

с чем посредством компьютерного моделирования и экспериментов были подобраны режимы экструзии и получены новые волокна с составом сердцевины 5, 10, 15 мас.% AgBr в AgI диаметром от 300 до 525 мкм, длиной от 0.5 до 2.0 м.

Световоды были помещены в защитную оболочку, торцы волокон срезаны торцовочной машинкой и подготовлены к измерению. Спектры пропускания измерялись на ИК Фурье спектрометре IRPrestige-21 (Shimadzu) с делителем луча на основе CsI, детектором – DLaTGS, в диапазоне длин волн от 1.28 до 40.0 мкм, с разрешением 4 см<sup>-1</sup>. По результатам измерений диапазоны пропускания составили от 3 до 23 мкм для световода с сердцевиной на основе 5 мас.% AgBr в AgI и от 4 до 25 мкм для световода на основе 15 мас.% AgBr в AgI. Оптические потери были измерены по методу отрезков и составили 0,45 дБ/м.

Таким образом разработанные световоды обладают широким диапазоном пропускания, что делает их перспективными для изготовления волоконных выводов для инфракрасных лазеров, в том числе перестраиваемых.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90021

- 1 Zhukova L. V., L'vov A. E., Korsakov A. S., Salimgareev D. D., Korsakov V. S. Domestic developments of IR optical materials based on solid solutions of silver halogenides and monovalent thallium. // Opt. and Spectr. 2018. V. 125.P. 933-943
- 2 Salimgareev D, Zhukova L., Yuzhakova A., L'vov A., Korsakov A. Synthesis of the AgBr – AgI system optical crystals. // Opt. Mat. 2021. V. 114. P. 110903

## **Моделирование волоконного зонда на основе кристаллов системы**

### **AgBr–AgI для лазерной медицины**

*П. В. Пестерева, Ю. В. Волегова, А. А. Южакова, Д. Д. Салимгареев,*

*Н. Н. Акифьева, Л. В. Жукова*

(Уральский Федеральный университет имени первого президента России  
Б. Н. Ельцина, l.v.zhukova@urfu.ru)

Посредством компьютерного моделирования был спроектирован зонд, состоящий из

волокон на основе кристаллов системы AgBr – AgI для работы в субтерагерцовом диапазоне с применением в качестве источника излучения терагерцовых лазеров. Моделирование осуществлялось с помощью метода конечных элементов и позволило выбрать геометрические параметры зонда, составы сердцевины и оболочки волокон зонда и чувствительного элемента. По результатам моделирования оценена работоспособность зонда, оптимальное время и площадь воздействия на поврежденный участок кожи, а также диапазон частот работы зонда.

**Ключевые слова:** терагерцовый диапазон, волоконный зонд, галогениды серебра

A probe was designed consisting of fibers based on the AgBr - AgI system crystals for operation in the subterahertz range using terahertz lasers as a radiation source by means of computer simulation. The simulation was carried out using the finite element method and made it possible to select the optical and geometric probe' parameters, the compositions of the core and clad of the probe fibers and the sensitive element. Based on the simulation results, the probe operability, the optimal time and area of exposure to the damaged area of the skin, as well as the frequency range were evaluated.

**Keywords:** terahertz range, fiber probe, silver halides

В настоящее время терагерцовый диапазон излучения является одним из наиболее перспективных направлений развития науки и техники, так как оказывает неионизирующее воздействие на ткани и обладает высокой проникающей способностью. На данный момент известны источники терагерцового излучения, в том числе лазерные: терагерцовые лазеры на основе современных цепей умножительных диодов Шоттки или квантово-каскадных переходов с диапазоном генерации от 0,075 до 5ТГц. Данные лазеры востребованы для медицинских применений, в частности для диагностики и лечения раковых опухолей (злокачественных эпителиом кожи).

Для доставки излучения от терагерцового лазера к месту воздействия требуются оптические каналы, в качестве которых могут быть использованы галогенидные кристаллы и световоды на их основе. В зависимости от кристаллической системы и состава, показатель преломления варьируется от 1.9 до 2.5, а спектральный диапазон пропускания составляет 0.4 – 6000.0 мкм (0.05 – 666 ТГц). Одним из наиболее совершенных материалов для применения в медицине являются кристаллы системы AgBr–AgI, поскольку они фото- и радиационностойки, нетоксичны и негигроскопичны [1]. В связи с этим целью данной работы являлось проектирование зонда для диагностики и лечения раковых заболеваний путем передачи субтерагерцового излучения к поврежденному участку кожи.

Для проектирования зонда использовалось программное обеспечение COMSOL Multiphysics 5.6 [2], которое позволяет подобрать геометрические и оптические параметры зонда, оптимизировать его функциональные характеристики: эффективную частоту и время воздействия, площадь облучаемого участка и пр. Входные параметры моделирования: частота излучения и температура кожи. Частота излучения принималась 75 ГГц-150 ГГц, температура кожи 34 - 37°C.

По результатам моделирования были определены конструкция зонда: двухслойный световод с сердцевиной на основе кристалла  $\text{AgBr}_{0.87}\text{I}_{0.13}$  и оболочкой –  $\text{AgBr}_{0.97}\text{I}_{0.03}$ , чувствительный элемент из сапфира. Оптимальное время воздействия составило до 2 минут в диапазоне частот 100 – 150 ГГц.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FEUZ-2020-0058 (Н687.42Б.223/20).

- 1 Salimgareev D, Zhukova L., Yuzhakova A., L'vov A., Korsakov A. Synthesis of the AgBr – AgI system optical crystals // Opt. Mat. 2021. V. 114. P. 110903
- 2 COMSOL Multiphysics® v. 5.6, www.comsol.com. COMSOL AB, Stockholm, Sweden

## **Введение оксидов редкоземельных элементов в матрицу галогенидов серебра**

*А.Е. Львов, Д.А. Белоусов, Д. Д. Салимгареев, Л. В. Жукова, А. С. Шмыгалев*

(Уральский Федеральный университет имени первого президента России  
Б. Н. Ельцина, l.v.zhukova@urfu.ru)

Работа посвящена гидрохимическому легированию галогенидов серебра оксидами редкоземельных элементов и изучению их свойств полученных материалов.

**Ключевые слова:** оксиды редкоземельных элементов, оптические материалы, лазерные материалы, галогениды серебра

The work is devoted to the hydrochemical alloying of silver halides with oxides of rare earth elements and the study of their properties of the materials obtained.

**Keywords:** rare earth oxides, optical materials, laser materials, silver halides

Создание мощных компактных источников когерентного излучения в