

Одномодовый микроструктурированный световод для среднего инфракрасного диапазона

Л.Н.Бутвина, О.В.Середа, Е.М.Дианов, Н.В.Личкова, В.Н.Загороднев

Впервые получен одномодовый микроструктурированный световод на основе кристаллов галогенидов серебра для среднего ИК диапазона. Представлены экспериментальные и теоретические доказательства того, что световод является фактически одномодовым на длине волны 10.27 мкм с оптическими потерями 2 дБ/м. Показано, что кристаллические микроструктурированные световоды имеют ряд преимуществ перед обычными волокнами из кристаллов галогенидов серебра. Широкое окно прозрачности данных материалов (2–20 мкм) делает перспективным применение этих волокон в спектроскопии и при создании нелинейных волоконных устройств для среднего ИК диапазона.

Ключевые слова: одномодовое волокно, микроструктурированное волокно, кристаллический световод, ИК спектроскопия, CO₂-лазер, галогениды серебра.

1. Введение

Микроструктурированные волокна составляют новый класс волоконных световодов, обладающих уникальными свойствами и огромным потенциалом с точки зрения применений. Например, микроструктурированное волокно позволяет реализовать одномодовый режим при значительно большей площади поля моды, чем удается получить в обычном волокне, снизив, таким образом, эффективность нелинейных процессов [1]. Изменение геометрических параметров волокна может привести как к существенному увеличению дисперсии, так и к сглаживанию кривой дисперсии [2]. Длина волны, соответствующая нулевой дисперсии, может изменяться в широких пределах [3, 4]. Стремительное развитие технологии фотонно-кристаллических волокон для видимого и ближнего ИК диапазонов в течение последних лет стимулировало разработку фотонно-кристаллического волокна для среднего ИК диапазона [5].

В настоящей работе рассмотрено созданное нами микроструктурированное кристаллическое волокно из кристаллов галогенидов серебра для $\lambda = 10.6$ мкм. Твердые растворы галогенидов серебра $\text{AgCl}_x\text{Br}_{1-x}$, где $0 \leq x \leq 1$, прозрачны в области 2.5–20 мкм. С возрастанием x коэффициент преломления $\text{AgCl}_x\text{Br}_{1-x}$ уменьшается от 2.16 до 1.98 практически линейно. Эти материалы используются для производства гибких, нетоксичных, негигроскопичных многомодовых световодов с минимумом оптических потерь $\alpha \sim 0.1$ дБ/м при длине волны

10.6 мкм [6]. Они успешно используются для ИК спектроскопии, радиометрии и передачи лазерной энергии [7]. Однако изготовить из галогенидов серебра качественный одномодовый световод с низкими потерями еще не удавалось [8].

Создание микроструктурированного кристаллического волокна является важным шагом в развитии ИК световодов, поскольку оно дает возможность сочетать фактически одномодовый режим с большой площадью поля моды.

2. Моделирование структуры

Для анализа свойств фотонно-кристаллического волокна из галогенида серебра мы использовали программу The CUDOS MOF Utilities, разработанную в Университете Сиднея (Австралия) [9]. В этой программе для расчетов используется мультипольный метод, который имеет преимущества в скорости по сравнению с другими методами и дает возможность рассчитать потери моды на вытекание за счет геометрической структуры [10, 11]. Мы смоделировали периодическую структуру, состоящую из цилиндрических вставок диаметром $d = 41.6$ мкм с показателем преломления $n_1 = 2.075$, равным показателю преломления $\text{AgCl}_{0.5}\text{Br}_{0.5}$. Вставки расположены в гексагональном порядке в матрице с показателем преломления $n_2 = 2.132$, равным показателю преломления $\text{AgCl}_{0.2}\text{Br}_{0.8}$; расстояние между центрами вставок $L = 59.5$ мкм. Эта структура поддерживала девять мод. Первая мода имела эффективный показатель преломления $n_{\text{eff}} = \beta/k_0$ (β – константа распространения, k_0 – волновое число в вакууме), для которого $\text{Re}n_{\text{eff}} = 2.1302$ и $\text{Im}n_{\text{eff}} = 7.48 \times 10^{-12}$, что соответствует потерям на вытекание $\alpha = 1.9 \times 10^{-5}$ дБ/м. Потери рассчитывались по формуле $\alpha = (20/\ln 10)2\pi/\lambda \text{Im}n_{\text{eff}} \times 10^6$, где длина волны λ измерялась в микрометрах. Потери мод высоких порядков были значительно больше. Например, потери моды второго порядка составляли примерно 125 дБ/м. Такие высокие потери должны препятствовать распространению мод выс-

