

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-09-95-105

УДК 535.3

Исследование оптических характеристик композитных материалов

Вячеслав Викторович Пронин¹, Сергей Максимович Сагалаев²,
Алексей Николаевич Старченко³✉

Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор
Ленинградской обл., Россия

¹wwp-niiki@rambler.ru <https://orcid.org/0000-0003-1113-7486>

²MaeshiSud@yandex.ru <https://orcid.org/0009-0006-2190-3657>

³anstar2000@mail.ru <https://orcid.org/0009-0003-5129-5515>

Аннотация

Предмет исследования. Оптические характеристики композитных материалов. **Цель работы.** Получение и исследование спектральных зависимостей коэффициентов отражения и особенностей отражения (рассеяния) композитных материалов для формирования баз данных и моделирования отраженного и собственного излучений объектов. **Метод.** Сравнительные измерения спектральных зависимостей коэффициентов полусферического отражения, изучение структуры поверхности материалов с помощью профилометра и индикатрис рассеяния образцов на гониофотометрической установке. **Основные результаты.** Экспериментальные данные по спектральным зависимостям коэффициентов отражения и индикатрисам рассеяния типовых представителей композитных материалов. **Практическая значимость.** Получены и систематизированы сведения, необходимые для оценок коэффициентов излучения, проведения математического моделирования и теплофизических расчетов.

Ключевые слова: полимерный композитный материал, стеклопластик, углепластик, спектральный коэффициент отражения, шероховатость поверхности, индикатриса рассеяния (отражения)

Ссылка для цитирования: Пронин В.В., Сагалаев С.М., Старченко А.Н. Исследование оптических характеристик композитных материалов // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 9. С. 95–105. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-09-95-105>

Коды OCIS: 160.1245, 240.5770, 290.5820, 290.5880, 300.6190, 300.6300, 300.6330

Investigation of composite materials optical characteristics

VIACHESLAV V. PRONIN¹, SERGEY M. SAGALAEV², ALEXEY N. STARCHENKO³✉

Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor,
Leningrad region, Russia

¹wwp-niiki@rambler.ru <https://orcid.org/0000-0003-1113-7486>

²MaeshiSud@yandex.ru <https://orcid.org/0009-0006-2190-3657>

³anstar2000@mail.ru <https://orcid.org/0009-0003-5129-5515>

Abstract

Subject of study. Optical characteristics of composite materials. **Aim of study.** Investigation of reflection coefficients spectral dependences and reflection (scattering) features of composite materials. **Method.** Comparative measurements of the hemispherical reflection coefficients spectral dependences, studies of the surface structure and scattering indicatrices of samples the different roughness parameters samples. **Main results.** Experimental data on spectral dependences of reflection coefficients and scattering indicatrices of typical representatives of composite materials. **Practical significance.** The information necessary for estimating emissivity (radiation coefficient), mathematical modeling and thermal physic calculations was obtained and systematized.

Keywords: polymer composite material, fiberglass plastic, carbon-filled plastic, spectral reflection coefficient, surface roughness, scattering (reflection) indicatrix

For citation: Pronin V.V., Sagalaev S.M., Starchenko A.N. Investigation of composite materials optical characteristics [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 9. P. 95–105. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-09-95-105>

OCIS codes: 160.1245, 240.5770, 290.5820, 290.5880, 300.6190, 300.6300, 300.6330

ВВЕДЕНИЕ

Широкое применение полимерных композитных материалов (ПКМ) в разных областях техники обусловлено их уникальными физическими свойствами и высокими эксплуатационными показателями. Прогресс в технологии формообразования стимулирует применение ПКМ для корпусных и несущих деталей оптических и оптико-электронных приборов, включая приборы для инфракрасной (ИК) области спектра. Знание оптических свойств материалов необходимо для оценок как паразитного рассеянного ими света в оптических системах, так и внутреннего теплового фона ИК приборов. Эта информация важна для тепловых расчетов, особенно в случае радиационного теплообмена.

В ПКМ матрицей служит полимер, а в качестве наполнителей используются вещества различного типа. По типу наполнителя ПКМ делят на стеклопластики, углепластики, боропластики, органопластики, пластики с порошковым наполнителем, текстолиты.

Стеклопластики армируются волокнами из неорганического стекла и кварца. В качестве матрицы применяются термореактивные синтетические смолы (фенольные, эпоксидные, полиэфирные и др.) и термопластичные полимеры (полиамиды, полиэтилен, полистирол и др.). Эти ПКМ обладают высокой прочностью, низкой теплопроводностью, высокими электроизоляционными свойствами. Они прозрачны для радиоволн. Содержание волокон в стеклопластиках по массе достигает 80%. Стеклопластики сравнительно де-

шевы, их используют в ракетно-космической отрасли, судостроении и электронике.

В углепластиках наполнителем служат углеродные волокна. Волокна получают из синтетических и природных нитей на основе целлюлозы, сополимеров акрилонитрила, нефтяных и каменноугольных пеков. В зависимости от режима обработки и сырья волокна имеют различную структуру. Для углепластиков используются те же связующие матрицы, что и для стеклопластиков. Преимуществами углепластиков являются их низкая плотность и высокий модуль упругости. Углеродные волокна и углепластики имеют практически нулевой коэффициент линейного расширения. Они хорошо проводят электричество, что ограничивает области их применения. Углепластики применяют в авиации, ракетостроении, машиностроении. Углеродистые композиты способны выдерживать в инертных средах температуры до 3000 °С.

Боропластики содержат в качестве наполнителя борные волокна, внедренные в термореактивную полимерную матрицу. Волокна могут быть в виде монопилей и жгутов. Благодаря твердости нитей материал обладает высокими механическими свойствами и стойкостью к агрессивным средам. Из-за высокой стоимости боропластики используют лишь в авиационной и космической технике в деталях, подвергающихся длительным нагрузкам.

Органопластики — композиты, в которых наполнителями являются органические природные и искусственные волокна в виде

жгутов, нитей, тканей, бумаги. В термореактивных органопластиках в качестве матрицы используют эпоксидные, полиэфирные и фенольные смолы, а также полиамиды. Материал содержит 40–70% наполнителя. Органопластики применяются при производстве автомобилей, судов, авиационной и космической техники и в радиоэлектронике.

