ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 666.189.21: 666.22

МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ СВЕТОВОДЫ С БОЛЬШОЙ СЕРДЦЕВИНОЙ

© 2007 г. **К. В. Дукельский**, канд. техн. наук; **А. В. Комаров**; **Е. В. Тер-Нерсесянц**; **А. В. Хохлов**; **В. С. Шевандин**, канд. техн. наук

Научно-исследовательский и технологический институт оптического материаловедения ВНЦ "Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова", Санкт-Петербург

E-mail: volokno@goi.u

Исследованы спектральные свойства микроструктурированных оптических волокон с сердцевиной из кварцевого стекла, образованной заменой семи центральных элементов в гексагональной структуре. Показано преимущество волокон с семиэлемнтной сердцевиной по стойкости к изгибу световодного тракта по сравнению с аналогом, где сердцевина представлена одним элементом.

Коды OCIS: 060.2270, 060.2280, 060.2290.

Поступила в редакцию 25.04.2007.

Микроструктурированные волокна с кварцевой сердцевиной, работающие по принципу полного внутреннего отражения от границы с оболочкой, эффективный показатель преломления которой меньше, чем в сердцевине, отличаются уникальными дисперсионными свойствами. Это обстоятельство позволяет использовать дырчатые волокна в качестве эффективных нелинейно-оптических преобразователей ультракоротких световых импульсов, несмотря на сравнительно малое значение нелинейной составляющей показателя преломления. В ряде работ продемонстрированы возможности дырчатых оптических волокон для получения спектрального суперконтинуума [1–5], в качестве генераторов третьей гармоники твердотельных лазеров [6, 7] или нелинейно-оптических переключателей, использующих параметрическое взаимодействие световых волн [8–10]. Практически для реализации перечисленных процессов достаточно располагать относительно небольшими отрезками дырчатых световодов (от нескольких сантиметров до 1–2 м). Высокая концентрация светового поля в сердцевинах указанных световодов достигается за счет уменьшения их размеров и достижения значений числовой апертуры более 0,3.

С другой стороны, существует альтернативная по смыслу проблема передачи мощных (лазерных) световых потоков с минимальной оптической нелинейностью. Эта проблема может быть решена путем увеличения размеров сердцевины. Кроме того, желательно передавать световой поток в режиме одной поперечной моды с гауссовым распределением интенсивности по сечению пучка, поскольку преобразование гауссовых пучков представляет собой относительно простую техническую задачу. Для передачи лазерного излучения в пределах архитектурного объекта достаточно достичь значения затухания излучения в несколько единиц или десятков децибел на километр. В данной работе сообщается о последовательном решении поставленных задач и о переходе от световодов для преобразования излучения с затуханием в сотни децибел на километр и сердцевинами субмикронного размера [11] к световодам с минимальным затуханием излучения 10 дБ/км и сердцевинами размером до 20 мкм, отличающимися повышенной стойкостью к изгибу.

Для получения суперконтинуума при распространении фемтосекундных импульсов в наших ранних публикациях использовались в основном дырчатые световоды, изготовленные из природных материалов. Это обстоятельство обусловило и повышенные потери излучения в упомянутых световодах. На последующих этапах разработки капилляры для образования первоначальной гексагональной сборки изготавливались на основе трубы из синтетического кварцевого стекла марки F300 с содержанием ОН-групп менее 0,5 ppm. Из такого же кварцевого стекла был изготовлен и микроштабик, образующий впоследствии сердцевину световода. Внутренние полости капилляров и пространство между ними заполнялись аргоном марки ОСЧ с содержанием влаги не более 3 ppm. Заготовка перетягивалась в печи сопротивления, пространство которой также было заполнено особо чистым аргоном, в предволокно диаметром около 2 мм [12], которое на втором этапе технологического процесса

перетягивалось в волоконный световод без дополнительного “шубирования”. Поскольку соотношение между диаметрами сердцевины и внешней оболочки в предволокне составляло около 0,1, то требуемый диаметр сердцевины более 10 мкм достигался при превышении внешним диаметром значения 100 мкм. Воздушные каналы в предволокне перед его перетягиванием в микроструктурированный световод также заполнялись аргоном марки ОСЧ. Типичный спектр оптических потерь дырчатого волокна, произведенного по указанной технологии, представлен на рис. 1.

