

Композитный трехслойный световод из галогенидов калия и серебра для среднего ИК диапазона

А.Л.Бутвина, Л.Н.Бутвина, А.Г.Охримчук

Впервые показана возможность совместной экструзии кристаллов галогенидов серебра и калия для получения двух-оболочечного поликристаллического ИК световода. Это сочетание позволяет преодолеть недостатки, присущие каждому из кристаллов в отдельности. Получившиеся волокна имеют стабильное долговременное пропускание и могут быть использованы для передачи излучения CO₂-лазера. Потери в световоде на длине волны 10.6 мкм составили 0.75 дБ/м.

Ключевые слова: средний ИК диапазон, галогенид серебра, галогенид калия, ИК световод.

1. Введение

В настоящее время существует практическая потребность в световодах среднего ИК диапазона для передачи лазерного излучения, в частности на длине волны 10.6 мкм, получившего широкое распространение CO₂-лазера. Его излучение используется в мощных промышленных установках, а также в ряде других приложений (в частности в хирургии), где передаваемые средние мощности не столь высоки (10–30 Вт). На сегодняшний день эти задачи решаются в основном с помощью полых металлических или полых брегговских световодов [1, 2]. Несмотря на то что в некоторых таких световодах достигаются потери ~0.2 дБ/м [2], они все еще высоки для многих приложений, причем потери в полых световодах сильно зависят от радиуса изгиба, что также затрудняет их использование.

Среди волокон, пропускающих в области длин волн 8–10 мкм, наименьшие потери в настоящее время имеют экструзионные световоды из твердых растворов галогенидов серебра (до 50 дБ/км на 10.6 мкм [3]). К сожалению, их широкому внедрению препятствуют такие недостатки, как светочувствительность и низкий порог разрушения непрерывным лазерным излучением, что приводит к быстрому плавлению заднего торца световода. Это особенно актуально при использовании в качестве сердцевины световода галогенидов серебра из-за их склонности к диспропорционированию при нагреве с образованием поглощающих кластеров серебра.

Мы рассмотрели все кристаллы, используемые в ИК оптике в качестве передающей среды для излучения CO₂-лазера, и нашли, что некоторые из них обладают набором свойств, необходимых для изготовления из них композитных микроструктурированных ИК волокон методом экструзии. Это наличие кубической решетки, возможность пластической деформации с приемлемой скоростью при приемлемой температуре (до 300 °С), наличие пяти независимых систем скольжения при температуре

деформации (критерий Мизеса для однородной пластической деформации). Такими свойствами обладают несколько прозрачных в среднем ИК кристаллов, а именно галогениды натрия и калия (KCl, KBr, NaCl), а также их твердые растворы и несколько других галогенидов металлов. Эти кристаллы сравнительно доступны и хорошо изучены, что значительно упрощает работу с ними. Существенными недостатками таких кристаллов (табл.1) являются их гигроскопичность и хрупкость.

Работы по изготовлению световодов для ИК диапазона из щелочно-галогидных кристаллов показали, что такие световоды могут быть получены методом экструзии с оптическими потерями менее 1 дБ/м и могут передавать излучение CO₂-лазера значительной мощности [4]. Однако их применение затруднено и ограничено по причине быстрой деградации таких световодов в обычной влажной атмосфере.

В настоящей работе показано, как этот недостаток может быть преодолен введением в экструзионную преформу второй оболочки из другого материала, непроницаемого для молекул воды. Для этого мы предлагаем использовать вторую оболочку из негигроскопичного поликристаллического твердого раствора AgClBr, которая в нашем случае выполняет сразу три функции: снижает коэффициент трения при экструзии, защищает волокно от паров воды и улучшает механические свойства получаемого композитного экструзионного световода. Одно из фундаментальных преимуществ галогенидов калия по сравнению с галогенидами серебра состоит в отсутствии внутризонных состояний в валентной зоне [5], что приводит к отсутствию у галогенидов калия внутризонного поглощения в среднем ИК диапазоне в отличие от галогенидов серебра.

Из всех щелочно-галогидных кристаллов мы выбрали галогениды калия, коэффициент термического расширения которых близок к таковому у галогенидов серебра. Фундаментальные минимальные оптические потери, определяемые многофононным поглощением на $\lambda = 10.6$ мкм, для KBr составляют 4.4×10^{-6} дБ/м, а для KCl – 0.035 дБ/м [6]. В работе [4] достигнуты потери 1 дБ/м для незащищенных световодов с сердцевиной из KBr и оптической оболочкой из KCl, однако эффективного способа предотвращения их деградации не найдено.

А.Л.Бутвина, Л.Н.Бутвина, А.Г.Охримчук. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: butvina.alexey@yandex.ru

Табл.1. Оптические и теплофизические свойства щелочно-галогидных кристаллов KCl, CsI и галогенидов серебра [1].

