

Исследование характеристик оптических стекол при воздействии факторов космического пространства

М.П. Калаев¹, А.М. Телегин¹, К.Е. Воронов¹, Ц. Лисян², Ц. Цзилун²

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д 34,

² Пекинский институт инженерии космического пространства, Китай, г. Пекин

Аннотация

В работе приводится описание оптико-электронного устройства ДЧ-ОПТИКА, разработанного авторами статьи и предназначенного для экспериментального исследования изменения оптических свойств стекла при воздействии на поверхность потоков высокоскоростных пылевых частиц микронных размеров. Устройство позволяет в автоматическом режиме измерять индикатрису рассеяния и коэффициент спектрального пропускания для каждой точки образца с шагом 0,5 мм. Особенностью разработанного устройства являются малые габариты и возможность работы в вакууме, что позволяет использовать его в камере ускорителя для моделирования факторов космического пространства. Приведены результаты эксперимента на ускорителе микрочастиц для стекла К-8 с использованием алюминиевой пудры ПАП-1 с характерным размером 1–3 мкм и скоростями 2–8 км/с. Устройство позволяет измерять изменение спектрального пропускания прозрачных материалов в области UV и RGB с точностью 0,005 %, что превосходит чувствительность некоторых известных спектрофотометров.

Ключевые слова: спектральный коэффициент пропускания, индикатриса рассеяния, микрометеорит.

Цитирование: Калаев, М.П. Исследование характеристик оптических стекол при воздействии факторов космического пространства / М.П. Калаев, А.М. Телегин, К.Е. Воронов, Ц. Лисян, Ц. Цзилун // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 5. – С. 803-809. –DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-5-803-809.

Введение

При длительной эксплуатации оптических элементов космических аппаратов, таких как защитные стекла, объективы, фотоэлектрические преобразователи, происходит деградация их свойств [1, 2]: измерение спектрального коэффициента пропускания [3–6], увеличение рассеяния [7], снижение мощности солнечных батарей [8] и т.д. Одной из основных причин изменения этих параметров является воздействие на поверхность метеоритов и пылевых частиц микронных размеров. При этом во многих случаях изменения оптических характеристик предельно малы (ввиду небольшой площади перекрытия поверхности оптических образцов дефектами), что затрудняет их регистрацию при проведении лабораторных исследований из-за загрязнения поверхности при извлечении образцов из вакуумной камеры ускорителя [9]. По этой причине необходимо проводить измерение оптических характеристик в процессе эксперимента без развакуумирования камеры ускорителя. Указанную задачу позволяет решать оптико-электронное устройство ДЧ-ОПТИКА, разработанное в Институте космического приборостроения Самарского университета.

Описание объекта исследования

Типовой вид механических повреждений оптических элементов, возникающих при высокоскоростном ударе микронных частиц, представлен на рис. 1.

На рис. 2 приведена фотография участка поверхности оптического элемента, подвергнутого воздействию высокоскоростных пылевых частиц.

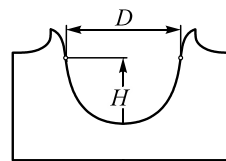


Рис. 1. Типовой профиль оптического дефекта при высокоскоростном ударе

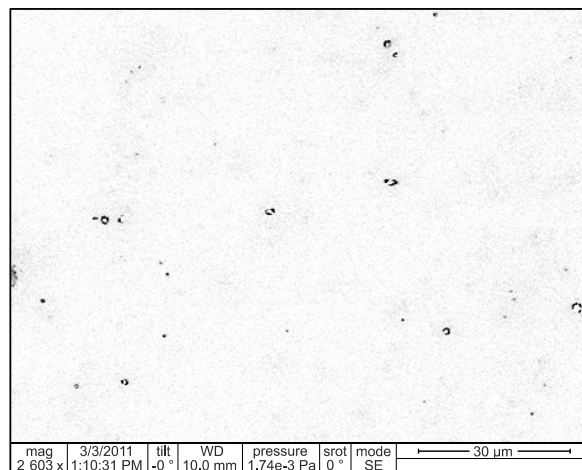


Рис. 2. Фотография участка поверхности оптического элемента с дефектами в виде микроратеров

При прохождении света через оптические дефекты, вызванные воздействием высокоскоростных пылевых частиц, возникают эффекты ослабления и рассеяния, которые необходимо контролировать непосредственно в ходе проведения эксперимента.

Описание опико-электронного устройства

ДЧ-ОПТИКА (рис. 3) измеряет следующие характеристики прозрачных материалов:

- изменение коэффициента спектрального пропускания $\Delta T(\lambda)$ для 4 длин волн (410 (UV), 470 (B), 525 (G), 650 (R) нм) более чем в 500 точках образца с чувствительностью не хуже 0,005%;
- изменение индикатрисы рассеяния для более чем 2000 точек образца в диапазоне углов 10–30 градусов с шагом 0,1 градуса.