Текстолиты — слоистые пластики, армированные тканями из различных волокон. Первоначально ткань пропитывается фенолформальдегидной смолой, затем прессуется при повышенной температуре с получением текстолитовых пластин. Связующими в текстолитах являются термореактивные и термопластичные полимеры. В качестве наполнителя используются ткани из хлопковых, синтетических, стеклянных, углеродных, асбестовых, базальтовых волокон.

Оптические характеристики ПКМ изучены в недостаточной степени [1–5]. Это относится к ограниченной ширине спектральных диапазонов измерения коэффициентов отражения. В статье [1] приведены спектральные коэффициенты полусферического отражения композитных материалов на основе углерода в области длин волн 364–927 нм. В публикациях [2, 3] представлены результаты измерения коэффициентов яркости $\beta(\lambda)$ в спектральном диапазоне 0,4–2,4 мкм для углов падения и наблюдения 5, 25, 45 и 65°. В работе [4] приводятся интегральные коэффициенты отражения материалов в спектральной области 500–800 нм и экспериментальная индикатриса рассеяния на длине волны гелий-неонового лазера $\lambda = 633$ нм. В публикации [5], посвященной изучению оптических характеристик элементов космических аппаратов при воздействии электронов с высокой энергией, приведены результаты контроля коэффициента полусферического отражения (ПСО) углеродного композитного материала в диапазоне длин волн 350–1850 нм и индикатрисы рассеяния на длине волны 632 нм при углах падения 0 и 60°.

Применительно к угловому характеру отражения в статье [3] приводятся оценки объемного многократного рассеяния в толще ПКМ и однократного рассеяния на границе раздела со среднеквадратической высотой неровностей 11 мкм. Эти экспериментальные данные указывают на рост $\beta(\lambda)$ по мере увеличения углов падения и наблюдения 5, 25, 45 и 65°.

Цель настоящей работы заключается в получении и исследовании спектральных зависимостей коэффициентов отражения и особенностей отражения (рассеяния) ПКМ для формирования баз данных и моделирования отраженного и собственного излучений объектов.

В работе использованы следующие материалы: углепластики 3К1Ф3 и 4КМС, углефенольные пластики П5-12 и П5-13Н, стеклопластики РТМ-6, РТП-170, РТП-200 и стеклофенольный пластик СФП.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРИМЕНЯЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Искомые зависимости получены при использовании спектрофотометра СФ-56, спектрометров Фурье ФСМ2201 и ФСМ2211, укомплектованных приставками диффузного отражения (ПДО), и гониофотометрической установки [6].

Для измерений спектральных зависимостей коэффициентов отражения и индикатрис рассеяния подготовлены образцы двух типов. На рис. 1 в качестве примера приведены фотографии образцов стеклопластика РТП-170 и углепластика 3К1Ф3. Образцы диаметром 19 мм нужны для измерений с применением ПДО на спектрометрах ФСМ. Образцы диаметром 40 мм необходимы для измерений на спектрофотометре СФ-56 и на гониофотометрической установке.

Обычно материалы и покрытия по характеру отражения излучения подразделяются на три типа: с зеркальным, диффузным и смешанным отражением [7]. При зеркальном отражении (ЗО) вклад диффузной

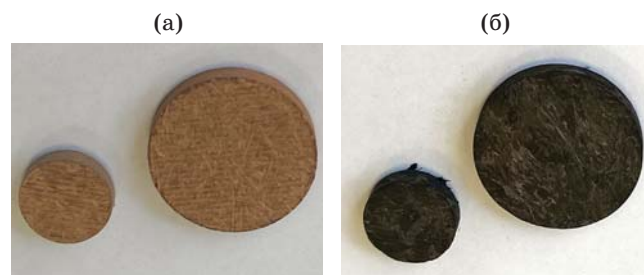


Рис. 1. Образцы из стеклопластика РТП-170 (а) и углепластика 3К1Ф3 (б)

Fig. 1. Samples from (a) fiberglass plastic РТП-170 and (b) carbon-filled plastic 3К1Ф3

компоненты пренебрежимо мал. При этом полагается, что образец имеет идеально гладкую поверхность и при отражении не искажает диаграмму направленности падающего излучения. Для диффузного отражения (ДО), наоборот, характерно отсутствие зеркальной составляющей [8]. Идеальным случаем является ламбертовское, или равнояркое отражение: яркость поверхности образца постоянна и не зависит от угла рассеяния ψ . Коэффициент отражения идеального диффузного рассеивателя равен единице. Смешанный тип отражения характеризуется существенным вкладом как зеркальной, так и диффузной составляющих. Такое отражение наблюдается у материалов с развитой структурой поверхности.

Ниже будут применяться следующие обозначения: $\rho_{2\pi}(\lambda)$ — коэффициент ПСО, $\rho_d(\lambda)$ — коэффициент ДО и $\rho_{sp}(\lambda)$ — коэффициент ЗО. В общем случае коэффициент $\rho_{2\pi}(\lambda)$ представляет собой сумму $\rho_d(\lambda)$ и $\rho_{sp}(\lambda)$.

Нужно отметить, что в большинстве вариантов ПДО служат для измерений коэффициентов ПСО шероховатых образцов и сыпучих материалов. Лишь в отдельных видах приставок реализуется возможность измерения коэффициента $\rho_d(\lambda)$ за счет вывода из оптического тракта зеркальной компоненты $\rho_{sp}(\lambda)$.

Известно, что коэффициенты отражения измеряют методом сравнения. Искомая зависимость $\rho(\lambda)$ определяется согласно формуле

$$\rho(\lambda) = \rho_0(\lambda)[N(\lambda)/N_0(\lambda)], \quad (1)$$

где $\rho_0(\lambda)$ — коэффициент отражения меры сравнения, $N(\lambda)$ — сигнал от исследуемого образца, $N_0(\lambda)$ — сигнал от меры сравнения.

Ввиду особенностей спектральных приборов зависимости $N(\lambda)$ и $N_0(\lambda)$ поочередно фиксируются в режиме записи «интенсивности», а затем обрабатываются с помощью прикладной программы согласно формуле (1).

В видимом и ближнем ИК диапазонах в качестве мер полусферического (диффузного) отражения применяют образцы из молочного стекла МС20 [9] и пластины из определенных марок фторопласта.

На рис. 2 представлены фотография и зависимость $\rho_{2\pi}(\lambda)$ меры из молочного стекла МС20 с полированной рабочей поверхностью. Она входит в комплект ПДО спектрофотометра СФ-56.

