

УДК 681.7.068

**А.Л. Бутвина, Л.Н. Бутвина, А.Г. Охримчук**Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,  
Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова, г. Москва, Россия**ОДНОМОДОВЫЕ ЭКСТРУЗИОННЫЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ  
СВЕТОВОДЫ ГАЛОГЕНИДОВ СЕРЕБРА С ПОТЕРЯМИ  
МЕНЬШЕ 1ДБ/М ДЛЯ СО<sub>2</sub> ЛАЗЕРА**

Впервые разработаны и изготовлены методом экструзии одномодовые поликристаллические световоды среднего ИК диапазона с длиной волны отсечки 10 мкм с оптическими потерями фундаментальной моды меньше 1 дБ/м на длине волны 10,6 мкм СО<sub>2</sub> лазера. Измеренные оптические потери сегментированного одномодового поликристаллического световода с малым контрастом 0,01 показателя преломления  $\text{AgCl}_{0,5}\text{Br}_{0,5}/\text{AgCl}_{0,55}\text{Br}_{0,45}$  составили 0,8 дБ/м. Впервые разработано и изготовлено поликристаллическое сегментированное одномодовое волокно со ступенчатым профилем на длине волны 10,6 мкм и с высоким контрастом 0,05 показателя преломления  $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75} / \text{AgCl}_{0,5}\text{Br}_{0,5}$  и наименьшими в мире оптическими потерями 0,5 дБ/м из известных авторам. Порог лазерного разрушения непрерывного СО<sub>2</sub> лазера составил величину 200 кВт/см<sup>2</sup>. Впервые изготовлены одномодовые поликристаллические нано- и микроструктурированные экструзионные световоды галогенидов серебра с сердцевинной с наименьшим диаметром 17 мкм.

**Ключевые слова:** ИК экструзионные поликристаллические световоды, одномодовые световоды на длине волны 10,6 мкм, одномодовые световоды для СО<sub>2</sub> лазеров, оптические потери, порог лазерного разрушения, дисперсия в среднем ИК, галогениды серебра.

**A.L. Butvina, L.N. Butvina, A.G. Okhrimchuk**Institute of General Physics named after A.M. Prokhorov RAS,  
Scientific Center for Fiber Optics named after E.M. Dianov, Moscow, Russia**SINGLE-MODE EXTRUSION POLYCRYSTALLINE  
LIGHT GUIDES OF SILVER HALOGENIDES  
WITH LOSSES LESS THAN 1DB / M FOR CO<sub>2</sub> LASER**

For the first time, single-mode polycrystalline mid-IR optical fibers with a cutoff wavelength of 10 μm with an optical loss of the fundamental mode less than 1 dB / m at a wavelength of 10.6 μm of a CO<sub>2</sub> laser have been developed and manufactured by extrusion. The measured optical loss of a segmented single-mode polycrystalline fiber with a low contrast of 0.01 refractive index  $\text{AgCl}_{0,5}\text{Br}_{0,5}/\text{AgCl}_{0,55}\text{Br}_{0,45}$  was 0.8 dB / m. For the first time, a polycrystalline segmented single-mode fiber at a wavelength of 10.6 μm with a stepped profile and a high contrast of 0.05 refractive index  $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75} / \text{AgCl}_{0,5}\text{Br}_{0,5}$  and the lowest in the world, as we know, optical losses of 0.5 dB / m. The threshold for laser destruction of a cw CO<sub>2</sub> laser was 200 kW / cm<sup>2</sup>. For the first time, single-mode polycrystalline nano- and micro-structured extrusion fibers of silver halides with a smallest core of 17 μm have been fabricated.

**Keywords:** IR extrusion polycrystalline fibers, single-mode fibers at a wavelength of 10,6 μm, single-mode fibers for CO<sub>2</sub> lasers, optical losses, laser damage threshold, dispersion in mid-IR, silver halides.

## **Введение**

Поликристаллические гибкие оптические волокна из кристаллов твердых растворов галогенидов серебра  $\text{AgCl}_x\text{Br}_{1-x}$  ( $0 < x < 1$ ) имеют широкое окно прозрачности в среднем инфракрасном (ИК) диапазоне (длины волн 3–15 мкм). Кристаллы галогенидов серебра пластичны, нетоксичны, негигроскопичны, однако обладают значительной фоточувствительностью. ИК волокна из этих кристаллов производятся методом экструзии<sup>1</sup>. Фактические потери в световодах из кристаллов галогенидов серебра превышают теоретически возможные на 1–2 порядка. Актуальные оптические потери как в безоболочечных, так и в оболочечных экструзионных световодах вызваны в основном рассеянием и поглощением 3-мерными дефектами (порами и коллоидами серебра), возникающими в процессе пластической деформации при экструзии<sup>1</sup>. Снижение этих потерь весьма актуально. Оно увеличит длины применяемых ИК-волокон в разнообразных применениях, в частности в медицине, для передачи излучения  $\text{CO}_2$  лазера. Создание ярких волоконных источников среднего ИК-диапазона также требует разработки одномодовых кристаллических световодов с малыми оптическими потерями. Астрономические ИК-интерферометры также нуждаются в одномодовых ИК-световодах с малыми потерями.

