

УДК 535.92

ПОЛНОСТЬЮ СТЕКЛЯННЫЕ ОДНОМОДОВЫЕ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ С БОЛЬШИМ ПОЛЕМ МОДЫ

© 2021 г. А. Н. Денисов^{1,*}, С. Л. Семёнов¹

Представлено академиком РАН И.А. Щербаковым 21.12.2020 г.

Поступило 21.12.2020 г.

После доработки 23.12.2020 г.

Принято к публикации 25.12.2020 г.

Предложен новый дизайн полностью стеклянных микроструктурированных волоконных световодов с большой сердцевиной. Проведен численный анализ свойств этих световодов с использованием метода конечных элементов, рассчитаны потери на вытекание фундаментальных и высших мод в спектральном диапазоне от 0.8 до 1.4 мкм. Показано, что предложенный дизайн позволяет получить одномодовый режим в спектральном диапазоне от 0.87 до 1.11 мкм для прямых и изогнутых световодов при радиусе изгиба 0.25 м.

Ключевые слова: микроструктурированные волоконные световоды, одномодовые световоды, световоды с большим полем моды

DOI: 10.31857/S2686740021010041

В последние десятилетия не ослабевают интерес к развитию технологий мощных волоконных лазеров и усилителей, что обусловлено их возрастающим спросом во многих областях применений, включая обработку промышленных материалов, фундаментальные науки и медицину. Для них необходимы волоконные световоды с большим полем моды, которые при этом сохраняют одномодовый режим [1, 2]. Таким требованиям могут отвечать различные типы микроструктурированных волоконных световодов (МВС), включая волоконные световоды с фотонной запрещенной зоной [3, 4], брэгговские световоды [5, 6] и МВС с каналами вытекания [7, 8]. Последний вариант является одним из перспективных и достаточно простых способов получения одномодового МВС с большим полем моды и характеризуется кварцевой сердцевиной с оболочкой, образованной одним или двумя слоями воздушных отверстий. Вместе с тем, 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 допол-

нительным потерям. Этим недостаткам лишены МВС, оболочка которых образована элементами из легированного фтором кварцевого стекла с пониженным показателем преломления [9–11]. Однако 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. Намного больше возможностей дает метод высверливания отверстий в чистом кварцевом стержне и вставкой в них легированных фтором кварцевых стержней с последующей вытяжкой такой заготовки в МВС с нужными параметрами.

В настоящей работе мы предлагаем новый дизайн полностью стеклянных МВС, который имеет большую чисто кварцевую сердцевину 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). Диаметр сердцевины МВС, которая обозначена пунктиром на рис. 1, равен D_{core} . Первый слой содержит шесть элементов диаметром d_1 , расположенных на расстоянии Λ_1 друг от друга. При этом величина перемишки (зазора) между элементами первого слоя $Z_{11} = \Lambda_1 - d_1$. Двенадцать элементов второго слоя имеют различные диаметры ($d_2 > d_1$

¹ Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук, Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова, Москва, Россия

*E-mail: denisov@fo.gpi.ru

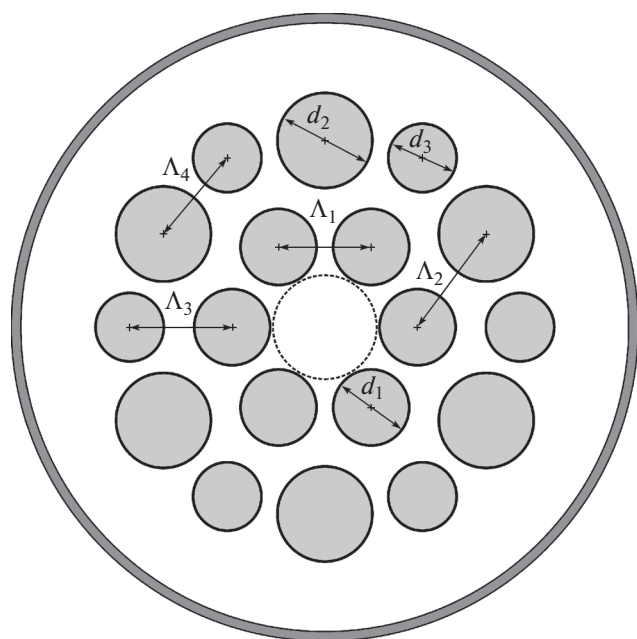


Рис. 1. Структура МВС-18 при $\frac{d_1}{\Lambda_1} = 0.82$; $\frac{d_2}{d_1} = 1.25$; $\frac{d_3}{d_1} = 0.90$; $\frac{Z_{12}}{Z_{11}} = 1.82$.

