

УДК 535.92

А.Н. Денисов, С.Л. Семенов

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук,
Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова, Москва, Россия

**ПОЛНОСТЬЮ СТЕКЛЯННЫЕ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ
ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ С БОЛЬШИМ ДИАМЕТРОМ
СЕРДЦЕВИНЫ И СПЕКТРАЛЬНЫМ ДИАПАЗОНОМ
ОДНОМОДОВОГО РЕЖИМА 0,87 – 1,36 МКМ**

Приведены результаты теоретических исследований полностью стеклянных микроструктурированных волоконных световодов (МВС) с сердцевинной диаметром 21 мкм, содержащих два слоя круглых элементов из легированного фтором кварцевого стекла с пониженным показателем преломления, разными диаметрами и различными расстояниями между собой. Численный анализ свойств этих МВС проведен с использованием метода конечных элементов. Рассчитаны потери на вытекание фундаментальных и высших мод в спектральном диапазоне от 0,75 до 1,45 мкм. Предложенная конфигурация МВС позволяет обеспечить спектральный диапазон одномодового режима от 0,87 до 1,36 мкм.

Ключевые слова: микроструктурированные волоконные световоды, одномодовые волоконные световоды, световоды с большим полем моды, метод конечных элементов.

A.N. Denisov, S.L. Semjonov

Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences,
Dianov Fiber Optics Research Center, Moscow, Russia

**ALL-GLASS MICROSTRUCTURED FIBERS WITH LARGE
CORE DIAMETER AND SINGLE-MODE GUIDANCE
IN THE SPECTRAL RANGE OF 0.87 – 1.36 MICRONS**

The present paper presents the results of numerical analysis of all-glass microstructured fibers (MSFs) with a core diameter of 21 μm , containing two rings of circular elements made of fluorine-doped silica glass with a reduced refractive index, different diameters and different distances between each other. The MSFs were characterized using the finite element method. Confinement losses for fundamental and higher-order modes were calculated in the spectral range of 0.75 to 1.45 microns. Simulation results show that the proposed design allows to obtain single-mode guidance of these MSFs in the spectral range of 0.87 to 1.36 microns.

Keywords: microstructured fiber, photonic crystal fiber, single-mode fiber, large-mode area fiber, finite element method.

Введение

В настоящее время большой интерес проявляется к развитию технологий мощных волоконных лазеров и усилителей, что обусловлено их высоким спросом во многих областях применений, включая обработку промышленных материалов, фундаментальные науки и медицину. Для них необходимы волоконные световоды с большим диаметром сердцевины и, соответственно, с большим полем моды, которые при этом сохраняют одномодовый режим [1–5]. Таким требованиям отвечают различные типы микроструктурированных волоконных световодов (МВС), включая волоконные световоды с фотонной запрещенной зоной [6–13], брэгговские световоды [14–17] и МВС с каналами вытекания [18–22]. Последний вариант является одним из достаточно простых способов получения одномодового МВС с большим полем моды и характеризуется кварцевой сердцевиной с оболочкой, образованной одним или двумя слоями воздушных отверстий. Однако МВС с воздушными отверстиями имеют некоторые недостатки, связанные со сложностью изготовления структур МВС с заданными параметрами, а также со стыковкой (свариванием) с обычными световодами из-за схлопывания отверстий, приводящего к дополнительным потерям. Таких недостатков лишены МВС, оболочка которых образована элементами из легированного фтором кварцевого стекла с пониженным показателем преломления [23–27]. Вместе с тем исследованные и изготовленные к настоящему времени варианты таких МВС имели ограниченные возможности в варьировании параметров, поскольку имели в своей основе гексагональную структуру, которая была обусловлена использованием метода сборки заготовок для МВС из стержней различного состава. Значительно больше возможностей дает метод высверливания отверстий в чистом кварцевом стержне с последующей вставкой в них легированных фтором кварцевых стержней и вытяжкой такой заготовки в МВС с нужными параметрами.

1. Описание геометрической структуры МВС

В настоящей работе мы представляем результаты теоретических исследований оригинального дизайна полностью стеклянного МВС, который был ранее предложен нами и теоретически частично исследован в работе [28]. Этот МВС имеет большую чисто кварцевую сердце-

вину и содержит два слоя круглых элементов вокруг нее из легированного фтором кварцевого стекла с пониженным показателем преломления, разными диаметрами и различными расстояниями между собой (рис. 1).

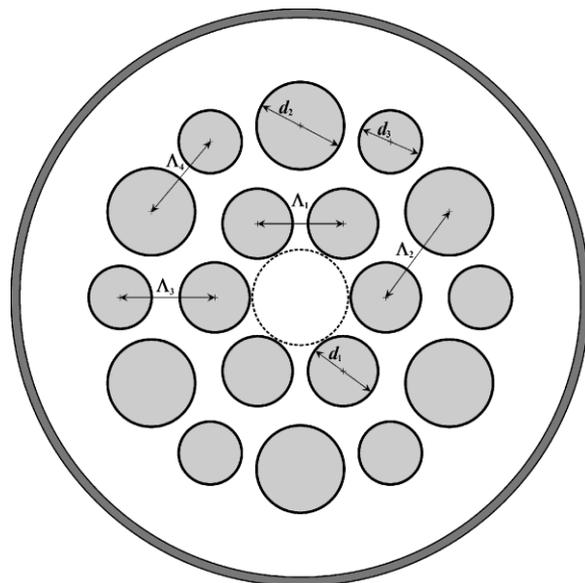


Рис. 1. Структура МВС-18 при $d_1/\Lambda_1 = 0,82$;
 $d_2/d_1 \approx 1,25$; $d_3/d_1 \approx 0,90$; $Z_{12}/Z_{11} = 1,82$

Сердцевина МВС, обозначенная пунктиром на рис.1, имеет диаметр D_{core} . Первый слой содержит шесть одинаковых круглых элементов диаметром d_1 , расположенных на расстоянии Λ_1 друг от друга. Таким образом, величина перемычки (зазора) между элементами первого слоя определяется выражением: $Z_{11} = \Lambda_1 - d_1$. Двенадцать элементов второго слоя имеют различные диаметры: $d_2 > d_1$ и $d_3 \leq d_2$, при этом элементы диаметром d_2 располагаются напротив перемычек между элементами первого слоя. Зазор между элементами диаметром d_2 второго слоя и элементами первого слоя определяется выражением:

$$Z_{12} = \Lambda_2 - d_1/2 - d_2/2.$$

Зазор между элементами диаметром d_3 второго слоя и элементами первого слоя рассчитывается как

$$Z_{13} = \Lambda_3 - d_1/2 - d_3/2.$$

Наконец, зазор между элементами второго слоя определяется выражением:

$$Z_{23} = \Lambda_4 - d_2/2 - d_3/2.$$

Этот вариант условно называется МВС-18, где 18 означает полное число элементов.