Актуальность работы по снижению оптических потерь в одномодовых поликристаллических ИК-световодах следует из высокого уровня оптических потерь (2–20 дБ/м) в уже опубликованных работах [2–5]. Материалы для поликристаллических волокон должны удовлетворять многим требованиям. Во-первых, кристалл должен быть пластически деформируем в области температур, выдерживаемых экструзионной камерой, со скоростью больше чем 1 см/мин. Во-вторых, кристалл должен быть оптически изотропным, так как зерна поликристаллического волокна значительно (десятки градусов) разориентированы по своим кристаллографическим направлениям. Поэтому для уменьшения рассеяния в волокне кристалл должен иметь кубическую решетку. И, наконец, процесс рекристаллизации должен быть заторможен в условиях эксплуатации волокна для предотвращения деградации его оптических и механических свойств. Кроме того, кристаллы должны иметь низкие оптические потери в среднем инфракрасном диапазоне. Подходящими кристаллами являются твердые сильные растворы галогенидов серебра и некоторых других металлов.

Развитие экструзионных поликристаллических инфракрасных оболочечных световодов из негигроскопического и нетоксического материала кристаллов твердых растворов галогенидов серебра  $\text{AgCl-AgBr-AgI}$  с широкой областью (длины волн 20–2,5 мкм или волновые числа 500–4000  $\text{см}^{-1}$ ) малых оптических потерь (0,1–1 дБ/м) со стабильными характеристиками позволяет проводить количественные долговременные исследования<sup>6</sup>. Многолетняя стабильность спектра пропускания этих световодов достигается глубокой очисткой исходных монокристаллов для изготовления сердцевины и оболочки и их совместной экструзией в оболочечный нано- и микроструктурированный световод<sup>1</sup>.

### 1. Экспериментальные методы

Методы изготовления длинных поликристаллических оптических волокон фундаментально отличаются от вытягивания кварцевых световодов. Лучшие результаты получены методом **экструзии**, где кристаллическая заготовка продавливается через полированную фильеру. В рамках данной работы мы разработали новую экструзионную установку на порядок с улучшенной равномерностью хода пресс-штемпеля с максимальным усилием до 30 т. Нами были найдены оптимальные параметры экструзии и технология приготовления составных преформ из кристаллов. Созданная технология ведет к существенному снижению оптических потерь, вызываемых как вакансионными порами, так и кластерами, и коллоидами серебра, образующимися в процессе экструзии. Поликристаллические волокна галогенидов серебра имеют особые упругие и пластические свойства, отличные от кварцевых световодов, сделанных из хрупких материалов. Поверхность такого кристаллического волокна не нуждается в защитном покрытии. Механические и оптические свойства кристаллических световодов могут меняться в широком диапазоне и определяются дислокационной структурой, структурой зерен, их распределением и составом. Твердорастворное упрочнение в растворах  $\text{AgCl-AgBr}$  усиливается деформационным упрочнением во время экструзии<sup>1</sup>. Оптимизация состава кристаллов и условий экструзии позволяет получать кристаллические световоды с прочностью 170–200 МПа и упругостью до 1 %<sup>1</sup>.

### **1.1. Изготовление оболочечных кристаллических волокон**

Оболочечные поликристаллические световоды со ступенчатым профилем показателя преломления изготавливались экструзией составной кристаллической преформы «стержень-трубка» из камеры диаметром 12 мм через фильеры диаметрами 0,5, 0,7 и 1,0 мм. Для этого методами экструзии в специальных камерах высокого давления изготавливались из соответствующих кристаллов отдельно сердцевина и отдельно поликристаллическая трубка-оболочка. В кристаллах твердых растворов  $\text{AgCl}-\text{AgBr}$  показатель преломления изменяется практически линейно с атомной композицией в диапазоне от 1,97 (для  $\text{AgCl}$ ) до 2,17 (для  $\text{AgBr}$ ) на длине волны 10 мкм. Материалы, используемые для оболочки кристаллического световода, позволили изготовить оболочечные световоды с диаметром сердцевины от 18 мкм до 0,9 мм с числовыми апертурами от 0,14 до 0,5. Благодаря уменьшению оптических потерь в сердцевине и улучшению границы раздела мы достигли уровня потерь меньше 1 дБ/м для диапазона пропускания 3–12 мкм с минимумом около 0,05 дБ/м на длинах волн вблизи 7–10,6 мкм<sup>7</sup>. Оптические потери в световодах измерялись с помощью метода укорочения длины световода (cut-back) на спектрометре «Bruker» модели Vector 22. Мы разработали методы как прямой, так и обратной экструзии комплексной составной заготовки (стержень в трубке) для изготовления оболочечных световодов. Фото части сечения оболочечного кристаллического световода  $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75} / \text{AgCl}_{0,5}\text{Br}_{0,5}$  диаметром 1 мм показано на рис. 1.