Приставка ДО спектрофотометра СФ-56 построена на основе фотометрического шара и «интегрирует» излучение, отражаемое во всю полусферу (телесный угол 2π). Угол падения излучения на образец составляет 9° . В приставке имеется окно для вывода зеркально отраженного излучения. При измерении коэффициента ПСО окно закрывается заглушкой, имеющей диффузное покрытие такое же, как на внутренней поверхности шара.

На рис. 3 приведены фотография и зависимость $\rho_{2\pi}(\lambda)$ меры сравнения ПДО приборов ФСМ. Она и аналогичные ей меры изготовлены и паспортизованы в АО «НИИ ОЭП». Поверхность меры обработана абразивным порошком на пескоструйной установке. После травления на поверхность нанесено вакуумное алюминиевое покрытие с защитой.

На рис. 4 представлены фотографии ПДО спектрометров ФСМ, меры сравнения и образца, подготовленного для измерений. В этой приставке отраженное излучение собирается

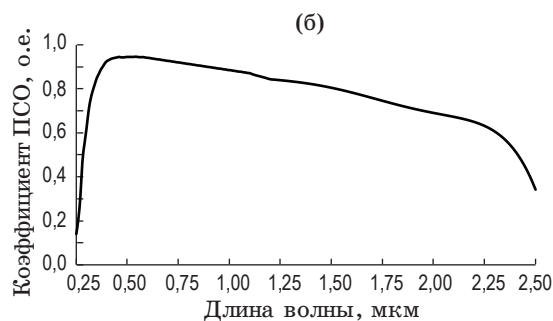
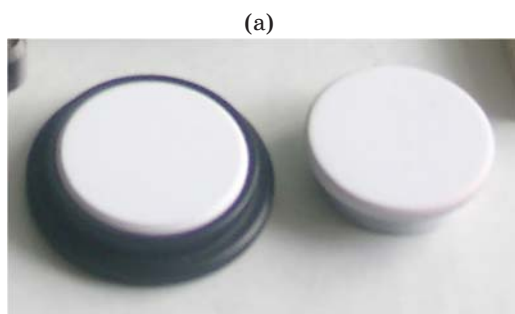


Рис. 2. Фотография (а) и зависимость $\rho_{2\pi}(\lambda)$ меры сравнения из стекла МС20 в видимом и ближнем ИК диапазонах (б)

Fig. 2. (a) Photograph and (b) hemispherical reflection coefficient spectral dependence $\rho_{2\pi}(\lambda)$ of the comparison measure made of MC20 glass for visible and near infrared ranges

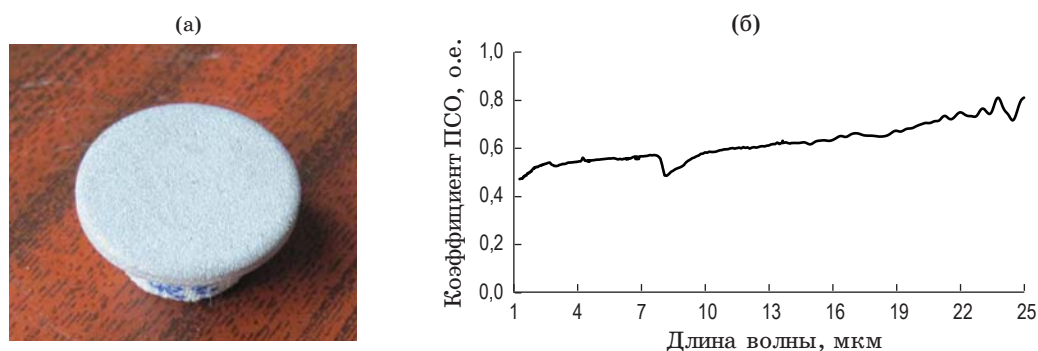


Рис. 3. Фотография (а) и зависимость $\rho_{2\pi}(\lambda)$ меры сравнения ИК диапазона (б)

Fig. 3. (a) Photograph and (b) hemispherical reflection coefficient spectral dependence $\rho_{2\pi}(\lambda)$ of a comparison measure for the infrared range

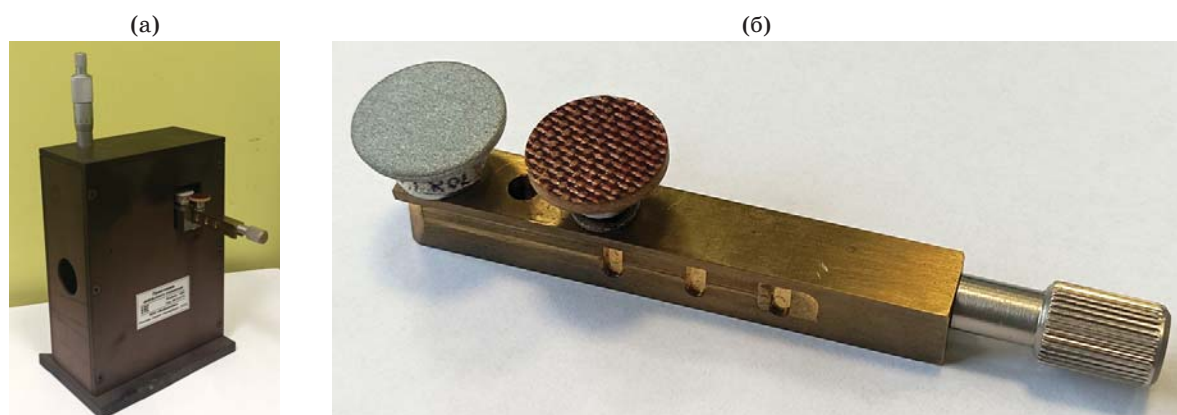


Рис. 4. Приставка ДО приборов ФСМ (а) и каретка с мерой сравнения и исследуемым образцом (б)

Fig. 4. (a) Fourier spectrometer diffuse accessory and (b) carriage with comparison measure and test sample

эллиптическим зеркалом из телесного угла около 1,2 ср (плоский угол охвата 70°). По этой и иным причинам важно обеспечить равенство размеров образца и меры сравнения.

На рис. 5 приведены снимки поверхностей двух образцов. Они сделаны с помощью микроскопа и телевизионной камеры. Изображения иллюстрируют наличие неоднородностей разного вида и разных характерных размеров.

