

Револьверный световод с полой сердцевиной и отражающей оболочкой из двойных капилляров

А.Ф.Косолапов, Г.К.Алагашев, А.Н.Колядин, А.Д.Прямыков, А.С.Бирюков, И.А.Буфетов, Е.М.Дианов

Впервые создан револьверный волоконный световод с полой сердцевиной, диаметр которой уменьшен до 25 мкм, а оптические потери на длине волны 1850 нм не превысили 75 дБ/км. Уменьшение диаметра сердцевины без значительного роста оптических потерь достигнуто благодаря использованию в конструкции отражающей оболочки световода двойных вложенных капилляров. Решены существенные технологические проблемы создания таких световодов.

Ключевые слова: волоконный световод с полой сердцевиной, револьверный световод, антирезонансный волоконный световод.

Стеклянные волоконные световоды с полой сердцевиной открыли новые возможности в развитии волоконной оптики [1]. Наименьшие оптические потери (1.2 дБ/км) реализованы на сегодняшний день в так называемых фотонно-кристаллических световодах с полой сердцевиной (ФКСПС), световедущие свойства которых обеспечиваются наличием фотонной запрещенной зоны в микроструктурированной оболочке световода [2]. Другой механизм обеспечения световедущих свойств полой сердцевины основан на эффекте антирезонансного отражения (аналогично отражению от интерферометра Фабри–Перо, см., напр., обзор [3]). Для удержания излучения в этих антирезонансных световодах с полой сердцевиной (АСПС) она окружается стеклянными мембранами одинаковой толщины, которая выбрана такой, что интерференция отраженных лучей от различных поверхностей мембран приводит к значительному росту коэффициента отражения излучения обратно в сердцевину. В результате оптические потери в световоде снижаются. АСПС отличаются от ФКСПС возможностью реализации более широкой спектральной полосы пропускания излучения при несколько больших оптических потерях. Наименьшие оптические потери в АСПС, полученные до настоящего времени, составляют 24 дБ/км при диаметре сердцевины $D_c = 94$ мкм [4] (под диаметром сердцевины здесь подразумевается диаметр окружности, вписанной в центральную часть сечения световода и соприкасающейся с элементами отражающей оболочки). Отметим, что в АСПС оптические потери обратно пропорциональны D_c в степени 3 или более [3], поэтому получить более низкие потери гораздо проще при больших диаметрах сердцевины.

А.Ф.Косолапов, Г.К.Алагашев, А.Н.Колядин, А.Д.Прямыков, Е.М.Дианов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: kaf@fo.gpi.ru

А.С.Бирюков, И.А.Буфетов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141700 Долгопрудный, Институтский пер., 9; e-mail: biriukov@fo.gpi.ru, iabuf@fo.gpi.ru

Поступила в редакцию 17 ноября 2015 г.

Среди АСПС особое место занимают револьверные световоды с полой сердцевиной, отражающая оболочка которых состоит только из одного слоя капилляров. Впервые подобная конструкция была предложена в 2011 г. в [5], где она рассматривалась как волоконный световод с полой сердцевиной и отрицательной кривизной границы сердцевина–оболочка. Позже к таким световодам были отнесены также световоды с границей сердцевины в форме гипоциклоиды [6] и с отражающими элементами оболочки, существенно отличающимися от круглых капилляров [4]; форма таких элементов ассоциируется со стилизованным изображением «парашютика» [7] или «рожка с мороженым» [3]. Для полых световодов с отражающей оболочкой в виде одного слоя круглых (или эллиптических) капилляров в работе [7] было предложено специальное название – револьверные световоды с полой сердцевиной (РСПС). Такие световоды отличаются простотой конструкции, малой долей излучения, распространяющегося в материале световода (по сравнению с долей, распространяющейся по полой сердцевиной) [8] и незначительной дисперсией в зонах прозрачности [9]. Достигнутые в револьверных световодах наименьшие оптические потери находятся на уровне 100 дБ/км ($D_c = 109$ мкм [10]) и 50 дБ/км ($D_c = 119$ мкм [11]). Недавно благодаря оптимизации размеров РСПС были получены оптические потери 180 дБ/км при $D_c \approx 30$ мкм [12]. Кроме того, в РСПС продемонстрирована эффективная рамановская генерация на колебательном переходе молекулы водорода $1.06 \rightarrow 1.9$ мкм [7].