Как видно из рисунка, средний уровень потерь излучения снизился примерно на порядок по сравнению с таковым для аналога, в состав которого входили природные материалы. Однако поглощение, обусловленное гидроксильными группами на длинах волн $\lambda = 1250$ и 1380 нм, свидетельствует о том, что их концентрация составляет около 25 ppm, превышая содержание в исходном стекле более чем на порядок. Среди причин, вызывающих повышенную концентрацию гидроксила, можно отметить диффузию водорода из опорной кварцевой трубы [13] и выделение водорода из среды инертного газа. Действительно, дополнительные опыты показали, что использование опорной трубы с повышенным содержанием гидроксила сопровождается ростом потерь, обусловленных поглощением OH-групп (рис. 2). Применение нами в последующем отожженных опорных труб, в которых содержатся только стабильные гидроксильные группы [13], также способствовало снижению концентрации гидроксильных групп в дырчатом световоде.

Однако основной вклад в потери на поглощение гидроксильными группами в дырчатом световоде при этом вносили другие процессы. Анализ возможных причин показал, что содержание водорода в аргоне марки ОСЧ, который изначально в нем находился или мог образоваться при высокотемпературном разложении углеводородов, не превысило бы, по паспортным данным, 3 ppm. Дополнительная проверка вероятного проникновения водяных паров внутрь исходной сборки и очистка сборки от механических примесей, которые в принципе могли быть источником водорода, сопровождались падением затухания излучения до минимального значения 10 дБ/км (рис. 3), но даже в этом случае концентрация гидроксила, как видно из рисунка, составила около 15 ppm. Только замена аргона марки ОСЧ на осушенный кислород, применяемый в технологии MCVD, позволила получить в дырчатом световоде такое же содержание OH-групп, как и в исходном стекле марки F300, т. е. около 0,5 ppm (рис. 4). Осушенный кислород применялся нами на всех этапах изготовления дырчатого световода: им

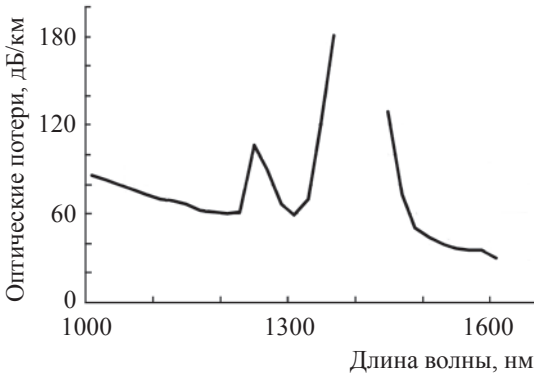


Рис. 1. Спектр оптических потерь в световоде, изготовленном из парофазного кварцевого стекла.

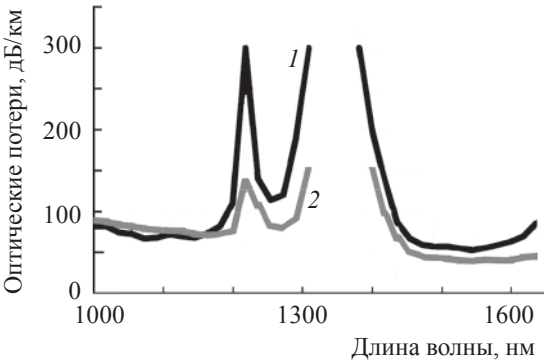


Рис. 2. Зависимость оптических потерь в микроструктурированных световодах от качества опорной кварцевой трубы. (Пояснения см. в тексте).

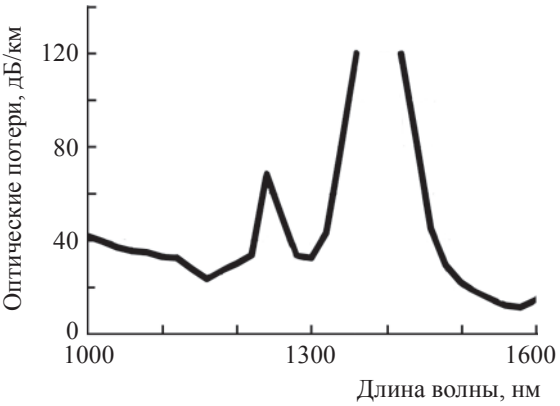


Рис. 3. Спектр оптических потерь в световоде, при изготовлении которого производилась очистка исходной сборки от механических примесей.

