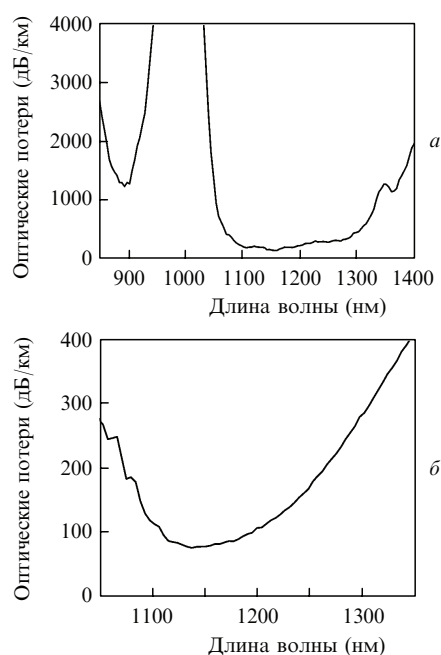


Рис.3. Спектр оптических потерь, измеренный на отрезках волоконного световода длиной 2 (а) и 45 м (б).

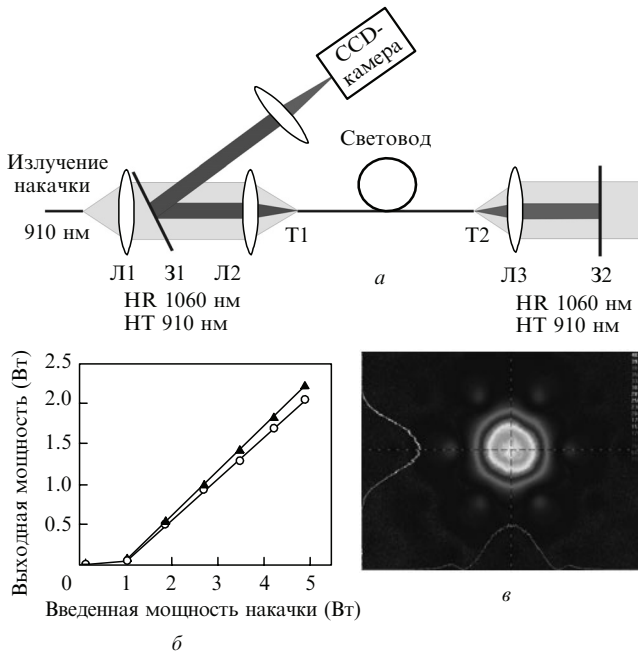


Рис.4. Схема установки для исследования генерационных характеристик световода (а), зависимость выходной мощности от введенной мощности накачки (б) и распределение интенсивности на выходном торце волоконного световода (в).

с торца в оболочку накачки волоконного световода, при этом измерялась доля излучения, поглощенного сердцевиной световода. Измеренные значения поглощения составили 1.2 дБ/м на длине волны 980 нм и 0.3 дБ/м на 915 нм.

Генерация в исследуемом волоконном световоде была получена в схеме, представленной на рис.4,а. В качестве источника накачки использовалась линейка многомодовых лазерных диодов с длиной волны 910 нм. Резонатором лазера служили торец волоконного световода Т1 и зеркало 32. Для ввода накачки в световод использовались асферические линзы Л1 и Л2. Для защиты источника накачки от излучения волоконного лазера, а также для вывода излучения между линзами помещалось диэлектрическое зеркало 31 с высоким коэффициентом отражения (HR) на длине волны генерации (1.03–1.06 мкм) и высоким пропусканием (HT) на длине волны накачки. Обратная связь на выходе световода осуществлялась с помощью диэлектрического зеркала 32, которое либо было вплотную приставлено к торцу световода Т2, либо отражало излучение, прошедшее через линзу Л3.

Длина исследуемых световодов составляла от 20 до 45 м, дифференциальная эффективность генерации в разных схемах достигала 50 %–55 %, средний порог генерации – 1 Вт (рис.4,б). В схеме с использованием линзы

получена меньшая эффективность по сравнению со схемой, в которой зеркало 32 вплотную пристыковано к торцу световода. Это, очевидно, связано с дополнительными оптическими потерями на линзе. Полученная небольшая (для волоконного иттербиевого лазера) дифференциальная эффективность генерации обусловлена сравнительно малой концентрацией ионов иттербия в сердцевине, что приводит к увеличению рабочей длины волоконного световода и связанных с ней пассивных оптических потерь в резонаторе.

Распределение относительной интенсивности выходящего излучения на торце волоконного световода, полученное с помощью CCD-камеры, имеет сложную форму и состоит из центральной части и шести боковых частей, что соответствует основной моде световода (рис.4,в). Центральная часть имеет близкое к гауссовому распределение интенсивности и содержит 90 % мощности излучения. Остальные 10 % мощности приходятся на боковые части. Распределение мощности между центральной и боковыми частями моды, а также количество и форма боковых частей зависят от конструкции световода.

#### 4. Заключение

Изготовлен и исследован одномодовый волоконный световод с фотонной запрещенной зоной и сердцевиной из кварцевого стекла, легированного ионами иттербия. Диаметр поля моды этого световода относительно велик – 18 мкм. Однако данная конструкция световода предполагает возможность увеличения диаметра поля моды при сохранении высокого качества пучка. Отсутствие воздушных отверстий в поперечном сечении волоконного световода делает его изготовление и использование более простыми по сравнению с дырчатыми микроструктурированными волоконными световодами.

Работа поддержана грантом Президента РФ государственной поддержки молодых российских ученых (№ МК-8069.2010.2), а также грантом РФФИ (№ 10-02-00334-а).

1. Knight J.C., Birks T.A., Russell P.St.J., Atkin D.M., *Opt. Lett.*, **21**, 1547 (1996).
2. Egorova O.N., Semjonov S.L., Kosolapov A.F., Denisov A.N., Pryamikov A.D., Gaponov D.A., Biriukov A.S., Dianov E.M., Salganskii M.Y., Khopin V.F., Yashkov M.V., Gurianov A.N., Kuksenkov D.V. *Opt. Express*, **16**, 11735 (2008).
3. Argyros A., Birks T.A., Leon-Saval S.G., Cordeiro C. M.B., Luan F., Russell P.St.J. *Opt. Express*, **13**, 309 (2005).
4. Joannopoulos John D. *Photonic Crystals. Molding the flow of light* (Princeton: Princeton Univ. Press, 2008).
5. Johnson S.G., Joannopoulos J.D. *Opt. Express*, **8**, 173 (2001).
6. <http://ab-initio.mit.edu/mpb>.
7. Bjarklev A., Broeng J. *Photonic Crystal Fibers* (Boston: Kluwer Acad. Publ., 2003).