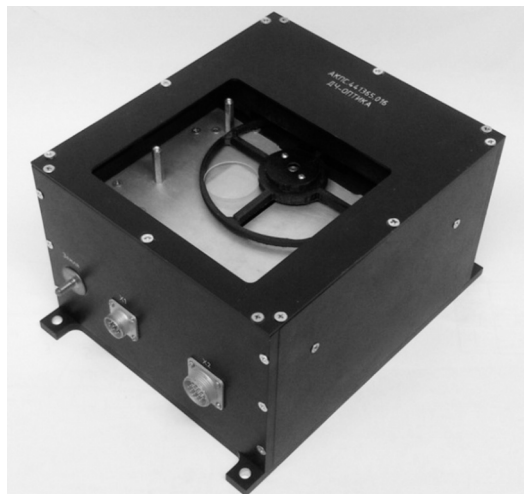


Рис. 3. Фотография опико-электронного устройства ДЧ-ОПТИКА

Аппаратура для исследования показателей деградации оптических элементов выполнена в виде моноблока, содержащего внутри модуль оптических измерений и необходимую электронику [10].

Схема модуля оптических измерений приведена на рис. 4.

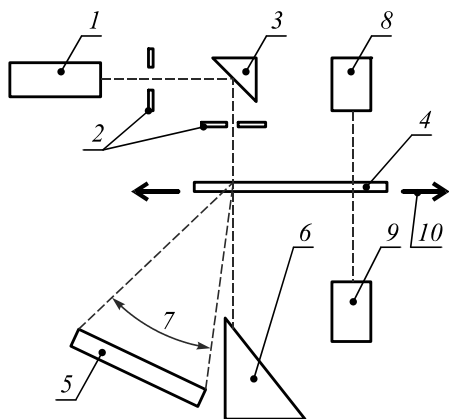


Рис. 4. Оптическая схема устройства:

- 1 – лазерный модуль 50 mW 650 нм; 2 – диафрагмы;
- 3 – зеркало; 4 – исследуемый образец – защитное стекло K-8 ($d=30$ мм, $h=1$ мм); 5 – линейная ПЗС-матрица (TCD1304 3648×1 пикселей); 6 – поглотитель лазерного пучка; 7 – регистрируемое рассеянное лазерное излучение;
- 8 – RGB, UV-светодиоды; 9 – фотодиоды; 10 – система перемещения образца вдоль области сканирования

Лазерный пучок проходит через прозрачный образец с дефектами и попадает в ловушку 6. При этом рассеянное на оптических дефектах излучение 7 при-

нимается с помощью линейной ПЗС-матрицы 5. Для измерения коэффициента прозрачности используются светодиоды 8 и фотодиоды 9. Путём вращения и последовательного перемещения держателя образцов возможно полное сканирование поверхности образцов (4 круглых образца диаметром 30 мм).

На рис. 5 показана электрическая структурная схема опико-электронного устройства.

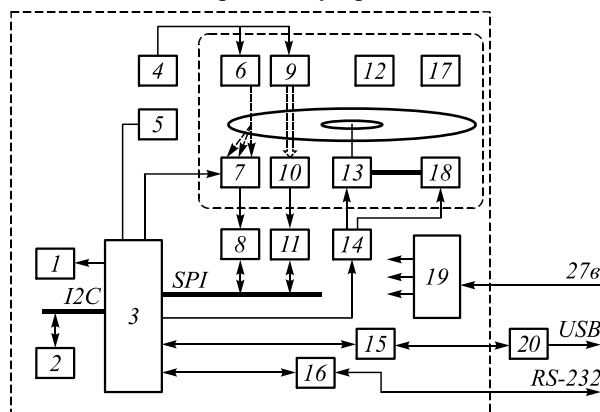


Рис. 5. Структурная схема опико-электронного устройства: 1 и 12 – управляемые нагреватели, 2 и 17 – датчики температуры, 3 – микроконтроллер, 4 – блок управления источниками света, 5 – датчик нулевого положения образца, 6 – лазер, 7 – ПЗС-матрица, 8 и 11 – АЦП 16 разрядов, 9 – блок светодиодов, 10 – блок фотоприемников, 13 – шаговый двигатель для вращения образцов, 14 – драйверы шаговых двигателей, 15 – формирователь RS-422, 16 – формирователь RS-232, 18 – шаговый двигатель для смещения образцов, 19 – преобразователь питания, 20 – преобразователь RS-422 в USB

В качестве ПЗС-матрицы используется TCD1304 производства Toshiba. Основные характеристики матрицы приведены в табл. 1.

