

УДК 635.15

## Галогенидсеребряные волоконные световоды для лазерной медицины

© 2017 г. **В. С. Корсаков, аспирант; В. Н. Фасхиев, аспирант;  
М. С. Корсаков, магистрант; Л. В. Жукова, доктор тех. наук**

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», Екатеринбург г

E-mail: l.v.zhukova@urfu.ru

Поступила в редакцию 02.05.2017

---

Для использования в лазерной медицине с целью передачи излучения  $\text{CO}_2$ -лазера и  $\text{ZnSe:Fe}$ -лазера авторами разработаны одномодовые инфракрасные оптические волокна, в том числе с фотоннокристаллической структурой, предназначенной для увеличения диаметра поля моды световода. Для упрощения процесса производства использован метод моделирования структуры волокна и их модового состава. Исследовано влияние режимов стерилизации и дезинфекции на оптические свойства полученных волокон с целью создания взаимозаменяемых, легко стыкующихся волоконно-оптических компонентов для лазерного медицинского оборудования на длине волны 10,6 мкм.

**Ключевые слова:** лазерная медицина, оптическое волокно, инфракрасный диапазон.

**Коды OCIS:** 170.0170.

---

### ВВЕДЕНИЕ

Разработка гибких оптических волокон, прозрачных для лазерного излучения, позволила расширить возможности использования лазеров в медицине, сделав возможным выполнение эндоскопических и «минимально инвазивных» лазерных операций. В синтезе с современными достижениями робототехники данная технология открывает перспективы для создания полностью автоматических медицинских операций, примером чему могут являться реализуемые в настоящее время методики по лечению варикозного расширения вен. При воздействии лазерного излучения на органические ткани важными параметрами являются: плотность мощности лазерного излучения, глубина его проникновения, числовая апертура ( $NA$ ) при одномодовом режиме работы. Особую значимость эти параметры приобретают при выполнении инвазивных операций. Щадящий режим воздействия на ткани излучения углекислотного лазера, глубина проникновения которого составляет от 20 до 50 мкм [1], делает его использование предпочтительным при выполнении сложных хирургических операций по сравнению с другими лазерами, работающими в видимой и ближней инфракрасной области спектра. Излучение этих лазеров передаётся по кварцевому волокну и значительно глубже проникает в органическую ткань, в том

числе здоровую, травмируя её. Например, глубина проникновения в органические ткани излучения гольмиевого ИАГ-лазера с длиной волны 2,09 мкм составляет 0,5 мм, излучение диодных лазеров с длиной волны 0,81 мкм проникает на глубину от 4 до 6 мм [1]. В настоящее время для медицины разрабатываются лазеры с длинами волн в диапазоне 3–5 мкм.  $\text{CO}_2$ -лазер так же не имеет надежного волоконного канала доставки лазерного излучения. Помимо возможности передавать лазерное излучение требуемой мощности и определенного диапазона оптическое волокно для успешного применения в области лазерной медицины должно обладать и возможностью подвергаться стерилизации и дезинфекции, при этом сохраняя свои оптические и механические свойства. Разработка оптических волокон прозрачных в широком спектральном диапазоне и удовлетворяющих требованиям медицины является актуальной задачей.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ МОДОВОГО СОСТАВА ИНФРАКРАСНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

В процессе экструзии оптические волокна из галогенидов металлов приобретают форму и структуру, обеспечивающую возможность эффективной передачи инфракрасного излучения в диапа-

зоне 3–5 мкм и 10,6 мкм. Для упрощения задачи производства оптического волокна применяют технологию моделирования геометрии структуры и модового состава оптического волокна, результатом которого являются геометрические параметры сердцевины и оболочки оптического волокна, а так же порядок расположения вставок (в случае фотонно-кристаллических волокон), а также соответствующие этим элементам структуры показатели преломления используемых составов [2].

