

Roman Novikov

– postgraduate, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia, novikov_r_l@mail.ru

Stanislav Aksarin

– postgraduate, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia, oskar2002@list.ru

УДК 681.7

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ ОПТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДАХ

А.Г. Коробейников^а, Ю.А. Гатчин^б, К.В. Дукельский^б, Е.В. Тер-Нерсесянц^б

^а Санкт-Петербургский филиал учреждения Российской академии наук «Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН», Санкт-Петербург, Россия, Korobeynikov_A_G@mail.ru

^б Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия, KDukel@GOI.ru

Представлены результаты разработки технологии получения микроструктурированных волоконных световодов. В ходе проводимых работ были созданы световоды с одним или двумя циклами отверстий, получаемые по двухстадийной технологии. Использование двух циклов позволяют снизить на длине волны накачки затухание до 0,1 дБ/м. В ходе экспериментов было установлено, что эффективность вытекания коррелирует с толщиной депрессированной оболочки – чем больше толщина оболочки, тем потери меньше. В ходе работ была разработана базовая технология получения дырчатых волоконных световодов из кварцевого стекла с четырьмя циклами отверстий, базирующаяся на двухстадийном процессе. В отличие от дырчатых световодов с одноэлементной сердцевинной, в разработанных системах при равных диаметрах сердцевинной шаг структур меньше в два и три раза. Это позволило получить большую устойчивость излучения к возмущениям световодного тракта. При постановке задачи получения микроструктурированного волокна с малым значением отношения диаметра отверстия конструкционной оболочки к шагу структуры и (или) с относительно малым шагом структуры возможен одностадийный процесс, так как в этом случае в исходной сборке можно использовать капилляры с небольшим по величине внутренним диаметром. Были проведены исследования по поиску технологических условий, выполнение которых позволяет затухание излучения определенного типа в микроструктурированных световодах минимальным. Основным способом, позволившим выявлять влияние технологической схемы на затухание излучения, являлось сравнение одно- и двухстадийных методов создания микроструктурированных световодов. Была определена зависимость потерь излучения в световодах от температуры вытяжки капилляров. Проведено сравнение методов очистки капилляров в дырчатых световодах. Предложены методы снижения затухания излучения.

Ключевые слова: оптическое волокно, микроструктурированные волоконные световоды, затухание излучения.

PROCESS METHODS WITH LOW LEVEL OF OPTICAL LOSSES FOR THE MICROSTRUCTURED FIBER LIGHT GUIDES

A. Korobeynikov^a, Yu. Gatchin^b, K. Dukel'skiy^b, E. Ter-Nersesyantz^b

^a Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences St. Petersburg Branch (SPbF IZMIRAN), Saint Petersburg, Russia, Korobeynikov_A_G@mail.ru

^b Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia, KDukel@GOI.ru

The paper deals with results of the technology process development for the microstructured fiber light guides. Light guides with one or two cycles of the openings, processed by two-phase technology were created during carried out research. The use of two cycles makes it possible to decrease attenuation to 0.5 dB/m on excitation wavelength. The experiments show that effluence efficiency correlates with thickness of depressed cover – the more is thickness of a cover, the less are losses. The basic technology of perforated fiber light guides creation from quartz glass with four cycles of the openings, based on two-phase process was developed. Unlike perforated light guides with a single-element core in the developed systems with equal diameters of a core the step of structures is two and three times less. It gives the possibility to receive big resistance of radiation to indignations of a light-guide path. At a problem definition of receiving the microstructured fiber with small value of the relation of an opening diameter of a constructional cover to a step of structure and/or with rather small step of structure single-stage process as in this case in initial assembly it is possible to use capillaries with small size internal diameter. Researches were conducted to search technological conditions for minimum attenuation of a certain type radiation in the microstructured light guides. The main way to receive answers about influence of the technological scheme on radiation attenuation is comparison of one - and two-phase methods of microstructured light guides creation. Dependence of radiation losses in light guides from temperature of capillaries extract was defined. Comparison of capillaries cleaning methods in perforated light guides is carried out. Methods of radiation attenuation decrease are offered.

Keyword: optical fiber, microstructured fiber light guides, radiation attenuation.

Введение

Большим достижением последних лет в оптических технологиях является создание фотонно-кристаллических (микроструктурированных, «дырчатых») волоконных световодов. Фотонно-кристал-

лическое волокно (ФКВ) (Photonic-crystal fiber) представляет собой оптическое волокно, у которого оболочка имеет структуру двумерного фотонного кристалла. ФКВ сегодня рассматривается как один из перспективнейших оптических элементов для использования в лазерной технике в качестве активной среды. Кроме того, ФКВ можно использовать для передачи и нелинейно-оптического преобразования мощных световых потоков с заданным распределением светового излучения в поперечном сечении.