Табл. 1. Параметры матрицы TCD1304

Параметр	Значение
Кол-во элементов	3648×1
Размер ячейки, мкм	200×8
Шумы, Лк	10^{-5}
Чувствительность, В·Лк/с	160
Насыщение, Лк/с	4×10^{-3}

Для снижения темновых шумов матрица работает на максимально допустимой частоте (около 250 кадров в секунду для TCD1304).

Для повышения точности измерения модуль источников света (лазер и светодиоды 4 цветов) расположен на термостатируемой пластине, температура которой повышена относительно температуры окружающей среды и поддерживается на уровне 50 градусов Цельсия с точностью до 0,25 градуса с помощью нагревателей и цифрового датчика температуры. Это необходимо, так как изменение интенсивности полупроводниковых источников излучения достигает 0,5% при росте температуры на 1 градус. Термостабилизация в совокупности со стабилизацией электрической мощности источников, а также алгоритмом калибровки позволила получить повторяемость ре-

зультатов измерения на уровне 0,005% без обработки результатов и 0,001% после усреднения результатов. Естественно, при этом абсолютная погрешность устройства в режиме измерения коэффициента пропускания будет выше, так как он является короткобазисным фотометром и отражение от поверхности образца вносит существенную погрешность. Сравнение с эталонным спектрофотометром (использован shimadzu UV-1700) показало расхожимость результатов на уровне 0,1–0,5% для длин волн 405, 470, 525, 650 нм. При этом следует отметить, что спектрофотометр UV-1700 имеет меньшую повторяемость результатов 0,1%, большие габариты, а также не позволяет производить сканирование по поверхности образца, что делает его малоприменимым для анализа стёкол с микрократерами на поверхности.

Связь параметров оптических дефектов с измеряемой величиной

Уравнение, связывающее сигнал на выходе ПЗС-матрицы с параметрами исследуемого образца, имеет вид [4]:

$$I(\theta_i) = I_0 \int_{D_{min}}^{D_{max}} Q(D, \theta_i) D^2 f(D) dD, \tag{1}$$

где $I(\theta_i)$ – интенсивность света, регистрируемая ячейкой i матрицы, установленной под углом θ_i ; I_0 – интенсивность лазера, D – диаметр кратера, где $f(D)$ – функция распределения кратеров по диаметрам на поверхности образца.

Функцию рассеяния $Q(D, \theta)$ можно найти различными методами, каждый из методов имеет свои границы применимости.

В нашем случае, поскольку размер исследуемых частиц соизмерим либо незначительно превышает длину световой волны (красный лазер, 650 нм), используется уравнение Ми в приближении Релея–Дебая [11–14], которое имеет вид (1), где

$$Q(\theta, a) = \left(\frac{3J_1(\chi(\theta, a))}{\chi(\theta, a)} + \frac{\text{sign}(J_1(\chi(\theta, a)))}{\chi(\theta, a)^{1.5}} \right)^2, \tag{2}$$

$$J_1(z) = \frac{\sin(z) - z \cos(z)}{z^2}, \tag{3}$$

$$\chi(\theta, a) = \frac{2a\pi}{\lambda} (1 + m^2 - 2m \cdot \cos(\theta))^{0.5}, \tag{4}$$

где λ – длина волны лазера (650 нм), $a = D/2$ – радиус кратера, m – коэффициент преломления оптического образца.

Описание программного обеспечения и результатов измерения

Для удобства работы с аппаратурой и анализа полученных измерений разработано программное обеспечение, рабочее окно которого приведено на рис. 6. Программа написана на Visual Studio C#.

Для визуального поиска зоны повреждения оптического образца используется изображение, полученное путём суммирования всех пикселей, с учетом веса ам-

плитуды сигнала ПЗС-матрицы для каждой точки образца (рис. 7). Показанному на рис. 7 изображению соответствует воздействие на образец 5000 частиц размерами от 1 до 3 мкм.