Моделирование модового состава в данной работе проводилось с помощью методики SMT (source model technique — методика моделирования источника света), являющейся дополнительным пакетом для программы Matlab [3, 4]. Этот пакет является доступным и удобным для пользователя и позволяет визуализировать  $S_z$  — компоненту светового вектора по сечению моделируемой структуры и определять эффективные показатели преломления для каждой из таких визуализаций-мод. Входными данными служат математические и физические характеристики — диэлектрические проницаемости сердцевины и оболочки световодов, рабочая длина волны, показатели преломления (ПП) материалов сердцевины и оболочки, допустимая вероятность ошибки при поиске волноводных мод, количество тестовых точек, составляющих диапазон поиска мод, и другие показатели.

В качестве материалов сердцевины и оболочки рассматривались твёрдые растворы AgCl–AgBr следующего состава по шкале мольного содержания замещающего бромида серебра, %: 0, 14, 40, 75, 82, 84 (только для  $\lambda = 10,6$  мкм), 100. Составы для сердцевины и оболочки подбирались так, чтобы показатель преломления первой был больше, что поможет осуществить механизм полного внутреннего отражения для поддержания мод в волокне. Основное условие одномодовости двухслойного цилиндрического волокна

$$V = a_{\text{core}} \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{n_{\text{core}}^2 - n_{\text{clad}}^2} < 2,405, \quad (1)$$

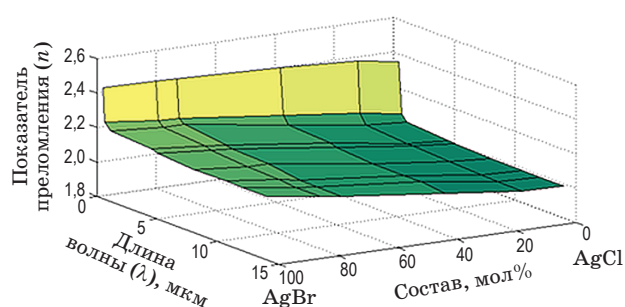


Рис. 1. Дисперсия показателя преломления для разного состава твёрдого раствора.

где  $V$  — параметр или нормализованная частота определяет режим работы,  $a_{\text{core}}$  — радиус сердцевины волокна,  $\lambda$  — рабочая длина волны,  $n_{\text{core}}$  и  $n_{\text{clad}}$  — показатели преломления сердцевины и оболочки, соответственно.

Показатели преломления определялись спектроскопически по методике [5] в ближнем и среднем ИК, а также двумя другими методиками в видимом диапазоне [5]. На рис. 1 представлена дисперсия показателя преломления в диапазоне длин волн от 0,5 до 15 мкм.

### МОДЕЛИРОВАНИЯ МОДОВОГО СОСТАВА ДЛЯ ДЛИНЫ ВОЛНЫ 4,5 МКМ

Было выполнено моделирование на длине волны 4,5 мкм для ZnSe:Fe-лазера, что соответствует максимуму его энергии [6]. На данной длине волны были исследованы показатели преломления для шести составов в порядке увеличения мольной доли бромида серебра: AgCl,  $\text{AgCl}_{0,86}\text{Br}_{0,14}$ ,  $\text{AgCl}_{0,6}\text{Br}_{0,4}$ ,  $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$ ,  $\text{AgCl}_{0,18}\text{Br}_{0,82}$ , AgBr. Составы были разбиты на пять пар (сердцевина-оболочка), как на рис. 2. В процессе расчётов было использовано четыре варианта  $V$ -параметра, соответствующие одномодовому режиму:  $V = 1,0$ ,  $V = 1,5$ ,  $V = 2,0$ ,  $V = 2,4$ . В результате моделирования были выявлены три возможных диаметра для состава сердцевины  $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$ : 11,33 мкм ( $V = 2,4$ ), 9,44 мкм ( $V = 2$ ) и 7,08 мкм ( $V = 1,5$ ) при составе оболочки  $\text{AgCl}_{0,18}\text{Br}_{0,82}$ .

Из трёх вариантов моды нашлись только в экстремальном случае, мода одна, имеет  $LP_{01}$  симметрию; эффективный показатель преломления  $n_{\text{eff}} = 2,148355$ , диаметр сердцевины — 11,33 мкм. Для наглядности результат моделирования представлен в виде трёхмерного профиля найденной фундаментальной моды (рис. 4а).

