

УДК 681.7.068

**Е.В. Борисова¹, Б.И. Галаган², И.В. Жлуктова²,
В.В. Колташев³, А.А. Поносова^{1,2}, С.Е. Сверчков²**

¹Российский квантовый центр, Москва, Россия

²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия,

³Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Научный центр
волоконной оптики им. Е.М. Дианова, Москва, Россия

РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ НА ОСНОВЕ ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ СТЕКОЛ ДЛЯ СРЕДНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА

В работе рассмотрены методы и подходы к созданию элементной базы для халькогенидных волоконных лазеров. Приводятся результаты исследований по записи Брэгговских решёток и сварки световодов.

Ключевые слова: халькогенидные оптические световоды, брэгговские решётки, сварка световодов.

**E.V. Borisova¹, B.I. Galagan², I.V. Zhlyuktova², V.V. Koltashev³,
A.A. Ponosova^{1,2}, S.E. Sverchkov²**

¹Russian Quantum Center, Moscow, Russian Federation

²Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

³Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences,
Dianov Fiber Optics Research Center, Moscow, Russian Federation

COMPONENTS DEVELOPMENT FOR MID-INFRARED CHALCOGENIDE FIBER GLASS LASERS

The paper considers methods and approaches in the creation of the element base for chalcogenide fiber lasers. The results of research on Bragg grating recording and splicing of chalcogenide fibers are given.

Keywords: chalcogenide optical fibers, Bragg gratings, fiber splicing

Достигнутый прогресс в создании высокочистых селенидных стекол, активированных редкоземельными элементами, позволил реализовать лазерную генерацию в области 5–6 мкм на объемных элементах и в световодах. В качестве активаторов использовались трехвалентные ионы: Ce^{3+} , Pr^{3+} , Nd^{3+} и Tb^{3+} ¹. Данное достижение открывает возможность создания полностью волоконных лазеров среднего ИК-диапазона. Эти лазеры могут иметь целый ряд преимуществ по сравнению с другими типами существующих лазерных систем этого спектрального диапазона.

Однако для того, чтобы реализовать такие лазерные источники, существует потребность в решении целого ряда технических проблем. В частности, необходима элементная база на основе халькогенидных световодов (ХГС), аналогичная компонентной базе на основе кварцевых световодов. Одним из её ключевых компонентов являются волоконные брэгговские решетки (ВБР).

Задача настоящей работы заключалась в исследовании возможностей наведения брэгговских решеток в нелегированных сульфидных световодах, а также их сварки с легированными сульфидно-селенидными. Основные характеристики исследуемых световодов представлены в таблице.

Основные характеристики световодов

Состав стекла сердцевины/оболочки	Диаметр сердцевины/оболочки, мкм	NA	Длина волны отсечки, мкм
$\text{As}_{40}\text{S}_{60}/\text{As}_{36}\text{S}_{64}$	20/300	0,09	4,7
$\text{Ge}_{20}\text{Ga}_5\text{Sb}_{10}\text{Se}_{65}+2\cdot 10^{-19}\text{ см}^{-3}\text{ Tb}^{3+} / \text{Ge}_{12}\text{As}_{20}\text{Sb}_5\text{S}_{63}$	19/270	0,98	24,3

Экспериментально запись ВБР в одномодовом сульфидном световоде осуществлялась излучением лазера He-Ne с длиной волны 632,8 нм и мощностью 20 мВт. Два пучка (рис. 1) примерно равной интенсивности фокусировались цилиндрической линзой на световоде под углом, обеспечивающим шаг интерференционной картины $d \sim 1$ мкм

в соответствии с соотношением $d = \frac{\lambda}{2\sin(\alpha)}$, здесь $\lambda = 0,6328$ мкм.

¹ Comparison of 4.5-6 μm luminescent and lasing properties of rare earth dopants in chalcogenide glasses / M.F. Churbanov, B.I. Denker, B.I. Galagan, V.V. Koltashev, V.G. Plotnichenko, M.V. Sukhanov, S.E. Sverchikov, and A.P. Velmuzhov // Journal of Luminescence. – 2022. – Vol. 245. – P. 118756.

Соответственно, должно возникать отражение внутри световода на длине волны около $2n_{\text{эфф}}d \sim 5$ мкм, где эффективный показатель преломления для сульфидного стекла $n_{\text{эфф}} \sim 2,5$.

Запись ВБР осуществлялась в течение 10–15 мин и контролировалась визуально наличием рассеяния на записанной в световоде голограмме. При перекрытии одного из падающих пучков наблюдалось его голографическое изображение, яркость которого сначала возрастала с ростом дозы облучения, а по истечении 20–30 мин яркость прекращала расти.

