

07

Пропускание ИК-излучения световодами из твердых растворов галогенидов серебра

© А.С. Шмыгалев¹, Б.П. Жилкин¹, А.С. Корсаков¹,
М.И. Низовцев², А.Н. Стерлягов², В.И. Терехов²

¹ Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
E-mail: sterlyagov@itp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 16 октября 2015 г.

Экспериментально исследована возможность передачи инфракрасного (ИК) излучения световодами из твердых растворов галогенидов серебра. Определены потери энергии при прохождении теплового излучения через световод в различных диапазонах длины волны ИК-излучения. Рассмотрена возможность использования ИК-световодов для передачи тепловой энергии и измерения температуры с использованием метода ИК-термографии.

В настоящее время одним из перспективных направлений в различных технических приложениях является волоконная оптика, работающая в инфракрасном диапазоне. В рамках развития данного направления изучаются различные классы оптических кристаллов и ИК-световодов на их основе [1,2]. При этом использование новых материалов в волоконной оптике сталкивается с проблемой минимизации оптических потерь излучения [3,4]. Перспектива использования поликристаллических композитных материалов в качестве сырья для изготовления световодов связана с возможностью получения низкого уровня потерь в

инфракрасном диапазоне, что делает их привлекательными для создания волоконных оптических систем [5]. Поэтому большой интерес вызывают кристаллы твердых растворов галогенидов серебра и световоды на их основе благодаря высокому пропусканию в широком диапазоне длин волн [6].

Имеющиеся в литературе данные свидетельствуют о принципиальной возможности создания ИК-световодов для передачи теплового излучения в инфракрасном спектральном диапазоне. Таким образом, с использованием ИК-световодов становится возможным измерение температуры объектов методом инфракрасной термографии, которое сложно провести другими методами. Появляются новые возможности применения ИК-световодов, такие как гибкие объективы для телевизионной техники, волоконно-оптические сенсоры диагностики в медицине и т. д.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования пропускания ИК-излучения световодами на основе твердого раствора галогенида серебра $\text{AgCl}_{0.75}\text{Br}_{0.25}$, полученные методом экструзии с использованием обратного прессования [7].

На первом этапе с помощью детектора КРТ (кадмий, ртуть, теллур) с рабочим диапазоном от 1.3 до $15.0\ \mu\text{m}$ были изучены характеристики спектрального пропускания ИК-световодов. Для съемки спектра световод закреплялся в специальной приставке, которая обеспечила ввод и вывод ИК-излучения с последующим детектированием спектрального пропускания. Источником излучения служил керамический нагреватель с максимальной температурой 1473 К и степенью черноты $\varepsilon \sim 0.85$. Результаты этих измерений представлены на рис. 1.

Видно, что для рассматриваемого световода наблюдалось пропускание в диапазоне длин волн ИК-излучения от 2.0 до $15.0\ \mu\text{m}$. При этом следует отметить, что в коротковолновом диапазоне ИК-излучения ($2.5\text{--}3\ \mu\text{m}$) пропускание составляло менее 20%, а в длинноволновом диапазоне ($7.5\text{--}14\ \mu\text{m}$) пропускание было существенно выше и изменялось от 50 до 25% в зависимости от длины волны.

На следующем этапе были выполнены экспериментальные исследования свойств ИК-световодов с применением метода инфракрасной термографии. В исследованиях использовались два тепловизора: первый — NEC 7102WV, работающий в длинноволновом спектральном диапазоне ($8\text{--}14\ \mu\text{m}$) с объективом TH71-377, который позволял выполнять измерения с пространственным разрешением $100\ \mu\text{m}$; второй — ТКВр-ИФП

