

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СВЕТОРАССЕИВАЮЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВ С ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ НА ЛАЗЕРНЫХ ДЛИНАХ ВОЛН В ДИАПАЗОНЕ 0.35–1.1 мкм

© 2019 г. А. А. Буренков<sup>а</sup>, А. А. Климов<sup>а</sup>, А. В. Кунин<sup>а</sup>,  
В. И. Мальцев<sup>а,\*</sup>, М. А. Чивкунов<sup>а</sup>

<sup>а</sup> РФЯЦ–ВНИИ экспериментальной физики  
Россия, 607188, Саров Нижегородской обл., Варламовское ш., 1а

\*e-mail: levinnat@bk.ru

Поступила в редакцию 26.01.2019 г.

После доработки 26.01.2019 г.

Принята к публикации 01.03.2019 г.

Представлены описание и алгоритм работы автоматизированной сканирующей установки, выполненной по схеме двухкоординатного гониофотометра и предназначенной для измерения двунаправленной функции отражения (д.ф.о.) образцов с различной степенью шероховатости поверхности на лазерных длинах волн 0.53, 0.63 и 1.06 мкм. Относительная погрешность измерения д.ф.о. составляет 6–9%. Специальное программное обеспечение и конструктивные особенности позволяют варьировать время и шаг сканирования установки, а наличие двух каналов измерения использовать источники излучения с нестабилизированной выходной мощностью. В схеме установки заложена возможность смещения рабочего спектрального диапазона в область среднего и дальнего и.к.-диапазона.

DOI: 10.1134/S0032816219040219

### ВВЕДЕНИЕ

Информация о характере рассеяния излучения на лазерных длинах волн для различных материалов имеет огромное значение, например, для расчета светорассеяния в объективах оптических систем или для определения размеров шероховатостей различных поверхностей. Наиболее общим способом описания светорассеивающих свойств поверхности материала является двунаправленная функция отражения (д.ф.о.), задаваемая следующими параметрами: длиной волны излучения ( $\lambda$ ) и углами падения ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) и отражения ( $\theta$ ,  $\varphi$ ), выраженными в полярных координатах.

Для экспериментального измерения д.ф.о. разработаны установки нескольких типов [1, 2]. Наиболее распространенным являются автоматизированные гониофотометры лабораторного [3, 4] и полевого [5, 6] исполнения. Данные установки работают по принципу пошагового сканирования датчиком по полусфере над образцом. Частным случаем являются установки для исследования размеров и ориентации шероховатостей, сканирование в которых осуществляется только в одной плоскости [7–10]. Отличительной особенностью таких установок является высокая точ-

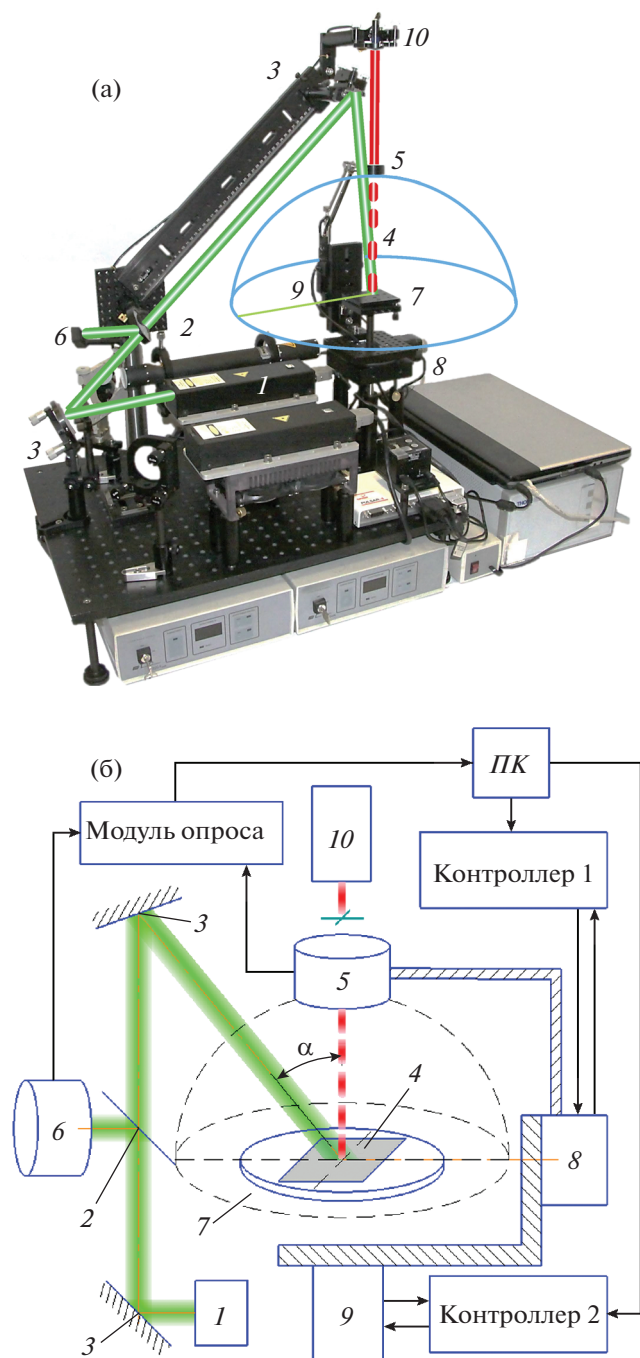
ность результатов при большом времени сканирования. В ряде работ [11–13] рассматривается применение п.з.с.-камер (п.з.с. – приборы с зарядовой связью) вместо механических сканирующих систем, что позволяет значительно увеличить скорость измерения д.ф.о. Однако в таких системах возможно снижение точности измерения за счет усложнения оптической схемы.