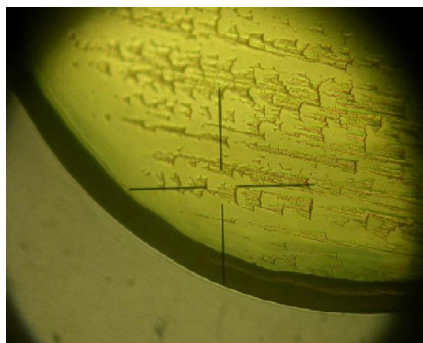


Рис. 1. Фотография части сечения оболочечного поликристаллического световода

## 1.2. Дисперсия в одномодовом кристаллическом волокне

Для изготовления одномодовых световодов со ступенчатым профилем показателя преломления необходимо детальное знание дисперсии показателей преломления в материалах сердцевины и оболочки и поведения волноводной дисперсии в зависимости от структуры световода.

### 1.2.1. Материальная дисперсия

Дисперсия материала волокна (в пс/мкм/м, что идентично пс/нм/км) определялась по формуле:

$$D_{mat}(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} 10^{12} \frac{d^2}{d\lambda^2} n(\lambda), \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны, мкм;  $c$  – скорость света, м/с,  $n(\lambda)$  – показатель преломления материала, который определялся как

$$n(\lambda) = xn_{AgCl}(\lambda) + (1-x)n_{AgBr}(\lambda), \quad (2)$$

где  $x$  – доля AgCl в составе материала  $AgCl_xBr_{1-x}$ .

Зависимость показателя преломления для AgCl бралась из данных компании Crystran Ltd. – производителя кристаллических материалов высокой чистоты:

$$n_{AgCl} = \left( 1 + \frac{2,062508\lambda^2}{\lambda^2 - 0,1039054^2} + \frac{0,9461465\lambda^2}{\lambda^2 - 0,2438691^2} + \frac{4,300785\lambda^2}{\lambda^2 - 70,85723^2} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

Зависимость показателя преломления для AgBr (рис. 2) была подобрана методом наименьших квадратов по эмпирической формуле, аналогичной зависимости для AgCl, на основе справочных данных, опубликованных компанией Crystran Ltd. и группой «Кристаллические световоды» Университета Тель-Авива, Израиль (рис. 3).

$$n_{AgBr} = \left( 1,855 + \frac{2,7821\lambda^2}{\lambda^2 - 0,21509^2} + \frac{0,0538\lambda^2}{\lambda^2 - 0,008591^2} + \frac{0,1147\lambda^2}{\lambda^2 - 64,91^2} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

При этом  $\chi^2 = 3E-5$ ,  $R^2 = 0,986$ .