Такой алгоритм построения структуры МВС-18 дает широкие возможности для варьирования различных ее параметров с целью оптимизации характеристик МВС, в частности, потерь на вытекание для фундаментальных и высших мод. Определение наиболее оптимального соотношения параметров МВС-18 для конкретной задачи возможно с использованием алгоритма мультиобъектной оптимизации [29], однако на первом этапе мы выбрали простую задачу: получение одномодового режима для МВС-18 в спектральной области около 1,05 мкм. С целью обеспечения простоты изготовления МВС-18 мы выбрали отношение диаметров элементов d_2/d_1 , исходя из имеющихся у нас в наличии трубчатых алмазных сверл, используемых для изготовления заготовок: $d_2/d_1 = 3,5/3,0 \approx 1,17$. Также мы выбрали $d_3 = d_1$. Кроме того, мы выбрали достаточно простой вариант МВС-18 с равными зазорами между элементами первого и второго слоев: $Z_{12} = Z_{13}$. При этом зазоры между элементами второго слоя Z_{23} мы выбрали равными Z_{11} .

2. Результаты расчетов

Численные расчеты характеристик МВС-18 проводились с использованием метода конечных элементов (FEM) с цилиндрическим PML-слоем (perfectly matched layer), который условно обозначен темно-серым кольцом на рис.1. Расчеты проводились для МВС-18 с сердцевинной диаметром $D_{\text{core}} = 21$ мкм. В качестве материала для МВС-18 было выбрано кварцевое стекло с показателем преломления n_{sil} , который определялся с помощью уравнения Селлмейера [30], а для элементов из легированного фтором кварцевого стекла показатель преломления брался меньше на величину $\Delta n = 10^{-3} \times n_{\text{sil}}$.

На рис.2 приведены пространственные распределения интенсивности двух поляризаций фундаментальной моды (1 и 2) и четырех высших мод (условно обозначенных цифрами от 3 до 6 в порядке убывания действительной части их эффективного показателя преломления n_{eff}) для МВС-18 при $d_1/\Lambda_1 = 0,85$ и $Z_{12}/Z_{11} = 1,88$ на длине волны 0,9 мкм.

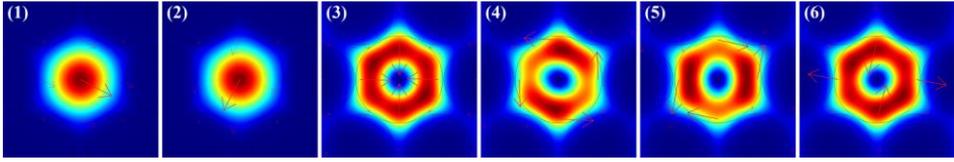


Рис. 2. Пространственные распределения интенсивности фундаментальных (1, 2) и высших (3 – 6) мод МВС-18 при $d_1/\Lambda_1 = 0,85$ и $Z_{12}/Z_{11} = 1,88$ на длине волны 0,9 мкм

Моды 1 и 2 относятся к типу HE_{11} , различаются только поляризацией; мода 3 относится к типу TM_{01} ; мода 4 относится к типу TE_{01} ; моды 5 и 6 относятся к типу HE_{21} , различаются направлением векторов электрического поля [31]. Диаметры поля фундаментальной моды 1 по уровню $1/e^2$ на длине волны 1,05 мкм равны: $MFD_x = 20,5$ мкм (по оси x) и $MFD_y = 21,8$ мкм (по оси y).

Потери на вытекание α (в дБ/м) определялись по получаемой в расчетах мнимой части эффективного показателя преломления k_{eff} с помощью выражения [32]:

$$\alpha = \frac{20}{\ln(10)} \cdot \frac{2\pi}{\lambda} k_{eff}$$

Длинноволновая граница одномодового режима λ_{LW} определялась из условия: потери на вытекание для фундаментальных мод $< 0,1$ дБ/м, а коротковолновая граница λ_{SW} – из условия потерь на вытекание для высших мод $> 1,0$ дБ/м [18].

На рис. 3 приведены спектральные зависимости потерь на вытекание для основных (фундаментальных) и высших мод МВС-18 при значениях параметров $d_1/\Lambda_1 = 0,85$ и $Z_{12}/Z_{11} = 1,88$. Потери для основной моды 1 практически совпадают с потерями основной моды 2, поэтому представлены одной зависимостью, потери для мод 5 и 6 тоже практически совпадают, поэтому также представлены одной зависимостью. Также на этих рисунках обозначены уровни потерь 0,1 и 1,0 дБ/м, которые позволяют определять границы λ_{LW} и λ_{SW} . Как видно из рис.3, для выбранных параметров МВС-18 спектральный диапазон одномодового режима составляет от 0,87 до 1,36 мкм.

Стоит отметить, что для длин волн более $\sim 0,9$ мкм высшие моды 3–6 приобретают заметную долю интенсивности в области между слоями отверстий, которую для удобства назовем «кольцевым зазором». При этом проявляются дополнительные моды, которые имеют в

сердцевине МВС-18 такие же пространственные распределения интенсивности, как и соответствующие моды 3 – 6, но иные соотношения интенсивностей в сердцевине и в кольцевом зазоре, а также отличающиеся уровни потерь на вытекание.

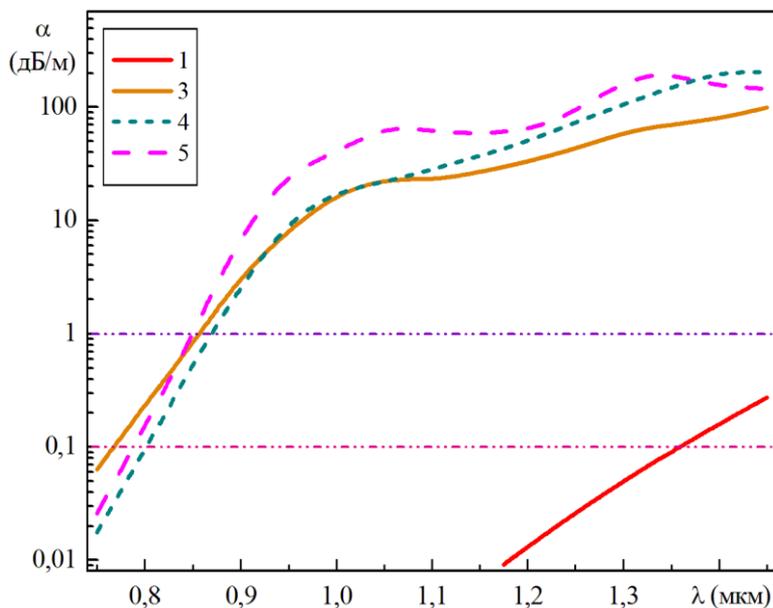


Рис. 3. Потери на вытекание основной (1) и высших (3 – 5) мод МВС-18 при $d_1/\Lambda_1 = 0,85$ и $Z_{12}/Z_{11} = 1,88$