Л.Н.Бутвина, О.В.Середа, Е.М.Дианов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: butvina@fo.gpi.ru; lesyaofmipt@mail.ru; dianov@fo.gpi.ru

Н.В.Личкова, В.Н.Загороднев. Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов, Россия, 142432 Черноголовка Московская обл.; e-mail: Lichkova@ipmt-hpm.ac.ru; Zagorodnev@ipmt-hpm.ac.ru

Поступила в редакцию 19 сентября 2006 г., после доработки – 23 ноября 2006 г.

ших порядков даже через небольшие (~ 1 м) отрезки волокна.

3. Одномодовое микроструктурированное кристаллическое волокно

Заготовка для микроструктурированного кристаллического волокна из твердого раствора $\text{AgCl}_{0.2}\text{Br}_{0.8}$ имела 12 мм в диаметре. В ней были просверлены отверстия, образующие два concentрических кольца. Отверстия располагались в гексагональном порядке с расстоянием 1.43 мм между их центрами. В отверстия были вставлены стержни диаметром 1 мм из $\text{AgCl}_{0.5}\text{Br}_{0.5}$, показатель преломления которых был меньше, чем у основного объема заготовки. Микроструктурированное волокно было получено из заготовки методом экструзии через фильеру диаметром 500 мкм из вакуумированной камеры.

На рис.1 представлена фотография торца микроструктурированного световода. Средний диаметр вставок $d = 45$ мкм, среднее расстояние между их центрами $A = 62$ мкм. По сравнению с заготовкой, из которой было экструдировано волокно, структура волокна имеет немного увеличенный размер вставок ($d/A = 0.73$ против $d/A = 0.7$). Диаметр сердцевины составляет приблизительно 79 мкм. Во избежание распространения оболочечных мод начало и конец световода покрыты полимером с углеродным наполнителем, который сильно поглощает в ИК диапазоне. Чтобы показать, что полученный свето-

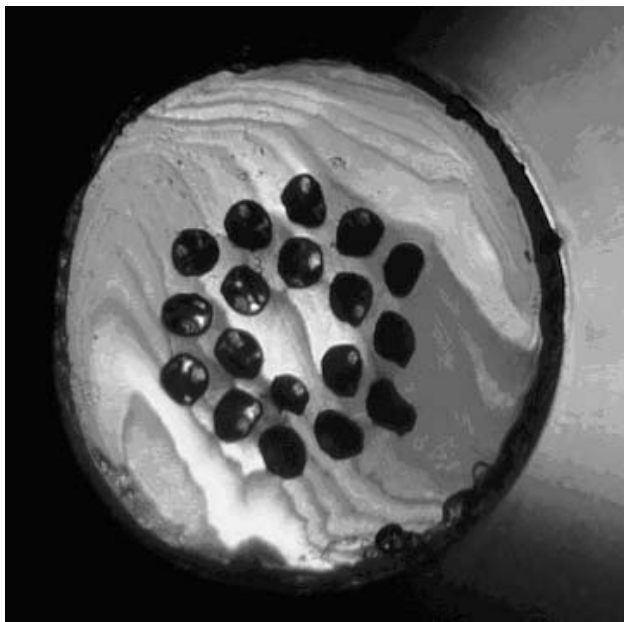


Рис.1. Фотография торца микроструктурированного кристаллического световода диаметром 500 мкм.