Для изучения поверхностей образцов применялся профилометр TESA RUGOSURF 90G. В щуп прибора встроена алмазная игла радиусом острия 5 мкм. Измерения автоматизированы, выполняются за счет перемещения щупа вдоль поверхности на базовое расстояние. Поперечные смещения иглы фиксируются индуктивным датчиком с разрешением 0,001 мкм. Прибор выдает оценки параметров

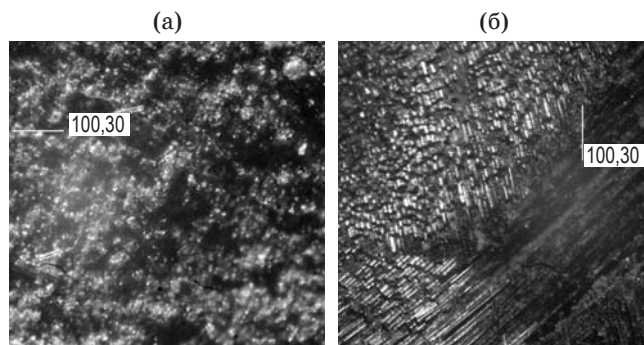


Рис. 5. Фотографии поверхностей образцов стеклопластика РТП-200 (а) и углефенольного пластика П5-13Н (б). На изображения наложены масштабные отрезки длиной 100,3 мкм

Fig. 5. Photographs of (a) surfaces of samples made of fiberglass plastic РТП-200 and (b) carbon phenolic plastic П5-13Н. Scale bars 100.3 μm long are superimposed on the images

Таблица 1. Параметры поверхностей образцов
Table 1. Surface parameters of samples

Параметр	3К1Ф3	4КМС	П5-12	П5-13Н	РТМ-6	РТП-170	РТП-200	СФП
<i>По первичному профилю</i>								
P_q , мкм	13,4	26,1	7,3	10,5	7,1	11,5	8,1	16,9
P_a , мкм	10,7	16,3	5,9	9,1	7,4	8,9	6,3	13,1
P_z , мкм	63,5	139,0	32,1	46,4	51,6	70,1	50,4	80,9
PSm , мкм	430	704	748	326	208	434	354	280
<i>По профилю шероховатости</i>								
R_q , мкм	5,00	9,1	1,4	4,0	3,9	4,2	3,8	6,6
R_a , мкм	4,1	6,9	1,2	3,1	3,9	3,6	2,9	5,4
R_z , мкм	22,3	37,6	6,3	22,4	25,9	18,4	19,6	30,9
RSm , мкм	173	244	84	120	113	169	95	148
<i>По профилю волнистости</i>								
W_q , мкм	9,7	21,6	5,8	8,7	5,4	8,7	5,6	15,0
W_a , мкм	7,9	14,9	5,3	7,7	6,0	6,8	4,6	11,8
W_z , мкм	39,5	84,7	16,7	26,1	23,7	31,8	19,6	53,9
WSm , мкм	648	1350	2630	—	—	1576	1744	2474

Примечание. P_q, R_q, W_q — среднеквадратические отклонения, P_a, R_a, W_a — средние арифметические отклонения, P_z, R_z, W_z — максимальные высоты профиля по 10 точкам в пределах базовой длины, PSm, RSm, WSm — средние значения ширины элементов профиля.

Note. P_q, R_q, W_q are standard deviations, P_a, R_a, W_a are arithmetic mean deviations, P_z, R_z, W_z are maximum profile heights at 10 points within the base length, PSm, RSm, WSm are average widths of profile elements.

поверхности согласно ГОСТ Р ИСО 4287-2014 [10]. В профилометре имеются фильтры, которые выделяют из исходного профиля длинноволновые (волнистость) и коротковолновые (шероховатость) компоненты согласно стандарту ISO 11562 [11]. На табло выводятся параметры исходного профиля (P_q, P_a, P_z, PSm), профилей шероховатости (R_q, R_a, R_z, RSm) и волнистости (W_q, W_a, W_z, WSm).

Параметры поверхности образцов приведены в табл. 1.

Индикатрисы рассеяния исследовались на автоматизированной гониофотометрической установке, разработанной в АО «НИИ ОЭП» [6]. На рис. 6 приведена схема установки. Она включает приводы поворота образца и фотоприемного устройства (ФПУ), источники излучения, средства регистрации и управления на базе портативного компьютера.

С помощью сменных держателей реализуются углы падения излучения φ на образцы, соответствующие 0, 15, 30, 45 и 60°.

Автоматизированные приводы обеспечивают погрешность задания углов наблюдения не более 5'. Установка укомплектована тремя одномодовыми лазерами: LCM-T-111 с мощностью излучения $P = 20$ мВт на $\lambda = 0,532$ мкм, LCM-T-112 с $P = 100$ мВт на $\lambda = 1,064$ мкм, LCD-3A с $P = 2$ Вт и $\lambda = 10,6$ мкм.

Время измерения трехмерной зависимости с шагом 5° диффузных образцов не превышает 10 мин. Программное обеспечение позволяет выбирать отдельные участки индикатрисы и прописать их с нужной детализацией. Результаты могут представляться в виде угловых зависимостей коэффициента яркости $\beta(\alpha, \psi; \varphi, \theta)$ или двунаправленного коэффициента отражения $\mu(\alpha, \psi; \varphi, \theta)$.

Измерения выполнялись в плоскости, проходящей через ось падающего пучка и направление ZO. Углы α и φ равны 0.

В качестве меры сравнения на длинах волн 0,532 и 1,064 мкм применяется пластинка из стекла MC20 со шлифованной рабочей

поверхностью. За счет этого исключается зеркальный блик от полированной поверхности. Коэффициенты яркости такого рассеивателя при углах падения и наблюдения до 45° составляют 0,97 на $\lambda = 0,532$ мкм и 0,9 на $\lambda = 1,064$ мкм [12]. На рис. 7 представлены ее индикатрисы рассеяния $N(\psi; \theta)$ на двух длинах волн при угле падения излучения 15° .

