

Микроструктурированный «револьверный» волоконный световод с полый сердцевинной для УФ диапазона спектра

А.Д.Прямыков, А.Ф.Косолапов, Г.К.Алагашев, А.Н.Колядин, В.В.Вельмискин, А.С.Бирюков, И.А.Буфетов

Впервые создан полый микроструктурированный волоконный световод на основе кварцевого стекла с отражающей оболочкой, состоящей из одного слоя капилляров, для УФ диапазона спектра. Оптические потери в световоде составили 3 дБ/м на длине волны 250 нм. Продемонстрированы различия между режимами распространения мод высших порядков и основной моды полый сердцевинной световода «револьверного» типа с разнесенными капиллярами оболочки. Рассмотрено влияние многомодового режима возбуждения световода на изменение ширины его зон пропускания. На основе экспериментальных данных и результатов численного моделирования даны рекомендации по снижению уровня потерь и расширению зон пропускания в полом револьверном световоде в спектральном УФ диапазоне.

Ключевые слова: волоконный световод с полый сердцевинной, микроструктурированный волоконный световод.

1. Введение

«Револьверные» световоды (РС) являются классом микроструктурированных волноводов, позволяющих передавать электромагнитное излучение в полый сердцевинной, заполненной газом. В настоящее время существуют несколько основных типов полых микроструктурированных световодов (ПМС), механизм локализации света в которых определяется оптическими свойствами микроструктурированной оболочки [1–3]. При этом под термином «локализация» мы подразумеваем ограничение поля моды в полый сердцевинной. Эффективная локализация света в сердцевинной ПМС достигается за счет конструктивной интерференции распространяющегося излучения при отражении от элементов микроструктурированной оболочки. Физические механизмы, определяющие эту локализацию, могут быть различны. Наиболее известный и изученный на данный момент механизм – локализация света на основе фотонных запрещенных зон (photonic bandgaps) в фотонно-кристаллических световодах (ФКС) [1]. Этот механизм реализуется, например, в ПМС с двумерной фотонно-кристаллической оболочкой гексагонального типа. Степень локализации света (его доля, распространяющаяся в сердцевинной) в таких микроструктурах в ближнем ИК диапазоне может быть очень высокой [4]. Линейные размеры основных элементов структуры оболочки ПМС при прочих равных условиях пропорциональны длине волны излучения. В связи с этим при переходе в УФ диапазон возрастают технологические проблемы изготовления ФКС, что ограничивает возможности их применения. Самая коротковолновая зона пропуска-

ния, полученная в таких ПМС, находится в области длин волн $\lambda = 850$ нм [5]. Известным типом полых световодов является световод с микроструктурированной оболочкой типа Kagome [2]. Спектральная плотность собственных мод данной оболочки мала, и моды полый сердцевинной слабо связаны с ними (малое значение интеграла перекрытия) из-за большого различия их пространственных распределений. Поэтому спектральная ширина зон пропускания в таких световодах существенно больше, чем в ФКС. Однако потери в ПМС с оболочкой типа Kagome значительно выше потерь в ФКС [2]. Этот факт и возрастающая с уменьшением длины волны сложность в воспроизведении и изготовлении оболочки типа Kagome также затрудняют их использование в УФ диапазоне.

Недавно разработанные ПМС из кварцевого стекла с отрицательной кривизной границы сердцевинной–оболочка являются новым типом полых световодов, позволяющих передавать электромагнитное излучение в спектральном диапазоне от средней до ближней ИК области [6–8]. При этом спектральные ширины зон пропускания таких ПМС превышают ширины зон пропускания ФКС, а основные моды воздушной сердцевинной имеют значительно большую степень локализации. Структура оболочки ПМС с отрицательной кривизной границы сердцевинной–оболочка намного проще, чем в случае ПМС, рассмотренных выше. Например, оболочка световода револьверного типа состоит из одного слоя капилляров, расположенных на внутренней поверхности опорной трубы [6, 8].

В настоящей работе исследуются возможности передачи излучения УФ диапазона в ПМС револьверного типа. Создание таких волноводов чрезвычайно важно для многих приложений в медицине, литографии, фотохимии, сенсорике [9–12].

