

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ КОНТРОЛЯ КОНСТРУКТИВНО-ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

Введение

Микроструктурированные оптические волокна (МС-волокна) – новый тип оптических волноводов, чьи уникальные свойства представляют особенный интерес в контексте возможности решения насущных проблем современной оптики, лазерной физики, фотоники и телекоммуникаций.

Для передачи излучения в МС-волокнах служит сплошная или полая сердцевина, окруженная микроструктурированной оболочкой, содержащей систему ориентированных вдоль оси волокна цилиндрических воздушных каналов.

Эти волокна обычно изготавливаются из стекла, кварца или прозрачной пластмассы путем перетяжки из преформы, образованной из плотно упакованных трубок и стержней, собранной в соответствии с поперечным сечением волокна. В зависимости от структуры поперечного сечения эти волокна имеют различные свойства, такие как одномодовый режим распространения в широком спектральном диапазоне, большая/малая площадь модового поля для увеличения/уменьшения нелинейных эффектов, низкие или высокие потери на изгибах, высокая нелинейность для генерации гармоник и суперконтинуума, точно управляемые поляризация, дисперсия групповой скорости, спектр пропускания и двулучепреломление. Эти волокна уже производятся и используются на практике в ряде приложений.

Перспективы использования в лазерной технике, нелинейной оптике, импульсной спектроскопии, оптической томографии вызывают потребность в контроле конструктивно-геометрических параметров микроструктурированных волокон.

Анализ последних достижений

В настоящее время интенсивные исследования уникальных свойств микроструктурированных волокон ведутся несколькими научными группами. Реализуется новая архитектура оптического волокна, позволяющая варьировать в широком диапазоне дисперсионные свойства волноводных мод и степень локализации электромагнитного излучения в направляемых модах за счет управления геометрическими характеристиками волокна.

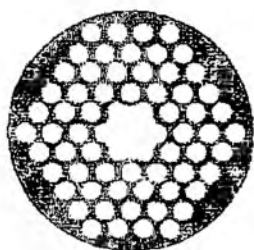
Разработаны и исследованы микроструктурированные волоконные световоды с различным типом сечения дырчатой оболочки [1], позволяющие решать широкий круг задач нелинейной оптики [2], оптической метрологии [3], лазерной физики [4] и биомедицинской оптики [6].

Проанализировано влияние геометрических параметров, таких как диаметр сердцевины волокна, структура дырчатой светоотражающей оболочки, толщина покрытия, concentricность слоев периодической структуры оболочки, на оптические свойства волокна [1, 5 – 7].

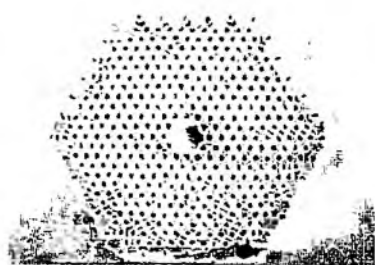
Кроме того, в большинстве случаев характеристики микроструктурированных волокон исследуются путем математического моделирования различными методами [1, 5]. При этом работа ведется с идеализированной моделью волокна (рис. 1, *а*), которая не всегда соответствует реальности (рис. 1, *б*). А следовательно, это ведет к погрешностям в расчетах характеристик микроструктурированных волокон.

Постановка задачи исследования

Геометрия является главным фактором, определяющим оптические свойства микроструктурированного волокна. При разработке микроструктурированных волокон различного профиля главная цель производителя оптоволокна – получить более точную геометрию волокна. Волокно, полученное с соблюдением более жестких допусков на его геометрию, гарантирует предсказуемость теоретически полученных характеристик.



а



б

Рис. 1

Задача обеспечения требуемых свойств МСВ является комплексной, включающей как этапы проектирования структуры волокон, так и этапы их производственной реализации. Роль контроля не ограничивается аттестацией достигнутых значений параметров. Он является средством управления формированием параметров непосредственно при изготовлении МСВ. Выбор метода контроля, его обоснование, определение характеристик базируется на количественном анализе влияния геометрических параметров на эксплуатационные свойства МСВ.

Цель работы – исследование особых требований к созданию методов контроля, возникающих исходя из структуры МСВ, направляющих свойств и особенностей существования того или иного режима их функционирования.