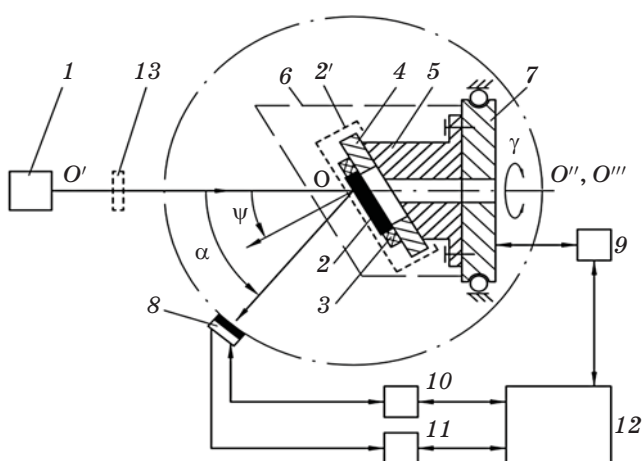


Рис. 6. Схема гониофотометрической установки. 1 — лазер, 2 — исследуемый образец, (3–7) — поворотная оправа, 8 — ФПУ, 9 — контроллер поворота оправы, 10 — привод ФПУ, 11 — модуль аналого-цифрового преобразователя Е14-140, 12 — компьютер, 13 — ослабители

Fig. 6. Schematic diagram of goniophotometric installation. (1) Laser, (2) test sample, (3–7) rotating frame, (8) photodetector, (9) frame rotation controller, (10) photodetector drive, (11) analog-to-digital converter module E14-140, (12) computer, (13) filters-attenuators

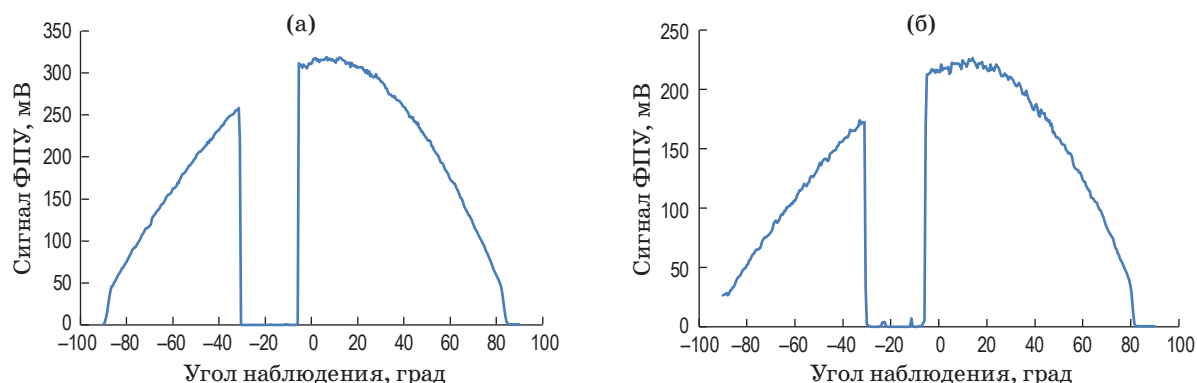


Рис. 7. Индикатрисы рассеяния шлифованной пластинки из стекла MC20 на $\lambda = 0,532$ мкм (а) и $\lambda = 1,064$ мкм (б)

Fig. 7. Scattering indicatrices of a ground MC20 glass plate at (a) $\lambda = 0.532$ μm and (б) $\lambda = 1.064$ μm

На длине волны 10,6 мкм в качестве образца сравнения применяются пластинки из алюминиевого сплава с шероховатой поверхностью. Коэффициенты их отражения и яркости на $\lambda = 10,6$ мкм лежат в пределах 0,5–0,7.

Эти или аналогичные зависимости образцов сравнения из алюминия являются нормирующими $N_0(\psi; \theta)$ при определении коэффициента яркости $\beta(\psi; \theta)$.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Изучение образцов ПКМ свидетельствует о том, что после формования их поверхности они имеют выраженный случайный или локально упорядоченный рельеф со значениями R_a в пределах 1,2–6,9 мкм. Это обстоятельство подтверждает то, что спектральные свойства таких образцов корректно характеризовать именно коэффициентами ПСО. Сравнение данных этих образцов с разной шероховатостью поверхностей не выявило заметного влияния на коэффициент $\rho_{2\pi}(\lambda)$.

В рамках работы получены зависимости $\rho_{2\pi}(\lambda)$ 8 образцов в диапазоне длин волн от 0,3 до 20 мкм. Они представлены на графиках рис. 8.

Большие значения $\rho_{2\pi}(\lambda)$ в видимой и ближней ИК областях спектра стеклопластиков РТМ-6, РТП-170, РТП-200 и СФП обусловлены малыми поглощением излучения связующей смолой и стекловолокном наполнителя.

Детальность данных по длине волны равна 10 нм, или 0,01 мкм. Относительная погрешность измерений не превышает 4% для