В данной работе описана автоматизированная установка, выполненная по схеме двухкоординатного гониофотометра. Установка предназначена для измерения двунаправленной функции отражения образцов с различной степенью шероховатости поверхности на лазерных длинах волн в диапазоне от 0.35 до 1.1 мкм.

### ОПИСАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ

Внешний вид установки показан на рис. 1а, а ее блок-схема представлена на рис. 1б.

Рабочее излучение лазерного источника 1 с помощью зеркала 3 направляется на образец 4 через светоделительную пластинку 2. Излучение, рассеянное образцом 4, попадает на измерительный датчик 5. Излучение, отраженное от светоделе-



**Рис. 1.** Внешний вид (а) и блок-схема установки (б). ПК – персональный компьютер; 1 – лазер; 2 – светоделительная пластинка; 3 – зеркала; 4 – исследуемый образец; 5 – измерительный датчик; 6 – опорный датчик; 7 – поворотная платформа; 8, 9 – моторизированные подвижки; 10 – юстировочный лазер.

лительной пластинки 2, попадает на опорный датчик 6. Поворотная платформа 7 позволяет изменять азимутальный угол падения излучения на образец (β). Моторизированные подвижки 8 и 9 объединены в устройство сканирования и задают

в полярных координатах зенитный (θ) и азимутальный (φ) углы, под которыми регистрируется рассеянное (отраженное) излучение.

Луч юстировочного лазера 10 направлен в центр сканируемой полусферы и совпадает с нормалью к исследуемой поверхности. Диаметр приемной площадки измерительного датчика может изменяться от 3 до 10 мм за счет ирисовой диафрагмы. Радиус сканируемой полусферы можно варьировать в пределах от 10 до 25 см за счет изменения длины плеча устройства сканирования. Количество точек и полное время сканирования можно изменять, задавая величину шага сканирования, диаметр приемной площадки и радиус сканируемой полусферы.

Минимальный угол падения лазерного излучения (л.и.) на образец ограничивается половиной углового размера измерительного датчика и составляет 8°, а максимальный угол – размером его пятна на образце и составляет 80°.

В процессе сканирования положение образца и падающего луча остается неизменным, измерительный датчик последовательно проходит всю верхнюю полусферу над образцом. Углы падения излучения (α, β) определяются из показаний контроллеров в программе путем наведения на падающий луч перекрестья на тыльной стороне датчика.

В качестве приемных датчиков излучения использованы фотодиодные измерители мощности PD300R-3W и PD300 фирмы OPHIR. Спектральная чувствительность датчиков ограничивает рабочий спектральный диапазон установки длинами волн от 0.35 до 1.1 мкм, поэтому в качестве источника излучения может быть использован лазер видимого или ближнего и.к.-диапазона. Наличие измерительного и опорного каналов для регистрации излучения позволяет использовать источники излучения с нестабильной выходной мощностью.