В настоящее время наиболее хорошо известны два типа ФКВ – со сплошной и полый световедущими жилами (рис. 1). На территории России их принято называть дырчатыми волокнами. Но необходимо знать, что между этими типами ФКВ имеется существенное отличие в механизмах, отвечающих за волноводные свойства ФКВ.

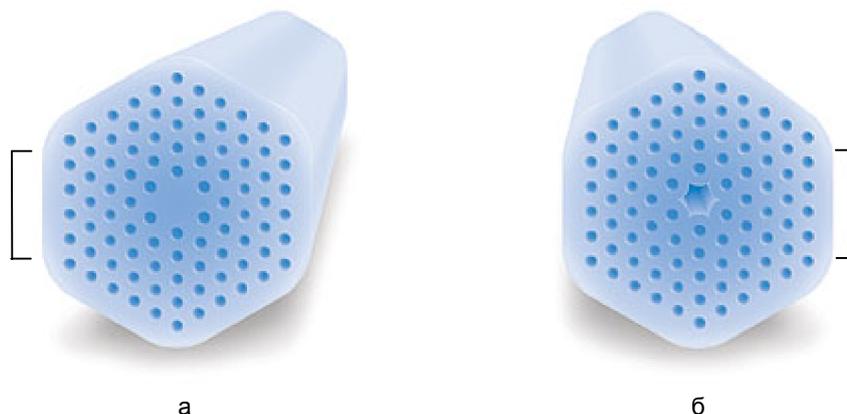


Рис. 1. Поперечное сечение дырчатого волокна: со сплошной световедущей жилой в центре и пятью циклами отверстий (а); с полый световедущей жилой в центре (б)

Дырчатое волокно со сплошной световедущей жилой (рис. 1, а) в центре представляет собой сердцевину из кварцевого стекла в оболочке из фотонного кристалла (кварцевое стекло с воздушными полостями-каналами), которая имеет по отношению к жиле в среднем более низкий коэффициент преломления. Отсюда следует, что волноводные свойства этих световодов гарантируются двумя одновременными эффектами – зонными свойствами фотонного кристалла и полным внутренним отражением (как в обычных световодах). Оболочка в виде фотонного кристалла значительно отличает ФКВ от обычных волоконных световодов.

Проведенный анализ литературных источников показал, что технология дырчатых световодов базируется в основном на двух методах: сборка системы капилляров, которые спекаются при последующей температурной обработке, и высверливание определенного множества отверстий в штабике из синтетического кварцевого стекла, который содержит минимальное количество примесей [1–7].

Первый метод характеризуется технологичностью, но имеет серьезный недостаток, заключающийся в проблеме очистки исходной сборки от механических примесей. Для второго метода необходимо специальное дорогостоящее оборудование, чтобы получать отверстия требуемой глубины. Но его применение позволяет получать лучшие характеристики по минимальным потерям излучения.

Если сравнить существующие методы газофазного осаждения диоксида кремния при изготовлении заготовок для традиционных волокон из сплошных сред, которые обязательно предусматривают эффективные меры для создания стерильной атмосферы в зонах осаждения и последующего остекловывания порошкообразных слоев диоксида кремния, с существующими методами приготовления заготовок для микроструктурированных световодов, то последние не позволяют удалять полностью механические примеси. Отсюда следует, что задача минимизации содержания примесей в заготовке является одной из основных, решаемой при разработке технологии микроструктурированных оптических волокон. Но, тем не менее, множество технологических задач, решая которые, можно в той или иной степени понизить затухание излучения, достаточно велико. Оно содержит следующие задачи: получение требуемой системы отверстий с заданными размерами и формой; создание гарантированной стабильной структуры в длиномерных отрезках световодов (даже не говоря о конкуренции традиционным связным световодам); выбор температурного режима вытяжки, который совмещает получение необходимой структуры с наличием стандартных величин механической прочности кварцевых волокон.