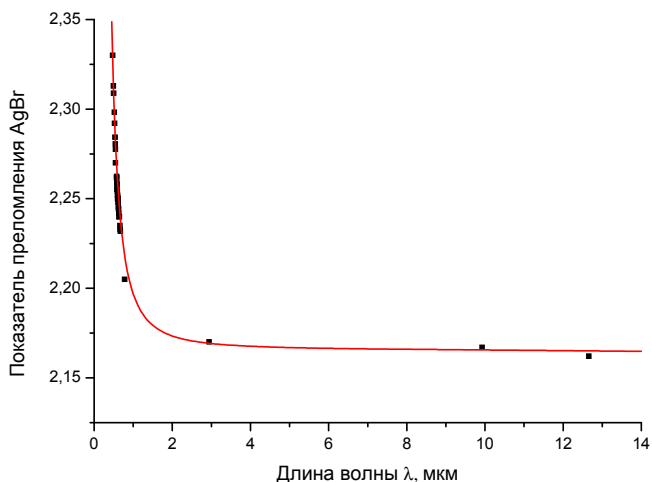


Рис. 2. Зависимость показателя преломления AgBr

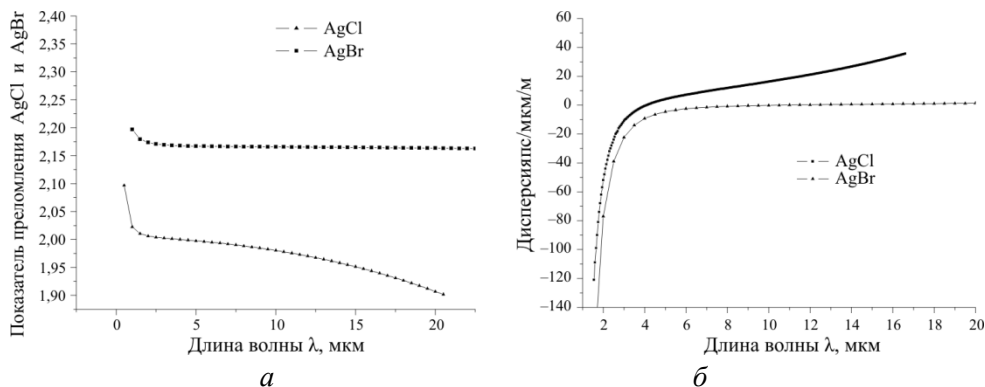


Рис. 3. Показатели преломления (а) и материальная дисперсия (б) AgBr и AgCl

Нуль дисперсии достигается при длине волны 4 и 10 мкм для AgCl и AgBr соответственно. Нуль дисперсии для смешанных составов лежит между этими значениями.

### 1.2.2. Волноводная дисперсия

Дисперсия первой моды в волокне со ступенчатым профилем показателя преломления рассчитывалась по формуле (1), где в качестве  $n(\lambda)$  бралась расчетная зависимость эффективного показателя преломления для первой моды  $n_{eff} = \frac{\beta}{k_0}$ .

На рис. 4 приведен пример дисперсии первой моды одномодового ступенчатого волокна (для разных диаметров  $d$  сердцевины разницы в концентрациях  $c$ ). Значения длины волны отсечки  $\lambda_{\text{cut}}$  для каждого волокна обозначены на рис. 4 квадратом.

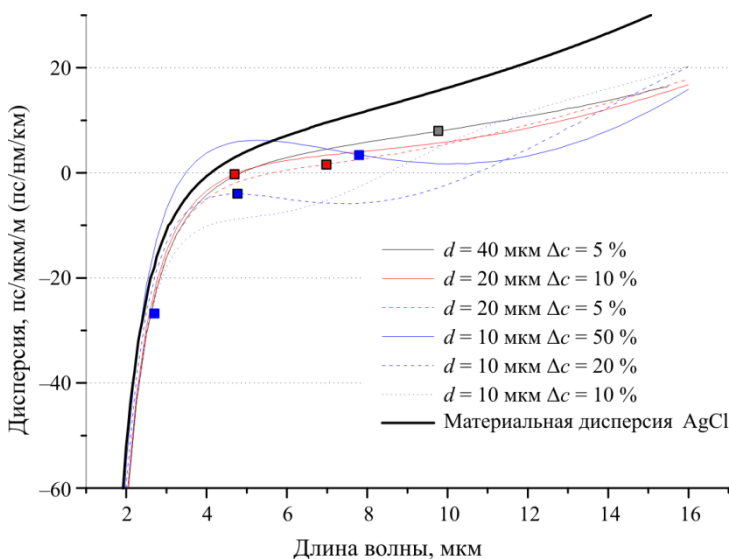


Рис. 4. Расчетное значение дисперсии для одномодового ступенчатого волокна

Из приведенного графика (см. рис. 4) видно, что значение дисперсии в кристаллах галогенидов серебра мало, и влияние волноводной дисперсии на общее значение дисперсии начинает проявляться при уменьшении сердцевины, но имеет невысокое значение по сравнению с дисперсией кварцевого стекла.

## 2. Изготовление одномодовых ступенчатых экструзионных световодов

### 2.1. Изготовление одномодовых ступенчатых экструзионных световодов с малой разницей показателей преломления методом сверления

Для изготовления одномодовых кристаллических световодов со ступенчатым профилем показателя преломления были использованы монокристаллы твердых растворов галогенидов серебра с составами:  $\text{AgCl}_{0,5}\text{Br}_{0,5}$  для сердцевины и  $\text{AgCl}_{0,55}\text{Br}_{0,45}$  для оболочки. Разница в со-

ставе  $\text{AgCl}_x\text{Br}_{1-x}$  сердцевины и оболочки была  $\Delta x \approx 0,05$ , что соответствует разнице показателей преломления  $\Delta n = n_{co} - n_{cl} \approx 0,01$ . Теоретическая числовая апертура получаемого волокна:  $NA = \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} = 0,2$ , где  $n_{co}$  и  $n_{cl}$  – показатели преломления сердцевины и оболочки соответственно.