Кристалл	Минимальное поглощение на $\lambda = 10.6$ мкм (дБ/км) (монокристалл)	Показатель преломления на $\lambda = 10.6$ мкм	Теплопроводность (10^2 кал·°C ⁻¹ ·см ⁻¹ ·с ⁻¹)	Коэффициент термического расширения (10^{-6} °C ⁻¹)	Температура плавления (°C)	Растворимость (г/100 г воды)	Недостатки
AgCl	60	1.98	2.6×10^{-3}	30	457	2×10^{-4}	Светочувствительный
0.5AgCl–0.5AgBr	26	2.12	1.5×10^{-3}	33	418	7×10^{-5}	Светочувствительный
KCl	30	1.45	16×10^{-3}	36	776	34.7	Хрупкий, гигроскопичный
CsI	40	1.74	2.7×10^{-3}	48	621	44	Гигроскопичный

2. Изготовление композитных волокон и результаты

Перед экструзией композитных волокон была собрана преформа (рис.1), состоящая из сердцевинки и двух оболочек. Вторая оболочка из твердого раствора AgClBr выполняла защитную функцию. Материалом сердцевинки служил твердый раствор $KCl_{0.1}KBr_{0.9}$ (показатель преломления $n = 1.518$ на $\lambda = 10.6$ мкм), выращенный методом Бриджмена–Стокбаргера в ИПТМ РАН. Материалом первой оптической оболочки был выбран кристалл KCl. Такие кристаллы являются общедоступными. Сердцевина из монокристалла KClBr помещалась в оболочку из KCl, и все это – в специальный цилиндр из AgClBr, изготовленный методом экструзии. Защитный слой AgClBr предохраняет световод от негативного воздействия влаги, снижает коэффициент трения в фильере и улучшает механические свойства волокна – уменьшает хрупкость и радиус упругого изгиба до 100 диаметров световода, или 0.5% относительно удлинения при изгибе.

Диаметр заготовки составлял 12 мм, а диаметры вытянутого световода состава KBrCl/KCl/AgClBr равнялись 465/870/1000 мкм. Фотография торца световода приведена на рис.2. Получившаяся трехслойная заготовка была

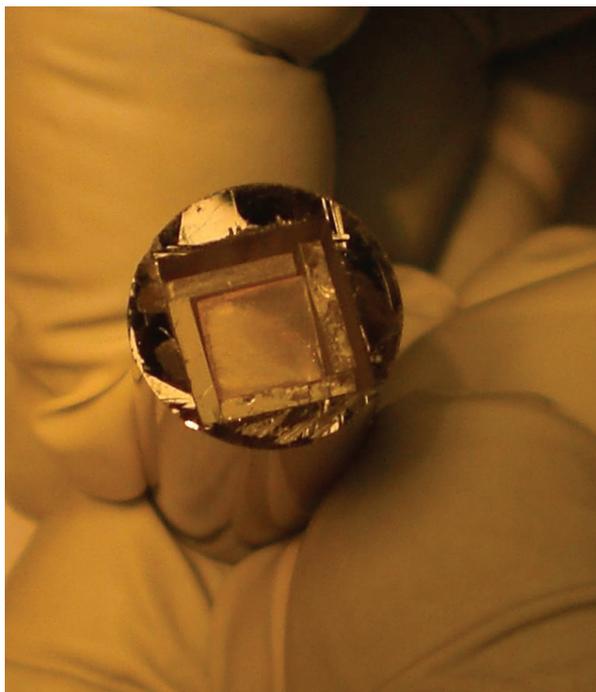


Рис.1. Составная композитная преформа для экструзии.

проэкструдирована методом обратной экструзии. Температура экструзии была равна 210°C, давление достигало 3 т, скорость экструзии составляла около 1 мм/мин. В результате было получено волокно длиной 4 м с диаметром внешней оболочки 1 мм. Апертура многомодового ИК волокна $NA = 0.44$. Неровность границы раздела между сердцевинкой и оболочкой (рис.2) обусловлена кристаллической природой исходных веществ. Торцы световодов изготавливались специальным ножом с 10-микронной толщиной срезов, качество торца контролировалось микроскопом МБС-10. Спектр пропускания полученного волокна измерялся спектрометром Vector-22 (Bruker) с приемником DTGS при комнатной температуре после экструзии (рис.3). Измерения спектра, проведенные через неделю, не показали статистически значимых изменений пропускания.

Для экспериментального определения потерь и передачи лазерной мощности полученными волокнами в области 10.6 мкм была собрана установка на основе CO₂-лазера, излучение которого фокусировалось в волокно линзой из просветленного Ge ($f = 30$ мм). Мощность лазера измерялась калиброванным термопарным приемником ROFIN-SINAR. Волокно длиной $L = 1.3$ м стабильно пропускало непрерывное излучение до максимально возможной выходной мощности лазера 30 Вт. При входной мощности 0.56 Вт выходная мощность составляла 0.41 Вт.