Технологии получения микроструктурированных световодов

В ходе проводимых работ сначала были созданы световоды гексагональной структуры с одним и двумя циклами отверстий вокруг сердцевины. Волокна были получены по двухстадийной технологии. На первой стадии производилось вытягивание предволокна диаметром 1–2 мм из поликапиллярной сборки (уложенных в необходимом порядке внутри кварцевой опорной трубы капилляров и штабиков малого диаметра), а на второй стадии предволокно помещалось в центр сборки, составленной из микроштаби-

ков, которые при перетяжке этой сборки образовывали сплошную конструкционную оболочку. Использование двух циклов отверстий (по сравнению со структурой, содержащей один цикл) позволяет снизить затухание излучения на длине волны накачки на порядок. Достигнутый минимум составил 0,5 дБ/м.

При получении световодов с двумя или одним циклами отверстий применялись элементы из кварцевого стекла, базой для которых является сырье из природных материалов – один из основных первоисточников повышенного уровня оптических потерь. В [8] было показано, что дырчатые световоды с большим уровнем оптических потерь удовлетворяют требованиям к элементу, применяемому в качестве преобразователя фемтосекундных импульсов, так как величины наиболее значимых параметров, а именно, нелинейная и дисперсионная длины, составляют не больше нескольких миллиметров и 1,5 м соответственно. В указанных пределах длин доля поглощенного излучения в световоде не превысила 20%. Последующее улучшение структуры дырчатых световодов было необходимо для понижения уровня потерь излучения до значения, которое обеспечит рациональность доставки излучения потребителю на расстоянии не больше 40 м. Такие расстояния характерны для задач, в которых волоконные световоды используют не для передачи информации.

Для решения вышеназванной задачи была разработана новая структура, состоящая из четырех циклов отверстий вокруг сердцевинки, а также технология создания упорядоченной системы отверстий для получения микроструктурированных оптических волокон. Увеличение числа циклов создания отверстий продиктовано тем, что показатель преломления сердцевинки и показатель преломления внешней конструкционной оболочки выше эффективного показателя преломления светоотражающей оболочки. В таких световодах (по общепринятой в волоконной оптике терминологии – световоде с депрессированной оболочкой) идет процесс вытекания направленных по сердцевинке мод во внешнюю оболочку. Этот процесс обусловлен туннелированием излучения через депрессированную оболочку. Экспериментально установлено, что эффективность вытекания коррелирует с толщиной депрессированной оболочки – потери меньше, когда толщина больше. Причем это справедливо как для дырчатых световодов, так и для волоконных световодов со сплошными средами [9, 10].

В световодах, изготовленных из сплошных сред, спектральная зависимость потерь на вытекание излучения коррелирует с длиной волны. Это связано с расширением модовых полей и увеличением периферийной доли мощности, которая попадает во внешнюю (конструкционную) оболочку с последующим поглощением части излучения в полимерном покрытии. Кроме того, известно, что микро- и макроизгибы в световодах с депрессированной оболочкой содействуют более активному вытеканию излучения [11–14].

В работе [9] показано, что, увеличив число циклов отверстий до четырех, можно практически довести до нуля потери на вытекание излучения в конструкционную оболочку не только при $k \sim 0,9$ ($k = d/\Lambda$, где d – диаметр отверстия, Λ – шаг структуры), но и при значениях k , равных 0,3–0,4, и, следовательно, переходе распространения излучения в одномодовый режим.

В ходе работ была разработана базовая технология получения дырчатых волоконных световодов из кварцевого стекла с четырьмя циклами отверстий, базирующаяся на двухстадийном процессе.

Сначала в опорной кварцевой трубе (диаметр 20 мм) собирается структура, базирующаяся на центральном кварцевом штабике и объединенная в плотную гексагональную структуру с периферийными капиллярами. Выдерживается соотношение внутреннего и внешнего диаметров капилляров $\sim 0,8$ (порядок окружения равен четырем, величина диаметра структурных элементов находится в пределах 0,8–2 мм). Фотография исходной поликапиллярной сборки представлена на рис. 2.

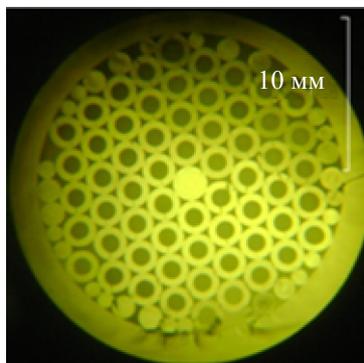


Рис. 2. Исходная поликапиллярная сборка

Из полученной таким образом заготовки вытягивается первичное волокно (предволокно) диаметром 2–3 мм (рис. 3). Существующие в начальный момент зазоры между капиллярами в заготовке необходимо сколлапсировать в ходе вытяжки. Для этой цели концы капилляров заплывают. Кроме того,