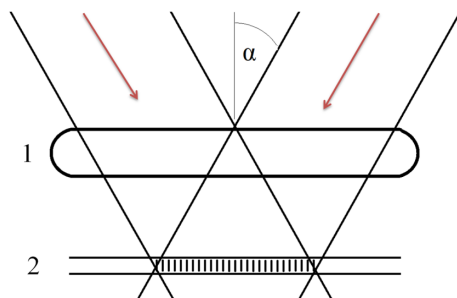


Рис. 1. Принципиальная схема записи брэгговской решётки в селенидном световоде: 1 – цилиндрическая линза, 2 – световод

Однако непосредственное измерение свойств наведенной решетки оказалось весьма трудной задачей.

Стандартные приборы для измерения оптических свойств одномодовых световодов в области 5 мкм отсутствуют. В силу высокого показателя преломления халькогенидных стёкол ($\sim 2,5$), высокие коэффициенты отражения порядка 20 % на торцах световодов и интерференционные эффекты не позволяют качественно определять свойства самой решетки с применением традиционных методик измерения. Одним из способов уйти от этой проблемы является создание цельноволоконного лазера с приваренной наведенной решеткой и определение её характеристик по выходным параметрам лазера. Однако для этого необходимо решить проблему самой сварки халькогенидных световодов.

Важно отметить, что для успешной сварки необходима качественная подготовка торцов световодов. Оказалось, что наиболее подходящим решением этой проблемы является использование ультразвукового скалывателя с регулируемым в широких пределах

натяжением волокна. В нашем случае использовалась модель Ericsson Fiber Cleaver EFC 11. Высокая воспроизводимость и высокое качество сколов были достигнуты при силе натяжения 110 г для сульфидно-селенидных волокон и 140 г для сульфидных. На рис. 2 представлен внешний вид торца сколотого световода.

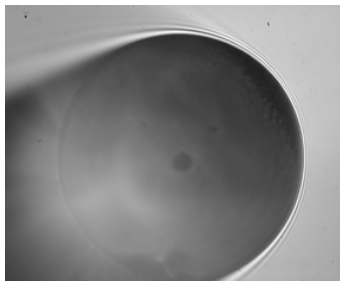


Рис. 2. Фотография торца световода

Использование стандартного сварочного аппарата, принцип действия которого основан на электрической дуге, не применим к ХГС, поскольку в результате одновременного разогрева световодов электрической дугой и наличия кислорода возможно окисление световодов, а также в нем затруднительно обеспечить малую энергию искры, необходимую для низко-температурных стекол.

Для сплавного соединения световодов была создана лабораторная установка с резистивным нагревателем, который обеспечивает диапазон температур, подходящий для халькогенидных световодов. Установка включала тепловой узел, систему позиционирования для фиксации и выравнивания световодов, импульсный источник тока (LDD-21, полупроводниковые приборы) и микроскоп для контроля узла сварки. Данное оборудование располагалось в вытяжном шкафу, так как при избыточном нагреве ХГС в результате окисления могут образовываться ядовитые вещества.

Тепловой узел был изготовлен из нихромовой ленты (Х20Н80). По аналогии с известными сварочными аппаратами типа Vytran были выбраны размеры и форма нагревательного узла, обеспечивающие равномерный прогрев световодов в месте сварки. Лента была сложена в форме буквы омега (Ω), с размерами, указанными на рис. 3.

Свариваемые световоды выравнивались по внешней оболочке с отсутствием зазора между сколотыми торцами. После этого к месту сварки подводился тепловой узел таким образом, чтобы световоды размещались по его оси, и с источника питания подавался импульс тока. Источник питания позволял варьировать величину тока (от 2 до 21 А) и длительность импульса (от 0,2 мс до 9,9 с). Для успешной сварки потребовался подбор обоих этих параметров.

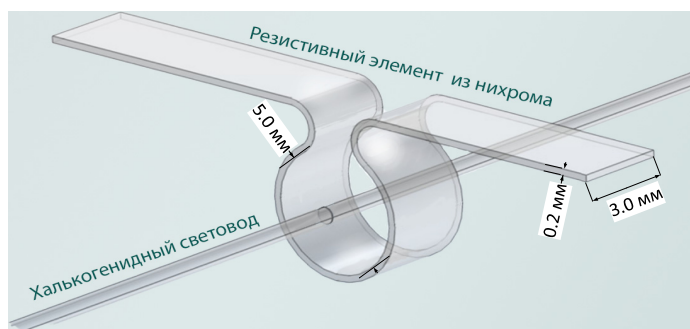


Рис. 3. Конструкция теплового узла

В результате серии экспериментов был сделан вывод, что наиболее оптимальными параметрами источника питания для сплавления данных халькогенидных волокон являются следующие: сила тока – 20,5 А (по показаниям на источнике тока) и длительность импульса – 3,53 с. Подобранный режим подходил как для сварки пассивных световодов, так и для сочетания пассивный-активный световод.