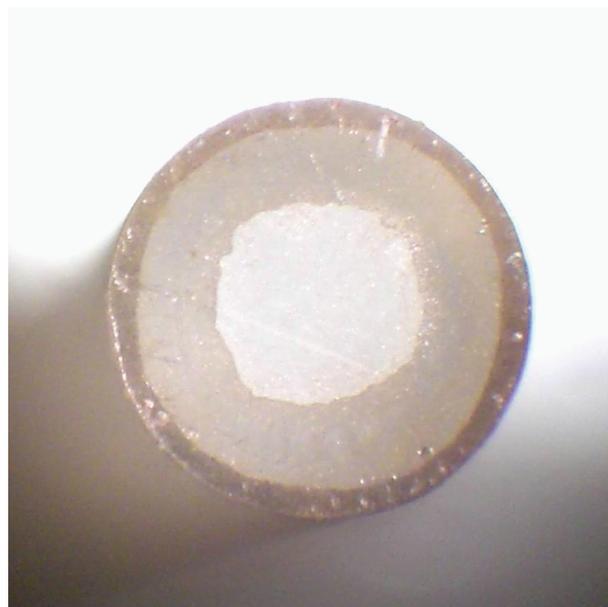


Рис.2. Фотография торца композитного поликристаллического ИК световода.

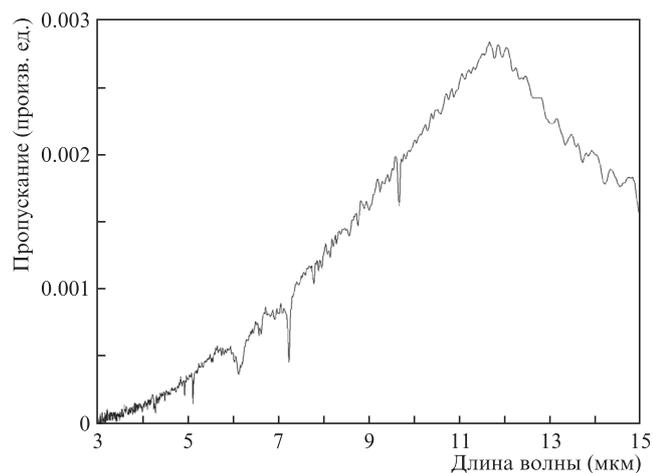


Рис.3. Спектр пропускания световода длиной 1.5 м.

Таким образом, с учетом френелевских отражений на торцах оптические потери в световоде длиной 1.3 м на $\lambda = 10.6$ мкм составили 0.75 дБ/м с погрешностью до 5%. Выходная мощность линейно зависила от входной вплоть до мощности 30 Вт. Оптические потери A (дБ/м) в волокне вычислялись исходя из закона Ламберта–Бэра: $P_{\text{out}} = P_{\text{in}}(1 - R)^2 \exp(-AL)$ (P_{out} и P_{in} — мощности на выходе и входе, R — коэффициент отражения, L — длина световода в метрах) по следующей формуле:

$$A = 10L^{-1} \lg[(P_{\text{in}}/P_{\text{out}})16n^2(1+n)^{-4}]. \quad (1)$$

При вычислении мы пренебрегли потерями на неровностях торцов многомодовых световодов, поэтому реальные потери еще ниже.

3. Выводы

Впервые показана возможность совместной экструзии кристаллов галогенидов серебра и калия для получения двухоболочечного поликристаллического световода для среднего ИК диапазона. Этим методом впервые изготовлено композитное двухоболочечное ИК волокно, состоящее из поликристаллической сердцевины состава $\text{KCl}_{0.1}\text{KBr}_{0.9}$, оптической оболочки KCl и защитной водонепроницаемой оболочки AgClBr . Это сочетание кристаллов позволяет преодолеть недостатки, присущие каждому из них в отдельности. Получившееся волокно имеет стабильное долговременное пропускание и может быть использовано для передачи излучения CO_2 -лазера. Потери в световоде на длине волны 10.6 мкм составили 0.75 дБ/м.

Спектр пропускания волокна показывает, что основными источниками потерь являлись потери на рассеяние. Мы полагаем, что это рассеяние на неоднородностях световода, а именно на шероховатой границе между сердцевиной и оболочкой и на межзеренных микропорах. Дальнейшие работы будут направлены на совершенствование структуры композитных экструзионных световодов и уменьшение их оптических потерь.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 19-12-00134).

1. *Infrared Fiber Optics*. Ed. by J.S.Sanghera, I.D.Aggarwal (Boca Raton, Boston: CRC Press, 1998).
2. Bledt C.M. et al. *Appl. Opt.*, **51** (16), 3114 (2012).
3. Butvina L.N. et al. *Advances in Optical Materials (AIOM)* (Istanbul, Turkey, 2011, AIThD).
4. Harrington J.A. *Appl. Opt.*, **27** (15), 3097 (1988).
5. Бассани Ф., Парравичини Пастори Дж. *Электронные состояния и оптические переходы в твердых телах* (М.: Наука, 1982, с.193).
6. Deutsch T.F. *J. Phys. Chem. Solids*, **34**, 2091 (1973).