внутри опорной трубы в процессе вытяжки необходимо существование отрицательного давления. Для более эффективного коллапсирования зазоров необходимо подобрать температуру вытяжки и разрежение в опорной трубе. Диаметр сердцевины в предволокне получается 100–200 мкм. После этого полученное предволокно помещается внутрь другой кварцевой опорной трубы диаметром 20 мм, как сердцевина в центр сборки, и окружается микроштабиками, сложенными в гексагональную структуру (так называемое «шубирование»). Затем эта сборка перетягивается в новое предволокно, а потом это предволокно перетягивается в волокно (т.е. снова используется двухстадийный метод вытяжки). На выходе получается дырчатый световод, изображенный на рис. 4.

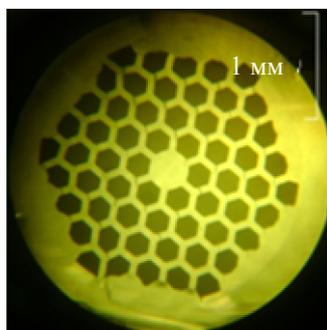


Рис. 3. Предволокно

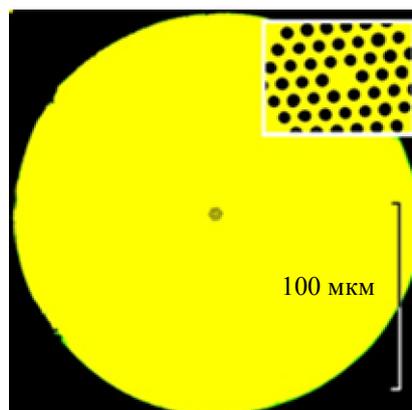


Рис. 4. Микроструктурированный световод
(на вставке показано увеличенное изображение центральной области)

В тех случаях, когда ставилась цель получения структуры с величиной шага $\Lambda > 5$ мкм, необходимость в создании конструкционной оболочки отпадала. В этой связи вторая стадия технологического процесса ограничивалась перетягиванием предволокна без его «шубирования» в волокно диаметром 50–200 мкм. На самом деле получить микроструктурированный световод можно и по одностадийной технологии, т.е. прямо из исходной сборки. Но в этом случае придется выполнять два противоречащих друг другу условия. Первое – температура нагревателя обязана быть достаточно высокой, так как это необходимо для коллапсирования межкапиллярных промежутков за счет низкой вязкости стекла и действия сил поверхностного натяжения в области образования луковицы заготовки. А второе условие гласит, что повышение температуры приводит к коллапсированию внутренних капиллярных полостей и снижению параметра содержания воздуха в микроструктурированном волокне. Таким образом, практически невозможно подобрать температуру вытяжки для получения заданной структуры, так как стремление сколлапсировать межкапиллярные промежутки приводит к получению монолитного волокна. В такой ситуации получить микроструктурированное волокно в одну стадию практически невозможно, если внутренний диаметр капилляров составляет около 1,5 мм (соотношение внутреннего и внешнего диаметров в исходной трубе 0,8). При получении волокна со значением k порядка 0,9 луковица раздувается под воздействием избыточного давления в капиллярах при всех возможных значениях температуры нагревателя.

Если же ставится задача получения волокна с малым значением k и (или) с относительно малым шагом структуры Λ , то решение задачи возможно благодаря тому, что в исходной сборке можно использовать капилляры с небольшим по величине внутренним диаметром. В этом случае, вследствие малого

радиуса кривизны поверхности, избыточное давление внутри капилляра уравнивается силами поверхностного натяжения.

Методы снижения затухания излучения

Одной из задач исследований являлась задача поиска технологических условий, выполнение которых делает затухание излучения определенного типа в микроструктурированных световодах минимальным [15]. Одним из методов, позволяющим изучить влияние технологической схемы на затухание излучения, является сравнение одно- и двухстадийного методов создания микроструктурированных световодов.

Как уже говорилось, одностадийный метод можно применять, когда капилляры в исходной сборке имеют небольшой внутренний диаметр. Исходя из этого, был выбран тип световода при проведении запланированного эксперимента – световод с сердцевинной, в которой было произведено замещение в исходной сборке 7 центральных капилляров. Кроме того, выбор вида световода вызван задачей проектирования такого передающего элемента, в котором излучение распространялось бы в одной поперечной моде по «большой сердцевине». Применение термина «большая сердцевина» к одномодовым оптическим волокнам на основе кварцевого стекла означает, что ее диаметр больше 10 мкм.