С целью дальнейшего снижения оптических потерь в РСПС в ряде работ (в хронологическом порядке [13, 14, 3, 15]) было предложено усложнить конструкцию капилляров, составляющих отражающую оболочку. А именно, вместо простых капилляров (рис. 1,а) использовать двойные (рис. 1,б) и даже тройные (рис. 1,в) вложенные капилляры. Использование вложенных капилляров в принципе должно привести к уменьшению оптических потерь на вытекание за счет введения дополнительных элементов, отражающих излучение и обеспечивающих конструктивную интерференцию отраженных лучей, что способствует увеличению доли возвращающегося в сердцевину излучения.

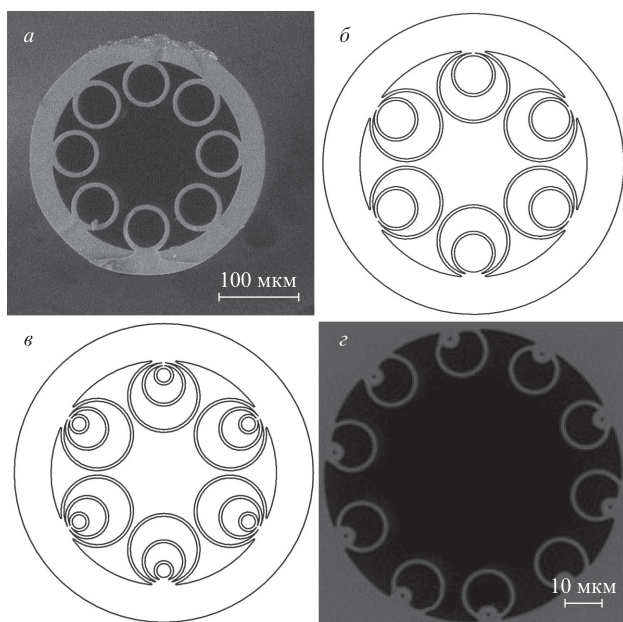


Рис.1. Поперечное сечение РСПС с потерями 50 дБ/км и $D_c = 119$ мкм [11] (а), схемы поперечных сечений РСПС с двойными (б) и тройными (в) вложенными капиллярами [3, 13], а также сечение РСПС с потерями 175 дБ/км и $D_c = 51$ мкм [15] (г).

Достаточно подробное численное моделирование РСПС с вложенными капиллярами было выполнено в [3, 15]. Поскольку толщина стенок капилляров определяет ширину зоны низких оптических потерь, то желательно, чтобы толщины всех стенок были одинаковыми. Толщина же воздушного зазора между стенками капилляров менее критично влияет на отражательные свойства оболочки световода [15], однако также желательно, чтобы она была приблизительно равной $0.5D_c(1 + 2k)$, $k = 0, 1, 2, \dots$ [16].

На рис.1,г показано поперечное сечение световода, изготовленного в работе [15] и являющегося практической реализацией схемы рис.1,б. По свидетельству авторов [15], положительный эффект от введения вложенных капилляров в такой конструкции ограничен малостью диаметров их отверстий и разнотолщинностью стенок больших и малых капилляров. Тем не менее оптические потери в данном световоде составили около 200 дБ/км на ряде длин волн (в диапазоне 500–1100 нм) при $D_c = 51$ мкм и толщине стенок больших капилляров 1.27 мкм.

Цель настоящей работы – исследование возможности создания РСПС с диаметром сердцевины, существенно меньшим 50 мкм, для реализации различных нелинейных эффектов в световоде при меньших мощностях излучения (например, для создания рамановских лазеров на молекулярных газах, генерирующих при меньших мощностях накачки, чем лазер на H_2 [7]). Для этого с помощью компьютерного моделирования был осуществлен поиск оптимальной конструкции РСПС с двойными вложенными капиллярами и уменьшенным диаметром сердцевины, усовершенствована технология изготовления световода и изготовлен РСПС с геометрическими параметрами, близкими к найденным расчетным путем. Подробное описание использованной в настоящей работе схемы компьютерного моделирования можно найти в [8]. Были рассчитаны параметры световодов с различным числом капилляров в отражающей оболочке (от пяти до восьми), выполнены оценки устойчивости оптических параметров световодов к вариациям их геометрических размеров, не-

избежно возникающим в процессе изготовления световода. В результате была выбрана конструкция световода с отражающей оболочкой, состоящей из пяти двойных вложенных капилляров, более подробно описанная ниже.