Для автоматизации процессов измерения и передачи данных от измерительного и опорного датчиков на персональный компьютер ПК применен модуль опроса, подключенный к ПК через интерфейс USB 2.0. Процесс сканирования осуществляется с помощью моторизированных подвижек NR360 и CR1-Z7, управляемых через контроллеры BSC202 и TDC001, подключенные к ПК через USB 2.0-интерфейс.

В схеме установки отсутствуют преломляющие оптические элементы, что позволяет смещать рабочий спектральный диапазон установки в область среднего и дальнего и.к.-диапазона путем установки соответствующих датчиков.

**Основные технические характеристики установки.** Измерительный датчик: апертура 10 мм, спектральный диапазон 350–1100 нм, диапазон измеряемой мощности  $5 \cdot 10^{-9}$ – $10^{-1}$  Вт. Опорный датчик: спектральный диапазон 350–1100 нм, диапазон измеря-

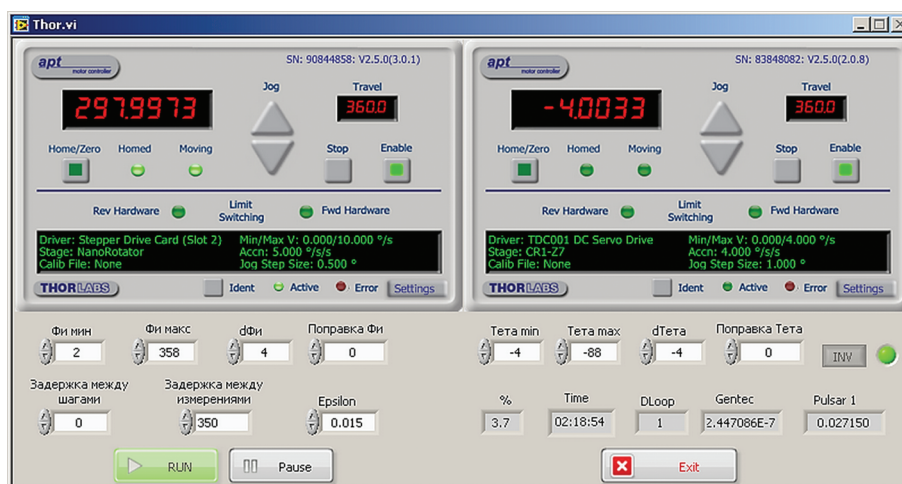


Рис. 2. Рабочее окно программы.

емой мощности  $1 \cdot 10^{-9} - 3 \cdot 10^{-2}$  Вт. Диапазон углов сканирования  $-0 - 360^\circ$  ( $\varphi$ ),  $8 - 80^\circ$  ( $\theta$ ), минимальный шаг сканирования  $0.5^\circ$ ; погрешность отсчета углов при сканировании  $\pm 5'$ .

Для автоматической работы установки написано специальное программное обеспечение на платформе LabVIEW. На рис. 2 показано рабочее окно программы.

В программе предусмотрены два режима работы с координатами: основной и дополнительный. В основном режиме работы программы в рабочем окне задаются шаг и диапазоны углов сканирования, на основании которых автоматически строится сетка, в узлах которой располагаются точки сканирования. В дополнительном режиме программа использует готовый список координат точек сканирования, заранее рассчитанных таким образом, что сканируемая полусфера разбивается на наименьшее количество сегментов, размеры которых не выходят за границы приемной площадки датчика. Данный режим предназначен для ускорения процесса сканирования диффузных образцов. На рис. 3 приведен алгоритм работы программы в основном режиме.

По команде *Run* подается сигнал на контроллеры, и моторизированные подвижки последовательно проводят измерительный датчик через все заданные точки сканирования, делая остановку в каждой из них для проведения измерения. При перемещении датчика между точками сканирования контроллер постоянно опрашивает подвижки, сравнивая их текущие координаты с координатами следующей точки сканирования. При совпадении текущих координат с координатами точки сканирования датчик останавливается и проводится последовательно 5 измерений. Если разброс результатов измерений в данной точке сканирования превышает 1%, то для повышения

точности проводимых измерений и исключения случайных ошибок проводится повторная серия из 5 измерений. После завершения измерений в данной точке пространства осуществляется за-