Исследование степени влияния конструктивно-геометрических параметров и их отклонений на эксплуатационные свойства МСВ

Востребованное применение микроструктурированных волокон накладывает определенные требования к точности формирования элементов структуры волокна в поперечном сечении, так как оптические свойства микроструктурированных волокон обусловлены периодической структурой оболочки и размером сердцевины. Управление дисперсией и профилем мод МС-волокон, как правило, осуществляется изменением формы сердцевины и структуры оболочки, а также варьированием геометрических параметров системы воздушных каналов в оболочке волокна.

Периодичность расположения воздушных отверстий в оболочке волокна является ключевым фактором для формирования волноводных мод в МС-волокнах с полый сердцевиной, так как за счет такой двумерно-периодической структуры оболочки волокна формируются фотонные запрещенные зоны [1, 7]. Теоретически в таких волокнах могут быть достигнуты затухания меньше минимального предельного затухания обычного ОВ (0,16 дБ/км), практически же, достижения здесь пока еще довольно скромные – 13 дБ/км). Уменьшение затухания на практике существенно зависит от точности формирования структуры МС-волокна.

Малейшие изменения в геометрической структуре поперечного сечения волокна вызывают значительные изменения его свойств. Потери при распространении света, вызванные разбросом геометрических параметров воздушных каналов (флуктуациями их диаметра и нерегулярностью расположения), составляют примерно 0,27 дБ/км), а это 45 % от суммарных потерь [7].

К геометрическим параметрам микроструктурированного оптического волокна можно отнести:

- диаметр воздушных отверстий, d ;
- межцентровое расстояние между соседними отверстиями (шаг), Λ ;
- количество концентрических периодических слоев, N ;
- нормированный диаметр отверстия, d/Λ ;
- расположение отверстий.

Варьированием каждым из указанных геометрических параметров можно регулировать оптические свойства.

Так, при уменьшении диаметра воздушных отверстий увеличивается рассеивание модового поля (рис. 2), а следовательно, и увеличиваются потери передаваемой энергии.

Одно из уникальных свойств МСВ – так называемый бесконечно одномодовый режим. Условием одномодового режима МСВ является выполнение неравенства

$$V_{\text{МКВ}} = 2\pi \frac{\Lambda}{\lambda} \sqrt{n_{\text{core}}^2 - n_{\text{clad}}^2} < 2,405.$$

Уже из условия одномодовости явно наблюдается четкая зависимость режимов распространения излучения в МСВ от геометрических параметров. На рис. 3 графически представлены границы областей существования возможных режимов распространения излучения в МСВ [2]. Верхняя область – область полного поглощения излучения оболочкой. Нижняя – область многомодового режима. Средняя – область одномодового распространения излучения. Таким образом, с помощью выбора геометрических параметров имеется возможность спроектировать и изготовить волокно нужного режима передачи излучения.