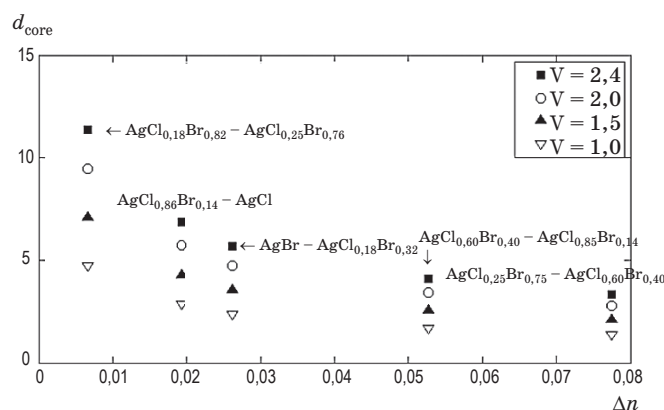


Рис. 2. Диаметр сердцевины волокна для значений нормализованной частоты  $V$  — 1,0, 1,5, 2,0 и 2,4 на длине волны 4,5 мкм.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ МОДОВОГО СОСТАВА ДЛЯ ДЛИНЫ ВОЛНЫ 10,6 МКМ

Исходные данные по моделированию для длины волны 10,6 мкм представлены на рис. 3. Целесообразно было выбрать как можно большие диаметры, но чтобы при этом разница показателей преломления была не настолько малой, чтобы усложнять изготовление. Были исследованы показатели преломления для семи составов в порядке увеличения мольной доли бромидов серебра:  $\text{AgCl}$ ,  $\text{AgCl}_{0,86}\text{Br}_{0,14}$ ,  $\text{AgCl}_{0,6}\text{Br}_{0,4}$ ,  $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$ ,  $\text{AgCl}_{0,18}\text{Br}_{0,82}$ ,  $\text{AgCl}_{0,16}\text{Br}_{0,84}$ ,  $\text{AgBr}$ . Удовлетворительными представились варианты с составом сердцевины  $\text{AgCl}_{0,16}\text{Br}_{0,84}$  и составом оболочки  $\text{AgCl}_{0,18}\text{Br}_{0,82}$

Оптимальными в результате моделирования являются варианты с  $V = 2,4$  и  $V = 2,0$ . Но так как в случае с  $V = 2,4$  есть варианты помимо граничного, целесообразно выбрать  $V = 2,0$  (рис. 4б);  $n_{\text{eff}} = 2,148813$ , диаметр сердцевины — 26,17 мкм.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОМОВОДОГО ВОЛОКНА С РАСШИРЕННЫМ ДИАМЕТРОМ ПОЛЯ МОДЫ

Для создания взаимозаменяемых разборных частей лазерного скальпеля требуется увеличение диаметра поля моды в одномодовых оптических волокнах на длине волны 10,6 мкм. С этой целью выполнено моделирование фотонной структуры оптического волокна. Диаметр фундаментальной моды в 100 мкм обеспечивается при следующей геометрии профиля сердцевины: 6 периферических вставок расположены вокруг одной центральной вставки. Диаметр всех вставок — 17,6 мкм, шаг — 58,8 мкм. Составы — галогениды серебра: в матрице  $\text{AgBr}$  — 82%,  $\text{AgCl}$  — 18%; во вставках периферии  $\text{AgBr}$  — 75%,  $\text{AgCl}$  — 25%; в центральной вставке  $\text{AgBr}$  — 84%,  $\text{AgCl}$  — 16%. Данный порядок позволяет обеспечить эффективный показатель преломления  $n_{\text{eff}} = 2,130405$  и одномодовый режим работы (рис. 5) [7].

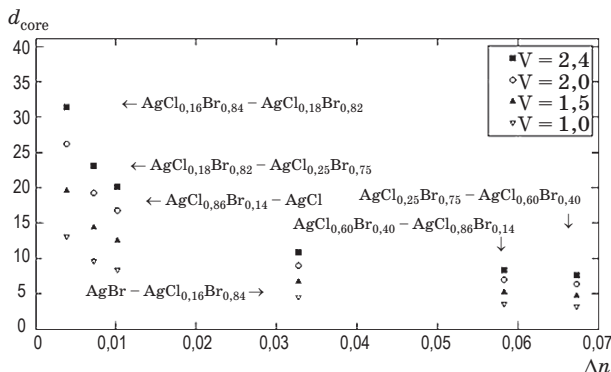


Рис. 3. Диаметр сердцевины волокна для значений нормализованной частоты  $V = 1,0, 1,5, 2,0$  и  $2,4$  на длине волны 10,6 мкм.

