

Одномодовый микроструктурированный световод для среднего ИК диапазона с большой площадью поля моды

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

Получен одномодовый микроструктурированный световод на основе кристаллов галогенидов серебра для среднего ИК диапазона с большой (13600 мкм²) площадью поля моды. Экспериментально и теоретически показано, что на длине волны 10.6 мкм световод является фактически одномодовым и имеет оптические потери 8 дБ/м.

Ключевые слова: одномодовый световод, микроструктурированное волокно, кристаллический световод, ИК спектроскопия, СО₂-лазер, галогениды серебра.

1. Введение

Изучение микроструктурированных световодов из галогенидов серебра (AgCl_xBг_{1-x}) для среднего ИК диапазона началось несколько лет назад. Галогениды серебра используются для производства гибких, нетоксичных и негигроскопичных многомодовых световодов, минимальные оптические потери которых α составляют ~ 0.1 дБ/м на длине волны $\lambda = 10.6$ мкм [1]. Многомодовые кристаллические световоды применяются в ИК спектроскопии, радиометрии и для передачи лазерной энергии [2]. Однако для реализации одномодового режима на $\lambda = 10.6$ мкм в ступенчатом волоконном световоде при минимальной технологически возможной разности показателей преломления сердцевин и оболочки сердцевина должна иметь диаметр менее 40 мкм [3], что создает трудности при вводе излучения в световод и уменьшает мощность излучения, при которой происходит пробой волокна. В то же время микроструктурированные световоды могут иметь большую площадь поля моды и оставаться одномодовыми вследствие больших потерь высших мод.

Поскольку кристаллические волокна изготавливаются методом экструзии, в них невозможно оставить воздушные отверстия, как это имеет место в волокнах на основе кварцевого стекла. Для формирования распределения показателя преломления в заготовке микроструктурированного волокна сверлят отверстия, в которые вставляют материал с пониженным показателем преломления, и затем производят экструзию. В литературе приводятся данные о микроструктурированных световодах из галогенидов серебра с двумя или тремя кольцами вставок, расположенных в гексагональном или октагональном порядке. Потери в них составляют 5–15 дБ/м [4–7] и

обусловлены рассеянием на границе раздела вставок, рассеянием на порах в объеме волокна и поглощением на коллоидах серебра.

В настоящей работе впервые сообщается о разработке одномодового микроструктурированного кристаллического световода (МКС) для $\lambda = 10.6$ мкм с большой площадью поля моды и с одним кольцом вставок (рис. 1). Микроструктурированные световоды с одним кольцом вставок называют в литературе волокнами с вытекающими модами – LCF (Leakage Channel Fibers) [8, 9]. При создании такой структуры в кварцевом волокне с кольцом воздушных отверстий можно получить достаточно большую площадь поля наименьшей (первой) моды (более 3000 мкм² при $\lambda \sim 1.5$ мкм [10]), однако для подавления высших мод волокно нужно изгибать, поскольку их изгибные потери растут с уменьшением радиуса изгиба гораздо быстрее, чем потери первой моды.

Следует отметить, что поскольку заготовки для МКС производятся с помощью сверления, изготовление заготовки с одним кольцом вставок технологически намного проще: требуется меньше времени на сверление отверстий, ниже риск развития трещин в заготовке и проще обрабатывается поверхность отверстий после сверления.

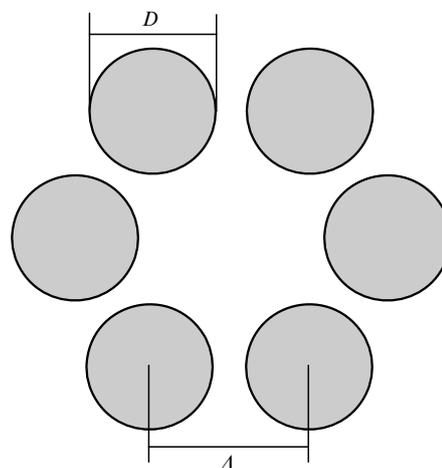


Рис. 1. Структура МКС на вытекающих модах (D – диаметр вставки, A – расстояние между центрами вставок).