Полностью стеклянные световоды неэффективны для передачи излучения УФ диапазона вследствие быстрорастущих с уменьшением длины волны их материальных оптических потерь. Воздух, заполняющий сердцевинной ПМС, имеет гораздо более широкую по сравнению с кварцевым стеклом спектральную область прозрачности (прав-

А.Д.Прямыков, А.Ф.Косолапов, Г.К.Алагашев, А.Н.Колядин, В.В.Вельмискин, А.С.Бирюков, И.А.Буфетов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: pryamikov@fo.gpi.ru

Поступила в редакцию 30 сентября 2016 г., после доработки – 22 октября 2016 г.

да, в ней имеются полосы поглощения Шумана–Рунге [13]). Поэтому одними из наиболее перспективных кандидатов на роль волноведущей структуры для транспортировки излучения в широком диапазоне длин волн (шире области прозрачности кварцевого стекла) являются световоды с поллой сердцевиной.

На рис.1 приведены результаты измерений потерь в ПМС различных типов, описанных выше. Видно, что уже в настоящее время при современном, недостаточно совершенном технологическом уровне ПМС, изготовленные из кварцевого стекла, имеют хорошие световедущие характеристики в среднем ИК диапазоне. Передача излучения с длинами волн вплоть до $\lambda = 8000$ нм осуществляется с помощью ПМС с отрицательной кривизной границы сердцевина–оболочка (рис.1, кривая 4). При этом именно РС позволили реализовать волноводный режим в спектральной области, где потери в кварцевом стекле велики. Вблизи $\lambda = 3000$ нм потери в РС (точка 5) и ПМС с элементами отражающей оболочки в виде «парашютиков» (точки 8) примерно одинаковы (30–50 дБ/км). Вблизи $\lambda = 1500$ нм наименьшие измеренные потери имеют место для ПМС на основе фотонных запрещенных зон (точки 6). Данных же по характеристикам микроструктурированных волоконных световодов с поллой сердцевиной в УФ области значительно меньше (точка 11, кривые 14).

В настоящей работе исследовались возможности передачи УФ излучения по полым РС. С этой целью был создан специальный, рассчитанный на передачу УФ излучения волоконный световод из кварцевого стекла (РС1), измерены его оптические потери в видимом и УФ диапазонах. Из-за особенностей технологии изготовления световода его геометрические размеры не постоянны по длине (их разброс составляет несколько процентов). Для дальнейшего совершенствования конструкции световодов и анализа механизмов, влияющих на их волноводные характеристики, было проведено математическое моделирование процесса распространения излучения по идеальному световоду с параметрами поперечного сечения, совпадающими с усредненными параметрами, измеренными в различных сечениях РС1. Проведено сравнение экспериментально измеренных и полученных в процессе моделирования результатов.

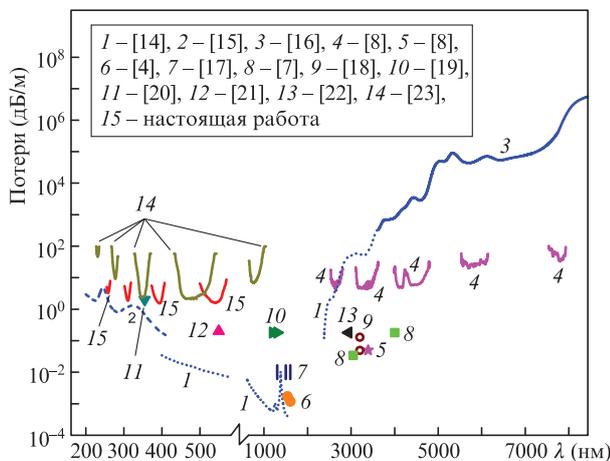


Рис.1. Оптические потери в чистом кварцевом стекле (F300, Heraeus) (1–3) и минимальные значения оптических потерь, полученные в различных типах ПМС на основе кварцевого стекла до настоящего времени (4–15).

