

# Одномодовые кристаллические волоконные световоды для длины волны $\lambda = 10.6$ мкм

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

*Впервые получены одномодовые кристаллические волоконные световоды для передачи излучения CO<sub>2</sub>-лазера на длине волны  $\lambda = 10.6$  мкм с оптическими потерями 4–5 дБ/м.*

**Ключевые слова:** одномодовое волокно, кристаллическое волокно, ИК спектроскопия, галогениды серебра.

## 1. Введение

Систематические усилия по разработке кристаллических световодов для среднего ИК диапазона (длины волн 3–20 мкм) начались с 1978 г., когда впервые были изготовлены поликристаллические световоды из твердого раствора галогенидов таллия КРС-5 методом экструзии монокристаллической заготовки через фильеру. В качестве материалов для получения поликристаллических световодов были предложены твердые гомогенные растворы хлорида, бромиды и иодида серебра с кубической решеткой. Такой выбор был обусловлен благоприятной оценкой минимальных оптических потерь этих материалов в диапазоне 3–20 мкм, их нетоксичностью, в отличие от галогенидов таллия, возможностью значительного усиления твердорастворного упрочнения деформационным в процессе экструзии [1]. Поликристаллические световоды демонстрируют особый характер упругого и пластичного поведения, отличный от поведения стеклянных волокон. Поверхность этих световодов принципиально не нуждается в защитной оболочке ввиду пластичного характера их разрушения даже при температуре жидкого азота. Долгое время такие световоды производились безоболочечными [2], поскольку в оболочечных световодах возникали значительные потери за счет рассеяния на границе раздела сердцевина – оболочка.

Для получения оболочечных поликристаллических световодов были разработаны оригинальные технологии. Оптимизация параметров экструзии и технологии выращивания кристаллов позволила существенно, более чем на порядок, снизить рассеяние на возникающих при экструзии вакансионных микропорах и уменьшить шероховатости на границе раздела сердцевина – оболочка. Ранее

нами были разработаны многомодовые оболочечные волокна с гладкой границей раздела, с оптическими потерями менее 1 дБ/м в большей части диапазона пропускания (3–20 мкм) и с минимальными потерями 0.15 дБ/м [3]. Достигнутое структурное совершенство границы раздела сердцевина – оболочка позволило впервые в мире получить одномодовые кристаллические световоды на длину волны от  $\lambda = 10.6$  мкм с потерями менее 5 дБ/м. В предыдущих работах минимальные потери в одномодовых кристаллических световодах достигали 30 дБ/м [4, 5].

## 2. Результаты

Поликристаллические световоды экструдированы из монокристаллов галогенидов серебра  $\text{AgCl}_x\text{Br}_{1-x}$ , где  $0 \leq x \leq 1$  – мольная доля  $\text{AgCl}$  в твердом растворе. Показатель преломления  $n(x)$  в твердых растворах  $\text{AgCl}_x\text{Br}_{1-x}$  уменьшается практически линейно от  $n(0) = 2.17$  до  $n(1) = 1.98$  для длины волны  $\lambda = 10.6$  мкм. С целью изготовления одномодового кристаллического световода были использованы монокристаллы твердых растворов галогенидов серебра –  $\text{AgCl}_{0.5}\text{Br}_{0.5}$  для сердцевин и  $\text{AgCl}_{0.55}\text{Br}_{0.45}$  для оболочки. Различие в их составах  $\Delta x$  было равно 0.05, что соответствует разности показателей преломления сердцевин и оболочки  $\Delta n = n_{\text{co}} - n_{\text{cl}} \approx 0.01$ . Теоретическая числовая апертура получаемого волокна  $\text{NA} = 0.2$ .

Для обеспечения одномодового режима в волокне с круглым поперечным сечением сердцевин волновой параметр  $V = ka(n_{\text{co}}^2 - n_{\text{cl}}^2)^{1/2}$  должен быть меньше  $V_0 = 2.405$ , где  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $a$  – радиус сердцевин. Таким образом, диаметр сердцевин  $d$  должен быть меньше, чем  $d(\lambda, \text{NA}) = \lambda V_0/\pi \text{NA}$ . Для  $\lambda = 10.6$  мкм при  $\text{NA} = 0.2$  максимальный диаметр сердцевин, при котором реализуется одномодовый режим, должен быть равен 40.5 мкм.

В полученном одномодовом кристаллическом волокне (рис. 1) при  $\text{NA} = 0.2$  диаметр сердцевин был равен 35 мкм, оболочки – 500 мкм. Длина изготовленного одномодового волокна составляла примерно 5.5 м. Чтобы убедиться, что излучение распространяется по сердцевине волокна, излучение CO<sub>2</sub>-лазера фокусировалось на торец волокна с помощью специального объектива из германия с фокусным расстоянием  $f = 15$  мм, а боковая поверхность волокна была покрыта слоем металлического серебра. Таким образом, моды оболочки поглоща-

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, lesyaofmpt@mail.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, Zagorodnev@ipmt-hpm.ac.ru  
В.Р.Сороченко. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: soroch@kapella.gpi.ru