Для обеспечения одномодового режима в волокне с круглым поперечным сечением сердцевины и со ступенчатым профилем показателя преломления волновой параметр  $V = k\rho(n_{co}^2 - n_{cl}^2)^{1/2}$  должен быть меньше:  $V < V_0 = 2,405$ , где  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\rho$  – диаметр сердцевины. Таким образом, диаметр сердцевины должен быть меньше, чем  $d(\lambda, NA) = \lambda V_0 / \pi NA$ , где  $NA$  – числовая апертура волокна. Для длины  $\lambda = 10,6$  мкм и при апертуре волокна  $NA = 0,2$  максимальный диаметр сердцевины, при котором реализуется одномодовый режим, должен быть  $d = 40,5$  мкм (см. рис. 4).

Для получения волокон с заданными параметрами в заготовке  $\text{AgCl}_{0,55}\text{Br}_{0,45}$  диаметром 12 мм сверлилось отверстие диаметром 1 мм, в которое было вставлено многомодовое волокно с диаметром сердцевины/оболочки 900/1000 мкм и составами  $\text{AgCl}_{0,5}\text{Br}_{0,5}/\text{AgCl}_{0,55}\text{Br}_{0,45}$ . Составная заготовка экструдировалась через фильеру диаметром 500 мкм при температуре 200 °С. В полученных одномодовых кристаллических волокнах при числовой апертуре  $NA = 0,2$  диаметр сердцевины был равен 38–35 мкм, оболочки – 500 мкм. Длины установившихся волокон составляли до 10 м. Измерение характеристик волокна производилось с помощью одномодового  $\text{CO}_2$  лазера «Плазма» модель LCD-25W. Распределения излучения в ближнем и дальнем поле были изучены с помощью ИК-камер Spigicon Ругосам-3 и Ругосам-4. Оболочечные моды подавлялись погружением концов волокон в низкотемпературный сплав. В условиях контроля выхода только фундаментальной моды измеренные минимальные оптические потери в световодах, полученных таким методом, составляли величины 1,2–1,4 дБ/м.

## **2.2. Одномодовый сегментный световод с малой разницей показателей преломления**

Изучение границы раздела в оптическом микроскопе показало наличие коллоидов серебра на границе раздела. Таким образом, основным источником потерь в одномодовых световодах галогенидов серебра со ступенчатым профилем показателя преломления являются потери на границе сердцевины и оболочки, а именно плазмонное поглощение на кол-



лоидах. По сравнению с многомодовыми световодами фактор потерь на границе возрастает многократно, так как фундаментальная мода при отсечке распространяется в оболочку до половины радиуса сердцевины.

Поскольку диаметр одномодового световода на 10,6 мкм составляет порядка десятков микрометров, то для его изготовления требуется сначала экструдировать сердцевину. В предыдущих экспериментах сердцевина вставлялась в оболочку после сверления. Это создавало неудовлетворительное качество поверхности раздела, так как в результате сверления в оболочке возникают дефекты, такие как кластеры серебра и неровности поверхности. В качестве альтернативы сверлению мы разработали способ создания сегментированного световода. В этом способе устраняются дефекты, присущие стандартному сверлению. Для снижения неровностей канал сердцевины в оболочке формируется с помощью вдавливания отполированного стержня между двумя экструдированными полуцилиндрами (сегментами преформы). Фотография торца полученного световода приведена на рис. 5.

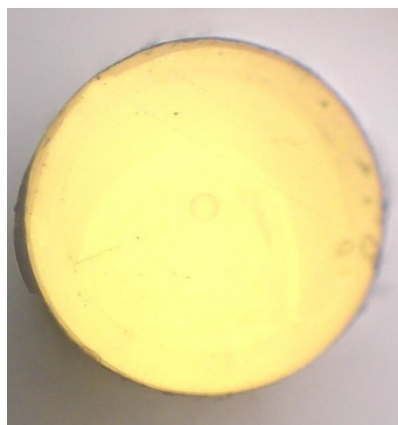


Рис. 5. Фотография торца одномодового сегментированного световода  $\text{AgCl}_{0,5}\text{Br}_{0,5}/\text{AgCl}_{0,55}\text{Br}_{0,45}$

Для подавления оболочечных мод, которые могут возникать при засветке входного торца волокна, одномодовое кристаллическое волокно покрывалось различными поглощающими в среднем ИК диапазоне материалами: тушью, легкоплавкими сплавами, металлическим серебром. Потери в исходном волокне были измерены с помощью одномодового  $\text{CO}_2$  лазера. Излучение лазера фокусировалось на торец волокна с помощью просветленной германиевой линзы дифракционного качества

(фокусное расстояние 30 мм). Оптимальные расстояния для модового согласования с учетом параметров гауссового пучка лазера находились с помощью программы MATLAB. Входная мощность составила 5 Вт, выходная – 3,6 Вт. С учетом френелевского отражения на входном и выходном торцах, эффективности возбуждения основной моды и длины световода потери в световоде не превосходят 0,8 дБ/м, что является рекордным значением для одномодовых на 10,6 мкм световодов данного типа.