Л.Н.Бутвина, О.В.Середа, А.Л.Бутвина, Е.М.Дианов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: butvina@fo.gpi.ru, dianov@fo.gpi.ru
Н.В.Личкова, В.Н.Загороднев. Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН, Россия, 142432 Черноголовка, Московская обл.; e-mail: Lichkova@ipmt-hpm.ac.ru

Поступила в редакцию 10 октября 2008 г.

2. Моделирование структуры МКС

Моделирование структуры проводилось с помощью программы FemLab 3.1 (компания Comsol). Для оценки потерь на вытекание в МКС в структуру был введен внешний поглощающий слой, описанный в [11]. На рис.2 приведены расчетные значения потерь α на вытекание для первой и второй мод МКС с одним кольцом вставок при фиксированном отношении $D/\Lambda = 0.7$ и различных значениях Δc – разности концентраций AgCl в составах $AgCl_xBr_{1-x}$ для вставок и основной матрицы. Потери на вытекание рассчитывались из постоянной распространения моды n_{eff} по формуле

$$\alpha = \frac{20 \times 10^{-6} 2\pi}{\ln 10 \lambda} \text{Im} n_{eff},$$

где длина волны λ взята в микрометрах.

Как видно из рис.2, в структуре с одним кольцом вставок нельзя добиться значительного (свыше 20 дБ/м) подавления второй моды при низких (менее 0.1 дБ/м) потерях первой моды. Однако одномодовый режим в таких световодах можно реализовать за счет их изгиба, поскольку изгибные потери первой моды растут медленнее, чем второй.

Параметры структуры для экспериментального образца МКС выбирались такими, чтобы потери первой моды на вытекание и на изгиб при радиусе изгиба $R = 15$ см не превышали 0.5 дБ/м, а потери второй моды были максимальными. В результате проведенных расчетов для различных D/Λ и Δc была выбрана структура и изготовлен МКС с $\Lambda = 127$ мкм, $D/\Lambda = 0.65$ и $\Delta c = 25\%$. Эффективный диаметр сердцевины МКС составляет 170 мкм, а распределение интенсивности поля в сердцевине можно аппроксимировать гауссовой кривой:

$$f(r) = \frac{1}{w\sqrt{\pi/2}} \exp(-2r^2/w^2),$$

где $w = 72$ мкм. Расчетная площадь поля моды равна 13600 мкм² (рис.3). Числовая апертура МКС должна составлять 0.08.

Потери на изгиб радиусом R для первой моды были рассчитаны по формуле [12]

$$\alpha(R) = \frac{8.686}{8\sqrt{6\pi}} \frac{1}{n_c} \frac{\Lambda}{A_{eff}} \frac{\lambda}{\Lambda} F \left[\frac{1}{6\pi^2} \frac{1}{(n_c)^2} \frac{R}{\Lambda} \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 V^3 \right],$$

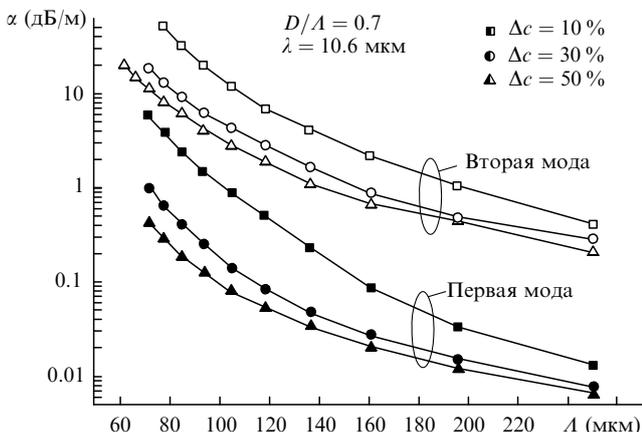


Рис.2. Зависимости потерь на вытекание для первой и второй мод от расстояния между центрами вставок при различных Δc .