Заготовка световода изготавливалась из высококачественных кварцевых труб марки Suprasil F 300 Heraeus. Основные этапы изготовления заготовки проиллюстрированы на рис.2. На первом этапе изготавливались пять элементов оболочки световода. Для этого в трубку с внешним ($D = 25$ мм) и внутренним ($d = 21$ мм) диаметрами вставлялась специально подготовленная трубка с $D = 12.3$ мм, $d = 8.4$ мм, которая приплавлялась с помощью кислородно-водородной горелки. Полученная конструкция перетягивалась на стандартной вытяжной установке до внешнего диаметра 6 мм (рис.2,а). Для предотвращения схлопывания трубок в процессе вытяжки в них подавался аргон при избыточном давлении.

Следует отметить некоторые важные технологические моменты на этом этапе изготовления преформы. Из-за отсутствия центральной симметрии получаемая трубка имеет изгиб в сторону вложенного капилляра, поэтому для уменьшения изгиба перетяжка проводилась при минимально возможном натяжении. Кроме того, по той же причине получаемая двойная трубка имеет слегка эллиптическую форму (рис.2,а). Мы считаем, что небольшая эллиптичность структурных элементов не должна существенно ухудшать оптические свойства световода. Более того, эллиптичность препятствует закручиванию преформы во время перетяжки, что позволяет получить двойную трубку с минимальной хиральностью.

В результате было получено пять двойных трубок эллиптического сечения с размерами главных осей эллипсов 6.12 и 6.28 мм (рис.2,а). Изгиб трубки (отклонение от прямой) не превышал 1 мм на 1 м ее длины.

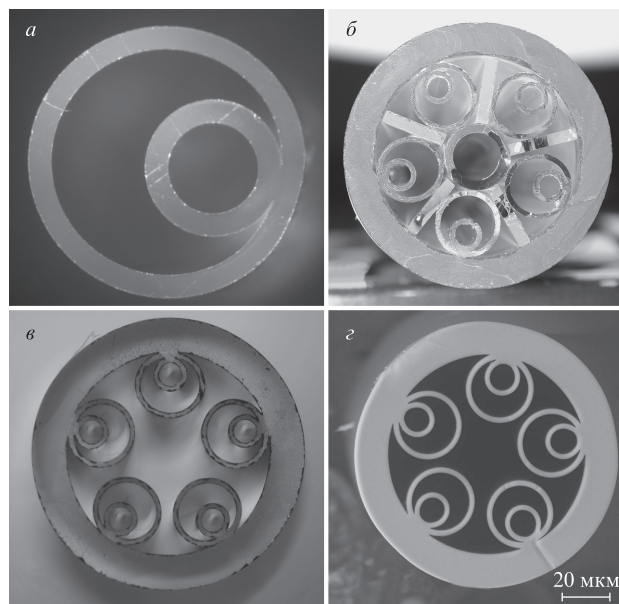


Рис.2. Фотографии поперечных сечений оптических элементов на основных этапах изготовления РСПС с двойными вложенными капиллярами: заготовка двойного вложенного капилляра, изготовленная на первом этапе, диаметром 6.12–6.28 мм (а); собранная заготовка с кварцевыми элементами между двойными капиллярами, $\varnothing 25$ мм (б); проплавленная и перетянутая заготовка (средняя часть), $\varnothing 6$ мм (в) и полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа изображение сечения вытянутого РСПС, $\varnothing 110$ мкм (г).

На втором этапе изготовления преформы (рис.2,б) полученные двойные трубки вставлялись в трубку длиной 70 см с $D = 25$ мм и $d = 19$ мм, на торцах которой двойные капилляры фиксировались специально изготовленными кварцевыми пластинами толщиной 1.27 мм (рис.2,б). При этом эллиптичность двойных трубок способствовала их правильной ориентации во внешней трубке. Затем сборка обрабатывалась на станке в пламени кислород-водородной горелки; температура пламени, скорость вращения внешней трубки и скорость хода горелки подбирались такими, чтобы двойные трубки приплавлялись к внешней трубке без ее существенной деформации. Факт приплавления контролировался визуально. На третьем и четвертом этапах заготовка перетягивалась сначала до диаметра 6 мм (рис.2,в), а затем в световод диаметром 110 мкм (рис.2,з). При этом для предотвращения схлопывания внутрь конструкции подавался аргон при избыточном давлении.