2. Волоконный световод

Одними из основных параметров, определяющих процесс распространения излучения по РС, являются отношение длины волны λ излучения к диаметру сердцевины D_{core} (λ/D_{core}) и отношение толщины t стенки капилляра оболочки к длине волны (t/λ). В работе [8] было показано, что РС с отражающей оболочкой из восьми капилляров, с $D_{\text{core}} = 119$ мкм и $t = 6$ мкм удовлетворительно работал в диапазоне длин волн $\lambda = 2000 - 8000$ нм. Поэтому для $\lambda = 200 - 500$ нм (уменьшение длины волны примерно на порядок) необходимо использовать световод с уменьшенными также на порядок диаметром сердцевины и толщиной стенок капилляров. Такой световод был создан нами при выполнении настоящей работы, и его поперечное сечение представлено на рис.2. Технология изготовления световода аналогична описанной в [8, 24]. Толщина стенок капилляров световода составляла 590–630 нм, диаметр сердцевины был равен 15 мкм. При этом для обеспечения возможности работы с таким световодом (придания ему соответствующих механических свойств) толщина его внешней кварцевой трубы была увеличена настолько, чтобы ее внешний диаметр после вытяжки световода составил более 70 мкм (в реальности он оказался равным 73 мкм).

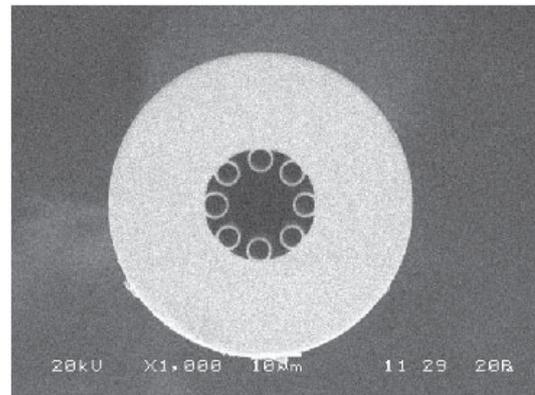


Рис.2. СЭМ-изображение поперечного сечения волоконного световода РС1 с внешним диаметром 73 мкм.

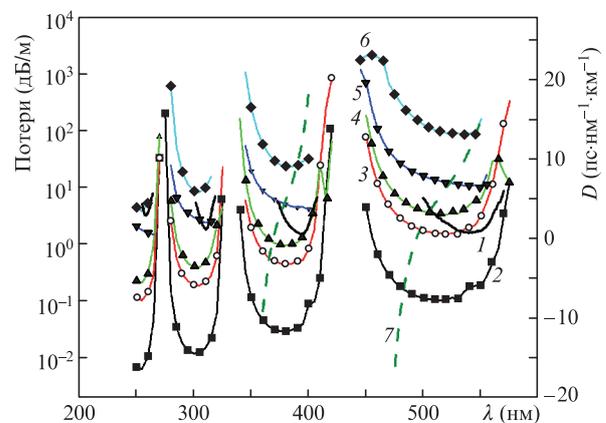


Рис.3. Измеренный спектр оптических потерь в РС1 (1), рассчитанные полные потери основной моды (2) и мод более высокого порядка (3–6) поллой сердцевины идеализированного ПМС, а также расчетная зависимость дисперсии групповой скорости D от длины волны для РС1 (7).

Методом cut-back нами был измерен спектр оптических потерь световода PC1 (рис.3, кривая 1). При этом использовались отрезки PC1 длиной менее 1 м, а источником излучения служила дейтериевая лампа Ocean Optics DH-2000, излучение которой с помощью линзы вводилось в PC1. Полученный таким образом спектр оптических потерь в диапазоне длин волн 250–600 нм свидетельствует о наличии в этом диапазоне четырех зон пропускания с минимальными значениями потерь на $\lambda = 258, 310, 393$ и 540 нм, составляющими 3.25, 1.9, 1.55 и 1.62 дБ/м соответственно. Из рис.1 видно, что в видимом диапазоне потери в PC1 существенно выше, чем в чистом кварцевом стекле. Однако в УФ области (вблизи $\lambda = 250$ нм) потери в кварцевом стекле и в PC1 становятся соизмеримыми.

Учитывая, что измеренные значения дисперсии в PC хорошо согласуются с расчетными [25], в настоящей работе мы ограничились вычислением зависимости дисперсии от длины волны для световода PC1 (рис.3, кривая 7). Световод PC1 характеризуется малой дисперсией, которая в средней части зон пропускания не сильно превышает $5 \text{ пс}\cdot\text{нм}^{-1}\cdot\text{км}^{-1}$. Если же учесть низкий уровень нелинейности PC (плотность вещества в сердцевине ПМС примерно на три порядка ниже, чем в твердом теле), малую величину дисперсии в PC и присущую им устойчивость к воздействию УФ и ионизирующих излучений, то уже сейчас можно сказать, что PC имеют ряд преимуществ перед чисто кварцевыми световодами при их использовании в УФ диапазоне.