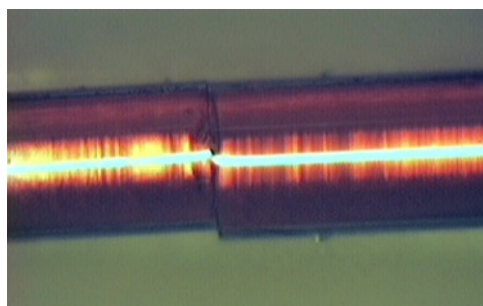


Рис. 4. Фотография сплавного соединения халькогенидных световодов As_2S_3 ; микроскоп OLYMPUS BH2-UMA

После сплавления пассивных световодов возникало прочное соединение (рис. 4), и было выполнено измерение потерь на сварке методом обрыва, которые составляли от 6 до 10 дБ. Наблюдаемые значительные потери связаны с тем, что сердцевинки экспериментальных световодов не удалось идеально центрировать. В дальнейшем потери могут быть значительно снижены при использовании позиционирования световодов по мощности прошедшего сигнала.

Таким образом, показано, что халькогенидные световоды, изготовленные в ИХВВ РАН, пригодны для сваривания методом омического нагрева, благодаря чему возможно изготовление цельно-

волоконных устройств. Также в работе продемонстрирована фоточувствительность сульфидных световодов к излучению He-Ne-лазера, позволяющая создавать брэгговские решётки.

Благодарность

Авторы выражают благодарность Максиму Суханову, Александру Вельмузову и Геннадию Снопатину за предоставленные образцы световодов.

Сведения об авторах

БОРИСОВА Е.В.

e-mail: Ekaterina21333@yandex.ru

Младший научный сотрудник Российского квантового центра, г. Москва.

ГАЛАГАН Б.И.

e-mail: galagan@ran.gpi.ru

Кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва.

ЖЛУКТОВА И.В.

e-mail: zhluktova@kapella.gpi.ru

Кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва.

КОЛТАШЕВ В.В.

e-mail: kvv@fo.gpi.ru

Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Научного центра волоконной оптики им. Е.М. Дианова, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва.

About the authors

BORISOVA E.V.

e-mail: Ekaterina21333@yandex.ru

Junior Researcher at the Russian Quantum Center, Moscow.

GALAGAN B.I.

e-mail: galagan@ran.gpi.ru

Ph. D. in physics and mathematics, principal scientist at Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow.

ZHLUKTOVA I.V.

e-mail: zhluktova@kapella.gpi.ru

Ph.D. in physics and mathematics, researcher at Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow.

KOLTASHEV V.V.

e-mail: kvv@fo.gpi.ru

Ph. D. in physics and mathematics, senior scientist at Dianov Fiber Optics Research Center, Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow.

ПОНОСОВА А.А.

e-mail: *nasty-aaleksi@mail.ru*

Кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Российского квантового центра; научный сотрудник Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва.

PONOSOVA A.A.

e-mail: *nasty-aaleksi@mail.ru*

Ph. D. in physics and mathematics, researcher at Russian Quantum Center, Moscow; Researcher at Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow.

СВЕРЧКОВ С.Е.

e-mail: *glasser@lst.gpi.ru*

Доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва.

SVERCHKOV S.E.

e-mail: *glasser@lst.gpi.ru*

D. in Physics and Mathematics, principal scientist at Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-22-00742).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценный.

Получена: 20.07.2023

Одобрена: 25.07.2023

Принята к публикации: 27.07.2023

Finansing. The work was carried out with financial support from the Russian Science Foundation (project No. 22-22-00742).

Conflict of Interest. The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions. All authors have made an equivalent contribution to the publication.

Received: 20/07/2023

Approved: 25/07/2023

Accepted for publication: 27/07/2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Разработка элементной базы волоконных лазеров на основе халькогенидных стёкол для среднего ИК-диапазона / Е.В. Борисова, Б.И. Галаган, И.В. Жлуктова, В.В. Колташев, А.А. Поносова, С.Е. Сверчков // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10, № 5. – С. 51–57.

Please cite this article in English as: Borisova E.V., Galagan B.I., Zhluktova I.V., Koltashev V.V., Ponosova A.A., Sverchkov S.E. Components development for mid-infrared chalcogenide fiber glass lasers // Applied photonics, 2023, no. 5, pp. 51-57.