Воздушная сердцевина полученного световода (рис.2,з) сформирована пятью неосприкасающимися двойными капиллярами. Диаметр сердцевины $D_c = 25$ мкм, внешний диаметр световода 110 мкм, внешние диаметры большого и малого капилляров 29 и 15 мкм. Средняя толщина стенок всех капилляров составляет 2.3 мкм. Оптические потери в световоде были измерены методом «облома» при использовании отрезка световода длиной 57 м. Измерения проводились на монохроматоре с дифракционной решеткой 300 штр./мм, излучателем служил источник суперконтинуума (Fianium), а приемником – InGaAs-детектор. Результаты измерений, а также численного моделирования уровня оптических потерь в световоде такой же конструкции, но с различными отклонениями геометрических параметров, представлены на рис.3.

Расчетный спектр оптических потерь для световода идеальной конструкции, в которой все капилляры имеют строго одинаковую толщину стенок, одинаковые диаметры и расположены строго эквидистантно по окружности вокруг сердцевины световода, показан на рис.3 кривой 1.

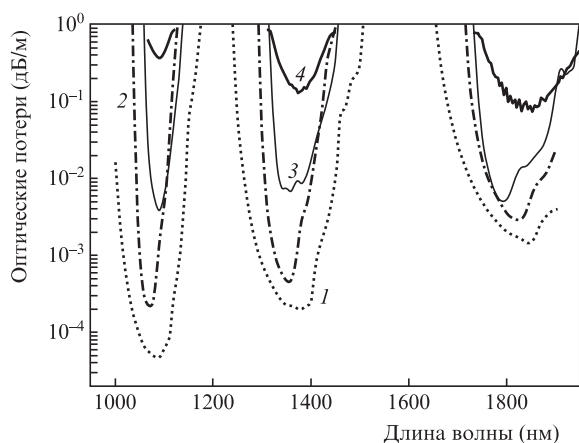


Рис.3. Спектры оптических потерь:

1 – рассчитанные потери для идеальной структуры световода (капилляры представляют собой эквидистантно расположенные окружности с одинаковой толщиной стенок); 2 – рассчитанные потери в световоде с фиксированными отклонениями от идеального (круглые капилляры, разнотолщинность стенок $\sim 10\%$, зазоры между капиллярами оболочки 4.5 мкм $\pm 20\%$); 3 – рассчитанные потери в структуре, основанной на фотографии реального световода (эллиптические капилляры, разнотолщинность стенок $\sim 10\%$, зазоры между капиллярами 4.5 мкм $\pm 30\%$); 4 – экспериментально измеренные потери.

В этом случае световод должен иметь очень низкие потери: так, на длине волны 1.09 мкм они должны составлять всего 4.6×10^{-2} дБ/км. При введении 10%-ной разнотолщинности капилляров и вариации зазоров между капиллярами $\pm 20\%$ достижимый уровень потерь повышается в несколько раз (кривая 2). Но в реальности конструкция световода (рис.2,з) еще больше отклоняется от идеальной: поперечные сечения капилляров представляют собой не окружности, а эллипсы, изменения толщины стенок капилляров и в этом случае находятся на уровне 10%, но колебания зазоров между капиллярами достигают $\pm 30\%$. В результате указанные отклонения приводят к расчетному росту оптических потерь в среднем на два порядка по сравнению с идеальной конструкцией (кривая 3). И наконец, измеренные экспериментально оптические потери изготовленного световода оказываются еще на один-два порядка выше расчетных для реальной модели (кривая 4). В то же время положение зон прозрачности изготовленного РСФС хорошо согласуется с результатами модельных расчетов (длины волн областей с минимальными потерями на рис.3 практически совпадают). Большое количественное расхождение между данными эксперимента и результатами численного моделирования указывает на то, что не все факторы, существенно влияющие на оптические потери в световоде, адекватно отражены в принятой модели. Возможно, что отклонения геометрической формы реального световода от идеальной носят более сложный характер, чем принято в наших расчетах. В частности, в модели не учтены вариации геометрических размеров световода по длине.