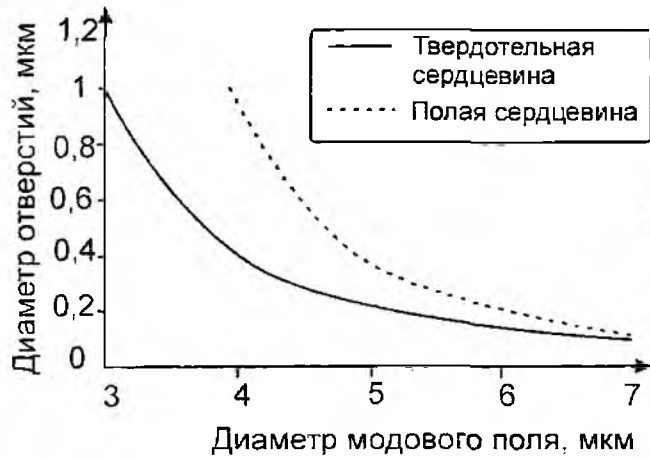


Рис. 2

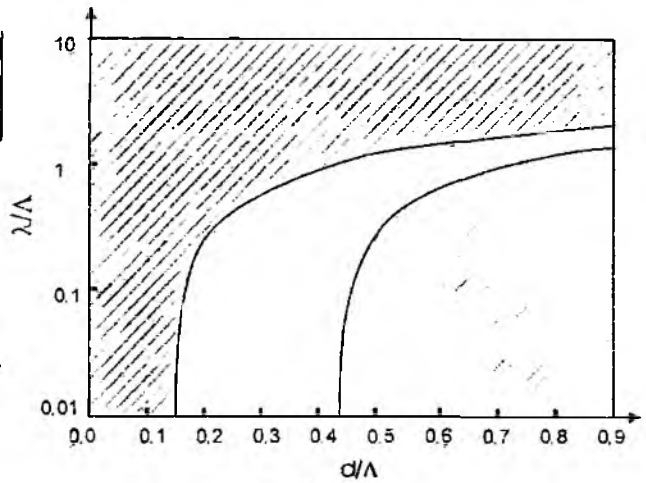


Рис. 3

Однако следует учитывать, что с уменьшением значения V -параметра увеличивается диаметр модового поля (рис. 4).

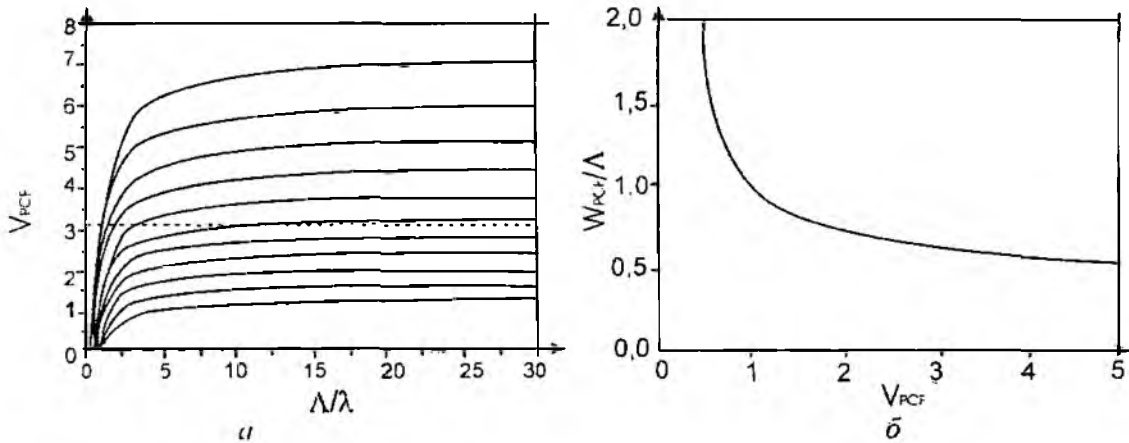


Рис. 4

Дисперсионные свойства волокна варьируются за счет изменения соотношения диаметра отверстия микроструктурированной оболочки к шагу гексагональной структуры d/Λ . С уменьшением данной величины наблюдается уменьшение дисперсии.

На рис. 5 представлены рассчитанные с помощью векторной модификации метода локализованных функций [2] спектральные зависимости дисперсии групповой скорости (ДГС) и параметра дисперсии третьего порядка β_3 для кварцевого МСВ, оболочка которого представляет собой микроструктуру (см. вставку на рис. 5, б), образованную воздушными отверстиями диаметром d . Для довольно малых Λ дисперсия групповой скорости для рассмотрен-

ного типа световодов проходит через нуль дважды. При довольно больших значениях отношения d/Λ изменение периода структуры оболочки Λ от 0,77 до 0,80 мкм приводит к перестройке длины волны λ_z , что отвечает второй нулевой точке ДГС, в диапазоне 970 – 1035 нм. Для длин волн, больших λ_z , рассмотренный тип световодов обеспечивает режим нормальной дисперсии ($\beta_2 > 0$, $D < 0$), одновременно удовлетворяя условию $\beta_3 < 0$, что и нужно для компенсации групповой задержки.