Представленные в [16] положения о ведущем значении Λ при формировании оптических потерь, которые обусловлены вытеканием излучения в микроструктурированных световодах, подвели к идее разработки световодов с сердцевинами, сформированными заменой в исходной гексагональной сборке 7 или 19 центральных капилляров одним стержнем, который образует затем сердцевину световода.

В отличие от дырчатых световодов с одноэлементной сердцевинной [17, 18] в созданных нами системах при равных диаметрах сердцевины шаг структур меньше в два и три раза. Это позволило получить большую устойчивость излучения к возмущениям световодного тракта. Кроме того, снижение шага структуры ведет к уменьшению размеров капилляров в исходной сборке. А из этого следует, что одностадийный процесс получения световода становится вполне реальным.

Для проведения эксперимента капилляры диаметром 1,3 мм, вытянутые из трубы марки F300, были уложены внутри опорной трубы из кварцевого стекла (соотношение диаметров 17 мм : 22 мм) в плотную гексагональную структуру. Кроме того, микроштабиками из синтетического кварцевого стекла были заполнены сегментарные промежутки между крайними капиллярами и внутренней окружностью опорной трубы. 7 центральных капилляров, как говорилось выше, были заменены одним стержнем из кварцевого стекла с низким содержанием гидроксильных групп.

В предварительных опытах [19] было определено, как влияет на величину потерь излучения в световодах температура вытягивания капилляров. Механизм таков: чем выше температура вытягивания, тем ниже в зоне луковицы заготовки вязкость стекла. Под воздействием сил поверхностного натяжения происходит более интенсивное «выглаживание» поверхностей капилляров. А это влечет снижение затухания.

В ходе экспериментов было замечено, что регистрируемое в процессе вытягивания свечение поверхностей капилляров (вызываемое распространением излучения вдоль капилляра из высокотемпературной области луковицы) сильно различается возле печи разогрева исходной трубы, до и после механизма вытягивания. Вытягивание капилляров происходило при помощи двух обрезиненных роликов, которые вращались в противоположных направлениях.

Свечение практически отсутствует на первом из перечисленных участков. После же прохода вытяжного механизма образуется множество светящихся точек на поверхности капилляра. Причина их появления, скорее всего, вызвана повреждением поверхности капилляра при контакте с вытяжным устройством, а также оседанием пылевидных частиц.

Отсюда было сделано заключение о целесообразности вытяжки капилляров бесконтактным методом. Например, это можно делать при помощи захватов, которые двигаются по направляющим от печи разогрева трубы до основания вытяжной башни. В этом случае, если расстояние между захватами превышает их размеры, то значительная величина поверхности капилляра не будет травмирована вытяжным механизмом.

При получении образцов с варьируемым параметром k в пределах 0,15–0,5 вытяжка световодов производилась двухстадийным методом. Этот метод был выбран потому, что при небольших значениях k (0,15–0,25), которые обеспечивают преимущества световодов с семиэлементной сердцевинной, двухстадийный метод оказался наиболее подходящим, так как получение небольших величин воздушности с заданной точностью может быть обеспечено лишь на второй стадии вытяжки волоконного световода.

Возможность осуществлять одностадийный процесс существует для образцов с $k \sim 0,4–0,5$ и не очень жесткими требованиями к соблюдению величины этого параметра. В этом случае изготавливаются капилляры с начальным соотношением внутреннего и внешнего диаметров в пределах 0,3–0,4.

После вытяжки капилляров происходила их нарезка на куски длиной 150–200 мм. После этого концы капилляров запаивались, и различными способами производилась очистка от механических примесей их внешней поверхности. Например, капилляры промывались изопропиловым спиртом, помещались в раствор фтористоводородной кислоты, после этого промывались дистиллированной водой, изопропиловым спиртом и осушались в потоке химически чистого азота. При другом методе капилляры промывались последовательно органическими растворителями с различной полярностью (четырёххлористый углерод и изопропиловый спирт) и осушались в потоке азота. Так как в ходе экспериментов при использовании перечисленных способов очистки капилляров не было замечено существенных отличий в величине оптических потерь в микроструктурированных световодах, то в дальнейшем как наиболее технологичный применялся метод, не требующий кислоты.

Главным следствием очистки капилляров в дырчатом световоде с высокой степенью воздушности структурированной оболочки ($k \sim 0,9$) явилось понижение затухания излучения в области $\lambda = 1550$ нм с нескольких десятков дБ/км до величины порядка 10 дБ/км [20].