Кроме того, они различаются значениями действительных частей эффективных показателей преломления n_{eff} , поэтому обозначим эти моды M_a , M_b , M_c и т.д. (где M – номер моды от 3 до 6) в порядке уменьшения их n_{eff} . Поскольку для нашей задачи нахождения спектрального диапазона одномодового режима МВС-18 главным является определение минимальных потерь для высших мод, то для приведенных на рис. 3 спектральных зависимостей мы выбирали из нескольких M_i только ту, которая имела меньшие потери на вытекание для конкретной длины волны (для каждого M).

Для иллюстрации изложенного на рис. 4 приведены пространственные распределения интенсивностей мод 4a, 4b и 4c для нескольких длин волн, а на рис. 5 приведены спектральные зависимости потерь на вытекание для этих же мод.

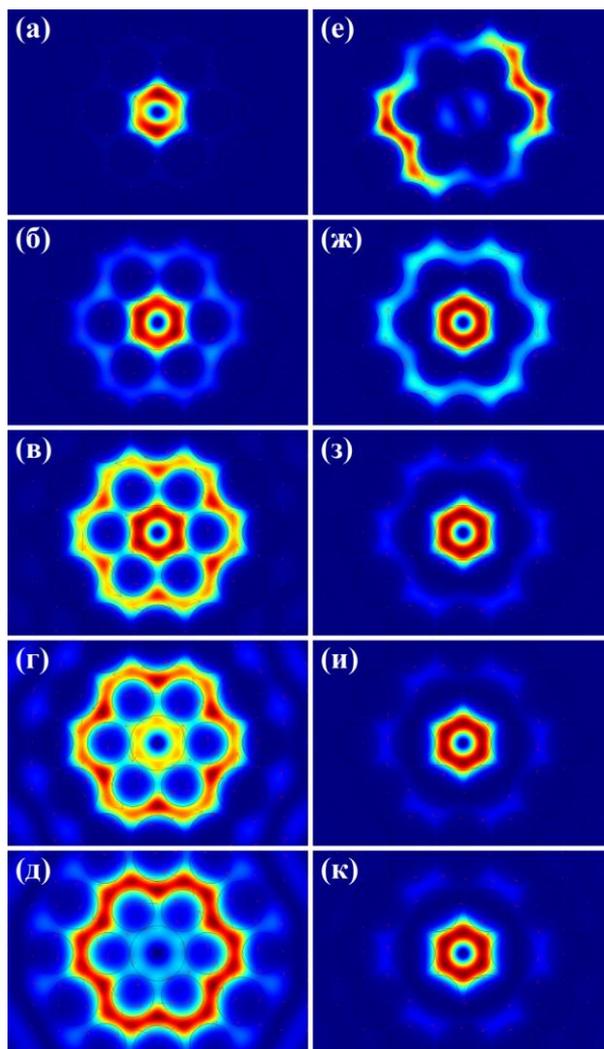


Рис. 4. Пространственные распределения интенсивности моды 4а ($a - d$) для длин волн 0,825, 0,950, 1,050 и 1,150 мкм; моды 4с для длины волны 1,300 мкм (d) и моды 4б ($e - k$) для длин волн 0,825, 0,950, 1,050, 1,150 и 1,300 мкм

Как видно из рис. 4, основное отличие мод 4а и 4б заключается в ориентации вектора электрического поля в кольцевом зазоре: для моды 4а этот вектор направлен, как и вектор электрического поля моды в сердцевине МВС-18, против часовой стрелки, а для моды 4б этот вектор направлен по часовой стрелке. Исключение составляет самый коротковолновый диапазон спектра, где направления векторов электрического поля меняются на противоположные, причем как в сердцевине, так и в кольцевом зазоре.

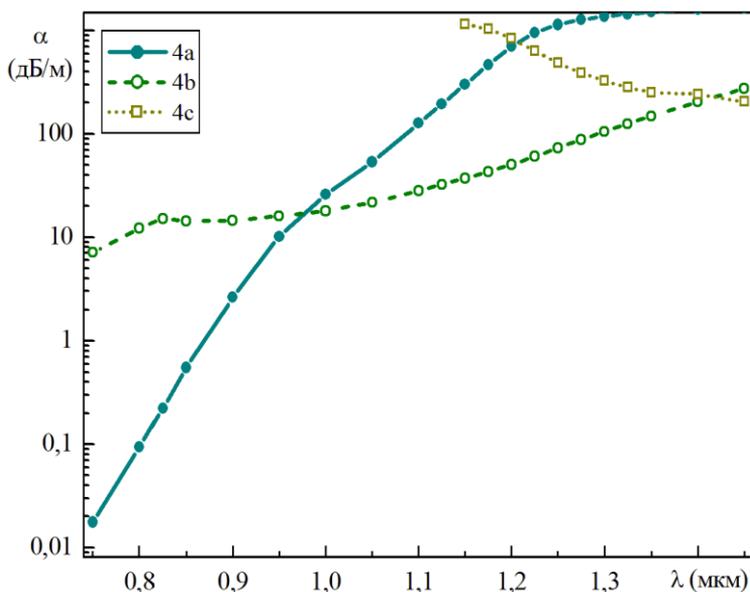


Рис. 5. Спектральные зависимости потерь на вытекание для мод 4а, 4b и 4с для МВС-18 при $d_1/\Lambda_1 = 0,85$ и $Z_{12}/Z_{11} = 1,88$

Что касается моды 4с, то из сравнения рис. 4, з, и рис 4, д, видно, что эта мода, как и мода 4а, имеет такие же направления векторов электрического поля, как в сердцевине МВС-18, так и в кольцевом зазоре, однако отличается небольшими дополнительными локальными максимумами, расположенными с внешней стороны второго слоя элементов, в частности, отличается направлением векторов электрического поля в этой области.