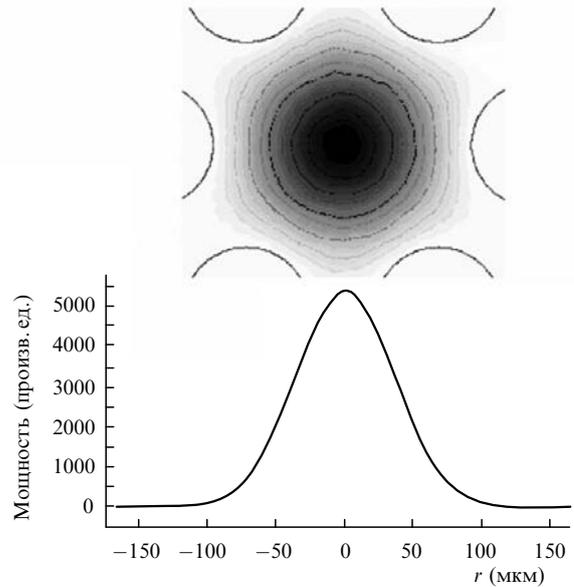


Рис.3. Распределение мощности первой моды в сердцевине МКС.

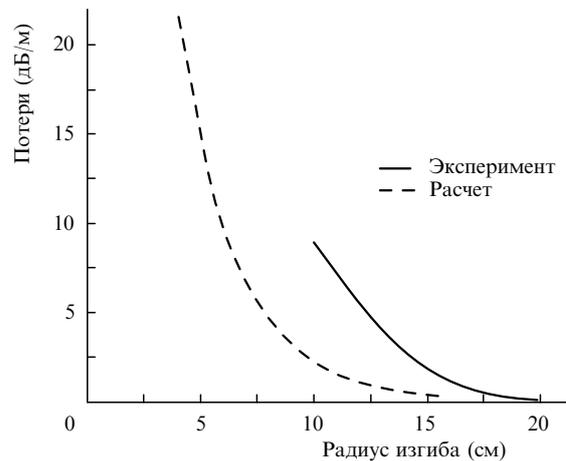


Рис.4. Зависимость изгибных потерь первой моды от радиуса изгиба.

где $F(z) = z^{-0.5} \exp(-z)$; A_{eff} – эффективная площадь поля моды; n_c – показатель преломления сердцевины; V – волноводный параметр. Расчетные потери на изгиб для экспериментального образца МКС приведены на рис 4.

3. Измерение параметров МКС

Диаметр заготовки для МКС из твердого раствора $AgCl_{0.5}Br_{0.5}$ составлял 12 мм. В заготовке в гексагональном порядке были просверлены 6 отверстий диаметром 1 мм с расстоянием 1.53 мм между центрами отверстий. В отверстия были вставлены стержни диаметром 1 мм из $AgCl_{0.75}Br_{0.25}$, показатель преломления которых был меньше, чем у основного объема заготовки. МКС был получен методом экструзии через фильеру $\varnothing 1$ мм из вакуумированной камеры.

На рис.5 представлена фотография торца МКС диаметром 1 мм. Средний диаметр вставок $D = 83$ мкм, среднее расстояние между их центрами $\Lambda = 127$ мкм. Диаметр сердцевины равен ~ 170 мкм. Во избежание распространения оболочечных мод боковая поверхность МКС с целью их поглощения была протравлена сульфатом натрия и покрыта тушью.

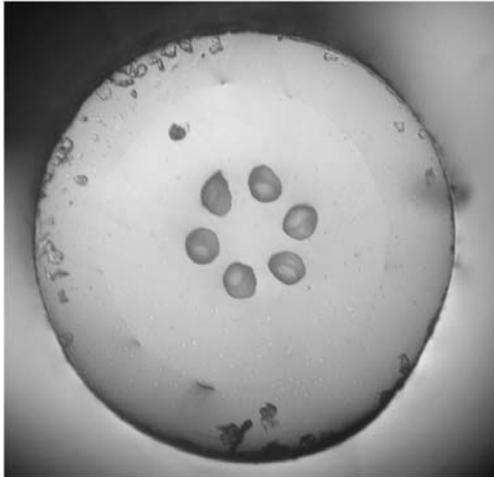


Рис.5. Фотография торца МКС (диаметр волокна 1 мм).