$$Q_{int} = \sum_{n=1}^{3684} Q_n.$$

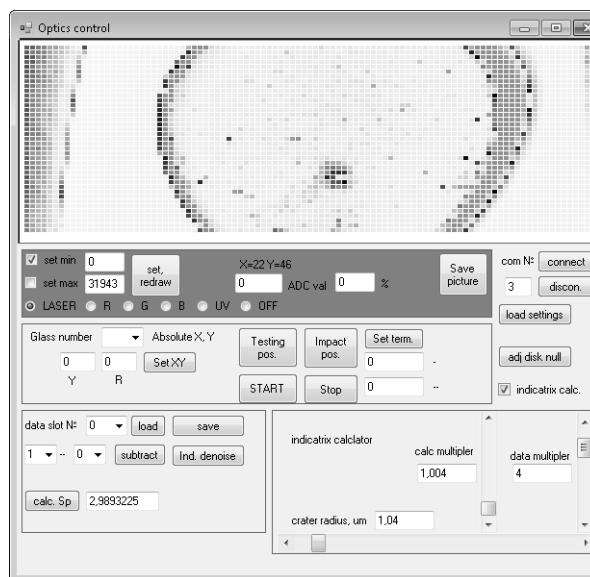


Рис. 6. Рабочее окно программы ДЧ-ОПТИКА

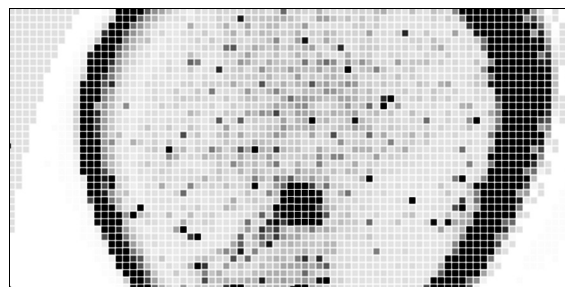


Рис. 7. Измерение изображения после воздействия

Затем из полученного изображения вычитается исходное, полученное аналогичным путём до воздействия микрометеоритов (рис. 8), что позволяет уменьшить влияние дефектов, присутствовавших на стекле до начала эксперимента (рис. 9):

$$Q_{int_0} = \sum_{n=1}^{3684} Q_{n_0}, \Delta Q_{int} = Q_{int} - Q_{int_0}.$$

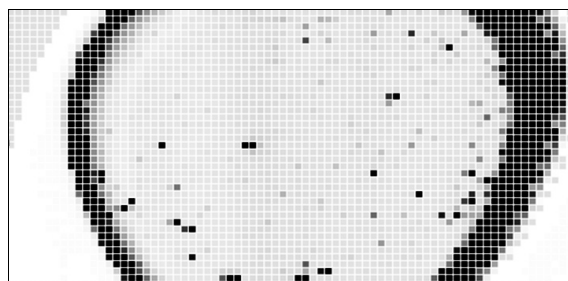


Рис. 8. Измерение изображения до воздействия

Как видно на рис. 9, дефекты оказались локализованы в области 4×4 мм (8×8 клеток).

Размер одной точки сканирования составляет 0,5×0,5мм. Это ограничено точностью встроенной системы позиционирования образцов, а также областью

фокусировки лазерного пучка. При сканировании образца диаметром 30 мм строится изображение размером 100×60 точек. По горизонтали область сканирования превышает размеры образца и попадает на пустой зазор в держателе образцов, используемый для постоянной калибровки схемы измерения прозрачности в процессе сканирования. При этом возникает траектория движения образца через измерительный зазор, показанная на рис. 10.

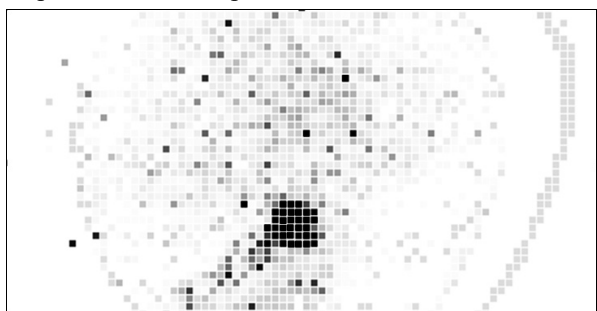


Рис. 9. Разность конечного и начального изображений

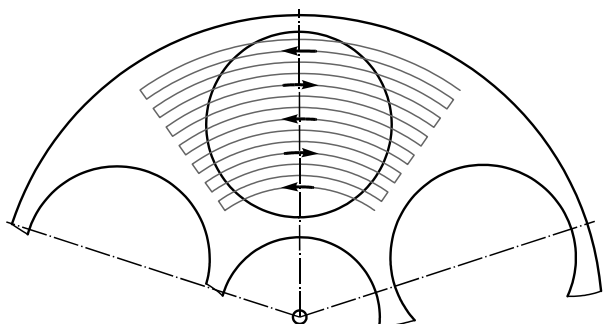


Рис. 10. Траектория движения образца при сканировании

В тех случаях, когда плотность оптических дефектов не велика (порядка 1 кратера на одну точку сканирования, то есть на 0,25 мм²), появляется возможность измерения и анализа индикатрисы рассеяния одиночного кратера. На рис. 11 показано изображение в режиме поиска зоны локализации дефектов после воздействия потока из 20 микрометеоритов.