заполнялись внутренние полости капилляров и пространство между ними в исходной сборке, а перед вытягиванием самого световода – полости в предволокне.

Как видно на всех представленных спектральных зависимостях, в исследованных образцах во-

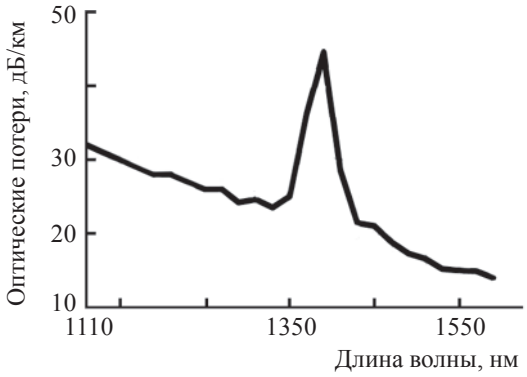


Рис. 4. Спектр оптических потерь в световоде, при изготовлении которого использовался осущенный кислород.

локон существенен коротковолновый рост потерь, который не связан с рэлеевским рассеянием или микроизгибными потерями, а обусловлен специфическим вытеканием излучения, присущим дырчатым световодам с гексагональной структурой [14]. По этой причине спектр оптических потерь в дырчатых световодах характеризуется излишней, по сравнению с обычными волоконными световодами со сплошными средами, неравномерностью. Различие в величине потерь в пределах примерно 500 нм составляет около 50 дБ/км, в то время как в обычных световодах оно на порядок меньше.

В работе [14] показано, что ослабление световедущих свойств дырчатых световодов возрастает при увеличении шага гексагональной структуры. Указанный процесс наблюдается как в коротких (длиной в несколько сантиметров), так и в длинномерных (до 100 м) образцах. В первых при увеличении шага структуры от 2–3 до 8–10 мкм яркое, контрастирующее с оболочкой свечение сердцевины сменяется более равномерным распределением интенсивности по сечению световода. Положение границы световодных свойств зависит от параметра заполнения воздухом оболочки световода $k = d/\Lambda$ (d – диаметр отверстия, Λ – шаг структуры). В длинномерных образцах, характеризуемых большим значением параметра $k = 0{,}8$–$0{,}9$ и многомодовым режимом, при увеличении шага структуры возрастают коротковолновые потери излучения, обусловленные в основном вытеканием высших мод [14].

В одномодовом режиме распространения излучения ($k < 0{,}46$), как показывают литературные данные [15, 16], существенны потери на макроизгибе световода. Макроизгибные потери, в отличие от таковых в световодах со сплошными средами, располагаются в коротковолновой части спектра. Резкая граница изгибных потерь смещается в длинноволновую часть спектра при увеличении шага структуры, сужая таким образом рабочий диапазон микроструктурированного оптического волокна. Следовательно, проблема получения световода с большой сердцевиной для передачи гауссовых пучков сводится к реализации одномодового дырчатого световода с относительно большим значением шага структуры. В [16] приведены сведения о разработке одномодовых волокон с гексагональной системой отверстий с диаметром сердцевины до 35 мкм, образованной заменой одного центрального капилляра. Платой за увеличение диаметра сердцевины был узкий спектральный диапазон работоспособности волокна с максимально достигнутым значением диаметра сердцевины 35 мкм при шаге структуры 23 мкм, составивший приблизительно 300 нм.

В данной публикации нами предлагается структура, отличающаяся расширенным по сравнению со структурой [16] спектральным диапазоном. Расширение спектрального диапазона достигалось тем, что сердцевина световода образовывалась в результате замещения в гексагональной исходной сборке микроштабиком сердцевины не одного, а 7 или 19 центральных элементов. Поперечное сечение волокна, в котором сердцевина образована семью элементами, показано на вставке на рис. 5. Значение параметра k составило примерно 0,3. Шаг структуры для получения сердцевины диаметром 20 мкм был равен 6,4 мкм.