3. Анализ спектральных зависимостей полных потерь в ПМС револьверного типа в УФ области спектра

Для численного моделирования и анализа спектральных зависимостей потерь в PC1 (рис.2) использовался идеализированный световод с аналогичной геометрической структурой. Характерные размеры его были таковы: диаметр поллой сердцевины $D_{\text{core}} = 15$ мкм, толщина стенки капилляра $t = 0.62$ мкм и внутренний диаметр капилляра $d = 4.36$ мкм. Вычисление потерь, проведенное для основной моды поллой сердцевины, показало хорошее соответствие рассчитанных и измеренных положений длинноволновых краев зон пропускания рассматриваемого ПМС (рис.3, кривая 2). При этом сравнение экспериментальных и расчетных зависимостей показывает существенное несоответствие между положениями коротковолновых краев экспериментально измеренных зон пропускания и коротковолновых краев рассчитанных зон пропускания для основной моды поллой сердцевины (рис.3). Происходит также сдвиг расчетного положения минимума оптических потерь для мод более высокого порядка в каждой зоне пропускания в длинноволновую сторону от центра зоны. Кроме того, наблюдается существенное различие рассчитанных полных потерь для основной моды и экспериментально измеренных потерь. Сравнение экспериментальных и расчетных данных указывает, по-видимому, на то, что в наших экспериментальных условиях при возбуждении коротких (~ 1 м) отрезков световода в них возбуждается не только основная мода, но и несколько мод более высокого порядка. При этом измеренный уровень оптических потерь соответствует некоторой средней величине для нескольких возбужденных мод, а сдвиг измеренного положения минимума по-

глощения в каждой зоне пропускания в длинноволновую сторону отвечает аналогичному сдвигу в спектрах оптических потерь для мод более высокого порядка в световоде PC1.

Известно, что ПМС револьверного типа относят в настоящее время к антирезонансному типу полых волноводов [26, 27]. Локализация света в таких волноводах происходит за счет эффективного отражения излучения, распространяющегося в поллой сердцевине, от элементов оболочки в антирезонансном режиме, в данном случае от стенок капилляров. В случае же выполнения резонансного условия на данной длине волны $k_t t = \pi m$ ($k_t = \sqrt{k^2 - \beta^2}$ – модуль поперечного волнового вектора, k – модуль волнового вектора излучения в среде (воздух или стекло), β – постоянная распространения моды поллой сердцевины и m – целое число) происходит резкий рост потерь, определяющий границу зоны пропускания световода. Из рис.3 видно, что для основной и нескольких первых мод поллой сердцевины это действительно так, в то же время для нескольких мод высшего порядка существует сдвиг коротковолнового края зоны пропускания. Чем выше порядок моды поллой сердцевины, тем сильнее смещен коротковолновый край зоны пропускания для нее относительно длины волны, определяющей резонанс внутри стенки капилляра.

Многомодовый режим распространения мод поллой сердцевины (различия между потерями для мод сравнительно невелики) наблюдается для ПМС типа PC1, когда между капиллярами имеется некоторое расстояние [28]. Расчет волноводных потерь для ПМС с оболочкой, состоящей из восьми соприкасающихся капилляров с той же толщиной стенки, что и в предыдущем случае, и с тем же диаметром поллой сердцевины показывает (рис.4,а), что в данном случае имеет место маломодовый режим распространения (различия между оптическими потерями для мод здесь значительно больше). Отметим, что при непрерывном уменьшении до нуля расстояний между капиллярами в сечениях световодов, аналогичных показанному на рис.2, спектры оптических потерь для них также непрерывно трансформируются от приведенных на рис.3 к спектрам потерь на рис.4,а. Для рассмотренной конструкции PC получение полностью одномодового режима распространения излучения представляется труднодостижимым, т. к. потери для основной моды поллой сердцевины хотя и меньше, чем для первой моды более высокого порядка (типа LP₁₁), но всегда сопоставимы с ними и различаются лишь в несколько раз (в отличие от потерь для мод более высоких порядков).