На рис. 5 представлены результаты измерения спектров затухания излучения в образцах световодов, полученных по одностадийному и двухстадийному методам. Необходимо пояснить, что распространение излучения по световоду с параметром $k \sim 0,5$ происходит в режиме нескольких мод. Величина диаметра сердцевины световодов составляла 20 мкм. Как показывает рис. 5, при вытяжке световода по одностадийной схеме происходит снижение потерь излучения на порядок. Основная причина такой большой разницы в величине оптических потерь, по-видимому, заключается в разной степени спекаемости исходных элементов в процессе вытягивания световода.

При использовании двухстадийного метода вытяжка как предволокна, так и волоконного световода происходит при температуре нагревателя на 50–100°C ниже, чем при использовании одностадийного процесса. Кроме того, в одностадийном процессе величина скорости подачи заготовки в печь разогрева меньше на порядок и равна 1 мм/мин. Такие параметры, по всей видимости, являются хорошими начальными условиями для того, чтобы в конечном продукте (световоде) однородность стекломассы в промежутках между воздушными отверстиями, обусловленными высокотемпературными диффузионными процессами в области границы раздела капилляров, оказывалась лучше. А это является причиной более низкого уровня потерь излучения в световоде.

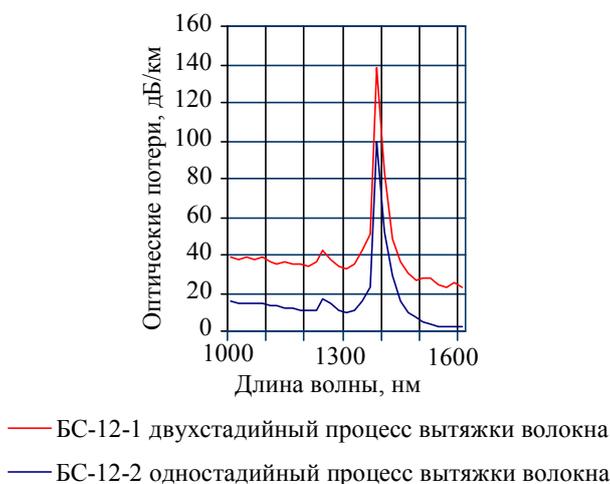


Рис. 5. Зависимость уровня оптических потерь излучения от технологической схемы получения световода с семиэлементной сердцевинной и значением параметра $k \sim 0,5$

Заключение

В результате исследований по разработке технологий получения микроструктурированных световодов были получены световоды с низкими оптическими потерями. Исследования оптических параметров микроструктурированных световодов показали, что эти объекты обладают большими возможностями, с одной стороны, как среды с выраженными нелинейно-оптическими свойствами, а с другой стороны — как средства передачи излучения с минимальными нелинейно-оптическими искажениями.

Разрабатываемые технологии производства микроструктурированных световодов из соображений конкурентоспособности должны выгодно отличаться малозатратностью и производительностью с максимально возможным использованием материалов отечественного производства. Кроме того, разработка конкурентоспособных микроструктурированных световодов диктует необходимость дальнейшего изучения технологических процессов для уменьшения затухания излучения и создания новых технических решений для улучшения этого параметра.