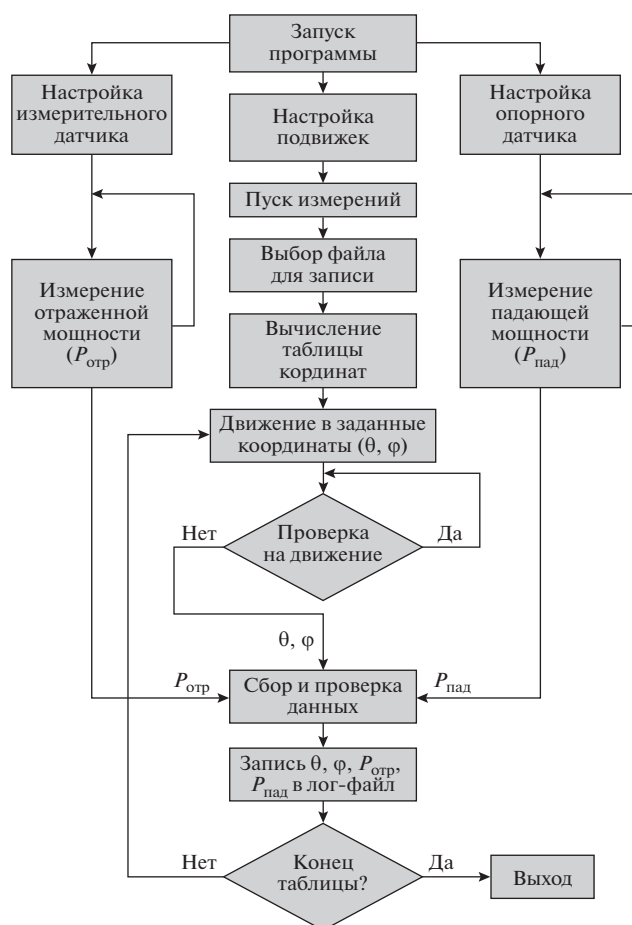


Рис. 3. Алгоритм работы программы.

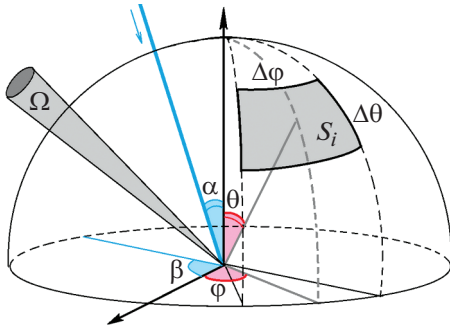


Рис. 4. Область сканирования.  $S_i$  – единичный сегмент;  $\Omega$  – телесный угол измерительного датчика;  $\alpha, \beta$  – углы падения л.и.;  $\varphi, \theta$  – углы сканирования.

пись текущих координат и усредненных результатов измерений с датчиков в лог-файл и цикл перемещение-измерение-запись повторяется уже в следующей точке сканирования. Окончание цикла измерений происходит после того, как измерительный датчик пройдет через все заданные координаты. Все результаты записываются в виде таблицы в лог-файл.

#### МЕТОДИКА РАСЧЕТА ИНТЕГРАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ

Интегральный коэффициент отражения образца  $R_{обр}$  это отношение всей доли излучения ( $P_{отр}$ ), отраженной от образца в верхнюю полусферу, к доле излучения ( $P_{пад}$ ), упавшей на образец под определенным углом  $\alpha$ .

Интегральный коэффициент отражения определяется путем интегрирования измеренной двунаправленной функции отражения по полусфере. Если разбить верхнюю полусферу на сегменты с равным шагом, как представлено на рис. 4, то при условии, что угловые размеры  $\Delta\varphi, \Delta\theta$  единичного сегмента стремятся к нулю, а количество сегментов  $N$  стремится к бесконечности, интегрирование может быть сведено к операции суммирования:

$$R_{обр} = \frac{P_{отр}}{P_{пад}} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} I(\theta, \varphi) \sin(\theta) d\theta d\varphi}{P_{пад}} \approx \sum_{i=1}^N \frac{P_{изм}(\theta_i) \sin(\theta_i) \Delta\theta \Delta\varphi}{P_{пад} \Omega} \quad (1)$$

где  $R_{обр}$  – интегральный коэффициент отражения образца;  $P_{отр}$  – доля излучения, отраженная от образца в верхнюю полусферу;  $P_{пад}$  – доля излучения, упавшая на образец;  $I(\theta, \varphi)$  – сила света, отраженного в заданном направлении;  $\varphi, \theta$  – азимутальный и зенитный углы сканирования;  $P_{изм}(\theta_i)$  – мощность л.и. на измерительном датчике в текущем измерении;  $\theta_i$  –  $i$ -е значение зенитного угла;

$\Omega$  – телесный угол приемной площадки измерительного датчика;  $\Delta\varphi, \Delta\theta$  – угловые размеры сегмента.