Чтобы показать, что полученный световод является фактически одномодовым, были измерены распределения излучения в дальней и ближней зонах. В эксперименте использовался CO₂-лазер (НИИ ГРП «Плазма») со следующими характеристиками: пучок TEM₀₀, λ = 10.6 мкм, мощность до 25 Вт, диаметр лазерного пучка менее 6 мм, расходимость менее 8 мрад. Излучение CO₂-лазера фокусировалось в сердцевину МКС линзой из Ge с фокусным расстоянием 25 мм. Расчетный диаметр фокального пятна составлял 60 мкм. Мощность на выходе отрезка МКС измерялась приемником Ophir Optics (модель 3А), чувствительным в диапазоне 0.19 – 20 мкм.

Распределение интенсивности в дальней зоне было получено путем сканирования излучения фотоприемником по дуге вокруг оси, на которой находился торец МКС. Сканирование производилось в плоскости, содержащей выходной торец световода (рис.6,а). Расстояние от торца МКС до приемника L = 15 см. Результаты сканирования представлены на рис.7. Полученное распределение описывается гауссовой кривой, измеренная числовая апертура МКС составляет 0.1, что при данных параметрах схемы измерения и диаметре приемника 9.6 мм согласуется с ее расчетным значением (0.08).

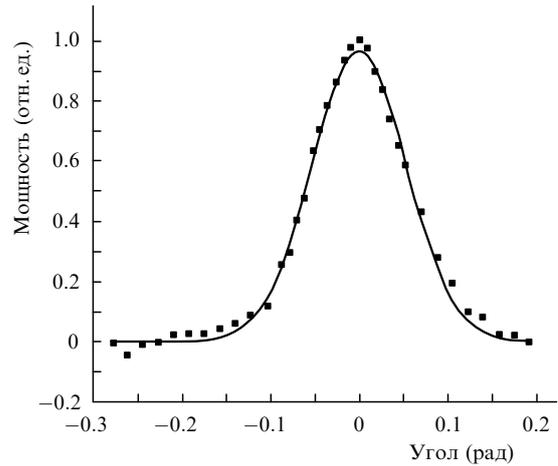


Рис.7. Измеренное (точки) и аппроксимированное гауссовой кривой распределение поля в дальней зоне.

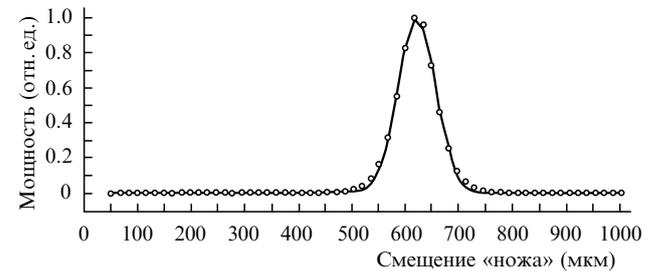
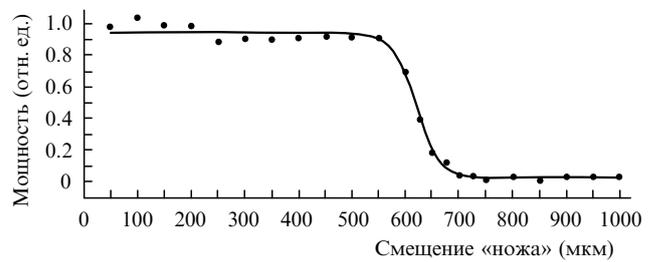


Рис.8. Измеренное (темные точки) и аппроксимированное сигмоидальной кривой распределение поля в ближней зоне (а), а также производная от сигмоидальной кривой (светлые точки) и ее аппроксимация гауссовой кривой (w = 71.4 мкм) (б).

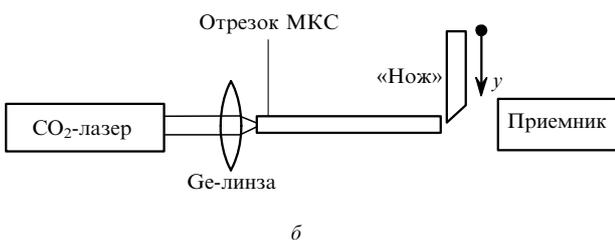
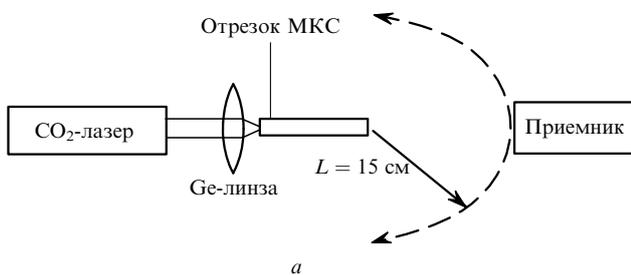


Рис.6. Схема измерения распределения поля в дальней (а) и ближней (б) зонах.