Распределения излучения в ближнем и дальнем поле были изучены с помощью ИК-камеры Spigicon Pygocam-3 (рис. 6).

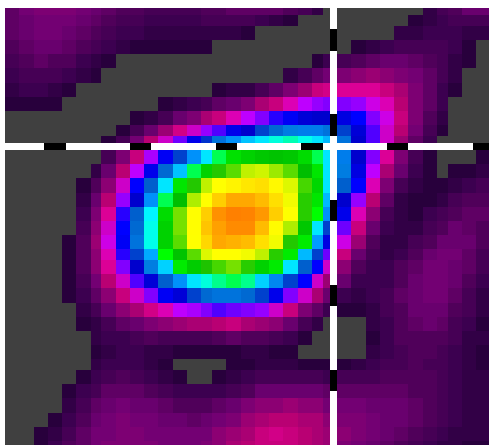


Рис. 6. Изображение поля фундаментальной моды в ближней зоне сегментного световода  $\text{AgCl}_{0,5}\text{Br}_{0,5}/\text{AgCl}_{0,55}\text{Br}_{0,45}$

### 2.3. Одномодовые световоды с большой разницей показателей преломления

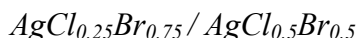
Наличие внутренних напряжений (оценка 20 МПа в<sup>1</sup>) в поликристаллической структуре экструдированного оболочечного световода из-за высоких фотоупругих постоянных галогенидов серебра приводит к значительному двулучепреломлению. Это у световодов с малой разницей в показателях преломления сердцевины и оболочки приводит к большей связи фундаментальной моды с другими модами. Поэтому нами были разработаны, экструдированы и исследованы одномодовые на 10,6 мкм волокна с **большой** разницей показателей преломления сердцевины и оболочки из составов  $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$  для сердцевины и  $\text{AgCl}_{0,5}\text{Br}_{0,5}$  для оболочки. Разница в составе  $\text{AgCl}_x\text{Br}_{1-x}$  сердцевины и оболочки была  $\Delta x \approx 0,25$ , что соответствует разнице показателей преломления  $\Delta n = n_{co} - n_{cl} \approx 0,05$ .

Для обеспечения одномодового режима в волокне с круглым поперечным сечением сердцевинки и со ступенчатым профилем показателя преломления волновой параметр  $V = k\rho(n_{co}^2 - n_{cl}^2)^{1/2}$  должен быть меньше  $V < V_0 = 2,405$ , где  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\rho$  – диаметр сердцевинки. Таким образом, диаметр сердцевинки должен быть меньше, чем  $d(\lambda, NA) = \lambda V_0 / \pi NA$ , где NA – числовая апертура волокна. Для длины  $\lambda = 10,6$  мкм максимальный диаметр сердцевинки, при котором реализуется одномодовый режим для световода данного состава, должен быть  $d = 18,5$  мкм.

Одномодовые ступенчатые поликристаллические световоды с большой разницей показателя преломления имеют перспективу для генерации суперконтинуума в среднем ИК диапазоне, поскольку у них нуль дисперсии сдвинут до 3 мкм, где имеются коротко импульсные лазеры (см. рис. 4).

Экструзия одномодового световода данного состава производилась двумя способами: а) однократной экструзии сегментной кристаллической преформы; б) путем нескольких последовательных экструзий преформ штабик-трубка, с учетом имеющихся наборов диаметров фильер, диаметра дорна и диаметра камеры.

### 3.3.1. Одномодовый сегментный световод



Световод создавался по вновь разработанному нами методу сегментной преформы и однократной экструзии (описанному в подразд. 3.2). Для этого было необходимо проэкструдировать безоболочечное волокно диаметром 700 мкм с материалом для сердцевинки  $AgCl_{0,25}Br_{0,75}$ , потом полученное волокно вставить в канал сегментированной оболочки кристалла  $AgCl_{0,5}Br_{0,5}$  с внешним диаметром 12 мм. После этого полностью кристаллическая заготовка была предварительно сдавлена, а затем экструдирована через фильеру диаметром 300 мкм. Сердцевина полученного волокна должна иметь диаметр около 17,5 мкм в установившемся режиме течения преформы. В начальной части волокна диаметр сердцевинки составил 20 мкм. Недостаток данных размеров волокна – 300 мкм – в том, что при финальной экструзии возникает очень большое давление, на грани прочности пресс-штемпеля, поэтому полученный световод имел длину 1 м. Модовый состав в ближней зоне и оптические потери исследовались на коротком световоде с однократно приготовленными торцами. Излучение  $CO_2$  лазера вводилось в сердцевину специально