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

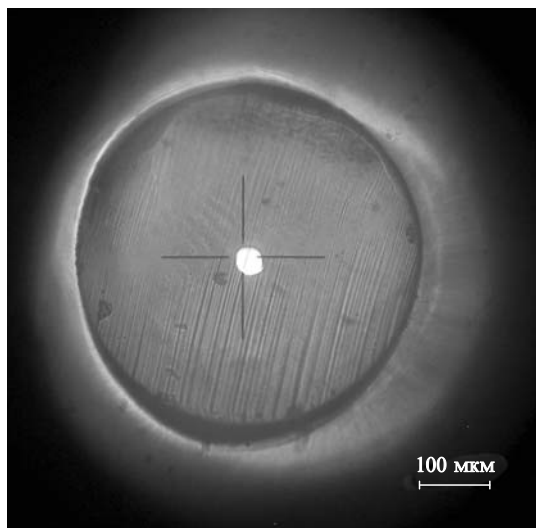


Рис.1. Фотография торца одномодового кристаллического световода.

лись металлическим слоем. При измерениях использовалось излучение одномодового  $\text{CO}_2$ -лазера (мода  $\text{TEM}_{00}$ ,  $\lambda = 10.2744$  мкм (линия 10R(16)), мощность  $\sim 5$  Вт, диаметр пучка менее 6 мм, расходимость менее 4.2 мрад, степень поляризации 90 %, осциллограф Tektonix TDS 2014 (полоса частот 100 МГц, время оцифровки 1 нс) и механический прерыватель (скважность 1:30). Оптические потери в одномодовом волокне были измерены методом скальвания и составили 4–5 дБ/м.

В ходе эксперимента максимальная мощность излучения на входе световода составляла  $\sim 3$  Вт. Разрушения материала при этом не наблюдалось.

Распределение поля в дальней зоне было измерено МСТ-приемником (ртути-кадмий-теллур) с волоконным входом [6]. На рис.2 показано распределение поля в дальней зоне для одномодового кристаллического волокна, полученное путем смещения торца приемного волокна относительно одномодового в поперечном направлении при расстоянии  $L = 7$  мм между торцами световодов. Распределение поля в дальней зоне хорошо описывается гауссовой кривой ( $P = \{A/[w(\pi/2)^{1/2}]\} \exp\{-2[(\varphi - \varphi_c)/w]^2\}$ , где  $P$  – мощность излучения;  $\varphi$  – угол смещения приемного волокна;  $\varphi_c = -0.0062 \pm 0.00073$ ;  $w = 0.12887 \pm 0.00145$ ;  $A = 0.39552 \pm 0.00386$ ). Коэффициент корреляции  $R^2 = 0.99612$ . Числовая апертура, измеренная по уровню 5 %, составила 0.16.

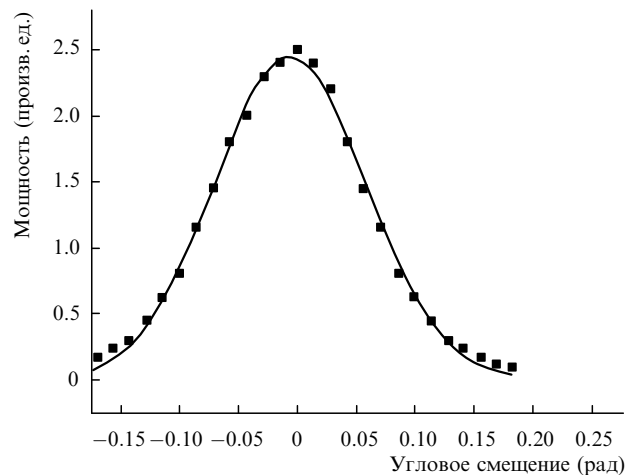


Рис.2. Распределение поля в дальней зоне одномодового кристаллического волокна и его приближение гауссовой кривой. Числовая апертура NA, измеренная по уровню 5 %, равна 0.16.

### 3. Заключение

Таким образом, нами получен одномодовый кристаллический световод на длину волны  $\lambda > 10$  мкм. Измерен профиль выходного излучения. Одним из наиболее важных применений одномодовых кристаллических волокон является передача излучения  $\text{CO}_2$ -,  $\text{CO}$ -лазеров, квантово-каскадных лазеров [7] и других лазерных источников ИК диапазона, фильтрация мод [8], а также использование этих волокон в ИК лазерной спектроскопии и системах оптических ИК сенсоров. Многоволоконные кабели одномодовых волокон могут применяться для получения теплового изображения [9]. Показана также возможность создания волоконных лазеров среднего ИК диапазона.

1. Butvina L.N et al. *Sov. Lightwave Commun.*, 1 (1991).
2. Butvina L.N. et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4083**, 238 (2000).
3. Бутвина Л.Н. *Фотон-экспресс*, **6**, 43 (2004).
4. Shalem S. et al. *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 091103 (2005).
5. Wallner O. et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5491**, 636 (2004).
6. Butvina L.N., in *Infrared Fiber Optics*. Ed. by J.S.Shanghera, I.D. Aggarwal (Boca Raton, Florida: CRC Press LLC, 1998, pp.209–249).
7. Chen J.Z. et al. *Opt. Express*, **13**, 5953 (2005).
8. Borde P. et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4838**, 273 (2003).
9. Shalem S. et al. *Opt. Lett.*, **30**, 15 (2005).