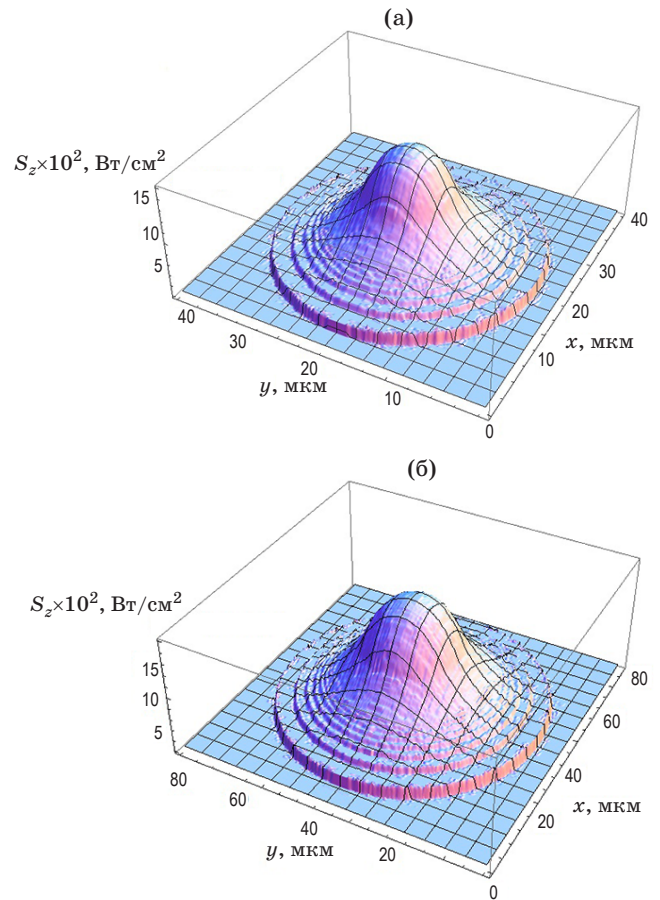


Рис. 4. Трёхмерный профиль найденной фундаментальной моды. а)  $\lambda = 4,5$  мкм, состав сердцевины —  $\text{AgCl}_{0,18}\text{AgBr}_{0,82}$ , состав оболочки —  $\text{AgCl}_{0,25}\text{AgBr}_{0,75}$ , диаметр сердцевины — 11,3 мкм; б)  $\lambda = 10,6$  мкм, состав сердцевины —  $\text{AgCl}_{0,16}\text{AgBr}_{0,84}$ , состав оболочки —  $\text{AgCl}_{0,18}\text{AgBr}_{0,82}$ , диаметр сердцевины — 26,2 мкм.

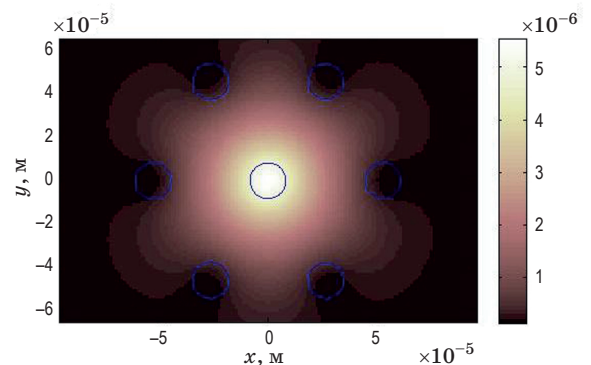


Рис. 5. Результаты моделирования модового состава инфракрасного оптического волокна с фотонной структурой.