Итоговая спектральная зависимость потерь на вытекание для моды 4, приведенная на рис. 3, представляет собой минимум из трех кривых для мод 4а, 4b и 4с, приведенных на рис. 5: для длин волн $< 0,975$ мкм минимальные потери на вытекание имеет мода 4а; затем для длин волн $< 1,425$ мкм минимальные потери на вытекание имеет мода 4b; и, наконец, для длин волн $> 1,425$ мкм минимальные потери на вытекание имеет мода 4с.

Для высших мод 3, 5 и 6 наблюдается в целом похожая картина, т.е. для них также наблюдаются две (или более) близких по пространственному распределению интенсивности в сердцевине МВС-18 моды 3а и 3b; 5а и 5b; 6а и 6b. Но есть и небольшие отличия.

Во-первых, пространственное распределение интенсивности для этих мод в кольцевом зазоре имеет свой специфический характер, от-

личный от распределения для мод 4а и 4б, в основном обусловленный различным сочетанием направлений векторов электрического поля в сердцевине МВС-18 и в кольцевом зазоре. Для иллюстрации на рис. 6 приведены пространственные распределения интенсивности мод 3а (см. рис. 6, а) и 3б (см. рис. 6, б) для длины волны 0,825 мкм, а также мод 5а (в) и 5б (г) для длины волны 1,300 мкм.

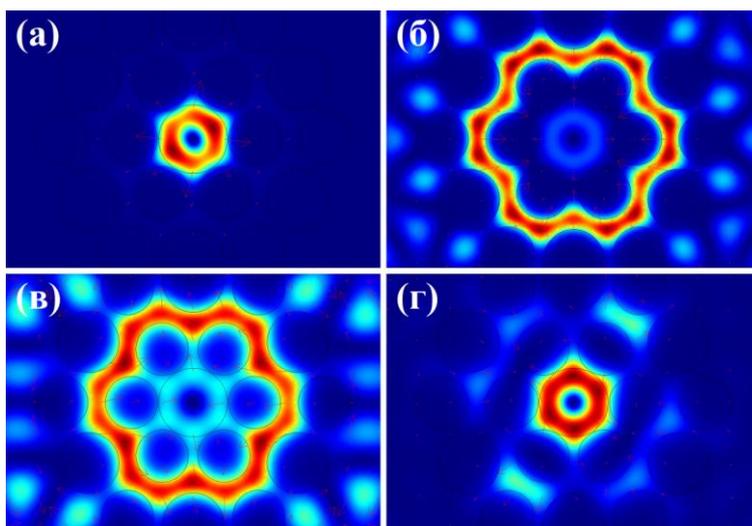


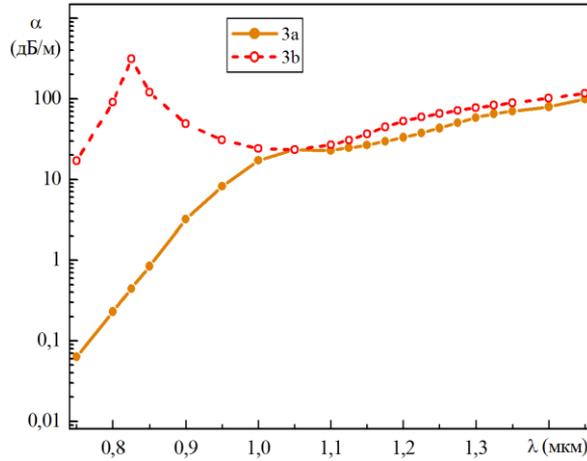
Рис. 6. Пространственные распределения интенсивности мод 3а (а) и 3б (б) для длины волны 0,825 мкм, а также мод 5а (в) и 5б (г) для длины волны 1,300 мкм

Во-вторых, реальное значение для определения итоговых спектральных зависимостей потерь на вытекание для мод 3 и 5, приведенных на рис. 3, имеют только по две моды 3а и 3б; 5а и 5б, так как следующие (3с и 5с) обладают существенно более высокими потерями на вытекание. На рис. 7 приведены спектральные зависимости потерь на вытекание для мод 3а и 3б (см. рис. 7, а); 5а и 5б (см. рис. 7, б).

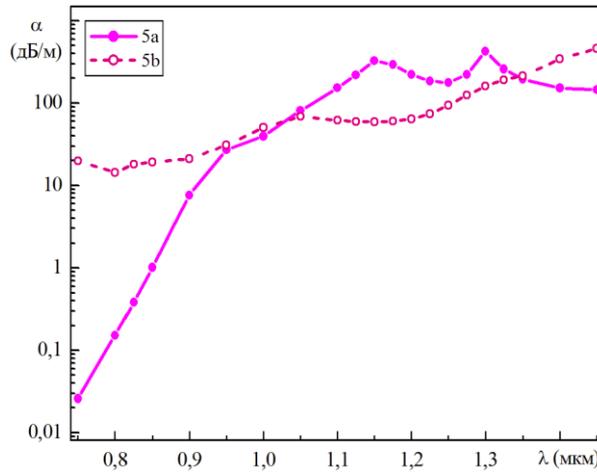
Таким образом, спектральная зависимость потерь на вытекание для моды 3, приведенная на рис. 3, совпадает со спектральной зависимостью потерь на вытекание для моды 3а, приведенной на рис. 7, а, поскольку она имеет меньшее значение во всем спектральном диапазоне, чем для моды 3б.

Стоит отметить также локальный максимум потерь на вытекание для моды 3б на длине волны 0,825 мкм, который обусловлен, как видно из рис. 6, б, появлением дополнительных локальных максимумов в пространственном распределении интенсивности этой моды, располо-

женных с внешней стороны второго слоя элементов, что и приводит к росту ее потерь на вытекание. Резонансный характер этого локального максимума потерь на вытекание для моды 3b обусловлен, вероятно, резонансным влиянием параметров структуры МВС-18 на характеристики этих дополнительных локальных максимумов в пространственном распределении интенсивности этой моды.



а



б

Рис. 7. Спектральные зависимости потерь на вытекание для мод 3а и 3б (а); 5а и 5б (б) для МВС-18 при $d_1/\Lambda_1 = 0,85$ и $Z_{12}/Z_{11} = 1,88$

Что касается итоговой спектральной зависимости потерь на вытекание для моды 5, приведенной на рис. 3, то она представляет собой минимум из двух кривых для мод 5a и 5b, приведенных на рис. 7, б: для длин волн $<1,025$ мкм минимальные потери на вытекание имеет мода 5a; затем для длин волн $<1,340$ мкм минимальные потери на вытекание имеет мода 5b; и, наконец, для длин волн $>1,340$ мкм минимальные потери на вытекание опять имеет мода 5a.