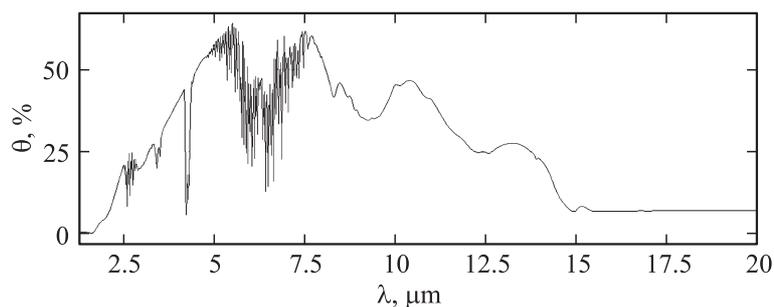


Рис. 1. Спектральное пропускание ИК-световода состава $\text{AgCl}_{0.75}\text{Br}_{0.25}$ длиной 200 mm диаметром 1.12 mm.

„ТИРМ-02“, работающий в коротковолновом инфракрасном спектральном диапазоне ($2.8\text{--}3.1\ \mu\text{m}$) с пространственным разрешением $3\ \mu\text{m}$.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2. Световод в защитной оболочке закреплялся в штативе и располагался вертикально. Над верхним торцом световода располагался тепловизор. По периметру верхнего торца световода для исключения влияния излучений окружающего фона располагался экран. Под нижним торцом световода на фиксированном расстоянии x находился элемент Пельтье. Изменение величины напряжения, подаваемого на элемент, позволяло менять температуру поверхности в диапазоне $283\text{--}450\ \text{K}$. Тепловизионная съемка показала, что распределение температуры на верхней поверхности элемента Пельтье при различной степени нагрева было равномерное (изменение температуры по поверхности менее $0.5\ \text{K}$). С использованием контактных измерений температуры был определен коэффициент излучения верхней поверхности элемента Пельтье, который составил $\varepsilon = 0.93$. Также на основании сравнения результатов контактных и бесконтактных измерений температуры был определен коэффициент излучения поверхности верхнего торца световода $\varepsilon = 0.92$.

В экспериментах предварительно нагретая поверхность элемента Пельтье являлась источником инфракрасного (теплового) излучения. После того как температура верхней поверхности элемента Пельтье (далее температура образца) достигала постоянного значения, он помещался под нижний торец световода. При этом на верхнем

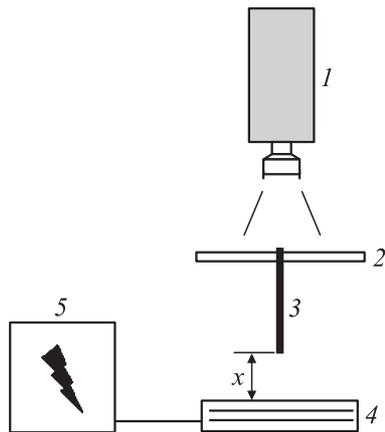


Рис. 2. Схема эксперимента: 1 — тепловизор; 2 — экран; 3 — световод; 4 — нагреваемая поверхность элемента Пельтье; 5 — источник постоянного электрического тока.

торце световода был сфокусирован объектив тепловизора. Выполненные эксперименты показали, что сразу после появления под нижним торцом световода нагретой поверхности тепловизор фиксировал мгновенное изменение теплового изображения на верхнем торце световода. При этом контактные измерения температуры поверхности световода показали, что в течение экспериментов существенного нагревания самого световода не происходило. Таким образом, передача энергии через световод происходила по механизму радиационного теплопереноса, а не за счет теплопроводности. Поскольку материал световода является полупрозрачным для инфракрасного излучения, то фактически тепловизор фиксировал температуру образца, наблюдаемую через световод с некоторой погрешностью, которая обусловлена потерями в ИК-световоде, а также обратным отражением излучения от торца световода.