На рис. 12 показан выходной сигнал ПЗС-матрицы после обработки для одной из точек поверхности, показанной на рис. 11. На график наложена расчетная индикатриса рассеяния (согласно формулы (1)) для сферического кратера с характерным диаметром 1,9 мкм, которая практически совпадает с измеренной, что позволяет судить о характерном размере оптического дефекта. Среднеквадратичное отклонение измерения составляет 7,1%.

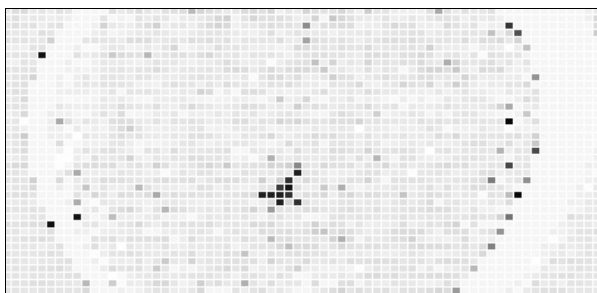


Рис. 11. Режим поиска зоны локализации дефектов после воздействия потока из 20 микрометеоритов

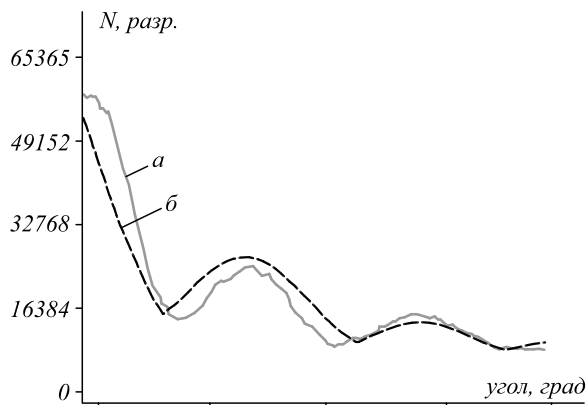


Рис. 12. Измеренная (а) и расчётная (б) индикатриса рассеяния кратера

В тех случаях, когда плотность оптических дефектов велика, появляется возможность регистрации изменения спектрального коэффициента пропускания образцов (для длин волн 410, 470, 525, 650 нм). На рис. 13 показано графическое представление изменения коэффициента пропускания при $\lambda = 525$ нм после воздействия 1000 частиц, а на рис. 14 – аналогичное изображение после воздействия 5000 частиц.

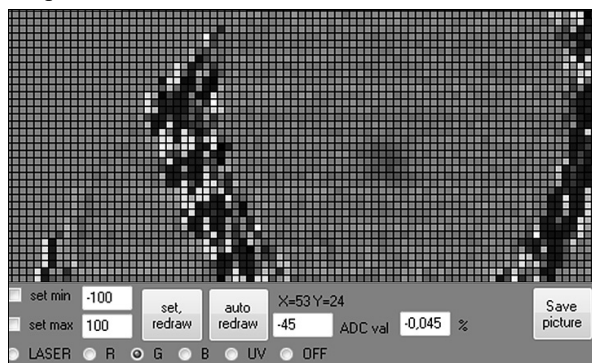


Рис. 13. Графическое представление ΔT_G (1000) для канала $\lambda = 525$ нм

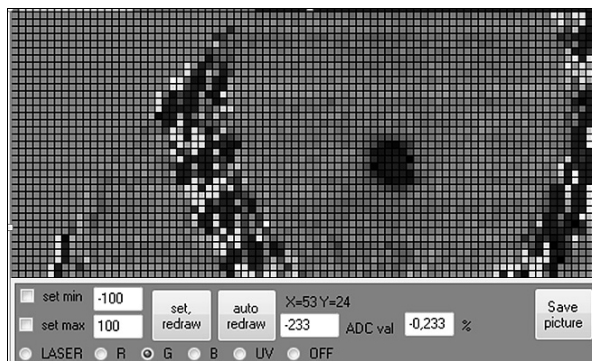


Рис. 14. Графическое представление ΔT_G (5000) для канала G

На рис. 15 показаны измеренные изменения коэффициентов пропускания образца при последовательном увеличении количества кратеров. Значения усреднены по всем точкам изображения в зоне воздействия частиц. Для построения показанного графика используется функция, встроенная в программное обеспечение ДЧ-ОПТИКА. Функция вычисляет усредненное изменение коэффициента пропускания

для участка поверхности, координаты которого задает пользователь (в данном случае 10×10 мм в центре образца).