На рис. 5 приведен ход спектральных потерь излучения в волокнах с различной геометрией сердцевины. Как видно из рисунка, в дырчатом световоде с сердцевиной из 7 центральных элементов диаметром 20 мкм (кривая *1*) граница изгибных по-

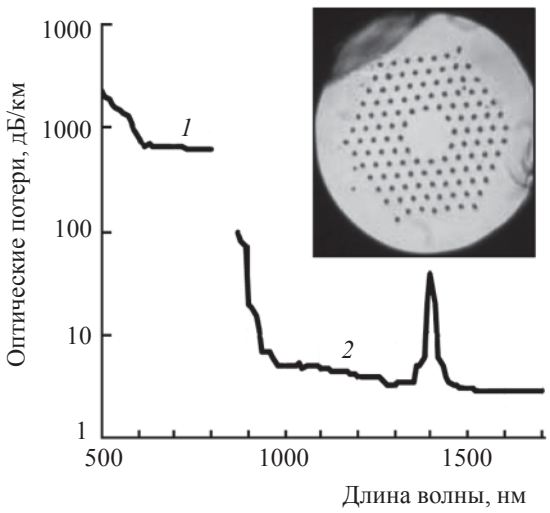


Рис. 5. Спектры оптических потерь в дырчатом световоде с сердцевиной из 7 элементов (*1*) и с сердцевиной из 1 элемента [16] (*2*). На вставке изображено поперечное сечение световода с сердцевиной из 7 элементов.

терь находится в области $\lambda \approx 600$ нм, в то время как в световоде с сердцевиной того же диаметра, но состоящей из одного элемента (кривая *2*), граница располагается в области $\lambda \approx 900$ нм. Избыточный уровень потерь в сердцевине из 7 элементов обусловлен изготовлением экспериментального демонстрационного образца из природных материалов.

Таким образом, в данной работе приводятся сведения об исследовании возможности увеличения диаметра сердцевины дырчатого оптического волокна в многомодовом и одномодовом режимах распространения света. Показано, что возможности многомодового режима в световоде с гексагональной структурой ограничены процессом вытекания излучения при увеличении диаметра сердцевины (шага структуры). Решение этой проблемы может быть найдено в отказе от гексагональной структуры и реализации сердцевины большого диаметра, окруженной одним циклом отверстий со сравнительно тонкими стеклянными перегородками между ними [17].