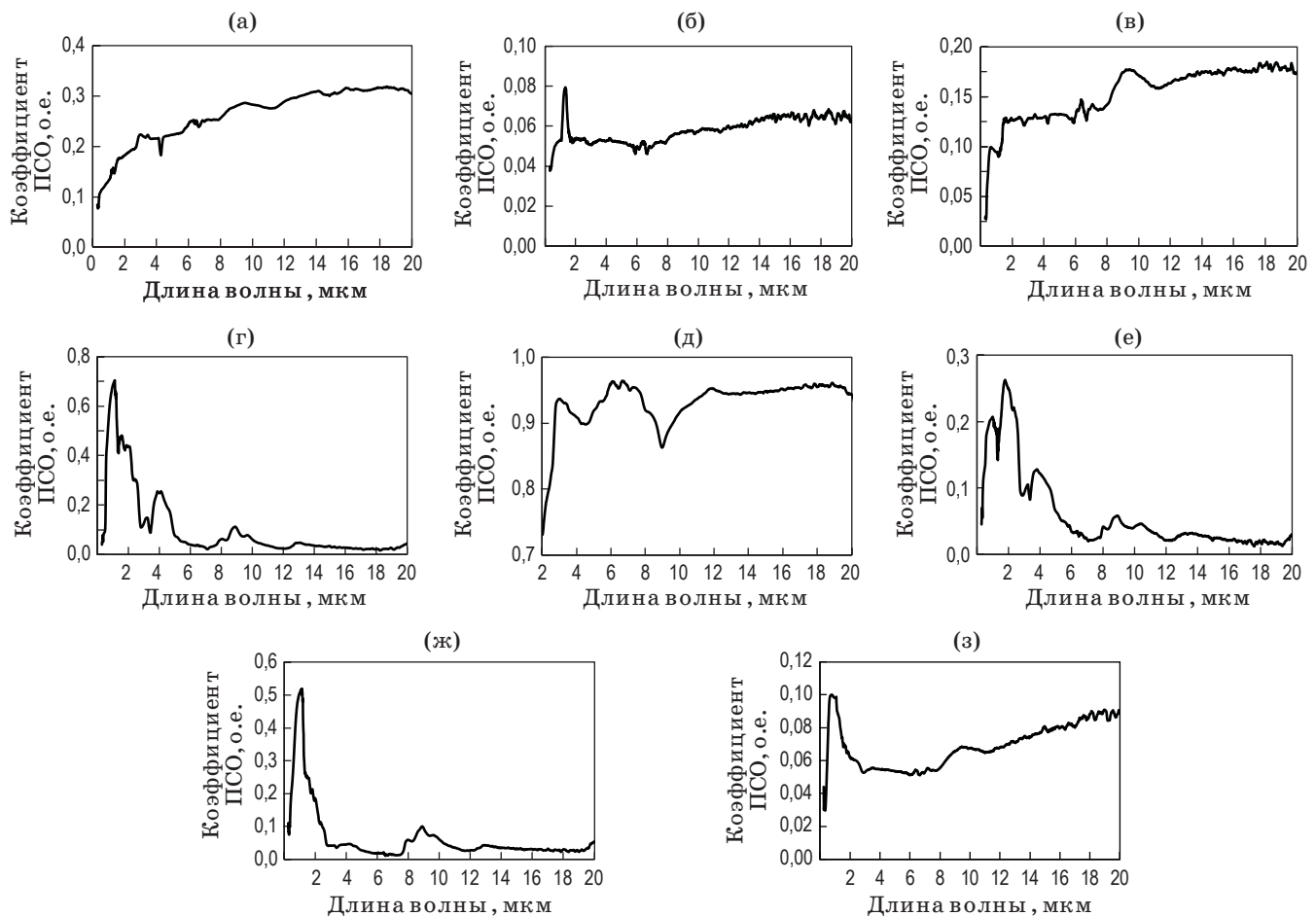


Рис. 8. Спектральные зависимости $\rho_{2\pi}(\lambda)$ композитных материалов 4КМС (а), П5-12 (б), П5-13Н (в), РТМ-6 (г), РТП-170 (д), РТП-200 (е), СФП (ж), ЗК1Ф3 (з)

Fig. 8. Hemispherical reflection coefficient spectral dependencies $\rho_{2\pi}(\lambda)$ of composite materials (а) 4КМС, (б) П5-12, (в) П5-13Н, (г) РТМ-6, (д) РТП-170, (е) РТП-200, (ж) СФП, (з) ЗК1Ф3

значений $\rho_{2\pi}(\lambda)$ больше 0,4 и 10% — для более низких значений.

Графики свидетельствуют о высоком коэффициенте отражения стеклопластиков в ближней ИК области спектра. Для них также характерен локальный подъем коэффициента отражения в окрестности $\lambda = 9$ мкм, обусловленный диоксидом кремния в стеклянном или кварцевом наполнителе.

Анализ индикатрис рассеяния показал, что в случае углепластиков наблюдается корреляция между размером шероховатости и шириной индикатрисы рассеяния. У стеклопластиков на длинах волн 0,532 мкм и 1,064 мкм такая взаимосвязь отсутствует. Для выявления причин этого поверхности ряда образцов были подвергнуты шлифованию абразивными порошками разного размера. В табл. 2 приве-

дены значения параметра R_a и ширины индикатрисы рассеяния на полувысоте γ до и после шлифования, а также их отношения γ/R_a .

Среднее значение отношений γ/R_a образцов ЗК1Ф3 (углепластик) и П5-12 (углефенольный пластик) составляет 10,8 град/мкм при углах падения пучка на образцы 15° .

На рис. 9 представлены индикатрисы рассеяния $N(\varphi, \psi)$ гладких образцов на $\lambda = 1,064$ мкм при угле падения излучения 15° , коэффициенты отражения $\rho_{2\pi}(\lambda)$ в этом случае равны 0,7 для РТМ-6, 0,75 для РТП-170 и 0,2 для РТП-200.

Графики указывают преобладание многократного рассеяния в толще стеклопластиков РТМ-6 и РТП-170. При росте внутреннего поглощения доля объемного рассеяния снижается (стеклопластик РТП-200). Это приводит

Таблица 2. Параметры поверхностей образцов до и после шлифования

Table 2. Surface parameters of samples before and after grinding

Параметр	ЗК1Ф3	П5-12	П5-13Н	РТМ-6	РТП-170	РТП-200
<i>До шлифования</i>						
R_a , мкм	4,1	1,2	3,1	3,9	3,6	2,9
γ , град	35	15	55	130	125	90
γ/R_a , град/мкм	8,6	12,5	17,7	33	34,7	31
<i>После шлифования</i>						
R_a , мкм	1,3	0,5	0,5	0,6	0,5	0,2
γ , град	12	6,5	40	130	115	85
γ/R_a , град/мкм	9,2	13	80	217	230	425

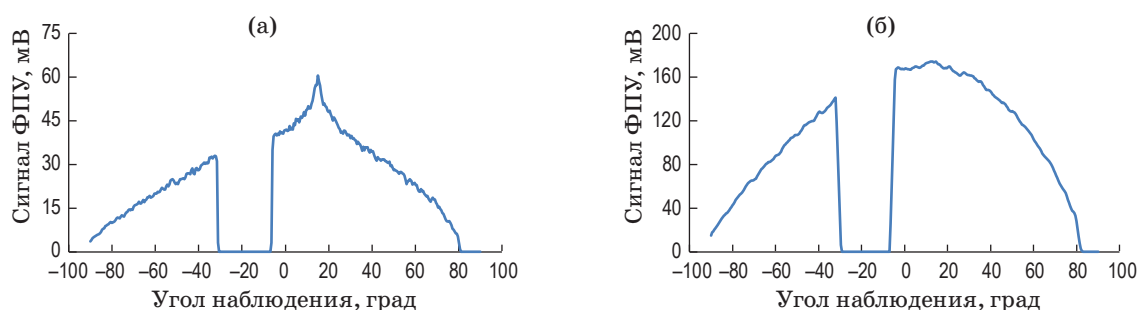


Рис. 9. Индикатрисы рассеяния ПКМ РТП-200 (а) и РТМ-6 (б) на длине волны 1,064 мкм

Fig. 9. Scattering indicatrices of composite materials (a) РТП-200 и (б) РТМ-6 at a wavelength of 1.064 μm

к уменьшению коэффициента отражения $\rho_{2\pi}(\lambda)$ и относительному увеличению доли рассеяния на шероховатой поверхности образца.