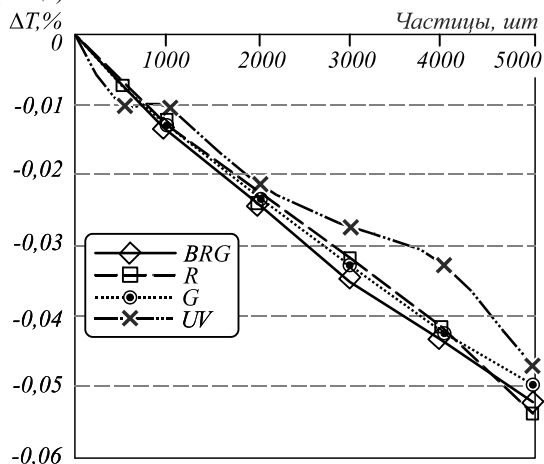


Рис. 15. Изменение пропускания (в процентах) в зоне воздействия на образце в зависимости от количества частиц

Изменение коэффициента пропускания образца имеет практически линейную зависимость от количества воздействовавших микрометеоритов.

На рис. 16 показана визуализация изменения коэффициента пропускания образца в центре зоны воздействия (канал G, воздействия 5000 частиц).

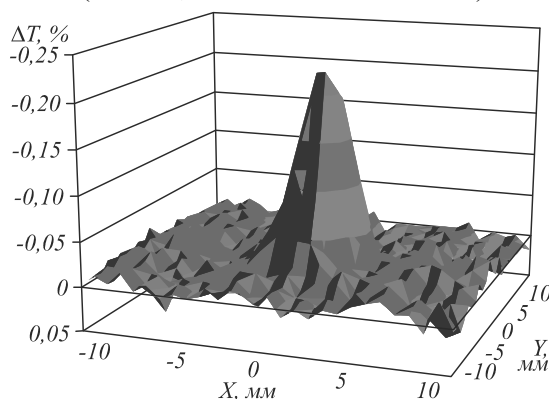


Рис. 16. Визуализация изменения коэффициента пропускания образца в центре зоны воздействия для $\lambda = 525$ нм

Максимальное изменение коэффициента пропускания для точки в центре зоны воздействия составило 0,23 %. При этом усредненное изменение коэффициента пропускания ΔT составляет 0,053 %.

Заключение

Регистрация таких малых изменений оптических характеристик прозрачных материалов (коэффициента направленного пропускания) стала возможной благодаря применению комплекса аппаратных мер: стабилизации яркости и термостатирования источников зондирующего излучения и основных измерительных цепей внутри аппаратуры, а также обработки и фильтрации полученных данных. В совокупности с отсутствием атмосферных источников загрязнения в вакуумной камере во время проведения эксперимента это

позволило получить хороший результат при малых габаритах оптической схемы научной аппаратуры. Для еще более малых изменений используется способ измерения индикатрисы рассеяния, позволяющий регистрировать наличие одиночных дефектов микронных размеров на образце.

Литература

1. **Lai, S.T.** Hazard of hypervelocity impacts on spacecraft / S.T. Lai, E. Murad // Journal of Spacecraft and Rockets. – 2002. – Vol. 39, Issue 1. – P. 106-114. – DOI: 10.2514/2.3788.
2. **Drolshagen, G.** Impact effects from small size meteoroids and space debris / G. Drolshagen // Advances in Space Research. – 2008. – Vol. 41. – P. 1123-1131. – DOI: 10.1016/j.asr.2007.09.007.
3. **Semkin, N.D.** Degradation of optical glass under exposure to micrometeoroids and space debris / N.D. Semkin, M.P. Kalaev // Instruments and Experimental Techniques. – 2011. – Vol. 54, Issue 1. – P. 126-130. – DOI: 10.1134/S0020441211010180.
4. **Novikov, L.S.** Measurements of microparticle fluxes on orbital space stations from 1978 until 2011 / L.S. Novikov, D.G. Baranov, Y.F. Gagarin, V.A. Dergachev, M.S. Samokhina, E.N. Voronina // Advances in Space Research. – 2017. – Vol. 59, Issue 12. – P. 3003-3010. – DOI: 10.1016/j.asr.2017.03.020.
5. **Piyakov, A.V.** Simulation of the control system of the electrodynamic accelerator of dust particles / A.V. Piyakov, D.V. Rodin, M.A. Rodina, A.M. Telegin, S.N. Kondratev // CEUR Workshop Proceedings. – 2018. – Vol. 2212. – P. 158-164.
6. **Назаренко, А.И.** Моделирование космического мусора / А.И. Назаренко. – М.: ИКИ РАН, 2013. – 216 с. – ISBN: 978-5-9903101-6-2.
7. **Semkin, N.D.** Determination of parameters of craters on a glass surface by the small-angle-indicatrix method / N.D. Semkin, M.P. Kalaev, K.E. Voronov // Instruments and Experimental Techniques. – 2011. – Vol. 54, Issue 3. – P. 425-429. – DOI: 10.1134/S002044121103016X.
8. **Nadiradze, A.B.** Meteoroid and technogenic particle impact on spacecraft solar panels / A.B. Nadiradze, M.P. Kalaev, N.D. Semkin // Cosmic Research. – 2016. – Vol. 54, Issue 5. – P. 366-374. – DOI: 10.1134/S001095251605004X.
9. **Kalaev, M.P.** Space debris and micrometeoroid impact on spacecraft elements: Experimental simulation / M.P. Kalaev, N.D. Semkin, L.S. Novikov // Inorganic Materials: Applied Research. – 2013. – Vol. 4, Issue 3. – P. 205-210. – DOI: 10.1134/S2075113313030052.
10. **Пат. 2658072 Российская Федерация G01T 1/34.** Устройство для измерения пространственной плотности микрометеороидов и частиц космического мусора / Калаев М.П., Рязанов Д.М.; заявитель и правообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва»; № 2016145744, заявл. 22.11.2016, опубл. 19.06.2018, Бюл. № 17.
11. **Drake, R.M.** Mie scattering / R.M. Drake, J.E. Gordon // American Journal of Physics. – 1985. – Vol. 53, Issue 10. – P. 955-962. – DOI: 10.1119/1.14011.
12. **Weiner, I.** Particle size determination: An undergraduate lab in Mie scattering / I. Weiner, M. Rust, T.D. Donnelly // American Journal of Physics. – 2001. – Vol. 69, Issue 2. – P. 129-136. – DOI: 10.1119/1.1311785.