разработанным микрообъективом (МО), состоящим из двух просветленных германиевых линз дифракционного качества с фокусным расстоянием 10 мм и диаметром сфокусированного пятна 18 мкм. Изображение выходного торца формировалось при этом таким же МО на камеру Ругосат-4. Волокно длиной 60 см, изогнутое под 90 градусов, юстировалось, контролируя изображение поля моды на камере. При точной фокусировке в сердцевину обнаружена одна ярковыраженная фундаментальная гаусова чистая мода (рис. 7). Измерения лазерной мощности, падающей на входной МО и выходящей из МО после волокна, составили 467 и 217 мВт соответственно, пропускание всей системы МО + волокно + МО составило 46 %. Энергетические потери на каждом МО на длине волны 10,6 мкм составляли 19 %. Оптические потери  $A$ , дБ/м, определяются по формуле:

$$A = (10/L)\log((P_{in} \cdot 16n^2)/(P_{out}(1+n)^4)), \quad (5)$$

где  $L$  – длина световода;  $P_{in}$  – входная мощность;  $P_{out}$  – выходная мощность из волокна;  $n$  – показатель преломления сердцевины. Оптические потери на длине волны 10,6 мкм в этом одномодовом световоде составили 0,5 дБ/м, что является наименьшим значением из известных нам в мире. Порог лазерного разрушения этого световода непрерывным излучением  $\text{CO}_2$  лазера, наступившего по истечении 20 мин, составил  $200 \text{ кВт/см}^2$ . Эта плотность мощности превышает в несколько раз данные, опубликованные ранее, для световодов из галогенидов серебра.

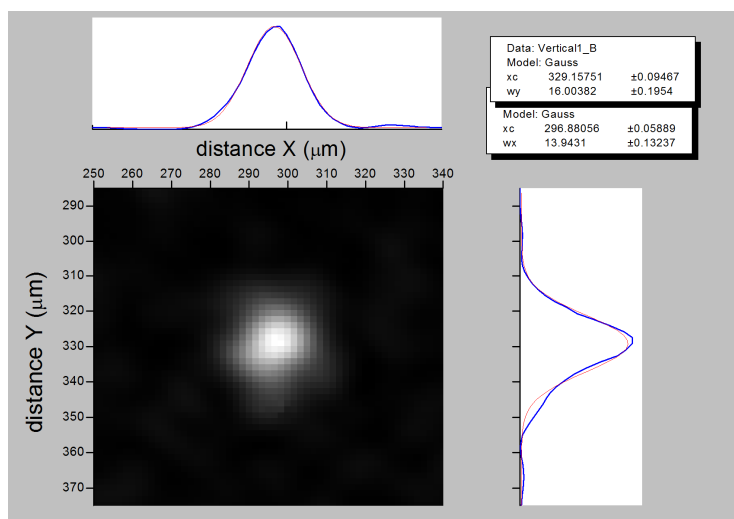


Рис. 7. Изображение поля фундаментальной моды в ближней зоне сегментного световода  $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75} / \text{AgCl}_{0,5}\text{Br}_{0,5}$

### 3.3.2. Многократная экструзия преформ штабик-трубка

Этот способ предполагает следующие этапы. В начале экструдировается безоболочечное волокно с материалом сердцевины  $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$  через фильеру диаметром 3,8 мм, затем вышеуказанным способом это волокно вставляется в выдавленный канал в кристалле оболочки  $\text{AgCl}_{0,5}\text{Br}_{0,5}$ , затем продавливается через фильеру диаметром 3,8 мм. Потом получившееся волокно опять вышеуказанным способом вставляется в оболочку  $\text{AgCl}_{0,5}\text{Br}_{0,5}$  и экструдировается через фильеру диаметром 0,5 мм. В полученном волокне диаметр сердцевины составляет около 17 мкм. Недостаток данного способа в необходимости 3 экструзий и нагревов и, как следствие, повышенном расходе исходных материалов и высоких оптических потерях.

Фотография торца такого одномодового световода приведена на рис. 8.



Рис. 8. Фотография торца одномодового световода  $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75} / \text{AgCl}_{0,5}\text{Br}_{0,5}$  с суммарным диаметром 500 мкм

### Выводы

Впервые разработаны и изготовлены методом экструзии одномодовые поликристаллические световоды среднего ИК диапазона с длиной волны отсечки 10 мкм с оптическими потерями фундаментальной моды меньше 1 дБ/м на длине волны 10,6 мкм  $\text{CO}_2$  лазера.

Измеренные оптические потери сегментированного одномодового поликристаллического световода с малым контрастом 0,01 показателя преломления  $\text{AgCl}_{0,5}\text{Br}_{0,5} / \text{AgCl}_{0,55}\text{Br}_{0,45}$  составили 0,8 дБ/м.