На рис.4,б приведены спектральные зависимости потерь для мод поллой сердцевины волновода с восьмиугольной формой границы сердцевины – оболочка (не имеющей отрицательной кривизны). Толщина стенки границы сердцевины – оболочка и эффективная площадь, занимаемая полем основной моды поллой сердцевины, были такими же, как и для идеализированного ПМС с оболочкой, состоящей из раздвинутых капилляров. Основные моды поллой сердцевины в ПМС с соприкасающимися капиллярами в оболочке и в восьмиугольной микроструктуре различаются уровнем потерь (рис.4). Для восьмиугольного волновода спектр потерь для основной моды имеет резонансный характер за счет возбуждения мод границы сердцевины – оболочка с высокими значениями азимутальных чисел [29]. Тем не менее в обоих случаях наблюдается маломодовый режим пропускания света в

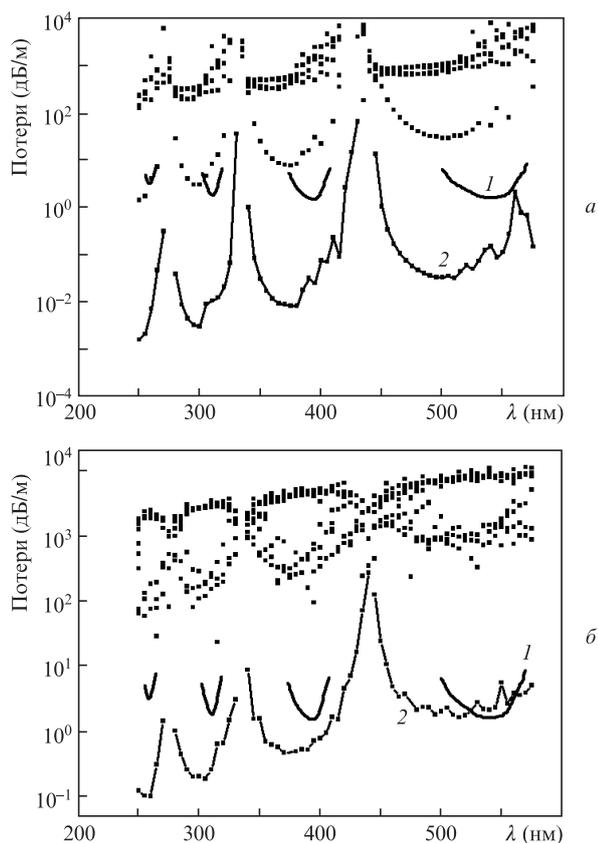


Рис.4. Спектральные зависимости волноводных потерь для мод полой сердцевины в ПМС револьверного типа с соприкасающимися капиллярами в оболочке (а) и в волноводе с восьмиугольной формой поперечного сечения и той же толщиной стенки границы сердцевина–оболочка, что и в предыдущих случаях (б). Кривые 1 – потери, измеренные экспериментально, кривые 2 – потери для основной моды, кривые из точек – потери для мод высших порядков.

полой сердцевине. Моды высшего порядка сильно связаны с модами границы полой сердцевины и являются сильно вытекающими. Этот факт говорит о том, что механиз-

мы локализации мод высокого порядка в ПМС с восемью соприкасающимися капиллярами в оболочке и в восьмиугольном волноводе схожи. По нашему мнению, это обусловлено эффективной связью между модами границы сердцевина–оболочка с определенным типом вращательной симметрии и модами полой сердцевины высших порядков [28].

Из рис.4 также видно, что сдвиг коротковолнового края зон пропускания для высших мод полой сердцевины в данных случаях не происходит. Отсюда можно сделать вывод о том, что основной вклад в увеличение числа мод высших порядков в ПМС (рис.2) вносит наличие свободного пространства между капиллярами. В отличие от основной моды полой сердцевины излучение мод высших порядков проникает в пространство между капиллярами, увеличивая тем самым эффективную площадь взаимодействия излучения со стенкой капилляра и с полостями внутри капилляров. По сравнению с ПМС револьверного типа с соприкасающимися капиллярами в оболочке в данном случае отсутствует взаимодействие мод полой сердцевины с модами границы сердцевина – оболочка как единого объекта, и каждый капилляр можно рассматривать как отдельный рассеиватель. Это приводит к отсутствию эффективной связи между модами границы сердцевина–оболочка и модами полой сердцевины высших порядков.