Полученные в результате моделирования данные были использованы для производства оптического волокна методом экструзии [2]. Были изготовлены одномодовые оптические волокна с диаметром сердцевины 26 мкм состава  $\text{AgCl}_{0,16}\text{Br}_{0,84}$  и диаметром оболочки 350 мкм состава  $\text{AgCl}_{0,18}\text{Br}_{0,82}$ ,

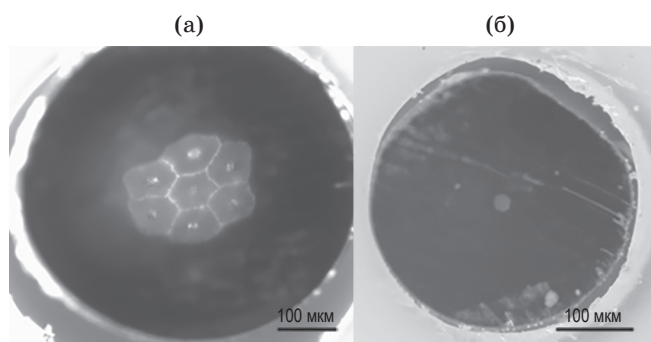


Рис. 6. а) Структура фотонно-кристаллического волокна. б) Структура одномодового двухслойного волокна сердцевины  $d = 26$  мкм.

а также фотонно-кристаллическое волокно (рис. 6). Одномодовый режим работы был проверен с использованием камеры Spiricon Pyrosam3.

### ДЕЗИНФЕКЦИЯ И СТЕРИЛИЗАЦИЯ ИНФРАКРАСНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

В связи с тем, что разница в составах исследуемых волокон на основе галогенидов серебра незначительна для оценки влияния режимов стерилизации и дезинфекции на оптические свойства, использовались однослойные волокна состава  $\text{AgCl}_{0,18}\text{Br}_{0,82}$ . Оптические волокна как составные части медицинских изделий в зависимости от вида выполняемых манипуляций могут подвергаться дезинфекции, предстерилизационной очистке и стерилизации [8, 9]. Существующие на сегодняшний день медицинские установки на основе  $\text{ZnSe}$ : Fe- и  $\text{CO}_2$ -лазеров могут использоваться для проведения открытых поверхностных или лапароскопических эндоскопических хирургических операций. Торцы разрабатываемых инфракрасных волокон для таких медицинских лазеров могут соприкасаться с повреждённой слизистой оболочкой, контактировать с кровью и инфекционными препаратами, а значит, они подлежат обязательной стерилизации. Перед стерилизацией инфракрасных волокон после проведения каких-либо манипуляций при хирургических операциях они должны быть подвергнуты: первичной очистке (механической и чистке водой или моющими растворами с последующим их смыванием); дезинфекции; предстерилизационной очистке. Среди широкого ассортимента методов предварительной очистки и дезинфекции наиболее предпочтительным представляется химический метод дезинфекции с использованием этилового спирта, так как растворимость галогенидов серебра в нём крайне мала [9]. В соответствии с ОСТ 42-21-2-85 [8] стерилизация может проводиться методами паровой стерилизации (водяной насыщенный пар под избыточным давлением) при температуре  $132^\circ\text{C}$ , воздушным методом сте-

рилизации (сухой горячий воздух) при температуре  $180^\circ\text{C}$ , химическим методом стерилизации (растворами химических препаратов). Кроме того, возможна стерилизация химическими газовыми методами смесью паров воды и формальдегида или смесью ОБ (окись этилена с бромистым метилом) и окисью этилена. Однако они трудоёмки в проведении и требуют специального дорогостоящего оборудования.

Для оценки термического воздействия на оптические свойства были подготовлены инфракрасные волокна состава  $\text{AgCl}_{0,18}\text{Br}_{0,82}$  длиной 20 см и диаметром 1,12 мм. Образцы подвергали циклической температурной обработке со следующим режимом: нагрев до температуры  $190^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$  за 30 мин, выдержка при температуре  $190^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$  в течение 60 мин и охлаждение в сушильном шкафу до  $100^\circ\text{C}$  в течение 90 мин, затем выполнялось охлаждение на воздухе до  $20^\circ\text{C}$  в течение 30 мин. Для нагрева использовали сушильный шкаф ПСВ/3,5. Для исследуемых образцов были измерены оптические потери [11] на длине волны 10,6 мкм до и после термической обработки с использованием в качестве источника  $\text{CO}_2$ -лазера Synrad мощностью 10 Вт и термоэлектрического датчика Ophir (рис. 7).