Отметим, что мода 5a имеет два локальных максимума потерь на вытекание на длинах волн $\sim 1,155$ и $1,300$ мкм. Они обусловлены, как и максимум для моды 3b на длине волны $0,825$ мкм, появлением дополнительных локальных максимумов в пространственном распределении интенсивности моды 5a, расположенных с внешней стороны второго слоя элементов, что и приводит к росту ее потерь на вытекание (см. рис. 6, в). Резонансный характер этих локальных максимумов потерь на вытекание для моды 5a также обусловлен, вероятно, резонансным влиянием параметров структуры МВС-18 на характеристики дополнительных локальных максимумов в пространственном распределении интенсивности этой моды.

3. Обсуждение результатов

Стоит отметить несколько интересных моментов.

В настоящей работе принята условная нумерация высших мод от 3 до 6 в порядке убывания действительной части их эффективного показателя преломления n_{eff} , как это было предложено ранее в работе [33] для МВС-30 с воздушными отверстиями и сердцевинной диаметром $3,27$ мкм. При этом оказывается, что высшие моды в МВС-18 располагаются в другом порядке в соответствии с их типом: на 3 месте оказывается мода, относящаяся к типу TM_{01} , тогда как для МВС-30 эта мода находится на 6 месте (см. рис. 2 настоящей работы и, соответственно, рис. 2 из [33]). Вероятно, основную роль в таком порядке мод по типам играет очень маленький контраст показателя преломления между сердцевинной и элементами оболочки для МВС-18, а также, возможно, существенно больший размер сердцевины.

В предыдущей работе [28] была допущена неточность, поскольку разница в показателях преломления высших мод для большей части спектрального диапазона менее 10^{-6} , так что условная нумерация высших мод была проведена по типам по аналогии с работой [33], поэтому

обозначения мод на рис. 3 отличаются от обозначений на рис. 2 работы [28]. В частности, на длине волны 0,900 мкм для всех четырех мод 3 – 6 с точностью до 10^{-6} получается $n_{eff} = 1,451247$, а их порядок определяется менее значимыми частями, которые в стандартном режиме не отображаются в программном пакете. Какого-либо влияния на основные выводы работы [28] этот факт не имеет, да и сам принцип условной нумерации мод пока что имеет предварительный характер, предложенный нами в работе [33]. Кроме того, n_{eff} для разных высших мод может по-разному изменяться с длиной волны, так что, строго говоря, порядок мод может меняться. Но это отдельный вопрос, который может быть исследован дополнительно. А в настоящей работе для простоты порядок мод во всем спектральном диапазоне сохраняется в соответствии с зафиксированным для длины волны 0,900 мкм.

Еще одно небольшое отличие рис. 3 от рис. 2 из работы [28] проявляется для области длин волн более 1,0 мкм, где потери на вытекание высших мод достаточно высоки (более 10 дБ/м). Это отличие обусловлено более подробным шагом по длине волны при проведении расчетов, а также более точным выбором конкретных вариантов высших мод (Ma, Mb или Mc) из нескольких проявляющихся в этом спектральном диапазоне, что было подробно описано выше. В целом разница весьма незначительна, так что основные выводы, сделанные в работе [28], остаются в силе.

Стоит подчеркнуть, что проведенные расчеты показывают важность рассмотрения всех значимых высших мод для корректной оценки диапазона одномодового режима МВС, а также таких параметров, как уровни потерь на вытекание высших мод, которые могут быть важны для конкретных задач. Однако зачастую в литературе выбирается только какая-либо одна из высших мод, причем даже не указывается какая именно, и этим расчеты ограничиваются. В результате полученные выводы могут оказаться не вполне обоснованными.

Одним из важных параметров МВС для мощных волоконных лазеров и усилителей является их стойкость к изгибу. Как было показано в работе [28], рассмотренный вариант МВС-18 способен сохранять одномодовый режим при радиусе изгиба 25 см, причем итоговый спектральный диапазон остается достаточно широким: от 0,87 до 1,11 мкм. Поэтому необходимы дальнейшие более подробные исследования чув-

ствительности МВС-18 к изгибу, в частности, определение спектральных диапазонов одномодового режима при разных радиусах изгиба, которые будут проведены в следующей работе.

Заключение

Проведены теоретические исследования полностью стеклянных микроструктурированных волоконных световодов с сердцевинной диаметром 21 мкм, содержащих два слоя круглых элементов из легированного фтором кварцевого стекла с пониженным показателем преломления, разными диаметрами и различными расстояниями между собой. Для расчетов характеристик этих МВС использовался метод конечных элементов. Приведены спектральные зависимости потерь на вытекание фундаментальных и высших мод в диапазоне от 0,75 до 1,45 мкм. Показано, что рассмотренный МВС-18 позволяет получить одномодовый режим в спектральном диапазоне от 0,87 до 1,36 мкм, следовательно, может представлять интерес для таких применений, как передача мощного лазерного излучения и для использования в мощных волоконных лазерах и усилителях.

Список литературы

1. ~900W Single-mode CW Power From a 60 μm -core Ytterbium-doped All-solid Photonic Bandgap Fiber Laser / F. Kong, G. Gu, T.W. Hawkins, M. Jones, J. Parsons, M.T. Kalichevsky-Dong, B. Pulford, I. Dajani, L. Dong // *Frontiers in Optics*. – 2016. – OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2016). – Paper FW5B.3.
2. Single-mode Yb-doped Double-clad All-solid Photonic Bandgap Fiber Laser Generating 27.8W at 976nm / T. Matniyaz, M.T. Kalichevsky-Dong, T.W. Hawkins, J. Parsons, G. Gu, W. Li, M. Faykus, B. Selee, J.A. Dong, L. Dong // *Laser Congress*. – 2018 (ASSL). – OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2018). – Paper AM6A.28.
3. 272 W quasi-single-mode picosecond pulse laser of ytterbium-doped large-mode-area photonic crystal fiber / M. Wang, F. Wang, S. Feng, C. Yu, S. Wang, Q. Zhou, L. Zhang, F. Lou, D. Chen, L. Hu // *Chin. Opt. Lett.* – 2019. – Vol. 17, № 7. – P. 071401–071405.
4. Large-mode-area optical fiber for photonic nanojet generation / R. Pierron, G. Chabrol, S. Roques, P. Pfeiffer, J.-P. Yehouessi, G. Bouwmans, S. Lecler // *Opt. Lett.* – 2019. – Vol. 44, № 10. – P. 2474–2477.

5. 302 W single-mode power from an Er/Yb fiber MOPA / T. Matniyaz, F. Kong, M.T. Kalichevsky-Dong, L. Dong, // *Opt. Lett.* – 2020. – Vol. 45, № 10. – P. 2910–2913.