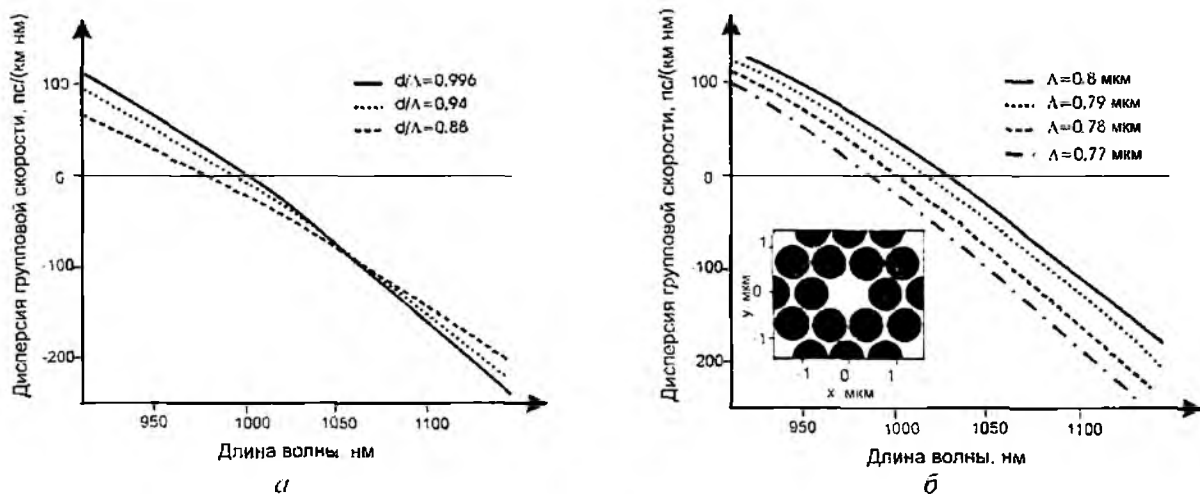


Рис. 5

За счет подбора значения нормированного диаметра отверстий микроструктурированной оболочки волокна существует возможность получения длины волны нулевой дисперсии в широком спектральном диапазоне (0,560 – 1,6 мкм). Такой существенный сдвиг длины волны нулевой дисперсии в видимую область объясняется тем, что в первом приближении коэффициент хроматической дисперсии представляет собой сумму материальной, волноводной и геометрической дисперсий (1), каждая из которых, в свою очередь, зависит от геометрии микроструктурной оболочки МСВ (2, 3)

$$D = - (M_m + M_w + M_p) \quad (1)$$

где M_m – материальная дисперсия, M_w – волноводная, M_p – дисперсия профиля.

Дисперсия профиля M_p (или геометрическая дисперсия) зависит от геометрических характеристик МСВ:

$$M_w = \frac{\lambda}{c} \int_0^{\infty} \frac{d^2 n(r)}{d\lambda^2} E^2(r) r dr; \quad (2)$$

$$M_p = \frac{(n_{cor} - n_{clad})}{c\lambda} \left(\frac{m_1}{n_{cor}} \right)^2 V^2 \frac{d^2 (BV)}{dV^2}. \quad (3)$$

Кроме того, необходимо учитывать и геометрическую дисперсию (рис. 6). На рисунке представлена рассчитанная зависимость геометрической дисперсии от длины волны при постоянном диаметре отверстий оболочки $a = 0,3$ мкм (рис. 4. а), шаге $\Lambda = 2,3$ мкм (рис. 6. б).

Как видим, при увеличении шага между отверстиями МСВ оболочки (0,4 мкм) приводит к сдвигу нулевого значения геометрической дисперсии приблизительно на 0,25 мкм. Незначительное увеличение значения диаметра отверстий оболочки (на 0,05 мкм) вызывает сдвиг нулевой геометрической дисперсии приблизительно на 0,15 мкм.

Для существенного сдвига длины волны нулевой дисперсии в коротковолновую область необходимо использовать волокна с большой разницей показателей преломления сердцевины и оболочки.

Структура МСВ из кварцевого стекла позволяет формировать волокна с разницей показателей преломления до 0,4. Эта разница достигается путем увеличения содержания воздуха

в оболочке (либо за счет увеличения диаметра воздушных отверстий, либо за счет уменьшения шага структуры).