Упавшая на образец доля излучения  $P_{пад}$  определяется по мониторинговому каналу ( $P_{оп}$ ) с учетом соответствующего коэффициента пересчета  $K$ . Влияние нестабильности источника излучения устраняется путем измерения мощности излучения, падающей на образец в каждой точке сканирования.

#### ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

В процессе измерения двунаправленной функции отражения в каждой точке сканирования производится независимое измерение коэффициента отражения. Относительная погрешность  $\epsilon_R$   $i$ -го измерения коэффициента отражения рассчитывается по формуле

$$\epsilon_R = \sqrt{\epsilon_{изм}^2 + \epsilon_{оп}^2 + \epsilon_K^2 + \epsilon_{\Omega}^2 + \epsilon_{\theta, \varphi}^2} \quad (2)$$

где  $\epsilon_{изм}$  – относительная погрешность измерительного датчика;  $\epsilon_{оп}$  – относительная погрешность опорного датчика;  $\epsilon_R$  – относительная погрешность коэффициента пересчета;  $\epsilon_{\Omega}$  – относительная погрешность определения величины телесного угла;  $\epsilon_{\theta, \varphi}$  – относительная погрешность, вносимая подвижками.

Относительные погрешности измерительного и опорного датчиков определяются приборной погрешностью и в зависимости от длины волны л.и. составляют  $\epsilon_{изм} = 3-5\%$ . Относительная погрешность коэффициента пересчета  $K$  составляет  $\epsilon_K = 4-6\%$  в зависимости от длины волны л.и. Относительная погрешность определения величины телесного угла составляет  $\epsilon_{\Omega} = 1\%$ . Относительная погрешность установки подвижек не превышает  $\epsilon_{\theta, \varphi} = 0.06\%$ . Относительная погрешность  $i$ -го измерения коэффициента отражения согласно формуле (2) в зависимости от длины волны л.и. составляет  $\epsilon_R = 6-9\%$ .

#### РЕЗУЛЬТАТЫ

На установке проведены измерения распределений коэффициентов отражения двух образцов: оксида магния и алюминиевого сплава, на длинах волн л.и.  $\lambda = 1.064$  мм и  $0.532$  мкм соответственно. Графическое представление результатов измерения и трехмерные графики распределения по углам коэффициента отражения образцов представлены на рис. 5 и 6. Интегральный коэффициент отражения на длине волны л.и.  $\lambda = 1.064$  мкм при угле падения  $\alpha = 10^\circ$  для образца оксида магния составил  $R_{MgO} = 0.96 \pm 0.08$ . Интегральный коэффициент отражения на длине волны л.и.  $\lambda =$