В результате наблюдается монотонное снижение пропускания  $P$  % с увеличением циклов нагрева. Наблюдаемое снижение оптических свойств предположительно связано с рекристаллизацией зерен поликристаллических волокон, так как режим температурной обработки приближается к температуре фазового перехода материала [12]. Циклический нагрев приводит к ухудшению оптических свойств. Таким образом, можно говорить о возможности использования стерилизации воздушным методом не более двух раз.

Оценка влияния химических методов стерилизации выполнена с использованием 6% раствора перекиси водорода. Была проведена серия экспериментов с полным погружением образцов ин-

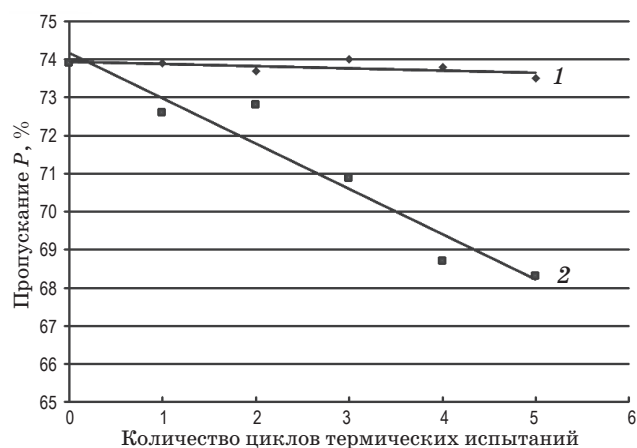
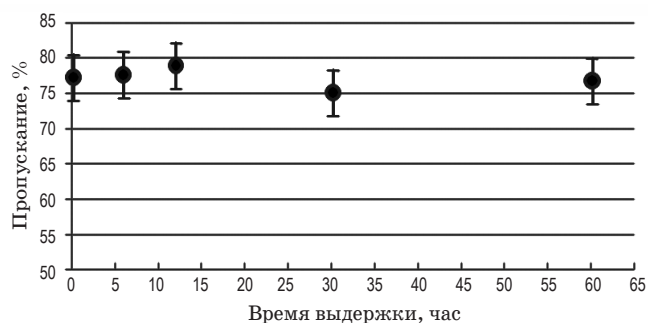


Рис. 7. Влияние циклической тепловой обработки на оптические свойства инфракрасного волокна без тепловой обработки (1); после тепловой обработки (2).



**Рис. 8.** Влияние химической стерилизации 6% раствором перекиси водорода на пропускание  $P$  % инфракрасных волокон.

фракрасных волокон при комнатной температуре 25 °С и выдержкой в течение 6, 12, 30 и 60 ч, что соответствует однократному, двукратному, пятикратному и десятикратному применению метода химической стерилизации. После выдержки в растворе проводили сушку путём протираания чистой тканевой салфеткой и просушиванием при комнатной температуре в течение 3 ч. Определение оптических свойств и статистическую обработку проводили аналогично [11]. Для каждого эксперимента были взяты по 5 световодов состава  $\text{AgCl}_{0,18}\text{Br}_{0,82}$  длиной 20 см и диаметром 1,12 мм.

Как видно из рис. 8 даже десятикратная стерилизация в растворе перекиси водорода не оказала влияния на оптические свойства волокна. По результатам дисперсионного анализа и оценки по

U-критерию Манна–Уитни не выявлено достоверных статистических отличий между полученными данными оптического пропускания для одно-, дву-, пяти- и десятикратной стерилизации. Значения составили 77,8; 79,2; 75,3 и 77,0% соответственно.

Таким образом, стерилизация химическим методом путём погружения в 6% раствор перекиси водорода и выдержки в течение 360 мин является приемлемой для разрабатываемых инфракрасных волокон.