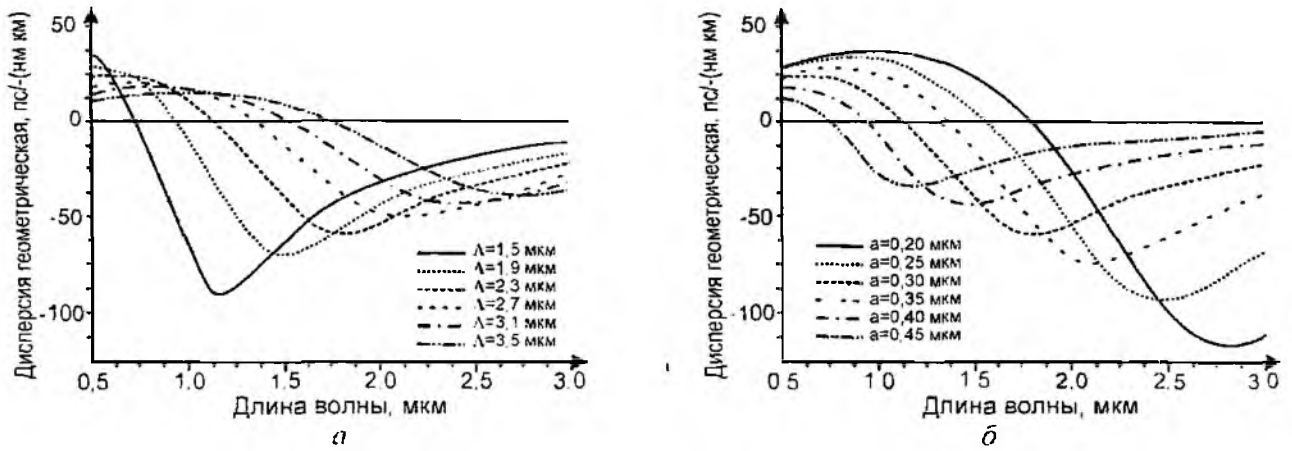


Рис. 6

Зависимость дисперсии от длины волны при постоянном значении шага между отверстиями оболочки (рис. 7, а), постоянном диаметре отверстий оболочки МСВ (рис. 7, б).

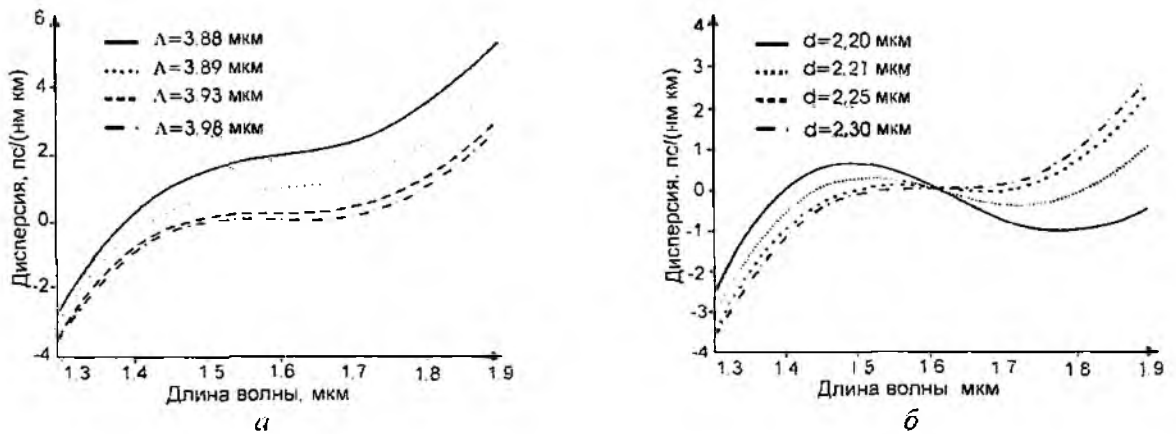


Рис. 7

В структуре оболочки микроструктурированных волокон присутствует конечное число периодических слоев, вследствие этого происходит тунелирование света через оболочку – частичное проникновение света за границы ограниченной периодической структуры и, следовательно, частичное истечение света из волокна [7]. Зависимость потерь на тунелирование света от длины волны при разном количестве периодических слоев в структуре МС волокна представлена на рис. 8, 9.

Выводы

Проведенный анализ показал, что обеспечение заданных характеристик, режимов работы МСВ и компонентов на их основе полностью определяется геометрическими параметрами структуры.

Как было показано, значение критических отклонений размеров, вызывающих кардинальное изменение эксплуатационных свойств, лежит в диапазоне менее 0,1 мкм.

Существующие методы и средства контроля параметров стандартных оптических волокон не удовлетворяют предъявляемым требованиям.

В настоящее время ведутся активные работы в области создания и исследования новых типов МСВ и их применения.