References

1. Yatsenko Yu.P., Levchenko A.E., Pryamikov A.D., Kosolapov A.F., Semjonov S.L., Dianov E.M. Four-wave mixing in two-layer microstructure fibres. *Quantum Electronics*, 2005, vol. 35, no. 8, pp. 715–719. doi:10.1070/QE2005v035n08ABEH010357
2. Wang S.-Y. *Microstructured optical fiber with improved transmission efficiency and durability*. Patent US 6418258 B1. Filing date: 09.06.00. Publication date: 09.07.02.
3. White C.A. *Microstructured multimode fiber*. Patent US 6594429 B1. Filing date: 20.10.00. Publication date: 15.07.03.
4. Russel P.S.T., Birks T.A., Knight J.C. *Photonic crystal fibers*. Patent US 6888992 B2. Filing date: 07.11.03. Publication date: 03.05.05.
5. Forbes L., Geusic J.E. *Hollow core photonic bandgap optical fiber*. Patent US 6829421 B2. Filing date: 13.03.02. Publication date: 07.12.04.
6. Korobeynikov A.G., Gatchin Yu.A., Dukel'skiy K.V., Eronyan M.A., Ter-Nersesyantz E.V., Nesterova N.A. Analiz sovmestimosti ftorsilikatnykh i borosilikatnykh sloev stekla dlya izgotovleniya opticheskogo volokna [Compatibility analysis of fluorine silicate and borosilicate glass layers for optical fiber manufacturing]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2012, no. 3 (79), pp. 15–18.
7. Korobeynikov A.G., Gatchin Yu.A., Dukel'skiy K.V., Ter-Nersesyantz E.V. Problemy proizvodstva vysokoprochnogo opticheskogo volokna [Aspects of high-strength optical fiber manufacture]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2013, no. 2 (84), pp.18–23.
8. Petrovskii G.T., Dukel'skii K.V., Kondrat'ev Yu.N., Khokhlov A.V., Shevandin V.S., Zheltikov A.M. Holey lightguides with a quartz core for nonlinear-optical conversion of laser-emission pulses. *Journal of Optical Technology*, 2006, vol. 73, no. 9, pp. 609–613. doi: 10.1364/JOT.73.000609
9. Yan M., Shum P. Antiguiding in microstructured optical fibers. *Optics Express*, 2004, vol. 12, no. 1, pp. 104–116.
10. Ferrarini D., Vincetti L., Zoboli M., Cucinotta A., Selleri S. Leakage properties of photonic crystal fibers. *Optics Express*, 2002, vol. 10, no. 23, pp. 1314–1319.
11. Morshnev S.K., Frantsesson A.V. Transmission of optical radiation by sharp bends in fiber-optical waveguides. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1982, vol. 12, no. 2, pp. 152–156. doi: 10.1070/QE1982v012n02ABEH005465
12. Ivanov S.I. Dopolnitel'nye poteri, obuslovlennyye neregulyarnostyami mnogomodovykh svetovodov [Additional losses caused by irregularities multimode lightguides]. *Elektrosvyaz'*, 1982, no. 1, pp. 41–44.
13. Jeunhomme L.B. *Single-mode fiber optics principles and applications*. NY, Marcel Dekker, 1983, 275 p.
14. Andreev A.Ts., Belov A.V., Vlasov A.V., Gur'yanov A.N., Dianov E.M., Zhits I.G., Inozemtsev V.P., Khopin V.F. Microbending losses in fiber waveguides and fiber-optic cables. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1980, vol. 10, no. 1, pp. 128–130. doi:10.1070/QE1980v010n01ABEH009880
15. Dukel'skiy K.V., Korobeynikov A.G., Ter-Nersesyantz E.V. Metody umen'sheniya opticheskikh poter' v fotonno-kristallicheskom opticheskom volokne [Reduction methods of optical losses in a photonic-crystal optical fibre]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2010, no. 3 (67), pp. 5–11.
16. Dukel'skii K.V., Kondrat'ev Yu.N., Komarov A.V., Ter-Nersesyants E.V., Khokhlov A.V., Shevandin V.S. How the pitch of a holey optical fiber affects its lightguide properties. *Journal of Optical Technology*, 2006, vol. 73, no. 11, pp. 808–811. doi: 10.1364/JOT.73.000808
17. Nielsen M.D., Folkenberg J.R., Mortensen N., Bjarklev A. Bandwidth comparison of photonic crystal fibers and conventional single-mode fibers. *Optics Express*, 2004, vol. 12, no. 3, pp. 430–435.
18. Nielsen M.D., Mortensen N.A., Albertsen A., Folkenberg J.R., Bjarklev A., Bonacinni D. Predicting macrobending loss for large-mode area photonic crystal fiber. *Optics Express*, 2004, vol. 12, no. 8, pp. 1775–1779.
19. Dukel'skii K.V., Komarov A.V., Ter-Nersesyants E.V., Khokhlov A.V., Shevandin V.S. Raboty GOI imeni S.I. Vavilova po snizheniyu zatukhaniya signala v mikrostrukturirovannykh opticheskikh voloknakh [Work Vavilov State Optical Institute to reduce signal attenuation in microstructured optical fibers]. *Trudy Mezhdunarodnykh nauchno-tehnicheskikh konferentsii "Intellektual'nye sistemy" (AIS'07) i "Intellektual'nye SAPR" (CAD-2007)* [Proc. of International conferences "Intelligent systems" (AIS'07) and "Intelligent CAD" (CAD-2007)]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2007, vol. 3, pp.160–166. (In Russ.)
20. Dukel'skii K.V., Komarov A.V., Kondrat'ev Yu.N., Ter-Nersesyants E.V., Khokhlov A.V., Shevandin V.S. Dyrchatye svetovody iz polikapillyarnoi sborki s zatukhaniem izlucheniya v 10 dB/km [Holey lightguides from polycapillary Assembly with the attenuation of emission 10 dB/km]. *Sbornik trudov VII Mezhdunarodnoi konferentsii "Prikladnaya optika"* [Proc. of the VII International conference "Applied optics"]. St. Petersburg, 2006, vol. 2, pp. 216–220. (In Russ.)