В одномодовом режиме распространения света увеличение сечения модового пятна без сужения спектрального диапазона работоспособности дырчатого световода, как представлено в настоящей работе, достижимо в сердцевине, состоящей не менее чем из 7 элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ranka J.K., Windeler R.S., Steinz A.J.* Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm // Opt. Lett. 2000. V. 25. № 1. P. 25–27.
2. *Coen S., Chau A.H.L., Leonardt R., Harvey J.D., Knight J.C., Wadsworth W.J., Russel P.S.J.* White-light supercontinuum generation with 60-ps pump pulses in a photonic crystal fiber // Opt. Lett. 2001. V. 26. № 17. P. 1356–1358.
3. *Coen S., Chau A.H.L., Leonardt R., Harvey J.D., Knight J.C., Wadsworth W.J., Russel P.S.J.* Supercontinuum generation by stimulated Raman scattering and parametric four-wave mixing in photonic crystal fibers // JOSA. 2002. V. B19. P. 753–764.
4. *Herrmann J., Griebner U., Zhavoronkov N., Husakou A., Nickel D., Knight J.C., Wadsworth W.J., Russel P.S.J., Korn G.* Experimental evidence for supercontinuum generation by emission of higher-order solitons in photonic fibers // Phys. Rev. Lett. 2002. V. 88. № 17. P. 173901-1–173901-4.
5. *Dudley J.M., Gu X., Xu L., Kimmel M., Zeek E., O`Shea P., Trebino R., Coen S., Windeler R.* Cross-correlation frequency resolved optical gating analysis of broadband continuum generation in photonic crystal fiber: simulation and experiments // Opt. Express. 2002. V. 10. № 21. P. 1215–1221.
6. *Efimov A., Taylor A.J., Omenetto F.G., Knight J.C., Wadsworth W.J., Russell P.S.J.* Phase-matched third harmonic generation in microstructured fiber // Opt. Express. 2003. V. 11. № 20. P. 2567–2576.
7. *Konorov S.O., Ivanov A.A., Alfimov M.V., Fedotov A.B., Kondrat'ev Yu.N., Shevandin V.S., Dukel'skii K.V., Khokhlov A.V., Podshivalov A.A., Petrov A.N., Sidorov-Biryukov D.A., Zheltikov A.M.* Generation of frequency-tunable radiation within the wavelength range of 350–600 nm through nonlinear-optical spectral transformation of femtosecond Cr: forsterite-laser pulses in submicron fused silica threads of a microstructure fiber // Laser Physics. V. 13. № 9. 2003. P. 1170–1174.
8. *Konorov S.O., Fedotov A.B., Mitrokhin V.P., Sidorov-Biryukov D.A., Kondrat'ev Yu.N., Shevandin V.S., Dukel'skii K.V., Khokhlov A.V., Zheltikov A.M.* Polarization-controlled spectral transformation of unamplified femtosecond pulses in multiple waveguide channels of a photonic-crystal fiber // Laser Physics. 2004. V. 14. № 5. P. 760–763.
9. *Konorov S.O., Ivanov A.A., Akimov D.A., Alfimov M.V., Podshivalov A.A., Kondrat'ev Yu.N., Shevandin V.S., Dukel'skii K.V., Khokhlov A.V., Zheltikov A.M.* Cross-phase modulation control of ultrashort pulses spectrally transformed in photonic-crystal fibers // Laser Physics. 2004. V. 14. № 5. P. 791–794.
10. *Konorov S.O., Akimov D.A., Ivanov A.A., Alfimov M.V., Dukel'skii K.V., Khokhlov A.V., Shevandin V.S., Kondrat'ev Yu.N., Zheltikov A.M.* Cross-phase-modulation-induced instabilities and frequency shifts in a photonic-crystal fiber // Appl. Phys. B. 2005. V. 80. P. 437–439.
11. *Федотов А.Б., Пин Чжу, Кондратьев Ю.Н., Багаев С.Н., Шевандин В.С., Дукельский К.В., Смирнов В.Б., Тарасевич А.П., фон дер Линде Д., Желтиков А.М.* Модовая структура и спектральные свойства излучения суперконтинуума в микроструктурированных волокнах // ЖЭТФ. 2002. Т. 122. № 5. С. 986–998.
12. *Дукельский К.В., Кондратьев Ю.Н., Хохлов А.В., Шевандин В.С., Желтиков А.М., Коноров С.О., Серебрянников Е.Е., Сидоров-Бирюков Д.А., Федотов А.Б., Семенов С.Л.* Микроструктурированные световоды с кварцевой сердцевиной для получения спектрального суперконтинуума в фемтосекундном диапазоне // Оптический журнал. 2005. Т. 72. № 7. С. 57–60.
13. *Богданова О.Ю., Ероньян М.А., Кондратьев Ю.Н.* Влияние водородосодержащих примесей в исходных материалах на оптическое поглощение кварцевых световодов // Физ. и хим. стекла. 1989. Т. 15. № 6. С. 895–899.
14. *Дукельский К.В., Кондратьев Ю.Н., Комаров А.В., Тер-Нерсесянц Е.В., Хохлов А.В., Шевандин В.С.* Влияние шага структуры дырчатого оптического волокна на его световодные свойства // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 10. С. 80–85.
15. *Nielsen M.D., Folkenberg J.R., Mortensen N., Bjarklev A.* Bandwidth comparison of photonic crystal fibers and conventional single-mode fibers // Optics Express. 2004. V. 12. № 3. P. 430–435.
16. *Nielsen M.D., Mortensen N.A., Albertsen M., Folkenberg J.R., Bjarklev A., Boncinni D.* Predicting macrobending loss for large-mode area photonic crystal fibers // Optics Express. 2004. V. 12. № 8. P. 1775–1779.
17. *Issa N.A.* High numerical aperture in multimode microstructured optical fibers // Appl. Opt. 2004. V. 43. P. 6191–6197.