У образца из углефенольного пластика П5-12 определяющим является рассеяние на поверхности раздела. Коэффициент ПСО на длине волны 1,064 мкм составляет $\rho_{2\pi}(\lambda) = 0,05$. Это является следствием электрической проводимости углерода, комплексного показателя преломления материала и большого внутреннего поглощения образцов. Аналогичные результаты получены и для других материалов с углеродным наполнителем.

Экспериментальные зависимости $\rho_{2\pi}(\lambda)$ позволяют определить спектральную характеристику коэффициентов теплового излучения $\varepsilon(\lambda)$ согласно известным следствиям закона теплового излучения Кирхгофа. При падении излучения на поверхность какого-либо материала [8] имеет место тождество

$$\rho(\lambda) + \tau(\lambda) + \alpha(\lambda) = 1, \quad (2)$$

где $\tau(\lambda)$ — коэффициент пропускания, $\alpha(\lambda)$ — коэффициент поглощения.

В условиях термодинамического равновесия с окружающей средой в случае непрозрачного образца $\tau(\lambda) = 0$, коэффициент теплового излучения $\varepsilon(\lambda)$ равен коэффициенту поглощения $\alpha(\lambda)$. Искомая зависимость $\varepsilon(\lambda)$ находится по формуле

$$\varepsilon(\lambda) = 1 - \rho_{2\pi}(\lambda). \quad (3)$$

На рис. 10 приведены графики зависимостей $\varepsilon(\lambda)$ образцов из стеклопластика РТМ-6 и углепластика 4КМС.

Нужно отметить, что согласно правилу обратимости [13, 14], связывающему коэффициенты яркости при направленном освещении в прямом (ψ, α) и обратном ходе (θ, φ), следует, что коэффициент яркости при освещении из полусферы равен коэффициенту ПСО при направленном освещении

$$\beta(2\pi; \theta, \varphi) = \rho_{2\pi}(\psi = \theta, \alpha = \varphi; 2\pi). \quad (4)$$

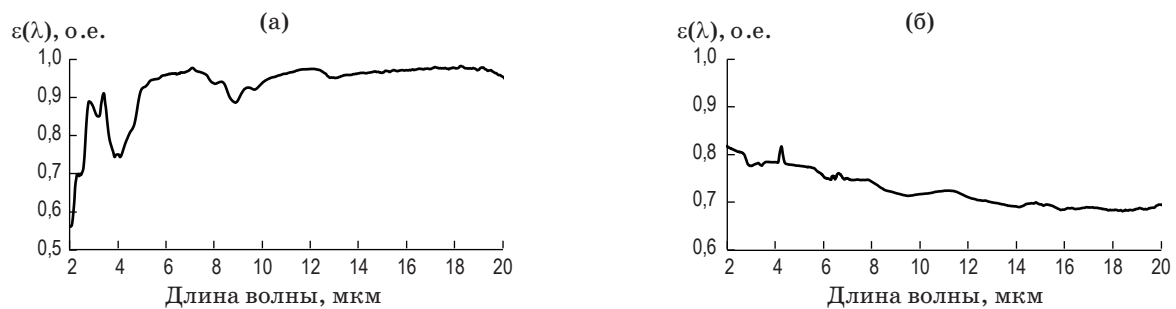


Рис. 10. Спектральные зависимости коэффициента теплового излучения $\varepsilon(\lambda)$ стеклопластика РТМ-6 (а) и углепластика 4КМС (б)

Fig. 10. Spectral dependences of thermal emissivity coefficient $\varepsilon(\lambda)$ of (a) fiberglass plastic PTM-6 and (b) carbon-filled plastic 4KMC

Выражение (4) служит обоснованием корректности определения $\beta(\lambda)$ по результатам измерений $\rho_{2\pi}(\lambda)$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерены спектральные зависимости коэффициентов полусферического отражения типовых композитных материалов в диапазоне длин волн от 0,3 до 20 мкм с шагом 0,01 мкм. По ним определяются спектральные зависимости коэффициентов яркости и коэффициентов излучения, необходимые для выполнения энергетических и тепловых расчетов, а также для моделирования объектов и фонов при создании оптико-электронных приборов.

Параллельно изучены свойства поверхностей исследуемых материалов и определены статистические показатели рельефа. Измерения показали, что соответствующие значения R_a лежат в диапазоне 1,2–6,9 мкм.

У стеклопластиков выявлено многократное объемное рассеяние в видимом и ИК диапазонах спектра до длин волн 3–5 мкм, что является новым результатом. Интенсивность объемного рассеяния превышает рассеяние на поверхности этих материалов. В области больших длин волн из-за поглощения в материалах преобладает однократное рассеяние на поверхности.

Для углеродных материалов определяющим является рассеяние на поверхности. Ширина индикатрис рассеяния хорошо коррелирует с шероховатостью поверхности. До настоящего времени экспериментальные данные по рассеянию излучения на материалах с углеродным наполнителем отсутствовали.

Полученные в работе результаты найдут применение для математического моделирования и теплофизических расчетов устройств, включающих детали из композитных материалов, в космической технике и оптико-электронном приборостроении.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кузнецов С.И., Петров А.Л., Паршиков А.Ю. Отражательная способность углеграфитовых композиционных материалов и углеродных тканей // Известия Самарского НЦ РАН. 2002. Т. 4. № 1. С. 31–37.
2. Мирончик В. В., Столер Д. В., Борботко Т.В. Анализ оптических свойств композитных материалов на основе диоксида титана, шунгита и таурита // 48-я Научная конф. аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. 2012. С. 46–47.
3. Бойправ О.В., Столер Д.В., Борботко Т.В. и др. Влияние микрорельефа поверхности композитных материалов на их оптические свойства // Доклады БГУИР. 2013. № 4(74). С. 16–21.
4. Колаша С.С., Фёдорцев Р.В., Старовойтов А.В. Влияние деталей из углепластика на светорассеяние в объективе оптико-электронного модуля кос-

REFERENCES

1. Kuznetsov S.I., Petrov A.L., Parshikov A.Yu. Reflectivity of carbon composite materials [in Russian] // News of Samara Scientific Centre RAS. 2002. V. 4. № 1. P. 31–37.
2. Mironchik B.V., Stoler D.V., Borbotko T.V. Analysis of optical properties of composite materials based on titanium dioxide, shungite and taurite [in Russian] // 48th Scientific Conf. Postgraduates, Undergraduates and Students of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. 2012. P. 46–47.
3. Boiprav O.V., Stoler D.V., Borbotko T.V., Kazeka A.A. Influence of the micro-relief of the surface of composite materials on their optical properties [in Russian] // Reports of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. 2013. № 4(74). P. 16–21.