## ВЫВОД

Для существующих и разрабатываемых медицинских лазеров среднего инфракрасного диапазона выполнено моделирование одномодовых инфракрасных волокон на длине волны 4,5 мкм и 10,6 мкм, в том числе с расширенным полем моды для длины волны 10,6 мкм.

Для инфракрасных волокон выбран режим стерилизации и сформулированы рекомендации по эксплуатации и проведению первичной очистки, дезинфекции и предстерилизационной очистки. Стерилизацию предпочтительно осуществлять химическим методом путём погружения в 6% раствор перекиси водорода в течение 360 мин. Термическое воздействие на световоды при температурах 180 °С и выше ухудшает оптические свойства, а значит световоды не могут подвергаться стерилизации или дезинфекции паровым или воздушным методами более двух раз.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шулуток А.М., Овчинников А.А., Ясногородский О.О., Мотус И.Я. Эндоскопическая торакальная хирургия. М.: Медицина, 2006. 392 с.
2. Chazov A., Korsakov A., Zhukova L., Vrublevsky D., Zhukov V., Kortov S. Modeling and experimental research of nano- and microstructured IR fibers (2–40  $\mu\text{m}$ ) based on defective crystals // Advanced Photonics Congress. Nonlinear Photonics Conference. OSA Technical Digest (online). Specialty Optical Fibers (SOF) 2012. Colorado Springs, Colorado, USA. 17–21 June 2012. Paper: STu3F.3.
3. Hochman A., Leviatan Y. Analysis of strictly bound modes in photonic fibers by use of a source-model technique // J. Opt. Soc. Am. A. 2004. V. 21. № 6. P. 1073–1081.
4. Hochman A., Leviatan Y. Calculation of confinement losses in photonic crystal fibers by use of a source-model technique // J. Opt. Soc. Am. B. 2005. V. 22. № 2. P. 474–480.
5. Korsakov A., Vrublevsky D., Zhukova L. Measuring spectral transmission and refractive index of  $\text{AgCl}_{1-x}\text{Br}_x$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) and  $\text{Ag}_{1-x}\text{Tl}_x\text{Br}_{1-x}\text{I}_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) at the wavelength of 10.6  $\mu\text{m}$  // Opt. Mat. 50 (B). 2015. P. 204–207.
6. Kozlovsky V.I., Korostelin Y.V., Landman A.I., Mislavskii V.V., Podmar'kov Y.P., Skasyrsky Y.K., Frolov M.P. Pulsed  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnS}$  laser continuously tunable in the wavelength range of 3.49–4.65  $\mu\text{m}$  // Quantum Electron. 2011. V. 41. № 1. P. 1–3.
7. Корсаков А.С., Корсаков В.С., Жукова Л.В. Инфракрасный световод с большим диаметром поля моды // Заявка на Патент РФ № 2016121385 от 30.05.2016.
8. ОСТ 42-21-2-85 Стерилизация и дезинфекция изделий медицинского назначения. Методы, средства и режимы // Приказ по Министерству здравоохранения СССР от 10 июня 1985 г. № 770. Срок введения установлен с 01.01.1986 г.
9. МУ 287-113. Методические указания по дезинфекции, предстерилизационной очистке и стерилизации изделий медицинского назначения // Департамент Госсанэпиднадзора Минздрава РФ 30 декабря 1998 г.
10. Жукова Л.В., Корсаков А.С., Салимгареев Д.Д. Инфракрасные кристаллы. Теория и практика. Екатеринбург: УМЦ УПИ, 2015. 215 с.
11. Korsakov A., Zhukova L., Vrublevsky D., Korsakova E. Investigating the properties of infrared PCFs based on  $\text{AgCl}-\text{AgBr}$ ,  $\text{AgBr}-\text{TlI}$ ,  $\text{AgCl}-\text{AgBr}-\text{AgI}(\text{TlI})$  crystals theoretically and experimentally // Opt. Spectrosc. 2014. V. 117. P. 960–963.
12. Корсаков А.С., Жукова Л.В., Корсакова Е.А., Жуков В.В., Корсаков В.С. Термодинамическое исследование кристаллов системы  $\text{AgBr}-\text{TlI}$  и получение ИК световодов нанокристаллической структуры на их основе // Цветные металлы. 2013. № 4. С. 62–66.