Распределение поля в ближней зоне (рис.8) было получено методом «ножа», т. е. измерением мощности на приемнике при пошаговом закрывании выходного торца волокна лезвием (рис.6,б). Полученное распределение можно аппроксимировать гауссовой кривой с w = 71.4 мкм, что также согласуется с расчетным значением. В ходе эксперимента радиус изгиба МКС варьировался от 13 до 20 см, однако его изменение не влияло на значения параметров распределений.

Таким образом, экспериментально было показано, что моды высших порядков не проявляются в распределении поля в дальней и ближней зонах, и МКС с одним кольцом вставок обеспечивает одномодовый режим распространения на λ = 10.6 мкм с площадью поля моды 13600 мкм².

Оптические потери в отрезке МКС длиной 1.5 м, измеренные методом «облома», составили 8.0 ± 0.8 дБ/м. Зависимость потерь первой моды от радиуса изгиба световода показана на рис.4. Потери значительно превышают теоретические, что объясняется рассеянием и погло-

щением на границах раздела матрицы и стержней и наличием множества микроизгибов. В ходе измерений максимальная мощность на входе МКС составила ~ 5 Вт. Разрушения материала при этом не наблюдалось.

4. Заключение

Впервые получен микроструктурированный кристаллический световод для среднего ИК диапазона с одним кольцом вставок и большой площадью поля моды. Экспериментально установлено, что МКС является фактически одномодовым на длине волны 10.6 мкм, что находится в соответствии с численными расчетами. Наши дальнейшие усилия будут направлены на повышение качества границы раздела между матрицей и вставками и, соответственно, на снижение потерь за счет рассеяния и поглощения.

Микроструктурированные кристаллические световоды весьма перспективны для доставки излучения мощных лазеров, т. к. у них площадь поля моды значительно больше, чем в ступенчатых одномодовых кристаллических световодах.

Авторы благодарят А.Н.Денисова за помощь при изготовлении световода.

1. Butvina L.N., in *Infrared Fiber Optics*. J.S.Shanghera, I.D.Aggarwal (eds.) (Boca Raton, Florida: CRC Press LLC,1998, pp. 209–249).
2. Бутвина Л.Н. *Фотон-Экспресс*, **6**, 43 (2004).
3. Бутвина Л.Н., Середа О.В., Дианов Е.М., Личкова Н.В., Загороднев В.Н., Сороченко В.Р. *Квантовая электроника*, **37**, 383 (2007).
4. Бутвина Л.Н. Середа О.В., Дианов Е.М., Личкова Н.В., Загороднев В.Н. *Квантовая электроника*, **37**, 385 (2007).
5. Butvina L.N., Sereda O.V., Dianov E.M., Lichkova N.V., Zagorodnev V.N. *Opt. Lett.*, **32**, 334 (2007).
6. Lewi T., Ksendzov A., Martin S., Lay O., Shalem S., Tsun A., Zayats A., Katzir A., Lawson P. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7013**, 701313 (2008).
7. Millo A., Lobachinsky L., Katzir A. *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 021112 (2008).
8. Wong W.S., Peng X., McLaughlin J.M., Dong L. *Opt. Lett.*, **30**, 2855 (2005).
9. Dong L., Peng X., Li J. *J. Opt. Soc. Am. B*, **24**, 1689 (2006).
10. Dong L., Li J., Peng X. *Opt. Express*, **14**, 11512 (2006).
11. Wu T.W., Dong L., Winful H. *Opt. Express*, **16** (6), 4278 (2008).
12. Nielsen M.D., Mortensen N.A., Albertsen M., Folkenberg J.R., Bjarklev A., Bonacinni D. *Opt. Express*, **12** (8), 1775 (2004).