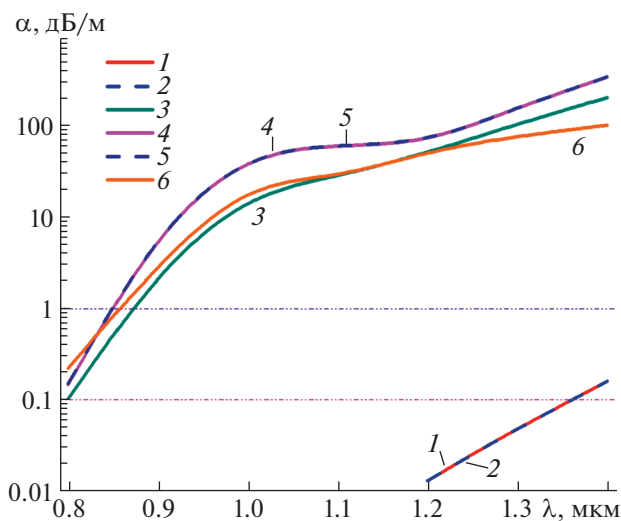


Рис. 2. Потери на вытекание основных (1, 2) и высших (3–6) мод прямого МВС-18.

и $d_3 \leq d_2$). Зазор между элементами диаметром d_2 второго слоя и элементами первого слоя равен $Z_{12} = \Lambda_2 - \frac{d_1}{2} - \frac{d_2}{2}$, а зазор между элементами диаметром d_3 второго слоя и элементами первого слоя равен $Z_{13} = \Lambda_3 - \frac{d_1}{2} - \frac{d_3}{2}$. Наконец, зазор между эле-

ментами второго слоя равен $Z_{23} = \Lambda_4 - \frac{d_2}{2} - \frac{d_3}{2}$. Этот вариант мы условно назвали МВС-18, где 18 означает полное число элементов.

Такой алгоритм построения структуры МВС-18 дает большие возможности для варьирования различных параметров с целью оптимизации ее характеристик, в частности, потерь на вытекание для фундаментальных и высших мод в прямом и изогнутом состоянии. Для определения наиболее оптимального соотношения параметров МВС-18 для конкретной задачи целесообразно использование алгоритма мультиобъектной оптимизации [12], однако на первом этапе мы выбрали простую задачу: получение одномодового режима для прямого и изогнутого МВС в спектральном диапазоне от 0.9 до 1.1 мкм.

Для обеспечения простоты изготовления заготовки для МВС-18 мы выбрали отношения диаметров элементов $\frac{d_2}{d_1} = 1.17$ и $\frac{d_3}{d_1} = 1.00$. Кроме того, мы выбрали вариант МВС-18 с равными зазорами между элементами первого и второго слоев: $Z_{12} = Z_{13}$. Зазоры между элементами второго слоя Z_{23} мы выбрали равными Z_{11} .

Численные расчеты характеристик МВС-18 мы проводили с использованием метода конечных элементов с цилиндрическим PML слоем, который условно обозначен темно-серым кольцом на рис. 1. В качестве материала для МВС-18 было выбрано кварцевое стекло, его показатель преломления n_{sil} определялся с помощью уравнения Селлмейера [13, с. 15], а для элементов из легированного фтором кварцевого стекла мы взяли показатель преломления меньше на величину $\Delta n = 10^{-3} \times n_{sil}$. Потери на вытекание α (в дБ/м) определялись по получаемой в расчетах мнимой части эффективного показателя преломления k_{eff} с помощью выражения [14]:

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

Расчеты проводились для МВС-18 с сердцевинной диаметром $D_{core} = 21$ мкм. Для каждого из выбранных значений $\frac{d_1}{\Lambda_1}$ мы подбирали величину кольцевого зазора Z_{12} таким образом, чтобы обеспечить потери на вытекание фундаментальных мод для изогнутого МВС-18 (при радиусе изгиба 25 см) менее 0.1 дБ/м на длине волны 1.1 мкм [7]. Затем мы рассчитывали потери на вытекание для двух основных мод, имеющих разную поляризацию (условно обозначенных цифрами 1 и 2) и для четырех кольцевых высших мод (условно обозначенных цифрами от 3 до 6 в порядке убывания действительной части их эффективного показателя преломления).