6. Single-mode all-silica photonic bandgap fiber with 20- μm mode-field diameter / O.N. Egorova, S.L. Semjonov, A.F. Kosolapov, A.N. Denisov, A.D. Pryamikov, D.A. Gaponov, A.S. Biriukov, E.M. Dianov, M.Y. Salganskii, V.F. Khopin, M.V. Yashkov, A.N. Gurianov, D.V. Kuksenkov // *Opt. Express* – 2008. – Vol. 16, № 16. – P. 11735–11740.

7. Одномодовый волоконный световод с фотонной запрещенной зоной и сердцевиной из кварцевого стекла, легированного ионами иттербия / О.Н. Егорова, С.Л. Семенов, В.В. Вельмискин, М.Ю. Салганский, М.В. Яшков, А.Н. Гурьянов, Е.М. Дианов // *Квант. электроника* – 2010. – Т. 40, № 12. – С. 1137–1140.

8. Low bending loss and effectively single-mode all-solid photonic bandgap fiber with an effective area of 650 μm^2 / M. Kashiwagi, K. Saitoh, K. Takenaga, S. Tanigawa, S. Matsuo, M. Fujimaki // *Opt. Lett.* – 2012. – Vol. 37, № 8. – P. 1292–1294.

9. Effectively single-mode all-solid photonic bandgap fiber with large effective area and low bending loss for compact high-power all-fiber lasers / M. Kashiwagi, K. Saitoh, K. Takenaga, S. Tanigawa, S. Matsuo, M. Fujimaki // *Opt. Express.* – 2012. – Vol. 20, № 14. – P. 15061–15070.

10. Design optimization of large-mode-area all-solid photonic bandgap fibers for high-power laser applications / S. Saitoh, K. Saitoh, M. Kashiwagi, S. Matsuo, L. Dong // *J. Lightwave Technol.* – 2014. – Vol. 32, № 3. – P. 440–449.

11. Ytterbium-doped large-mode-area all-solid photonic bandgap fiber lasers / G. Gu, F. Kong, T. Hawkins, J. Parsons, M. Jones, C. Dunn, M.T. Kalichevsky-Dong, K. Saitoh, L. Dong // *Opt. Express.* – 2014. – Vol. 22, № 11. – P. 13962–13968.

12. Efficient 240W single-mode 1018nm laser from an Ytterbium-doped 50/400 μm all-solid photonic bandgap fiber / F. Kong, G. Gu, T.W. Hawkins, M. Jones, J. Parsons, M.T. Kalichevsky-Dong, S.P. Palese, E. Cheung, L. Dong, // *Opt. Express.* – 2018. – Vol. 26, № 3. – P. 3138–3144.

13. Highly efficient cladding-pumped single-mode three-level Yb all-solid photonic bandgap fiber lasers / T. Matniyaz, W. Li, M. Kalichevsky-

Dong, T.W. Hawkins, J. Parsons, G. Gu, L. Dong // *Opt. Lett.* – 2019. – Vol. 44, № 4. – P. 807–810.

14. Low-loss singlemode large mode area all-silica photonic bandgap fiber / S. Février, R. Jamier, J.-M. Blondy, S.L. Semjonov, M.E. Likhachev, M.M. Bubnov, E.M. Dianov, V.F. Khopin, M.Y. Salganskii, A.N. Guryanov // *Opt. Express.* – 2006. – Vol. 14, №2. – P. 562–569.

15. Large-mode-area Bragg fiber with microstructured core for suppression of high-order modes / S.S. Aleshkina, M.E. Likhachev, A.D. Pryamikov, D.A. Gaponov, A.N. Denisov, S.L. Semjonov, M.M. Bubnov, M.Yu. Salganskii, A.N. Guryanov // *Proc. SPIE.* – 2010. – Vol. 7714. – P. 771413 (1-11).

16. Very-large-mode-area photonic bandgap Bragg fiber polarizing in a wide spectral range / S.S. Aleshkina, M.E. Likhachev, A.D. Pryamikov, D.A. Gaponov, A.N. Denisov, M.M. Bubnov, M.Yu. Salganskii, A.Yu. Laptev, A.N. Guryanov, Y.A. Uspenskii, N.L. Popov, S. Février // *Opt. Lett.* – 2011. – Vol. 36, № 18. – P. 3566–3568.

17. Polarization-maintaining and single-mode large mode area pixelated Bragg fiber / O. Vanvincq, R. Habert, A. Cassez, K. Baudelle, D. Labat, S. Delobel, Y. Quiquempois, G. Bouwmans, L. Bigot // *Opt. Lett.* – 2020. – Vol. 45, № 7. – P. 1946–1949.

18. Breaking the limit of maximum effective area for robust single-mode propagation in optical fibers / W.S. Wong, X. Peng, J.M. McLaughlin, L. Dong // *Opt. Lett.* – 2005. – Vol. 30, № 21. – P. 2855–2857.

19. Dong L., X. Peng, J. Li Leakage channel optical fibers with large effective area // *J. Opt. Soc. Am. B.* – 2007. – Vol. 24, № 8. – P. 1689–1697.

20. Single-Mode Large-Mode-Area Leakage Channel Fibers with Octagonal Symmetry / L. Rosa, K. Saitoh, Y. Tsuchida, S.K. Varshney, M. Koshiba, F. Poli, D. Passaro, A. Cucinotta, S. Selleri, L. Vincetti // *Conference Integrated Photonics and Nanophotonics Research and Applications.* – July 2008. – Paper IWB3. DOI: 10.1364/IPNRA.2008.IWB3.

21. Impact of fiber outer boundaries on leaky mode losses in leakage channel fibers / G. Gu, F. Kong, T.W. Hawkins, P. Foy, K. Wei, B. Samson, L. Dong // *Opt. Express.* – 2013. – Vol. 21, № 20. – P. 24039–24048.

22. High-energy nanosecond-pulses from a flat-top mode 50 μm -core ytterbium-doped leakage channel fiber / P. Calvet, A. Perrin, P. Gouriou, B. Samson, T.W. Hawkins, F. Kong, L. Dong, P. Dupriez, E. Hugonnot //

Advanced Photonics. – 2014. – OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2014). – Paper SoM3B.4.

23. Design of all-solid leakage channel fibers with large mode area and low bending loss / K. Saitoh, Y. Tsuchida, L. Rosa, M. Koshiba, F. Poli, A. Cucinotta, S. Selleri, M. Pal, M. Paul, D. Ghosh, S. Bhadra // *Opt. Express*. – 2009. – Vol. 17, № 6. – P. 4913–4919.