13. **Cox, A.J.** An experiment to measure Mie and Rayleigh total scattering cross sections / A.J. Cox, A.J. DeWeerd, J. Linden // *American Journal of Physics*. – 2002. – Vol. 70, Issue 5. – P. 620-625. – DOI: 10.1119/1.1466815.
14. **Wang, M.** Generalized multiparticle Mie modeling of light scattering by cells / M. Wang, M. Cao, Z.R. Guo, N. Gu // *Chinese Science Bulletin*. – 2013. – Vol. 58, Issue 21. – P. 2663-2666. – DOI: 10.1007/s11434-013-5719-0.

Сведения об авторах

Калаев Михаил Павлович, в 2009 году окончил СГАУ с дипломом по специальности «Радиотехника», в 2012 году защитил диссертацию, к.т.н., доцент кафедры конструирования и технологии электронных систем и устройств Самарского университета, с.н.с. института космического приборостроения Самарского университета. Область научных интересов: космическое приборостроение. E-mail: sgau5@yandex.ru.

Телегин Алексей Михайлович, в 2009 году окончил СГАУ с дипломом по специальности «Радиотехника», в 2012 году защитил диссертацию, к.ф.-м.н., доцент кафедры конструирования и технологии электронных систем и устройств Самарского университета, с.н.с. института космического приборостроения Самарского университета. Область научных интересов: космическое приборостроение. E-mail: talex85@mail.ru.

Воронов Константин Евгеньевич, в 1986 году окончил КУАИ с дипломом по специальности «Радиотехника», в 1999 году защитил диссертацию, к.т.н., доцент кафедры радиотехники Самарского университета, директор института космического приборостроения Самарского университета. Область научных интересов: космическое приборостроение. E-mail: voronov.ke@ssau.ru.

Лисян Цзян, начальник отдела, профессор Пекинского института инженерии космического пространства.

Цзилун Цзяо, старший инженер Пекинского института инженерии космического пространства.

ГРНТИ: 89.25.21

Поступила в редакцию 13 мая 2019 г. Окончательный вариант – 27 мая 2019 г.

Investigation of optical glass characteristics under the influence of space factors

M.P. Kalaev¹, A.M. Telegin¹, K.E. Voronov¹, Jiang Lixiang², Jiao Jilong²

¹ Samara National Research University, 443086, Russia, Samara, Moskovskoye shosse 34,

² Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering,
China, Beijing

Abstract

The paper describes a DF-OPTICS device that the present authors designed for the experimental study of changes in the optical properties of a glass whose surface is exposed to high-speed flows of micron-sized dust particles. The device allows the scattering indicatrix and the spectral transmittance to be automatically measured at each point of the sample with a 0.5-mm increment. Advantages of the developed device include small dimensions and the ability to work in vacuum, allowing it to be used in an accelerator chamber to simulate outer space factors. Experimental results for the K-8 glass put in a microparticle accelerator and bombarded by an aluminum powder PAP-1 with a characteristic size of 1-3 μm and speeds of 2-8 km / s are presented. The device makes it possible to measure the change of the spectral transmittance of transparent materials in the UV and RGB regions with an accuracy of 0.005%, which exceeds the sensitivity of some known spectrophotometers.

Keywords: spectral transmittance, scattering indicatrix, micrometeorite.

