

01.1;09.5;15

Малогабаритный криотермостат с хладагентом из твердого диоксида углерода

© Д.Р. Деветьяров¹, М.А. Ероньян^{1,¶}, В.Н. Ломасов², А.Ф. Опалихин³, Ю.А. Скупов¹, Б.А. Соболев¹, А.А. Унтилов¹

¹ Концерн „Центральный научно-исследовательский институт „Электроприбор“, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

³ ООО „Теста“, Санкт-Петербург, Россия

¶ E-mail: eronyan@mail.ru

Поступило в Редакцию 25 июля 2019 г.

В окончательной редакции 25 июля 2019 г.

Принято к публикации 9 сентября 2019 г.

Предложена простая конструкция малогабаритного криотермостата для исследования влияния гамма-облучения на оптические потери одномодовых фторсиликатных световодов на длине волны $1.31 \mu\text{m}$. Обнаружено повышение их радиационной стойкости с понижением температуры испытаний от $+25$ до -60°C .

Ключевые слова: криотермостат, фторсиликатные световоды, радиационная стойкость, гамма-излучение, рассеяние.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.24.48792.17999

Эксплуатируемые в космическом и воздушном околоземном пространстве объекты различного рода подвергаются воздействию радиации и температур менее -50°C . Повышение надежности функционирования оптоэлектронных систем таких объектов выдвигает требования к радиационным испытаниям их элементной базы при низких температурах. Особенно это относится к волоконным световодам (ВС), наиболее стойкими из которых являются оптические волокна с сердцевинной из чистого кварцевого стекла и оболочкой, легированной фтором [1–3]. Исследование влияния радиационного воздействия на ВС при температурах менее -50°C возможно с использованием малогабаритных криостатов дроссельного типа [4]. Однако их сложная конструкция и необходимость электропитания затрудняют требуемое в ряде случаев ускоренное (за время не более 5 с) перемещение криостатов с образцами в зону заданной лучевой нагрузки. Без потребления электрической энергии могут работать малогабаритные криостаты с использованием хладагентов. На рынке криостаты и криотермостаты такого типа в виде товарной продукции отсутствуют. В источниках научно-технической информации имеются весьма скудные сведения о подобного рода разработках.

Целью наших исследований является анализ работы простого по конструкции малогабаритного криотермостата на основе хладагента из твердого диоксида углерода (ТДУ), а также проведение радиационных низкотемпературных испытаний ВС.

На рис. 1 представлена принципиальная конструкция криотермостата с теплоизоляционной стенкой (ТС) из пенополистирола. Тепловой поток, затрачиваемый на испарение ТДУ 9, из окружающей воздушной среды проходит через ТС 2, рабочую камеру 3, блок термо-

стабилизации 6 и терморегулирующий экран 7, толщина которого определяет температуру рабочей камеры. Ее термостабилизация обеспечивается стационарным тепловым потоком, затрачиваемым на сублимацию ТДУ. Отличительной особенностью криотермостата является наличие блока термостабилизации в виде массивного бруска из дюралюминиевого сплава (ДС), обеспечивающего за счет высокой теплопроводности однородность температурного поля рабочей камеры. В то же время его большая теплоемкость ослабляет влияние загружаемых образцов на температуру рабочей камеры.

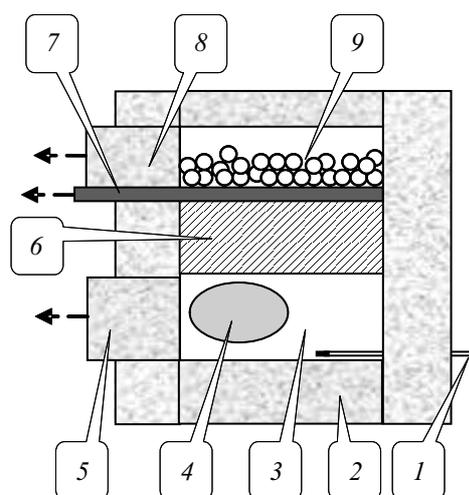


Рис. 1. Принципиальная конструкция малогабаритного криотермостата. 1 — термопара, 2 — наружная ТС, 3 — рабочая камера, 4 — испытываемый образец, 5 — крышка рабочей камеры, 6 — блок термостабилизации, 7 — терморегулирующий экран, 8 — крышка для загрузки хладагента, 9 — гранулы ТДУ.