Представляет интерес сравнить спектры оптических потерь РСФС с оболочкой из двойных вложенных капилляров (РСФС-2) и световода с отражающей оболочкой из одного слоя одиночных капилляров (см. рис.1,а), описанного в [7] (РСФС-1). Толщины стенок капилляров в этих световодах близки (около 2.3 мкм) и положения их полос пропускания по длинам волн примерно совпадают. Минимальные оптические потери в РСФС-1 и РСФС-2 также близки: примерно 100 дБ/км на $\lambda \approx 2$ мкм у РСФС-1 и 74 дБ/км на $\lambda = 1.8$ мкм у РСФС-2. Однако диаметр сердцевины РСФС-2 (25 мкм) более чем в два раза меньше диаметра сердцевины в РСФС-1 (57 мкм). Согласно оценкам оптических потерь для антирезонансных световодов [3], при таком уменьшении диаметра сердцевины оптические потери в РСФС-1 должны были бы вырасти в ~ 27 раз. Следовательно, введение двойных вложенных капилляров вместо одиночных позволяет значительно уменьшить диаметр поллой сердцевины без катастрофического увеличения оптических потерь.

Важно отметить тот факт, что изготовленный РСФС с двойными капиллярами является квазизодномодовым. Из-за малости диаметра поллой сердцевины моды высокого порядка сильно связаны с модами границы сердцевины – оболочка [8]. При этом разность потерь между основной модой для обеих поляризаций и первой высшей модой составляет примерно 1.5 порядка. Более подробно данный вопрос будет рассмотрен в наших следующих публикациях.

Таким образом, в настоящей работе впервые создан револьверный волоконный световод с отражающей оболочкой, состоящей из одного слоя двойных капилляров со стенками одинаковой толщины. Подобная конструкция световода позволила более чем в два раза уменьшить диаметр поллой сердцевины световода без увеличения опти-

ческих потерь. У световодов такой конструкции, имеющих меньший диаметр полый сердцевинны, должны быть меньшие потери на соединение со стандартными световодами, чем у РСФС с отражающей оболочкой из одного слоя одиночных капилляров. Кроме того, такие световоды, заполненные газом, могут работать в рамановских лазерах при соответственно более низких мощностях накачки.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-02-99688А).

1. Russell P.St.J. *Science*, **299**, 358 (2003).
2. Roberts P.J., Couny F., Sabert H., Mangan B.J., Williams D.P., Farr L., Mason M.W., Tomlinson A., Birks T.A., Knight J.C., Russell P.St.J. *Opt. Express*, **13**, 236 (2005).
3. Poletti F. *Opt. Express*, **22**, 23807 (2014).
4. Yu F., Wadsworth W.J., Knight J.C. *Opt. Express*, **20**, 11153 (2012).
5. Pryamikov A.D., Biriukov A.S., Kosolapov A.F., Plotnichenko V.G., Semjonov S.L., Dianov E.M. *Opt. Express*, **19**, 1441 (2011).
6. Wang Y.Y., Wheeler N.V., Couny F., Roberts P.J., Benabid F. *Opt. Lett.*, **36**, 669 (2011).
7. Гладышев А.В., Колядин А.Н., Косолапов А.Ф., Яценко Ю.П., Прямиков А.Д., Бирюков А.С., Буфетов И.А., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **45** (9), 807 (2015).
8. Alagashv G.K., Pryamikov A.D., Kosolapov A.F., Kolyadin A.N., Lukovkin A.Yu., Biriukov A.S. *Laser Phys.*, **25**, 055101 (2015).
9. Kolyadin A.N., Alagashv G.K., Pryamikov A.D., Mouradian L., Zeytunyan A., Toneyan H., Kosolapov A.F., Bufetov I.A. *Physics Procedia*, **73**, 59 (2015).
10. Belardi W., Knight J.C. *Opt. Express*, **22**, 100916 (2014).
11. Kolyadin A.N., Kosolapov A.F., Pryamikov A.D., Biriukov A.S., Plotnichenko V.G., Dianov E.M. *Opt. Express*, **21**, 9514 (2013).
12. Uebel P., Günendi M.C., Frosz M.H., Ahmed G., Edavalath N.N., Ménard J.-M., Russell P.St.J. *Proc. Conf. «Frontiers in Optics/Laser Science»* (San Jose, CA, USA, 2015, PD paper FW6C.2).
13. Belardi W., Knight J. *Proc. Optical Fiber Communication Conf.*, (San Francisco, CA, USA, 2014, paper Th2A.45).
14. Belardi W., Knight J.C. *Opt. Lett.*, **39**, 1853 (2014).
15. Belardi W. *J. Lightwave Technol.*, **33**, 4497 (2015).
16. Litchinitser N.M., Abeeluck A.K., Headley C., Eggleton B.J. *Opt. Lett.*, **27**, 1592 (2002).