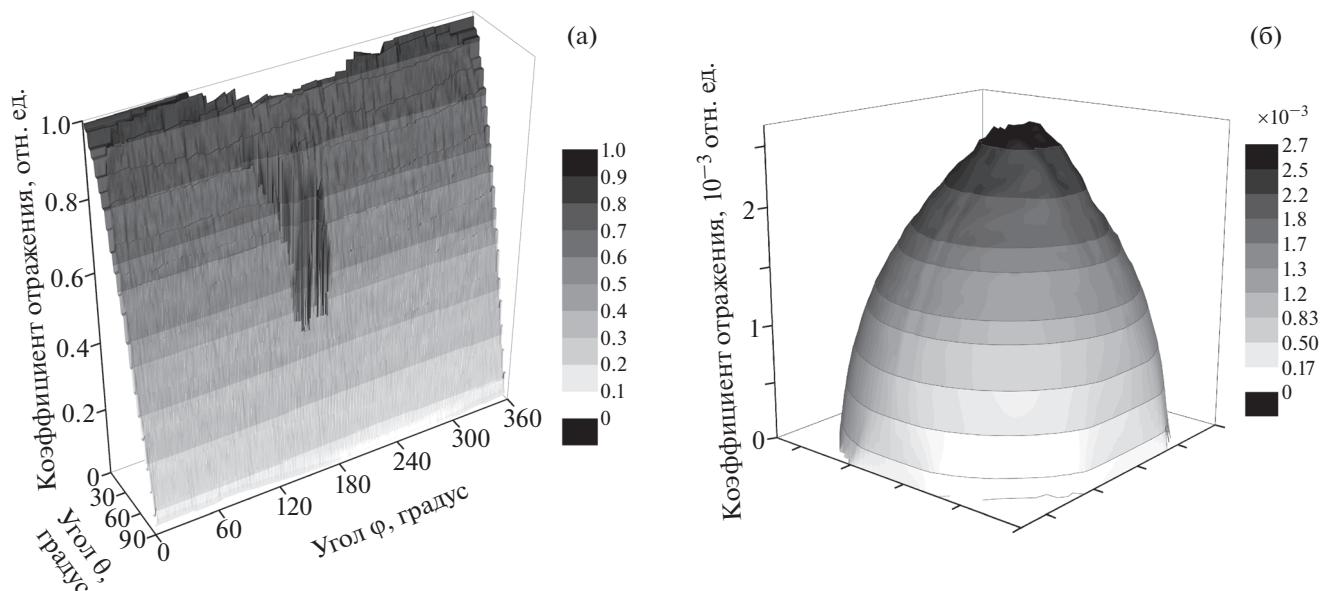


Рис. 5. Графическое представление результатов измерения коэффициента отражения образца оксида магния от углов  $\phi$  и  $\theta$  (а) и его трехмерное представление (б).

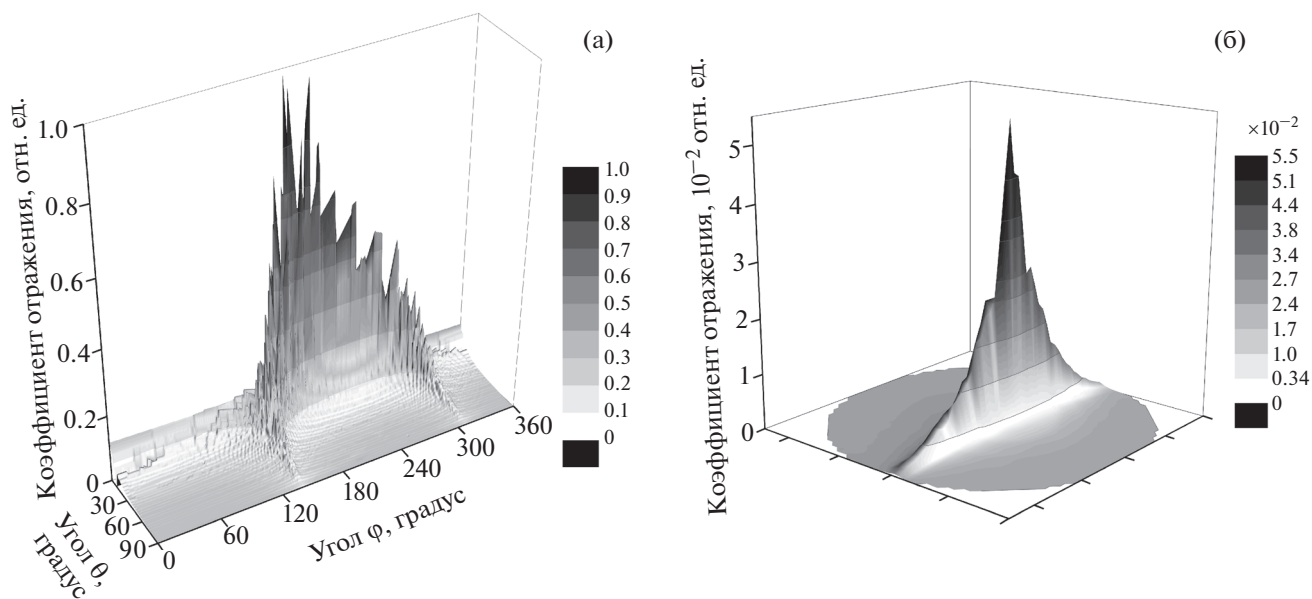


Рис. 6. Графическое представление результатов измерения коэффициента отражения образца алюминиевого сплава от углов  $\phi$  и  $\theta$  (а) и его трехмерное представление (б).