24. Large effective mode area optical fibers for high-power lasers / L. Dong, J. Li, H.A. McKay, L. Fu, B.K. Thomas // *Proc. SPIE* – 2009. – Vol. 7195. – P. 71950N1–71950N8.

25. All-glass large-core leakage channel fibers / L. Dong, T. Wu, H.A. McKay, L. Fu, J. Li, H.G. Winful // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* – 2009. – Vol. 15, № 1. – P. 47–53.

26. Extending Effective Area of Fundamental Mode in Optical Fibers / L. Dong, H.A. McKay, A. Marcinkevicius, L. Fu, J. Li, B.K. Thomas, M.E. Ferrmann // *J. Lightwave Technol.* – 2009. – Vol. 27, № 11. – P. 1565–1570.

27. Limitation on Effective Area of Bent Large-Mode-Area Leakage Channel Fibers / K. Saitoh, S. Varshney, K. Sasaki, L. Rosa, M. Pal, M.C. Paul, D. Ghosh, S.K. Bhadra, M. Koshiba // *J. Lightwave Technol.* – 2011. – Vol. 29, № 17. – P. 2609–2615.

28. Денисов А.Н., Семёнов С.Л. Полностью стекланные одномодовые микроструктурированные волоконные световоды с большим полем моды // *Доклады Рос. акад. наук. Физика, технические науки* – 2021. – Т. 497. – С. 12–15.

29. Optimal Design of Large Mode Area Photonic Crystal Fibers Using a Multiobjective Gray Wolf Optimization Technique / K. Rashidi, S.M. Mirjalili, H. Taleb, D. Fathi // *J. Lightwave Technol.* – 2018. – Vol. 36, № 23. – P. 5626–5632.

30. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. – М.: Мир, 1996. – С. 15.

31. Mode classification and degeneracy in photonic crystal fibers / R. Guobin, W. Zhi, L. Shuqin, J. Shuisheng // *Opt. Express*. – 2003. – Vol. 11, № 11. – P. 1310–1321.

32. Kuhlmeier В.Т., McPhedran R.C., de SterkeModal С.М. cutoff in microstructured optical fibers // *Opt. Lett.* – 2002. – Vol. 27, № 19. – P. 1684–1686.

33. Денисов А.Н., Семёнов С.Л. Микроструктурированные волоконные световоды с большим спектральным диапазоном одномодового режима // *Квант. Электроника*. – 2021. – Т. 51, № 3. – С. 240–247.

References

1. Kong F., Gu G., Hawkins T.W., Jones M., Parsons J., Kalichevsky-Dong M.T., Pulford B., Dajani I., Dong L. ~900W Single-mode CW Power From a 60 μm -core Ytterbium-doped All-solid Photonic Bandgap Fiber Laser. *Frontiers in Optics*, 2016. OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2016). Paper FW5B.3.

2. Matniyaz T., Kalichevsky-Dong M.T., Hawkins T.W., Parsons J., Gu G., Li W., Faykus M., Selee B., Dong J.A., Dong L. Single-mode Yb-doped Double-clad All-solid Photonic Bandgap Fiber Laser Generating 27.8W at 976nm. *Laser Congress*, 2018 (ASSL). OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2018). Paper AM6A.28.

3. Wang M., Wang F., Feng S., Yu C., Wang S., Zhou Q., Zhang L., Lou F., Chen D., Hu L. 272 W quasi-single-mode picosecond pulse laser of ytterbium-doped large-mode-area photonic crystal fiber. *Chin. Opt. Lett.*, 2019, vol. 17, no. 7, pp. 071401-071405.

4. Pierron R., Chabrol G., Roques S., Pfeiffer P., Yehouessi J.-P., Bouwmans G., Lecler S. Large-mode-area optical fiber for photonic nanojet generation. *Opt. Lett.*, 2019, vol. 44, no. 10, pp. 2474-2477.

5. Matniyaz T., Kong F., Kalichevsky-Dong M.T., Dong L. 302 W single-mode power from an Er/Yb fiber MOPA. *Opt. Lett.*, 2020, vol. 45, no. 10, pp. 2910-2913.

6. Egorova O.N., Semjonov S.L., Kosolapov A.F., Denisov A.N., Pryamikov A.D., Gaponov D.A., Biriukov A.S., Dianov E.M., Salganskii M.Y., Khopin V.F., Yashkov M.V., Gurianov A.N., Kuksenkov D.V. Single-mode all-silica photonic bandgap fiber with 20- μm mode-field diameter. *Opt. Express*, 2008, vol. 16, no. 16, pp. 11735-11740.

7. Egorova O.N., Semenov S.L., Vel'miskin V.V., Salganskii M.Iu., Iashkov M.V., Gur'ianov A.N., Dianov E.M. Odnomodovyi volokonnyi svetovod s fotonnoi zapreshchennoi zonoj i serdtsevinoj iz kvartsevoogo stekla, legirovannogo ionami itterbiiia [Одномодовый волоконный световод с фотонной запрещенной зоной и сердцевиной из кварцевого стекла, легированного ионами иттербия]. *Kvantovaja elektronika*, 2010, vol. 40, no. 12, pp. 1137-1140.

8. Kashiwagi M., Saitoh K., Takenaga K., Tanigawa S., Matsuo S., Fujimaki M. Low bending loss and effectively single-mode all-solid photonic bandgap fiber with an effective area of 650 μm^2 . *Opt. Lett.*, 2012, vol. 37, no. 8, pp. 1292-1294.

9. Kashiwagi M., Saitoh K., Takenaga K., Tanigawa S., Matsuo S., Fujimaki M. Effectively single-mode all-solid photonic bandgap fiber with large effective area and low bending loss for compact high-power all-fiber lasers. *Opt. Express*, 2012, vol. 20, no. 14, pp. 15061-15070.

10. Saitoh S., Saitoh K., Kashiwagi M., Matsuo S., Dong L. Design optimization of large-mode-area all-solid photonic bandgap fibers for high-power laser applications. *J. Lightwave Technol.*, 2014, vol. 32, no. 3, pp. 440-449.

11. Gu G., Kong F., Hawkins T., Parsons J., Jones M., Dunn C., Kalichevsky-Dong M.T., Saitoh K., Dong L. Ytterbium-doped large-mode-area all-solid photonic bandgap fiber lasers. *Opt. Express*, 2014, vol. 22, no. 11, pp. 13962-13968.