Коробейников Анатолий Григорьевич

– доктор технических наук, профессор, заместитель директора, Санкт-Петербургский филиал учреждения Российской академии наук «Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН» Санкт-Петербург, Россия, Korobeynikov_A_G@mail.ru

Гатчин Юрий Арменакович

– доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия, Gatchin@mail.ifmo.ru

- Дукельский Константин Владимирович* – кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия, KDukel@GOI.ru
- Тер-Нерсесянц Егеше Вавикович* – кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия, volokno@goi.ru
- Anatoly Korobeynikov* – D.Sc., Professor, Deputy director for science, Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences St. Petersburg Branch (SPbF IZMIRAN), Saint Petersburg, Russia, Korobeynikov_A_G@mail.ru
- Yury Gatchin* – D.Sc., Professor, Department head, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia, Gatchin@mail.ifmo.ru
- Konstantin Dukel'skiy* – PhD, Associate professor, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia, KDukel@GOI.ru
- Egеше Ter-Nersesyantz* – PhD, Associate professor, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia, volokno@goi.ru

УДК 681.7.064.454

МНОГОЗОННОЕ ПРОСВЕТЛЯЮЩЕЕ ПОКРЫТИЕ НА ПОДЛОЖКЕ ИЗ ОПТИЧЕСКОГО СУЛЬФИДА ЦИНКА

Тан Тай До^а, Л.А. Губанова^а

^аСанкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия, La7777@mail.ru

Представлена методика создания многозонного просветляющего покрытия на подложке из оптического сульфида цинка. Покрытие одновременно эффективно работает в нескольких спектральных диапазонах: в видимой области (450–700 нм), в ближней инфракрасной области (1000–1100 нм), на длине волны 1,55 мкм, а также в средней инфракрасной области спектра (3–5 мкм). Коэффициент отражения в диапазоне 450–700 нм не превышает 2%, в диапазоне 1000–1100 нм – менее 0,5%, в диапазоне 1500–1700 нм близок к 1,5% и в диапазоне 3–5 мкм – к 0,6%. В работе представлены результаты анализа влияния отклонений в толщинах слоев, формирующих разработанное покрытие, на изменение значения энергетического коэффициента отражения в рассматриваемых областях. Получено, что отклонение в толщине слоя, граничащего с воздухом, оказывает максимальное влияние на спектральную характеристику полученного покрытия. Отклонение показателя преломления этого слоя влияет на величину остаточного отражения.

Ключевые слова: просветляющие покрытия, градиентные покрытия, многозонные покрытия, сульфид цинка.

MULTI-ZONE ANTIREFLECTION COATING ON A SUBSTRATE MADE OF OPTICAL ZINC SULPHIDE

Тан Тай До^б, L. Gubanova^б

^бSaint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, La7777@mail.ru

The paper deals with creation technique for a multi-zone antireflection coating on a substrate made of the optical zinc sulphide ZnS. The coating effectively operates simultaneously in the following spectral ranges: visible region of 450 - 700 nm, in the near infrared region of 1000 - 1100 nm, at the wavelength of 1.55 μm , and in the mid-infrared (IR) spectrum of 3 - 5 microns. Reflection coefficient in the range of 450 - 700 nm is not more than 2%, in the range of 1000 - 1100 nm is less than 0.5%, in the range of 1500 - 1700 nm is close to 1.5% and in the range of 3 - 5 μm is equal to 0.6%. Analysis results of the deviation impact in the thickness of layers on the value changing of the energy reflection coefficient in the considered areas are given. Deviation in the thickness of the layer, contiguous with the air, is shown to have the greatest effect on the spectral characteristics of the obtained coating. Refractive index deviation for this layer influences the magnitude of the residual reflection.

Keywords: antireflection coatings, gradient coatings, multi-zone coatings, zinc sulphide.

Введение

Потребность в оптических приборах, способных работать в нескольких спектральных (видимой, ближней и средней инфракрасной (ИК)) областях, постоянно возрастает [1–7]. Такие системы оснащены датчиками, которые работают в определенной области спектра, и имеют ряд преимуществ, в том числе