Параметры материалов криотермостата

Параметр	Пенополистирол ПСБ-25 для ТС	Сплав Д-16	Пенополистирол ПСБ-50 для экрана
λ , W/(m·K)	0.04	160	0.04
S , m ²	0.05	0.029	0.029
δ , m	0.05	0.05	0–0.04

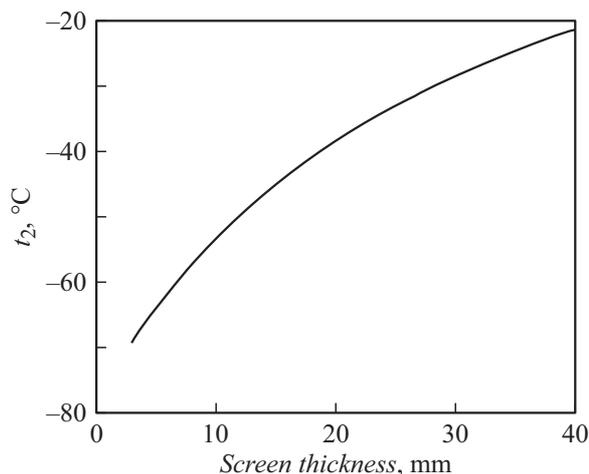


Рис. 2. Расчетная зависимость температуры рабочей камеры (t_2) от толщины экрана.

Для определения влияния параметров малогабаритного криотермостата на температуру рабочей камеры были проведены теплотехнические расчеты одномерной задачи для постоянного стационарного теплового потока (Q) через стенки, находящиеся в тепловом контакте [5]:

$$Q = \lambda_1(S_1/\delta_1)(T_1 - T_2), \quad (1)$$

$$Q = \lambda_2(S_2/\delta_2)(T_3 - T_4), \quad (2)$$

$$Q = \lambda_3(S_3/\delta_3)(T_4 - T_5), \quad (3)$$

где $\lambda_1, S_1, \delta_1; \lambda_2, S_2, \delta_2; \lambda_3, S_3, \delta_3$ — коэффициенты теплопроводности, площадь и толщина слоя ТС, ДС и терморегулирующего экрана соответственно; T — температура на границах окружающая атмосфера–ТС (T_1), ТС–атмосфера рабочей камеры (T_2), атмосфера рабочей камеры–ДС (T_3), ДС–экран (T_4), экран–ТДУ (T_5).

Их совместное решение дает в неявном виде зависимость T_2 от δ_3

$$T_2 = \frac{C_1 T_1 (C_3 + C_2) / C_2 + C_3 T_5}{(C_1 + C_2)(C_3 + C_2) / C_2 - C_2}, \quad (4)$$

где C_i равно $\lambda_i S_i / \delta_i$.

Расчеты основываются на следующих допущениях:

- T_1 равна температуре окружающей среды (293 K);
- T_3 равна T_2 благодаря высокой эффективности конвективного теплообмена в воздушной среде рабочей камеры;

— T_5 определяется температурой сублимации ТДУ (195 K);

— при определении S_1 учитывалась вся поверхность пенополистирола рабочей камеры.

Экспериментальный образец криотермостата с габаритами $300 \times 300 \times 300$ мм имел объем рабочей камеры 1100 cm^3 и массу ДС $\sim 4 \text{ kg}$.

На основании заимствованных из справочной литературы данных о свойствах материалов криотермостата (см. таблицу) и уравнения (4) была рассчитана зависимость температуры рабочей камеры от толщины теплоизоляционного экрана (рис. 2).

Результаты испытания криотермостата хорошо согласуются с расчетными данными: при толщине теплового экрана 7 мм температура рабочей зоны была на уровне -60°C .

Для радиационных испытаний были изготовлены образцы одномодовых ВС с сердцевиной из чистого кварцевого стекла и фторсиликатной оболочкой известным методом модифицированного химического парофазного осаждения [1]. В отличие от этого способа фторсиликатная оболочка наносилась двухстадийным методом, а в процессе высокотемпературного сжатия заготовки ее внутренний канал продувался азотом, содержащим не более $1 \cdot 10^{-5} \text{ mass\%}$ влаги. Длина волны отсечки высшей моды LP₁₁ соответствовала $1.2 \mu\text{m}$.