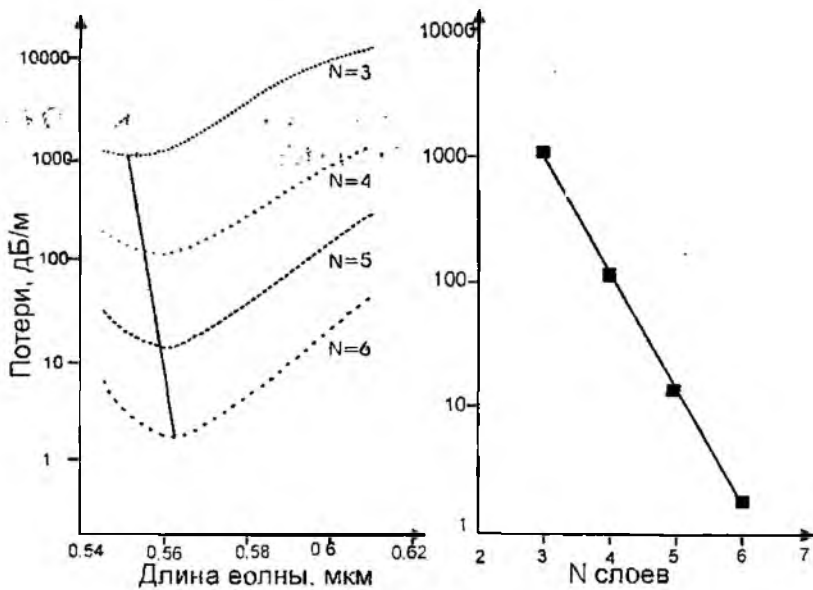


Рис. 8

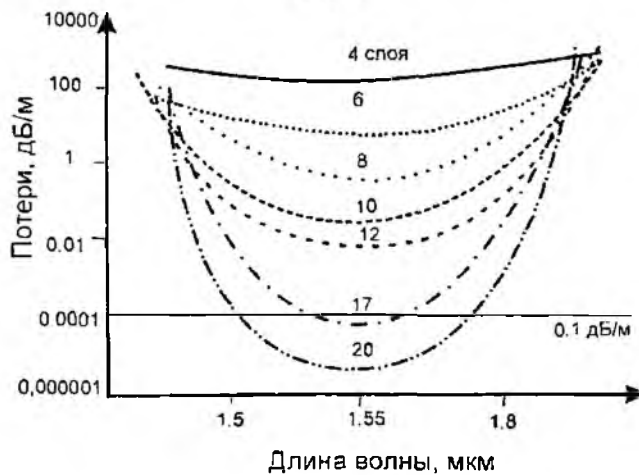


Рис. 9

Исходя из указанных особенностей, вопрос создания методов контроля конструктивно-геометрических параметров приобретает важное значение и направлен на повышение качества их изготовления, соответственное улучшение характеристик компонентов и систем в целом.

Направление дальнейших исследований связано с теоретическим обоснованием метода контроля, оценкой его параметров точности и воспроизводимости, создания средств контроля.

Список литературы: 1. А.М. Желтиков. Оптика микроструктурированных волокон. М.: Наука, 2004. 281 с. 2. Anatoly Efimov, Antoinette J. Taylor. Nonlinear generation of very high-order UV modes in microstructured fibers // OPTICS EXPRESS Vol. 11, No. 8. 3. P. Steinwurzel, C. Martijn de Sterke, M. J. Steel, B. T. Kuhlmey, and B. J. Eggleton. Single scatterer Fano resonances in solid core photonic band gap fibers // Opt. Express 14, No. 19. 4. W. J. Wadsworth, R. M. Percival, G. Bouwmans, J. C. Knight, and P. St. J. Russell. High power air-clad photonic crystal fibre laser // OPTICS EXPRESS 48, Vol. 11, No. 1. 5. Желтиков А.М. Микроструктурированные световоды для нового поколения волоконно-оптических источников и преобразователей световых импульсов // Успехи физических наук. Т. 177, №7. 6. Sangeeta Murugkar, Craig Brideau, Andrew Ridsdale, Majid Najil, Peter K. Stys, Hanan Anis I. Coherent anti-Stokes Raman scattering microscopy using photonic crystal fiber with two closely lying zero dispersion wavelengths // OPTICS EXPRESS Vol. 15, No. 21. 7. Павлова Е.Г. Механизмы потерь в фотонно-кристаллических волокнах // LIGHTWAVE Russian Edition. 2005. №3. P. 54-56.