- мического аппарата // Приборы и методы измерений. 2016. Т. 7. № 2. С. 176–185. <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2016-7-2-176-185>
5. Reyes J.A., Hoffmann R.C., Engelhart D.P., et al. Spectroscopic behavior of composite, black thermal paint, solar cell, and multilayered insulation materials in a GEO simulated environment // First Int'l. Orbital Debris Conf. 2019. P. 6184.
6. Сидоровский Н.В. Устройство для измерения пространственной индикатрисы рассеяния излучения // Патент РФ № RU 2726036. Бюл. 2020. № 19.
7. ГОСТ 8.654-2016. Межгосударственный стандарт. Государственная система обеспечения единства измерений. Фотометрия. Термины и определения. Введ. 01.07.2017. М.: Стандартиформ, 2019. 18 с.
8. Гуревич М.М. Фотометрия (теория, методы и приборы). Л.: Энергоиздат, 1983. 272 с.
9. Каталог светорассеивающих стекол. Л.: ГОИ им. С.И. Вавилова, 1975. 58 с.
10. ГОСТ Р ИСО 4287-2014. Национальный стандарт Российской Федерации. Геометрические характеристики изделий Структура поверхности Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности. Введ. 01.01.2016. М.: Стандартиформ, 2019. 23 с.
11. ГОСТ Р ИСО 16610-21-2015. Геометрические характеристики изделий (ГХИ). Введ. 22.09.2015. М.: Стандартиформ, 2019. 28 с.
12. Сакия А.С., Сидоровский Н.В., Старченко А.Н. Применение метода сравнения при натурных исследованиях оптических характеристик объектов // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 3. С. 39–43.
13. Топоретц А.С. Оптика шероховатой поверхности. Л.: Машиностроение, 1988. 192 с.
14. Шуба Ю.А., Сидоровский Н.В. Индикатрисы отражения как базовые характеристики оптических свойств материала // Оптический журнал. 1998. Т. 65. № 9. С. 49–53.
4. Kolasha S.S., Fiodortcev R.V., Starovoitov A.V. Carbonfibre-reinforced polymer parts effect on spacecraft optoelectronic module lens scattering [in Russian] // Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements]. 2016. V. 7. № 2, P. 176–185. <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2016-7-2-176-185>
5. Reyes J.A., Hoffmann R.C., Engelhart D.P., et al. Spectroscopic behavior of composite, black thermal paint, solar cell, and multilayered insulation materials in a GEO simulated environment // First Int'l. Orbital Debris Conf. 2019. P. 6184.
6. Sidorovskiy N.V. Device for measuring spatial indicatrix of radiation scattering // RF Patent. № RU 2726036. Bull. 2020. № 19.
7. GOST (Russian National Standard) 8.654-2016. State system for ensuring the uniformity of measurements. Photometry. Terms and definitions [in Russian]. Introd. 07/01/2017. Moscow: "Standards" Publ., 2019. 18 p.
8. Gurevich M.M. Photometry (theory, methods and devices) [in Russian]. Leningrad: "Energoizdat" Pbl., 1983. 272 p.
9. Catalogue of light-scattering glasses. Leningrad: Vavilov State Optical Institute, 1975. 58 p.
10. GOST (Russian National Standard) R ISO 4287-2014 Geometrical Product Specifications (GPS). Surface texture. Profile method. Terms, definitions and surface texture parameters [in Russian]. Introd. 01/01/2016. Moscow: "Standards" Publ., 2019. 23 p.
11. GOST (Russian National Standard) R ISO 16610-21-2015 (ISO 16610-21:2011). Geometrical product specifications (GPS) [in Russian]. Introd. 09/22/2015. Moscow: "Standards" Publ., 2019. 28 p.
12. Sakyan A.S., Sidorovskiy N.V., Starchenko A.N. Using a comparison method in field studies of the optical characteristics of objects // J. Opt. Technol. 2010. V. 77. № 3. P. 184–187. <http://dx.doi.org/10.1364/JOT.77.000184>
13. Toporets A.S. Optics of rough surface [in Russian]. Leningrad: "Mashinostroenie" Publ., 1988. 192 p.
14. Shuba Y.A., Sidorovskiy N.V. Reflectance indicatrices as basic characteristics of optical properties of a material // J. Opt. Technol. 1998. V. 65. № 9.

АВТОРЫ

Вячеслав Викторович Пронин — начальник стенда, Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор Ленинградской обл., 188540, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-1113-7486>; wwp-niiki@rambler.ru

Сергей Максимович Сагалаев — инженер, Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор Ленинградской обл., 188540, Россия; <https://orcid.org/0009-0006-2190-3657>; MaeshiSud@yandex.ru

Алексей Николаевич Старченко — кандидат технических наук, начальник отдела, Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор Ленинградской обл., 188540, Россия; <https://orcid.org/0009-0003-5129-5515>; anstar2000@mail.ru

AUTHORS

Viacheslav V. Pronin — Stand Supervisor, Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, Leningrad region, 188540, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-1113-7486>; wwp-niiki@rambler.ru

Sergey M. Sagalaev — Engineer, Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, Leningrad region, 188540, Russia; <https://orcid.org/0009-0006-2190-3657>; MaeshiSud@yandex.ru

Alexey N. Starchenko — PhD (Engineering), Head of Department, Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, Leningrad region, 188540, Russia; <https://orcid.org/0009-0003-5129-5515>; anstar2000@mail.ru

Статья поступила в редакцию 18.03.2024

Одобрена после рецензирования 10.06.2024

Принята к печати 29.07.2024

The article was submitted to the editorial office 18.03.2024

Approved after review 10.06.2024

Accepted for publication 27.07.2024