12. Kong F., Gu G., Hawkins T.W., Jones M., Parsons J., Kalichevsky-Dong M.T., Palese S.P., Cheung E., Dong L. Efficient 240W single-mode 1018nm laser from an Ytterbium-doped 50/400 μ m all-solid photonic bandgap fiber. *Opt. Express*, 2018, vol. 26, no. 3, pp. 3138-3144.

13. Matniyaz T., Li W., Kalichevsky-Dong M., Hawkins T.W., Parsons J., Gu G., Dong L. Highly efficient cladding-pumped single-mode three-level Yb all-solid photonic bandgap fiber lasers. *Opt. Lett.*, 2019, vol. 44, no. 4, pp. 807-810.

14. Février S., Jamier R., Blondy J.-M., Semjonov S.L., Likhachev M.E., Bubnov M.M., Dianov E.M., Khopin V.F., Salganskii M.Y., Guryanov A.N. Low-loss singlemode large mode area all-silica photonic bandgap fiber. *Opt. Express*, 2006, vol. 14, no. 2, pp. 562-569.

15. Aleshkina S.S., Likhachev M.E., Pryamikov A.D., Gaponov D.A., Denisov A.N., Semjonov S.L., Bubnov M.M., Salganskii M.Yu., Guryanov A.N. Large-mode-area Bragg fiber with microstructured core for suppression of high-order modes. *Proc. SPIE*, 2010, vol. 7714, pp. 771413 (1-11).

16. Aleshkina S.S., Likhachev M.E., Pryamikov A.D., Gaponov D.A., Denisov A.N., Bubnov M.M., Salganskii M.Yu., Laptev A.Yu., Guryanov A.N., Uspenskii Y.A., Popov N.L., Février S. Very-large-mode-area photonic bandgap Bragg fiber polarizing in a wide spectral range. *Opt. Lett.*, 2011, vol. 36, no. 18, pp. 3566-3568.

17. Vanvincq O., Habert R., Cassez A., Baudelle K., Labat D., Delobel S., Quiquempois Y., Bouwmans G., Bigot L. Polarization-

maintaining and single-mode large mode area pixelated Bragg fiber. *Opt. Lett.*, 2020, vol. 45, no. 7, pp. 1946-1949.

18. Wong W.S., Peng X., McLaughlin J.M., Dong L. Breaking the limit of maximum effective area for robust single-mode propagation in optical fibers. *Opt. Lett.*, 2005, vol. 30, no. 21, pp. 2855-2857.

19. Dong L., Peng X., Li J. Leakage channel optical fibers with large effective area. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, vol. 24, no. 8, pp. 1689-1697.

20. Rosa L., Saitoh K., Tsuchida Y., Varshney S.K., Koshiba M., Poli F., Passaro D., Cucinotta A., Selleri S., Vincetti L. Single-Mode Large-Mode-Area Leakage Channel Fibers with Octagonal Symmetry. *Conference Integrated Photonics and Nanophotonics Research and Applications*. July 2008. Paper IWB3. DOI: 10.1364/IPNRA.2008.IWB3

21. Gu G., Kong F., Hawkins T.W., Foy P., Wei K., Samson B., Dong L. Impact of fiber outer boundaries on leaky mode losses in leakage channel fibers. *Opt. Express*, 2013, vol. 21, no. 20, pp. 24039-24048.

22. Calvet P., Perrin A., Gouriou P., Samson B., Hawkins T.W., Kong F., Dong L., Dupriez P., Hugonnot E. High-energy nanosecond-pulses from a flat-top mode 50 μm -core ytterbium-doped leakage channel fiber. *Advanced Photonics*, 2014, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2014). Paper SoM3B.4.

23. Saitoh K., Tsuchida Y., Rosa L., Koshiba M., Poli F., Cucinotta A., Selleri S., Pal M., Paul M., Ghosh D., Bhadra S. Design of all-solid leakage channel fibers with large mode area and low bending loss. *Opt. Express*, 2009, vol. 17, no 6, pp. 4913-4919.

24. Dong L., Li J., McKay H.A., Fu L., Thomas B.K. Large effective mode area optical fibers for high-power lasers. *Proc. SPIE*. 2009, vol. 7195, pp. 71950N1-71950N8.

25. Dong L., Wu T., Mckay H.A., Fu L., Li J., H.G. Winful All-glass large-core leakage channel fibers. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron*, 2009, vol. 15, no. 1, pp. 47-53.

26. Dong L., Mckay H.A., Marcinkevicius A., Fu L., Li J., Thomas B.K., Fermann M.E. Extending Effective Area of Fundamental Mode in Optical Fibers. *J. Lightwave Technol.*, 2009, vol. 27, no. 11, pp. 1565-1570.

27. Saitoh K., Varshney S., Sasaki K., Rosa L., Pal M., Paul M.C., Ghosh D., Bhadra S.K., Koshiba M. Limitation on Effective Area of Bent Large-Mode-Area Leakage Channel Fibers. *J. Lightwave Technol.*, 2011, vol. 29, no. 17, pp. 2609-2615.

28. Denisov A.N., Semenov S.L. Polnost'iu stekliannye odnomodovye mikrostrukturirovannye volokonnye svetovody s bol'shim polem mody]. [Полностью стеклянные одномодовые микроструктурированные волоконные световоды с большим полем моды]. *Doklady Rossiiskoi akademii nauk. Fizika, tekhnicheskie nauki*, 2021, vol. 497, pp. 12-15.

29. Rashidi K., Mirjalili S.M., Taleb H., Fathi D. Optimal Design of Large Mode Area Photonic Crystal Fibers Using a Multiobjective Gray Wolf Optimization Technique. *J. Lightwave Technol.*, 2018, vol. 36, no. 23, pp. 5626-5632.

30. Agraval G. Nelineinaia volokonnaia optika [Нелинейная волоконная оптика]. Moscow: Mir, 1996, 15 p.

31. Guobin R., Zhi W., Shuqin L., Shuisheng J. Mode classification and degeneracy in photonic crystal fibers. *Opt. Express*, 2003, vol. 11, no. 11, pp. 1310-1321.

32. Kuhlmeiy B.T., McPhedran R.C., de SterkeModal C.M. Cutoff in microstructured optical fibers. *Opt. Lett.*, 2002, vol. 27, no. 19, pp. 1684-1686.

33. Denisov A.N., Semenov S.L. Mikrostrukturirovannye volokonnye svetovody s bol'shim spektral'nym diapazonom odnomodovogo rezhima [Микроструктурированные волоконные световоды с большим спектральным диапазоном одномодового режима]. *Kvantovaiia elektronika*, 2021, vol. 51, no. 3, pp. 240-247.

Получено 12.03.2021