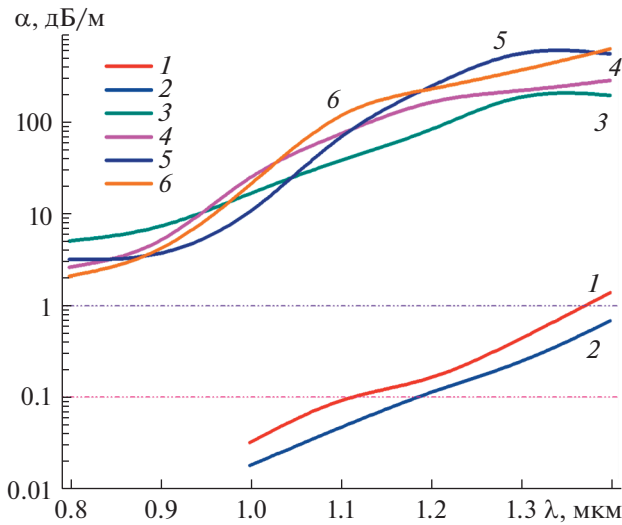


Рис. 3. Потери на вытекание основных (1, 2) и высших (3–6) мод изогнутого МВС-18 при $R_x = 25$ см.

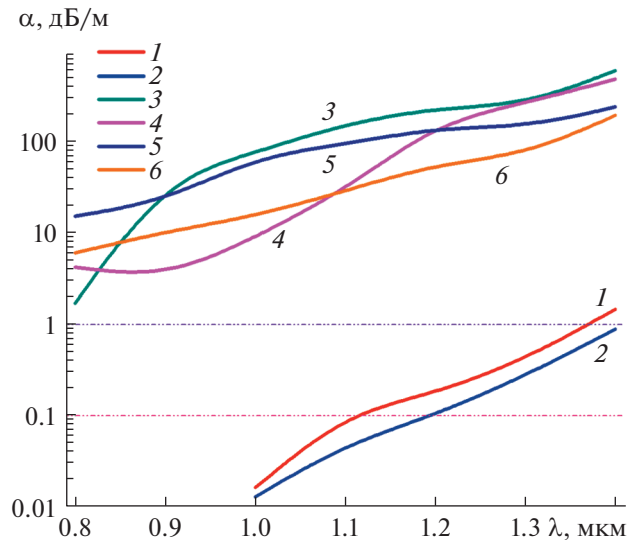


Рис. 4. Потери на вытекание основных (1, 2) и высших (3–6) мод изогнутого МВС-18 при $R_y = 25$ см.

теля преломления n_{eff}) в спектральном диапазоне от 0.8 мкм до 1.4 мкм. Коротковолновую границу одномодового режима мы определяли из условия: потери на вытекание для высших мод > 1.0 дБ/м [7].

На рис. 2 приведены примеры спектральных зависимостей потерь на вытекание для основных и высших мод при значениях параметров $\frac{d_1}{\Lambda_1} = 0.85$ и

$\frac{Z_{12}}{Z_{11}} = 1.88$ для прямого МВС-18, а на рис. 3 и рис. 4 – для изогнутых.

Как видно из рис. 2–4, для прямого МВС-18 спектральный диапазон одномодового режима составляет от 0.87 до 1.36 мкм, а для изогнутых – от 0.80 до 1.11 мкм для разных направлений изгиба. Последний факт весьма важен и позволяет не отслеживать направление изгиба МВС-18 при его использовании. Поскольку для многих практических применений часть длины МВС-18 может быть прямой, а другая часть – изогнутой, важное значение также имеет итоговый спектральный диапазон одномодового режима, который для МВС-18 составляет от 0.87 до 1.11 мкм.

В перспективе параметры МВС-18 могут быть улучшены при использовании элементов из легированного фтором кварцевого стекла с увеличенной разностью показателей преломления до $\Delta n = 4 \times 10^{-3} \times n_{\text{sil}}$ [11]. Это позволит добиться одномодового режима для МВС-18 при меньшем допустимом радиусе изгиба и/или большем диаметре сердцевины и в более широком спектральном диапазоне.