= 0.532 мкм при угле падения  $\alpha = 8^\circ$  для образца сплава алюминия составил  $R_{Al} = 0.39 \pm 0.06$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана автоматизированная установка, выполненная по схеме двухкоординатного гониофотометра, позволяющая измерять двунаправленную функцию отражения образцов с различной

степенью шероховатости поверхности на лазерных длинах волн в диапазоне от 0.35 до 1.1 мкм. Рабочий диапазон углов падения излучения на образец составляет  $8-80^\circ$ .

В схеме установки заложена возможность смещения рабочего спектрального диапазона в область среднего и дальнего и.к.-диапазона путем установки датчиков соответствующего диапазона. Наличие измерительного и опорного каналов

позволяет использовать источники излучения с нестабильной выходной мощностью. Количество точек и полное время сканирования можно варьировать, задавая величину шага сканирования, диаметр приемной площадки и радиус сканируемой полусферы. Для образцов с диффузным характером отражения может быть использован дополнительный алгоритм, который позволяет уменьшить количество точек сканирования и сократить время сканирования. Погрешность измерения в зависимости от длины волны и составляет 6–9%.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nicodemus F.E., Richmond J.C., Hsia J.J., Ginsberg I.W., Limperis T.* Geometrical considerations and nomenclature for reflectance.: U.S. Department of commerce. National Bureau of Standards, 1977. <http://graphics.stanford.edu/courses/cs448-05-winter/papers/nicodemus-brdf-nist.pdf>
2. *Shell J.R.* Bidirectional Reflectance: An Overview with Remote Sensing Applications & Measurement Recommendations. 2004. <http://web.gps.caltech.edu/~vijay/Papers/BRDF/shell-04.pdf>
3. *White D.R., Saunders P., Bonsey S.J., Van de Ven J., Hamish E.* // *Appl. Opt.* 1998. V. 37. P. 16. <https://doi.org/10.1364/AO.37.003450>
4. *Hanlu Zhang, Zhensen Wu.* // *Optica Applicata*. 2010. V. 40. № 1. P. 197. <http://www.oalib.com/paper/2063214#.XH6so8AzaYg>
5. *Сизиков А.С.* // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. 2016. № 2(40). С. 22. <https://elibrary.ru/item.asp?id=29445030>
6. *Беляев Ю.В., Попков А.П., Домарацкий А.В.* // XXIX международная научно-практическая конференция, посвященная 80-летию ФГБУ ВНИИПО МЧС России. Секция 1. Прикладные проблемы оптики и спектроскопии. 2017. С. 25. <http://elib.bsu.by/handle/123456789/178722>
7. *Топорец А.С.* Оптика шероховатой поверхности. Л.: Машиностроение, 1988.
8. *Колаша С.С.* // Приборы и методы измерений. 2016. Т. 7. № 2. С. 176.
9. *Тиранов Д.Т., Михайлов И.Д.* // *Опт. журн.* 2015. Т. 82. 9. С. 54. <http://opticjourn.ru/vipuski/1215-opticheskij-zhurnal-tom-82-09-2015.html>
10. *Зайцев Д.А.* // Международная научно-практическая конференция “Инновационно-технологическое развитие науки”. Волгоград, 05 апреля 2017: Сборник трудов. 2017. Т. 2. С. 50. <https://elibrary.ru/item.asp?id=28933474>
11. *Волобой А.Г., Вьюкова Н.И., Галактионов В.А., Ершов С.В., Летунов А.А., Потемин И.С.* Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша. 2005. № 108. [http://keldysh.ru/papers/2005/source/prep2005\\_108.pdf](http://keldysh.ru/papers/2005/source/prep2005_108.pdf)
12. *Bergery K., Reshetouskiz I., Magnorx M., Ihrke I.* // Proceedings of the Vision, Modeling, and Visualization Workshop. 4–6 October 2011. Berlin, Germany. doi 10.2312/PE/VMV/VMV11/325-330
13. *Белюсов Д.А., Полещук А.Г., Хомутов В.Н.* // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2015. Т. 5. С. 128. <https://cyberleninka.ru/article/n/ustroystvo-dlya-izmereniya-indikatorny-rasseyaniya-sveta-strukturirovannyimi-poverhnostyami>