В экспериментах исследовался прямой однослойный световод длиной 100 мм и диаметром 1.12 мм. Торцы световода были срезаны карбидным резцом. Эксперименты выполнялись при температуре окружающего воздуха (фона) $T_f = 293$ К и относительной влажности 50%. В течение эксперимента с помощью тепловизора фиксировалась темпе-

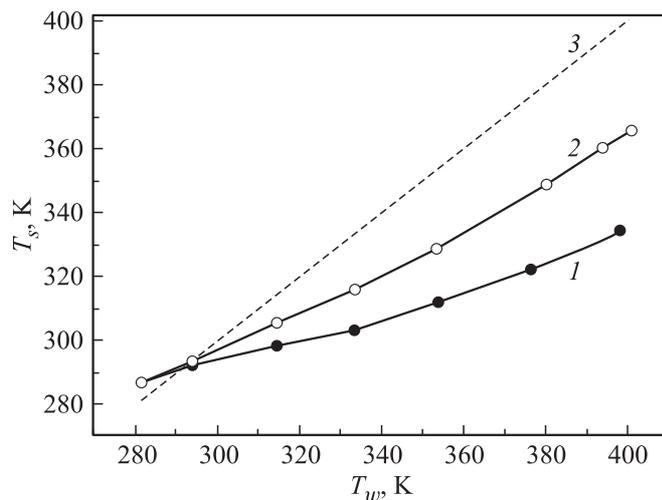


Рис. 3. Температура теплового изображения на верхнем торце световода T_s при различной температуре поверхности образца T_w : 1 — в коротковолновом инфракрасном диапазоне, 2 — в длинноволновом диапазоне, 3 — при отсутствии потерь.

ратура теплового изображения на верхнем торце световода, которая с некоторой погрешностью передавала температуру образца. На начальном этапе были проведены оценочные эксперименты при температуре образца 393 К и различном расстоянии от нижнего торца световода до образца: $x = 1, 5$ и 10 mm. Полученные данные показали, что с увеличением расстояния от поверхности образца до нижнего торца световода средняя температура теплового изображения на верхнем торце световода уменьшалась, однако изменение это было незначительно, что свидетельствовало о незначительных потерях излучения в воздушном промежутке между излучающей поверхностью и световодом. Во всех дальнейших экспериментах расстояние от образца до нижнего торца световода было неизменным и составляло 1 mm.

Результаты измерений температуры теплового изображения на верхнем торце световода T_s , регистрируемой коротковолновым и длинноволновым тепловизорами, в зависимости от температуры излучающей поверхности T_w представлены на рис. 3.

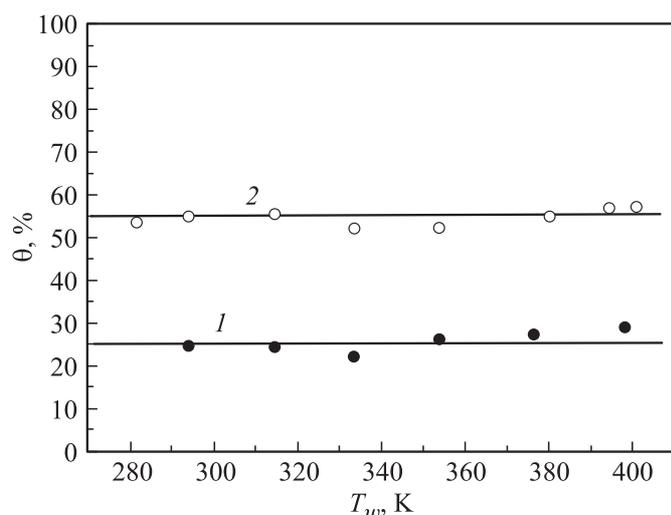


Рис. 4. Доля пропускания ИК-излучения через световод при различной температуре поверхности образца T_w : 1 — в коротковолновом инфракрасном диапазоне, 2 — в длинноволновом.

Для наглядности на рис. 3 под углом 45° нанесена линия, соответствующая отсутствию потерь излучения в световоде. Видно, что все результаты измерений лежат ниже этой линии как в коротковолновой (точки 1), так и в длинноволновой (точки 2) частях спектра. Это свидетельствует о наличии потерь лучистой энергии по мере прохождения ее по световоду. Причем заметно, что более высокие потери имеют место в коротковолновом диапазоне. Поэтому при использовании световода для диагностических целей необходима процедура корректировки показаний тепловизора с учетом его рабочего спектрального диапазона, а также размеров световода.