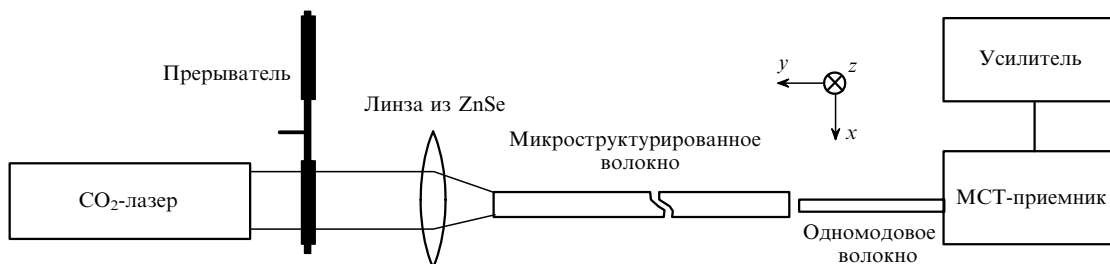


Рис.2. Схема измерения распределения поля в ближней зоне.

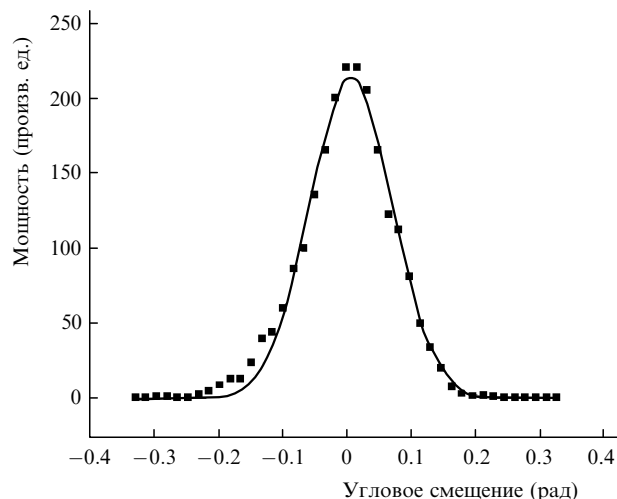


Рис.3. Распределение поля в дальней зоне – данные измерений (точки) и результат их аппроксимации гауссовой кривой (сплошная кривая).

вод является фактически одномодовым, мы провели два эксперимента.

В первом эксперименте излучение CO_2 -лазера было сфокусировано в сердцевину микроструктурированного волокна с помощью линзы из ZnSe с фокусным расстоянием 30 мм. Излучение CO_2 -лазера, который использовался в эксперименте, имело следующие характеристики: мода TEM_{00} , $\lambda = 10.2744$ мкм (линия 10R16), мощность ~ 5 Вт, диаметр лазерного пучка менее 6 мм, расходимость менее 4.2 мрад, степень поляризации 90%. Расчетный диаметр фокального пятна составлял 69.5 мкм. Мощность на выходе волокна измерялась ртутно-кадмий-теллуридным (МСТ) приемником (Opto-Electronic Components, KR208-FSMA2-GI), чувствительным в диапазоне 8–14 мкм.

Распределение поля в дальней зоне было получено путем его сканирования приемником на расстоянии $L_1 = 61$ мм от торца волокна, в ближней зоне – путем его сканирования одномодовым волокном, состыкованным с приемником, вдоль торца микроструктурированного волокна на расстоянии $L_2 \sim 50$ мкм (рис.2). Диаметр сердцевины одномодового волокна со ступенчатым профилем показателя преломления составлял 40 мкм. Для подавления оболочечных мод этого световода его оболочка была покрыта поглощающим слоем серебра. Результаты сканирования представлены на рис.3 и 4.

Во втором эксперименте излучение лазера заводилось в микроструктурированное волокно через отрезок многомодового световода с диаметрами сердцевины и оболочки 900 и 1000 мкм соответственно. Были также измерены распределения поля в ближней и дальней зонах. Полученные кривые, как и в первом эксперименте, опи-