Еще одним способом улучшения параметров МВС, простым и доступным для предложенной технологии его изготовления, является увеличе-

ние количества элементов в первом слое до 7 или 8 и соответствующее увеличение числа элементов во втором слое.

Таким образом, рассмотренный вариант МВС-18 может представлять интерес для таких применений, как передача мощного лазерного излучения, и для использования в мощных волоконных лазерах и усилителях.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках госзадания “Актуальные проблемы волоконной оптики” (0020-2020-0001).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang M., Wang F., Feng S., et al. 272 W quasi-single-mode picosecond pulse laser of ytterbium-doped large-mode-area photonic crystal fiber // Chin. Opt. Lett. 2019. V. 17. № 7. P. 071401 (1–5).
2. Matniyaz T., Kong F., Kalichevsky-Dong M.T., Dong L. 302 W single-mode power from an Er/Yb fiber MOPA // Opt. Lett. 2020. V. 45. № 10. P. 2910–2913.
3. Егорова О.Н., Семёнов С.Л., Вельмискин В.В. и др. Одномодовый волоконный световод с фотонной запрещенной зоной и сердцевиной из кварцевого стекла, легированного ионами иттербия // Квант. электроника. 2010. Т. 40. № 12. С. 1137–1140.
4. Kong F., Gu G., Hawkins T.W., et al. Efficient 240 W single-mode 1018 nm laser from an Ytterbium-doped 50/400 μm all-solid photonic bandgap fiber // Opt. Express. 2018. V. 26. № 3. P. 3138–3144.
5. Aleshkina S.S., Likhachev M.E., Pryamikov A.D., et al. Very-large-mode-area photonic bandgap Bragg fiber polarizing in a wide spectral range // Opt. Lett. 2011. V. 36. № 18. P. 3566–3568.

6. *Vanvincq O., Habert R., Cassez A., et al.* Polarization-maintaining and single-mode large mode area pixelated Bragg fiber // *Opt. Lett.* 2020. V. 45. № 7. P. 1946–1949.
7. *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. V. 30. № 21. P. 2855–2857.
8. *Dong L., Peng X., Li J.* Leakage channel optical fibers with large effective area // *J. Opt. Soc. Am. B.* 2007. V. 24. № 8. P. 1689–1697.
9. *Saitoh K., Tsuchida Y., Rosa L., et al.* Design of all-solid leakage channel fibers with large mode area and low bending loss // *Opt. Express.* 2009. V. 17. № 6. P. 4913–4919.
10. *Dong L., Li J., McKay H. A., et al.* Large Effective Mode Area Optical Fibers for High Power Lasers // *Proc. of SPIE.* 2009. V. 7195. P. 71950N (1–8).
11. *Saitoh K., Varshney S., Sasaki K., et al.* Limitation on Effective Area of Bent Large-Mode-Area Leakage Channel Fibers // *J. Lightwave Technol.* 2011. V. 29. № 17. P. 2609–2615.
12. *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. V. 36. № 23. P. 5626–5632.
13. *Агравал Г.* Нелинейная волоконная оптика. М.: Мир, 1996. 323 с.
14. *Kuhlmei B.T., McPhedran R.C., de Sterke C.M.* Modal cutoff in microstructured optical fibers // *Opt. Lett.* 2002. V. 27. № 19. P. 1684–1686.

ALL-GLASS SINGLE-MODE MICROSTRUCTURED FIBERS WITH LARGE MODE AREA

A. N. Denisov^a and S. L. Semjonov^a

^a *Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Dianov Fiber Optics Research Center, Moscow, Russian Federation*

Presented by Academician of the RAS I.A. Scherbakov

A new design of all-glass microstructured fibers with large mode area is presented. The numerical analysis of the fibers was performed using the finite element method. Confinement losses for fundamental and higher-order modes were calculated in the spectral range of 0.8 to 1.4 microns. Simulation results show that the proposed design allows to obtain single-mode guidance of these fibers in the spectral range of 0.87 to 1.11 microns for straight and curved fibers with a bending radius of 0.25 m.

Keywords: microstructured fiber, photonic crystal fiber, single-mode fiber, large-mode area fiber