Примеры распределений плотности потока энергии в поперечном сечении идеализированного ПМС для двух мод высокого порядка показаны на рис.5. Поскольку сдвиг коротковолнового края зон пропускания для этих мод полой сердцевины не может быть связан с резонансом внутри стенки капилляра, то речь идет о резонансном вытекании излучения в полость самих капилляров и в пространство между ними.

Таким образом, возбуждение мод высших порядков в коротких отрезках ПМС револьверного типа (рис.2) в спектральном УФ диапазоне приводит к высокому уровню полных измеряемых потерь и к сужению зон пропускания ПМС. По-видимому, при обеспечении условий возбуждения только основной моды в световоде РС1 из-

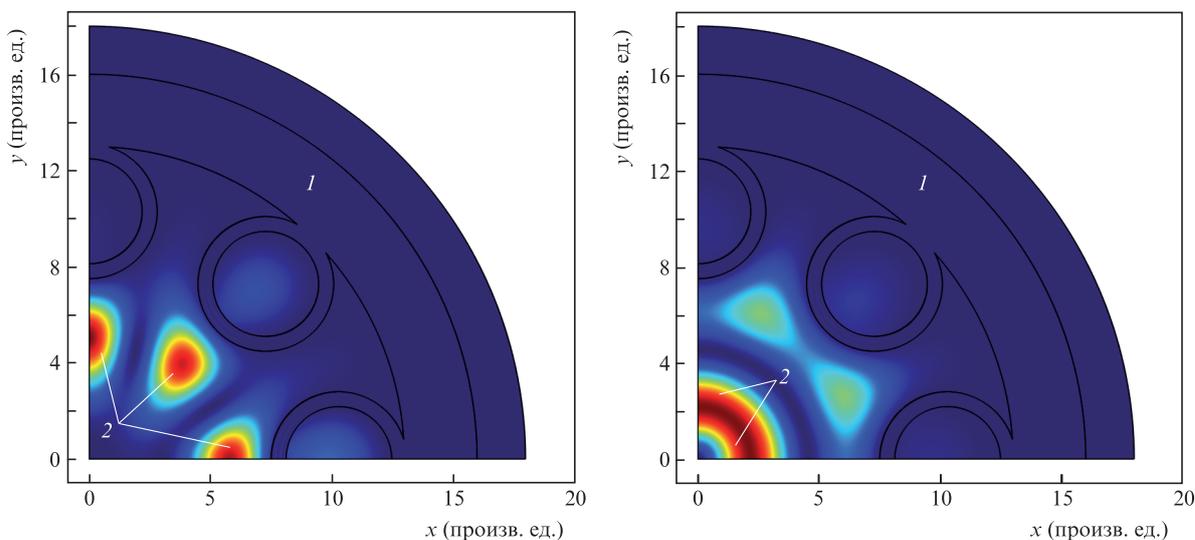


Рис.5. Распределения плотности потока энергии на длине волны $\lambda = 475$ нм (рис.3) для двух мод полой сердцевины высшего порядка в идеализированном ПМС револьверного типа. Цветной вариант рис.5 помещен на сайте нашего журнала <http://www.quantum-electron.ru>, Темно-синий цвет (области 1) соответствует отсутствию поля излучения, красный (области 2) – максимальному значению поля, промежуточные тона отвечают промежуточным значениям поля.

меренные оптические потери относились бы только к основной моде и, следовательно, имели бы меньшие значения. Значения же экспериментальных оптических потерь для световода PC1 можно рассматривать как верхнюю границу оптических потерь для основной моды. Однако следует отметить, что к большим измеренным потерям приводит и неоднородность геометрических параметров световода по длине, что не учитывалось при математическом моделировании.

4. Выводы

В настоящей работе впервые был исследован полый световод револьверного типа с зонами пропускания в спектральном УФ диапазоне и уровнем потерь порядка нескольких дБ/м. Измеренные потери и ширины зон пропускания определялись особенностями спектров потерь для некоторых мод полой сердцевины высших порядков. Реализовать в РС режим распространения излучения, близкий к одномодовому, т.е. с увеличенными оптическими потерями для высших мод по сравнению с основной модой, можно путем подбора оптимального расстояния между капиллярами оболочки или изменения числа капилляров в ней. При усовершенствовании технологии изготовления ПМС револьверного типа могут иметь большие перспективы для использования в УФ области спектра.

Работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-29-07176-офи-м).

- Russell P.St.J. *J. Lightwave Technol.*, **24** (12), 4729 (2006).
- Benabid F. *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A*, **364**, 3439 (2012).
- Russell P.St.J., Hölzer P., Chang W., Abdolvand A., Travers J.C. *Nat. Photonics*, **8**, 278 (2014).
- 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** (1), 236 (2005).
- Bouwman G., Luan F., Knight J.C., Russell P.St.J., Farr L., Mangan B.J., Sabert H. *Opt. Express*, **11** (14), 1613 (2003).
- Pryamikov A.D., Biriukov A.S., Kosolapov A.F., Plotnichenko V.G., Semjonov S.L., Dianov E.M. *Opt. Express*, **19** (2), 1441 (2011).
- Yu F., Wadsworth W.J., Knight J.C. *Opt. Express*, **20** (10), 11153 (2012).
- Kolyadin A.N., Kosolapov A.F., Pryamikov A.D., Biriukov A.S., Plotnichenko V.G., Dianov E.M. *Opt. Express*, **21** (8), 9514 (2013).
- Jaryaraman V., Rodgers K.R., Mukerji I., Spiro T.G. *Science*, **269** (5232), 1843 (1995).
- Cubillas A.M., Unterkofler S., Euser T.G., Etzold B.J.M., Jones A.C., Sadler P.J., Wasserscheid P., Russell P.St.J. *Chem. Soc. Rev.*, **42** (22), 8629 (2013).
- Leggett G.J. *Nanoscale*, **4** (6), 1840 (2012).
- Hanlon E.B., Manoharan R., Koo T.W., Shafer K.E., Motz J.T., Fitzmaurice M., Kramer J.R., Itzkan I., Dasari R.R., Feld M.S. *Phys. Med. Biol.*, **45** (2), R1 (2000).
- Ельяшевич М.А. *Атомная и молекулярная спектроскопия* (М.: Эдиториал УРСС, 2001).
- Humbach O., Fabian H., Grzesik U., Haken U., Heitmann W. *J. Non-Cryst. Solids*, **203**, 19 (1996).
- Tomashuk A.L., Golant K.M. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4083**, 188 (2000).
- Kryukova E.B., Plotnichenko V.G., Dianov E.M. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4083**, 71 (2000).
- OFS; <http://fiber-optic-catalog.ofsoptics.com/asset/Hollow-Core-Optical-Fibers.pdf>.
- Sandoghchi S.R., Poletti F., Petrovich M.N., Richardson D.J. *Opt. Lett.*, **39**, 295 (2014).
- Wang Y.Y., Wheeler N.V., Couny F., Roberts P.J., Benabid F. *Opt. Lett.*, **36**, 669 (2011).
- Février S., Beaudou B., Viale P. *Opt. Express*, **18**, 5142 (2010).
- Gérôme F., Jamier R., Auguste J.-L., Humbert G., Blondy J.-M. *Opt. Lett.*, **35**, 1157 (2010).
- Urich A., Maier R.R.J., Yu F., Knight J.C., Hand D.P., Shephard J.D. *Biomed. Opt. Express*, **4**, 193 (2013).
- Hartung A., Kobelke J., Schwuchow A., Wondraczek K., Bierlich J., Popp J., Frosch T., Schmidt M.A. *Opt. Express*, **22**, 19131 (2014).
- Косолапов А.Ф., Алагашев Г.К., Колядин А.Н., Прямиков А.Д., Бирюков А.С., Буфетов И.А., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **46**, 267 (2016).
- Kolyadin A.N., Alagashev G.K., Pryamikov A.D., Mouradian L., Zeytunyan A., Toneyan H., Kosolapov A.F., Bufetov I.A. *Physics Procedia*, **73**, 59 (2015).
- Litchinitser N.M., Abeeluck A.K., Headley C., Eggleton B.J. *Opt. Lett.*, **27** (18), 1592 (2002).
- Yu F., Knight J.C. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **22** (2), 4400610 (2016).
- Alagashev G.K., Pryamikov A.D., Kosolapov A.F., Kolyadin A.N., Lukovkin A.Yu., Biriukov A.S. *Laser Phys.*, **25**, 055101 (2015).
- Vincetti L., Setti V. *Opt. Express*, **20** (13), 14350 (2012).