В соответствии с теорией радиационного теплообмена результирующая плотность потока ИК-излучения, попадающего на нижний торец световода, пропорциональна разности 4 степеней температуры источника излучения и температуры поверхности световода, имеющего температуру окружающего воздуха (далее температура фона). Аналогично плотность потока теплового излучения, выходящего из верхнего

торца световода, пропорциональна разности 4 степеней температуры теплового изображения, регистрируемого тепловизором, и температуры фона.

После прохождения излучения через световод происходит его ослабление вследствие потерь за счет поглощения. Таким образом, долю пропускания ИК-излучения при прохождении через световод можно определить:

$$\theta = \frac{(T_s)^4 - (T_f)^4}{(T_w)^4 - (T_f)^4} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где θ — доля пропускания (%), T_w — температура объекта, T_s — температура, регистрируемая тепловизором, и T_f — температура фона (К).

Результаты обработки экспериментальных данных по (1) для коротковолнового (точки 1) и длинноволнового (точки 2) диапазона инфракрасного излучения представлены на рис. 4.

Видно, что для рассматриваемых температур излучающей поверхности T_w в диапазоне 280–400 К при прохождении излучения через световод пропускание ИК-излучения в длинноволновом диапазоне выше, чем в коротковолновом. Причем в длинноволновом диапазоне доля пропускания излучения для рассматриваемого световода длиной 100 мм составляла в среднем 54% и практически не менялась во всем исследованном диапазоне температур. Для коротковолнового диапазона доля пропускания была практически в 2 раза ниже, чем для длинноволнового, и также не изменялась во всем рассматриваемом диапазоне.

Таким образом, в работе выполнены экспериментальные исследования передачи инфракрасного излучения через световоды, изготовленные на основе твердых растворов галогенидов серебра. Показано, что с применением данных световодов имеется возможность проведения измерений температур поверхностей различных объектов с использованием метода инфракрасной термографии. Для выполнения таких измерений необходима предварительная тарировка световодов с целью определения их поглощательной способности в ИК-диапазоне.

В экспериментах выявлено, что доля пропускания излучения в световодах, изготовленных из твердых растворов галогенидов серебра, при передаче ИК-излучения в длинноволновом диапазоне была практически в два раза выше, чем в коротковолновом. Поэтому при использовании данного типа световодов для измерения температур поверхностей с

применением метода ИК-термографии целесообразно использование ИК-приемников длинноволнового диапазона.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации НШ-8780.2016.8.

Список литературы

- [1] *Harrington J.A.* // *Fiber Integr. Opt.* 2000. V. 19. P. 211–217.
- [2] *Малинин А.В., Скибина Ю.С., Михайлова Н.А., Силовин И.Ю., Чайников М.В.* // *Письма в ЖТФ.* 2010. Т. 36. В. 8. С. 33–38.
- [3] *Курбатов А.М., Курбатов Р.А.* // *Письма в ЖТФ.* 2010. Т. 36. В. 17. С. 23–29.
- [4] *Churbanov M.F., Snopatin G.E., Shiryayev V.S. et al.* // *J. Non Cryst. Solids.* 2011. V. 357. N 11. P. 2352–2357.
- [5] *Караксина Э.В., Кеткова Л.А., Чурбанов М.Ф., Дианов Е.М.* // *Неорганические материалы,* 2013. Т. 49. № 3. С. 223–229.
- [6] *Zhukova L., Primerov N., Korsakov A., Chazov A.* // *Inorg. Mater.* 2008. V. 44. P. 1516–1521.
- [7] *Korsakov A., Zhukova L., Korsakova E., Zharikov V.* // *J. Cryst. Growth.* 2014. V. 386. P. 94–99.