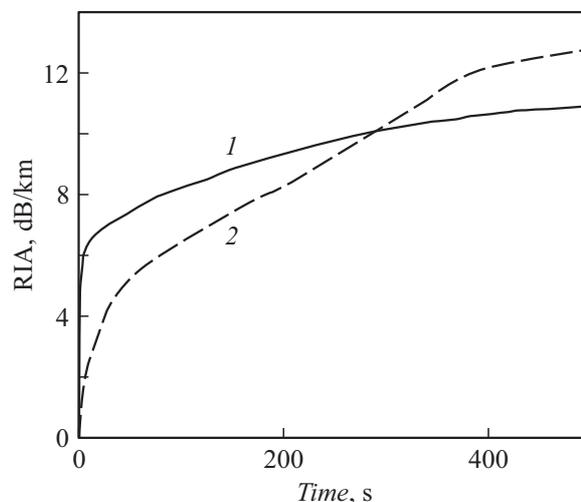


Рис. 3. Влияние длительности гамма-облучения ВС мощностью 1 Gy/s на наведенные в нем оптические потери (RIA) на длине волны $1.31 \mu\text{m}$ при температуре -60 (1) и $+25^\circ\text{C}$ (2).

Загрузка в рабочую камеру криотермостата для радиационных испытаний намотанного в бухту ВС длиной 100 м и массой 8 г привела к временному повышению температуры от -60 до -57°C . Конструкция криотермостата позволила ускоренно вводить испытываемый образец ВС в необходимую энергетическую зону облучения и обеспечивать температуру испытаний -60°C .

Метод измерения наведенных радиацией оптических потерь заключался в измерении ослабления излучения, прошедшего через ВС, в процессе его облучения на установке К-120000. В удаленной от источника гамма-излучения ^{60}Co зоне радиационного воздействия мощность облучения ВС составляла 1 Gy/s. Зондирующее излучение с длиной волны $1.31\ \mu\text{m}$ в оптическом тестере EXFO FOT-600 перед вводом в ВС ослаблялось до $5\ \mu\text{W}$. Эта величина является пороговым уровнем, выше которого возможно фотообесцвечивание радиационных дефектов [6]. Измерения при температуре -60°C проводились при ускоренном вводе образца с криотермостатом в зону облучения (не более 4 с), в то время как испытания при комнатной температуре осуществлялись в штатном режиме введения излучателя в зону облучения.

Увеличение наведенных радиацией оптических потерь с температурой ВС на завершающем этапе процесса облучения (рис. 3) может свидетельствовать о вкладе высокой энергии колебаний атомов в процесс образования дефектов, приводящих, как установлено в работе [2], к рассеянию излучения в длинноволновой области прозрачности кварцевого стекла.

Таким образом, результаты анализа работоспособности простого по конструкции малогабаритного криотермостата, функционирующего на основе хладагента из ТДУ, свидетельствуют о возможности его использования для радиационного испытания образцов ВС при низких температурах вплоть до -70°C .

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Kashaykin P.F., Tomashuk A.L., Dianov E.M., Nishchev K.N., Salgansky M.Y., Abramov A.N., Guryanov A.N. // J. Lightwave Technol. 2015. V. 33. N 9. P. 1788–1793. DOI: 10.1109/JLT.2015.2394806
- [2] Bisyarin M.A., Dukelskiy K.V., Eronyan M.A., Komarov A.V., Lomasov V.N., Meshkovskiy I.K., Reutsky A.A., Shcheglov A.A., Ustinov S.V. // Mater. Res. Express. 2019. V. 6. N 2. P. 026202. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2053-1591/aacc3f>
- [3] Tomashuk A.L., Levchenko A.E., Dianov E.M., Filippov A.V., Moiseenko A.N., Bychkova E.A., Tatsenko O.M., Zavalov N.V., Grunin A.V., Batova E.T., Salgansky M.Y., Guryanov A.N., Kashaykin P.F., Azanova I.S., Tsibinogina M.K. // J. Lightwave Technol. 2017. V. 35. N 11. P. 2143–2149. DOI: 10.1109/JLT.2016.2623359
- [4] Архаров А.М., Марфенина И.В., Микулин Е.И. Криогенные системы. Основы теории и расчета. М.: Машиностроение, 1996. Т. 1. 576 с.
- [5] Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи. Пер. с англ. М.: Мир, 1983. 513 с.
- [6] Долгов И.И., Иванов Г.А., Чаморовский Ю.К., Яковлев М.Я. // Фотон-экспресс. 2005. № 6. С. 4–10.