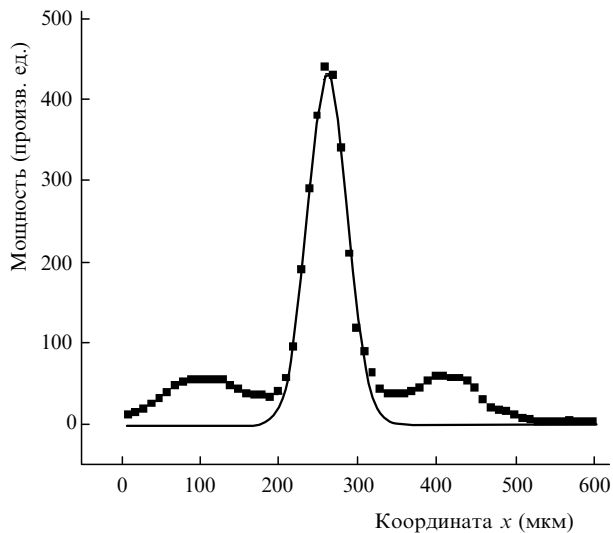


Рис.4. Распределение поля в ближней зоне – данные измерений (точки) и результат их аппроксимации гауссовой кривой (сплошная кривая).

сывались гауссовой кривой и не зависели от условий ввода излучения, т. е. от расстояния между многомодовым и одномодовым волокнами и угла между ними. Таким образом, экспериментально было показано, что в микроструктурированном кристаллическом волокне реализуется одномодовый режим распространения излучения на длине волны 10.27 мкм, поскольку моды высших порядков в распределениях поля в дальней и ближней зонах не проявляются.

Оптические потери в микроструктурированном кристаллическом световоде были измерены методом «обламывания» на отрезке волокна 2.5 м и составили 2.0 ± 0.8 дБ/м. Потери намного превышают теоретические, что объясняется рассеянием и поглощением на границах раздела матрицы и стержней. В ходе измерений максимальная мощность на входе волокна составляла ~ 3 Вт. Разрушения материала при этом не наблюдалось.

4. Заключение

Впервые было получено микроструктурированное волокно для среднего ИК диапазона. Экспериментально подтверждено, что это волокно является фактически одномодовым для излучения на длине волны 10.27 мкм, что находится в соответствии с численными расчетами. Дальнейшее усилия будут направлены на улучшение границы раздела между матрицей и вставками и, соответственно, на снижение потерь за счет рассеяния и поглощения.

Микроструктурированные кристаллические световоды весьма перспективны при использовании для передачи излучения мощных лазеров, т. к. площадь поля моды в них может быть значительно больше, чем в обычных одномодовых кристаллических волокнах. Микроструктурированный световод для среднего ИК диапазона с сердцевинной малого диаметра и контролируемым значением дисперсии может быть использован при создании нелинейных волоконно-оптических устройств в этой области спектра.

1. Birks T. A., Knight J.C., Russell P.St.J. *Opt. Lett.*, **22**, 961 (1997).
2. Reeves W., Knight J., Russell P., Roberts P. *Opt. Express*, **10**, 609 (2002).
3. Ranka J.K., Windeler R.S., Stentz A.J. *Opt. Lett.*, **25**, 25 (2000).
4. Mogilevtsev D., Briks T.A., Russell P.St.J. *Opt. Lett.*, **23**, 1662 (1998).
5. Rave E., Ephrat P., Goldberg M., Kedmi E., Katzir A. *Appl. Opt.*, **43**, 2236 (2004.)
6. Butvina L.N., in *Infrared Fiber Optics*. Ed. by J.S.Shanghera, I.D.Agarwal (Boca Raton, Florida: CRC Press LLC, 1998, pp. 209–249).
7. Бутвина Л.Н. *Фотон-экспресс*, **6**, 43 (2004).
8. Shalem S., Tsun A., Rave E., Millo A., Nagli L., Katzir A. *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 091103 (2005).
9. <http://www.physics.usyd.edu.au/cudos/mofsoftware/>
10. White T.P., Kuhlmeiy B.T., Maystre D., Renversez G., Martijn de Sterke C., Botten L.C. *J. Opt. Soc. Am. B*, **19**, 2322 (2002).
11. Kuhlmeiy B.T., White T.P., Maystre D., Renversez G., Botten L.C., Martijn de Sterke C., McPhedran R.C. *J. Opt. Soc. Am. B*, **19**, 2331 (2002).