Впервые разработано и изготовлено поликристаллическое сегментированное одномодовое на длине волны 10,6 мкм волокно со ступенчатым профилем и с высоким контрастом 0,05 показателя преломления  $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$  /  $\text{AgCl}_{0,5}\text{Br}_{0,5}$  и наименьшими в мире оптическими потерями 0,5 дБ/м, известными авторам. Порог лазерного разрушения этого одномодового световода от мощности непрерывного  $\text{CO}_2$  лазера, наступившего за 20 мин, составил величину 200 кВт/см<sup>2</sup>.

Впервые изготовлены одномодовые поликристаллические нано- и микроструктурированные экструзионные световоды галогенидов серебра с сердцевиной с наименьшим диаметром 17 мкм.

*Авторы благодарят Российский научный фонд за финансирование (грант РФФ № 19-12-09134).*

### **Список литературы**

1. Butvina L. Polycrystalline Fibers // Infrared Fiber Optics / Ed. by J.S. Sanghera, I.D. Aggarwal. – CRC Press, Boca Raton, 1998. – P. 209–249.

2. Crystalline silver halide fibers with optical losses lower than 50 dB/km in broad IR region and their applications / L.N. Butvina, E.M. Dianov, N.V. Lichkova, V.N. Zagorodnev, L. Kupper // Proceedings of SPIE. – 2000. – Vol. 4083. – P. 238–253.

3. Single-mode microstructured optical fiber for the middle infrared / L.N. Butvina, O.V. Sereda, E.M. Dianov, N.V. Lichkova, V.N. Zagorodnev // Opt. Lett. – 2007. – Vol. 32. – P. 334–336.

4. Одномодовые кристаллические волоконные световоды для длины волны  $\lambda = 10,6$  мкм / Л.Н. Бутвина, О.В. Серeda, Е.М. Дианов, Н.В. Личкова, В.Н. Загороднев, В.Р. Сороченко // Квантовая электроника. – 2007. – Т. 37 (4). – С. 385–387.

5. Silver halide single-mode fibers with improved properties in the middle infrared / T. Lewi, S. Shalem, A. Tsun, A. Katzir // Applied Physics Lett. – 2007. – 91. – 251112.

6. Heise H.M., Kupper L., Butvina L.N. Bio-Analytical Applications of Mid-Infrared Spectroscopy Using Silver Halide Fiber-Optic Probes // Spectrochim. Acta B. – 2002. – 57 (10). – P. 1649–1663.

7. Low loss micro and nano structured single mode crystalline fibers for 5-15  $\mu\text{m}$  / L.N. Butvina, A.G. Okhrymchuk, A.L. Butvina, E.M. Dianov, N.V. Lichkova, V.N. Zagorodnev // Advances in Optical Materials. Paper# AIThD4. – 2011.

## References

1. Butvina L. Polycrystalline Fibers. *Infrared Fiber Optics*. Eds. Sanghera ByJ.S., Aggarwal I.D. CRC Press, Boca Raton, 1998, pp. 209-249.
2. Butvina L.N., Dianov E.M., Lichkova N.V., Zagorodnev V.N., Kupper L. Crystalline silver halide fibers with optical losses lower than 50 dB/km in broad IR region and their applications. *Proceedings of SPIE*, 2000, vol. 4083, pp. 238-253.
3. Butvina L.N., Sereda O.V., Dianov E.M., Lichkova N.V., Zagorodnev V.N. Single-mode microstructured optical fiber for the middle infrared. *Opt. Lett.*, 2007, vol. 32, pp. 334-336.
4. Butvina L.N., Sereda O.V., Dianov E.M., Lichkova N.V., Zagorodnev V.N., Sorochenko V.R. Odnomodovye kristallicheskie volokonnye svetovody dlia dliny volny  $\lambda = 10,6$  mkm [Single-mode crystalline fibers for wavelength  $\lambda = 10.6$   $\mu\text{m}$ ]. *Kvantovaya elektronika*, 2007, vol. 37(4), pp. 385-387.
5. Lewi T., Shalem S., Tsun A., Katzir A. Silver halide single-mode fibers with improved properties in the middle infrared. *Applied Physics Lett.*, 2007, 91, 251112.
6. Heise H.M., Kupper L., Butvina L.N. Bio-Analytical Applications of Mid-Infrared Spectroscopy Using Silver Halide Fiber-Optic Probes. *Spectrochim. Acta B*, 2002, 57(10), pp. 1649-1663.
7. Butvina L.N., Okhrimchuk A.G., Butvina A.L., Dianov E.M., Lichkova N.V., Zagorodnev V.N. Low loss micro and nano structured single mode crystalline fibers for 5-15  $\mu\text{m}$ . *Advances in Optical Materials*. Paper# AIThD4, 2011.

Получено 27.10.2020