Citation: Kalaev MP, Telegin AM, Voronov KE, Lixiang J, Jilong J. Investigation of optical glass characteristics under the influence of space factors. *Computer Optics* 2019; 43(5): 803-809. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-5-803-809.

Acknowledgements: The work was carried out under the international contract between Samara University and Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering.

References

- [1] Lai ST, Murad E. Hazard of hypervelocity impacts on spacecraft. *Journal of Spacecraft and Rockets* 2002; 39(1): 106-114. DOI: 10.2514/2.3788.
- [2] Drolshagen G. Impact effects from small size meteoroids and space debris. *Advances in Space Research* 2008; 41: 1123-1131. DOI: 10.1016/j.asr.2007.09.007.
- [3] Semkin ND, Kalaev MP. Degradation of optical glass under exposure to micrometeoroids and space debris. *Instruments and Experimental Techniques* 2011; 54(1): 126-130. DOI: 10.1134/S0020441211010180.
- [4] Novikov LS, Baranov DG, Gagarin YF, Dergachev VA, Samokhina MS, Voronina EN. Measurements of microparticle fluxes on orbital space stations from 1978 until 2011.

- Advances in Space Research 2017; 59(12): 3003-3010. DOI: 10.1016/j.asr.2017.03.020.
- [5] Piyakov AV, Rodin DV, Rodina MA, Telegin AM, Kondratev SN. Simulation of the control system of the electrodynamic accelerator of dust particles. CEUR Workshop Proceedings 2018; 2212: 158-164.
- [6] Nazarenko AI. Modeling of space debris [In Russian]. Moscow: IKI RAN Publisher; 2013. ISBN: 978-5-9903101-6-2.
- [7] Semkin ND, Kalaev MP, Voronov KE. Determination of parameters of craters on a glass surface by the small-angle-indicatrix method. Instruments and Experimental Techniques 2011; 54(3): 425-429. DOI: 10.1134/S002044121103016X.
- [8] Nadiradze AB, Kalaev MP, Semkin ND. Meteoroid and technogenic particle impact on spacecraft solar panels. Cosmic Research 2016; 54(5): 366-374. DOI: 10.1134/S001095251605004X.
- [9] Kalaev M.P., Semkin N.D., Novikov L.S. Space debris and micrometeoroid impact on spacecraft elements: Experimental simulation. Inorganic Materials: Applied Research 2013; 4(3):. 205-210. DOI: 10.1134/S2075113313030052.
- [10] Kalaev MP, Ryazanov DM. Device for measuring the spatial density of micrometeoroids and debris particles [In Russian], Pat RF of Invent N 2658072 of June 19, 2018, Russian Bull of Inventions N17, 2018.
- [11] Drake RM, Gordon JE. Mie scattering. American Journal of Physics 1985; 53(10): 955-962. DOI: 10.1119/1.14011.
- [12] Weiner I, Rust M, Donnelly TD. Particle size determination: An undergraduate lab in Mie scattering. American Journal of Physics 2001; 69(2): 129-136. DOI: 10.1119/1.1311785.
- [13] Cox AJ, DeWeerd AJ, Linden J. An experiment to measure Mie and Rayleigh total scattering cross sections. American Journal of Physics 2002; 70(5): 620-625. DOI: 10.1119/1.1466815.
- [14] Wang M, Cao M, Guo ZR, Gu N. Generalized multiparticle Mie modeling of light scattering by cells. Chinese Science Bulletin 2013; 58(21): 2663-2666. DOI: 10.1007/s11434-013-5719-0.

Author's information

Mikhail Pavlovich Kalaev, in 2009 he graduated from SSAU with a diploma in "Radio Engineering", in 2012 he defended his thesis, Ph. D., associate professor of the Design and Technology of Electronic Systems and Devices department of Samara University, S. S. Institute of Space Instrumentation of the Samara University. Research interests: space instrumentation. E-mail: sgau5@yandex.ru.

Aleksey Mikhailovich Telegin, in 2009 graduated from Samara State Aerospace University with a degree in "Radio Engineering", in 2012 he defended his thesis, Ph.D., associate professor of the Designing and Technology of Electronic Systems and Devices department, Samara University, senior researcher of Institute of Space Device Engineering, Samara University. Research interests: space instrumentation. E-mail: talex85@mail.ru.

Konstantin Evgenievich Voronov, in 1986 graduated from KUI with a diploma in "Radio Engineering", in 1999 he defended his thesis, Ph. D., associate professors of Radio Engineering department of Samara University, Director of the Institute of Space Instrumentation of the Samara University. Research interests: space instrumentation. E-mail: voronov.ke@ssau.ru.

Jiang Lixiang, Head of Department, Professor at the Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering.

Jiao Jilong, Senior Engineer, Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering.

Received May 13, 2019. The final version – May 27, 2019.
