



УДК 677.016.413.6

РАЗРАБОТКА КОЛОРИМЕТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА С RGB-ЭЛЕМЕНТОМ И ДВУХПОЛОСТНОЙ ОПТОЭЛЕКТРОННОЙ ИНТЕГРИРУЮЩЕЙ СФЕРОЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДИФФУЗНО ОТРАЖАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ

DEVELOPMENT OF THE COLORIMETRIC SENSOR WITH AN RGB ELEMENT AND A BICAMERAL OPTOELECTRONIC INTEGRATING SPHERE TO CONTROL THE DIFFUSELY REFLECTING OBJECTS

Е.Е. Майоров¹⁾, А.С. Машек²⁾, Г.А. Цыганкова²⁾, Г.Г. Хайдаров³⁾, А.Г. Хайдаров³⁾,
В.К. Абрамян⁴⁾, Ю.Е. Зайцев⁵⁾
E.E. Maiorov¹⁾, A.S. Mashek²⁾, G.A. Tsygankova²⁾, A.G. Khaidarov³⁾, G.G. Khaidarov³⁾,
V.K. Abramian⁴⁾, Y.E. Zaitsev⁵⁾

¹⁾Санкт-Петербургский университет технологий управления и экономики, 190103, г. Санкт-Петербург, Лермонтовский пр-т, д. 44, Лит. А., e-mail: majorov_ee@mail.ru

²⁾Военно-морской политехнический институт, 196604, г. Пушкин, Кадетский б-р, д. 1

³⁾Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), 190013, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, д. 26

⁴⁾Военная академия связи им. С.М. Буденного, 194064, г. Санкт-Петербург, К-64, Тихорецкий проспект, д.3

⁵⁾Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, д. 5

¹⁾Saint-Petersburg university of management technologies and economics, Lermontovsky Ave., 44, Lit. A. Saint-Petersburg, 190103, Russia, e-mail: majorov_ee@mail.ru

²⁾Naval polytechnical institute, Kadetskiy b-r, 1, Pushkin, 196604, Russia

³⁾Saint-Petersburg state technological institute (technical university), Moscow Ave., 26, Saint-Petersburg, 190013, Russia

⁴⁾Military academy of telecommunications named. S. M. Budyonny, Tikhoretskiy Ave., 3, Saint-Petersburg, 194064, Russia

⁵⁾Saint Petersburg state electrotechnical university "LETI" them. V. I. Ulyanov (Lenin), Professor Popov st, 5, Saint-Petersburg, 197376, Russia

Аннотация

В настоящей работе представлен колориметрический датчик с RGB-элементом и двухполостной оптоэлектронной интегральной сферой. Проанализированы двухполостные оптоэлектронные интегральные сферы в двух конфигурациях и определены распределения освещенности на верхних и нижних частях интегральных сфер. Также показана эффективность светоотдачи излучателя при исключении попадания света от него на контролируемые диффузно отражающие объекты. Получены спектры отражения образцов для разной толщины.

Abstract

The present work a colorimetric sensor with an RGB element and a bicameral optoelectronic integrated sphere is described. A bicameral optoelectronic integrated sphere in two configurations and determined the luminance distribution on the top and bottom parts of the integrated spheres are analyzed. The light extraction efficiency of the radiator with the exclusion of light falling from it on controlled diffusely reflecting objects is showed. The reflection spectra of samples with different thicknesses are obtained.

Ключевые слова: колориметрический датчик; интегральная сфера; диффузно отражающий объект; светодиод; фотодиод; метод Монте-Карло; нанокompозит; оптическое волокно.

Keywords: colorimetric sensor; integral sphere; a diffuse reflective object; led; photodiode; Monte-Carlo's method; nanocomposite; optical fiber.



Введение

В настоящее время огромный интерес представляют колориметрические системы, приборы и датчики для различных областей науки и техники, таких как химия и химические производства, целлюлозно-бумажная промышленность, пищевые технологии и производства, экология, медицина и биология. Большинство используемых в современной практике колориметрических методов и средств основываются на измерениях оптических спектров пропускания или (и) отражения в области длин волн $\lambda=380-760$ нм и расчете на основе спектральных данных координат цвета объекта в интересующей колориметрической системе. Включение в состав колориметров спектрофотометрических датчиков усложняет их конструкцию и необходимое регламентное техническое обслуживание, увеличивает массогабаритные характеристики прибора или системы, а также приводит к возрастанию общей стоимости изделия [1, 2], которая зачастую становится недоступной отечественному пользователю. Современные колориметрические датчики, удовлетворяющие требованиям международной комиссии по освещению (МКО), как правило, используют интегрирующую фотометрическую сферу, где излучатель и фотодетектор расположены за пределами ее полости. В целом применение такой сферы в спектроколориметрических приборах приводит как к усложнению конструкции, так и возрастанию их общей стоимости.

Поэтому может представлять интерес разработка колориметрического датчика, используются технологически освоенные, в последние годы, оптоэлектронные элементы (главным образом фотодетекторы и светодиодные излучатели), которые по своим техническим характеристикам могут обеспечить измерения параметров цвета различных объектов. Значимыми для колориметрии являются трехэлементные RGB-фотодиоды, имеющие три фотоприёмных площадки с оптическими фильтрами для выделения красной, зеленой и синей составляющей в регистрируемом излучении. Важным вопросом для колориметрических датчиков с RGB-элементом (RGB-фотодиод) является распределение освещенности внутри оптоэлектронной сферы. Если для интегрирующей сферы канонической геометрии конфигурационные факторы, определяющие обмен излучением между зонами сферы известны, то для двухполостной оптоэлектронной интегрирующей сферы (ДОИС), имеющих внутренний экран, соответствующие конфигурационные факторы в данной работе определены впервые. Поэтому разработка и исследования колориметрического датчика с RGB-элементом и (ДОИС) для контроля диффузно отражающих объектов (ДОО) является актуальной.

Двухполостная интегрирующая сфера

ДОИС представляет особый интерес, так как позволяет одновременно получить данные по диффузному отражению и пропусканию исследуемого объекта. В данной работе проведен расчет распределения освещенности для ДОИС в двух конфигурациях схематически изображенных на рис. 1.

В первой конфигурации (рис.1, а.) использовался внешний осветитель, во второй (рис. 1,б) осветителем являлся светодиод, расположенный в полости сферы. В обеих конструкциях коллекторы на основе оптического волокна передавали отраженное и прошедшее излучение в электронную систему сбора и обработки данных. В первой конфигурации (рис.1, а) оба коллектора располагались горизонтально и были закрыты диафрагмами. Во второй конфигурации (рис.1, б) только один из коллекторов был закрыт диафрагмой, другой – располагался вертикально. Экран в этой же конфигурации, расположенный в полости верхней сферы, блокировал прямое попадание света на образец.

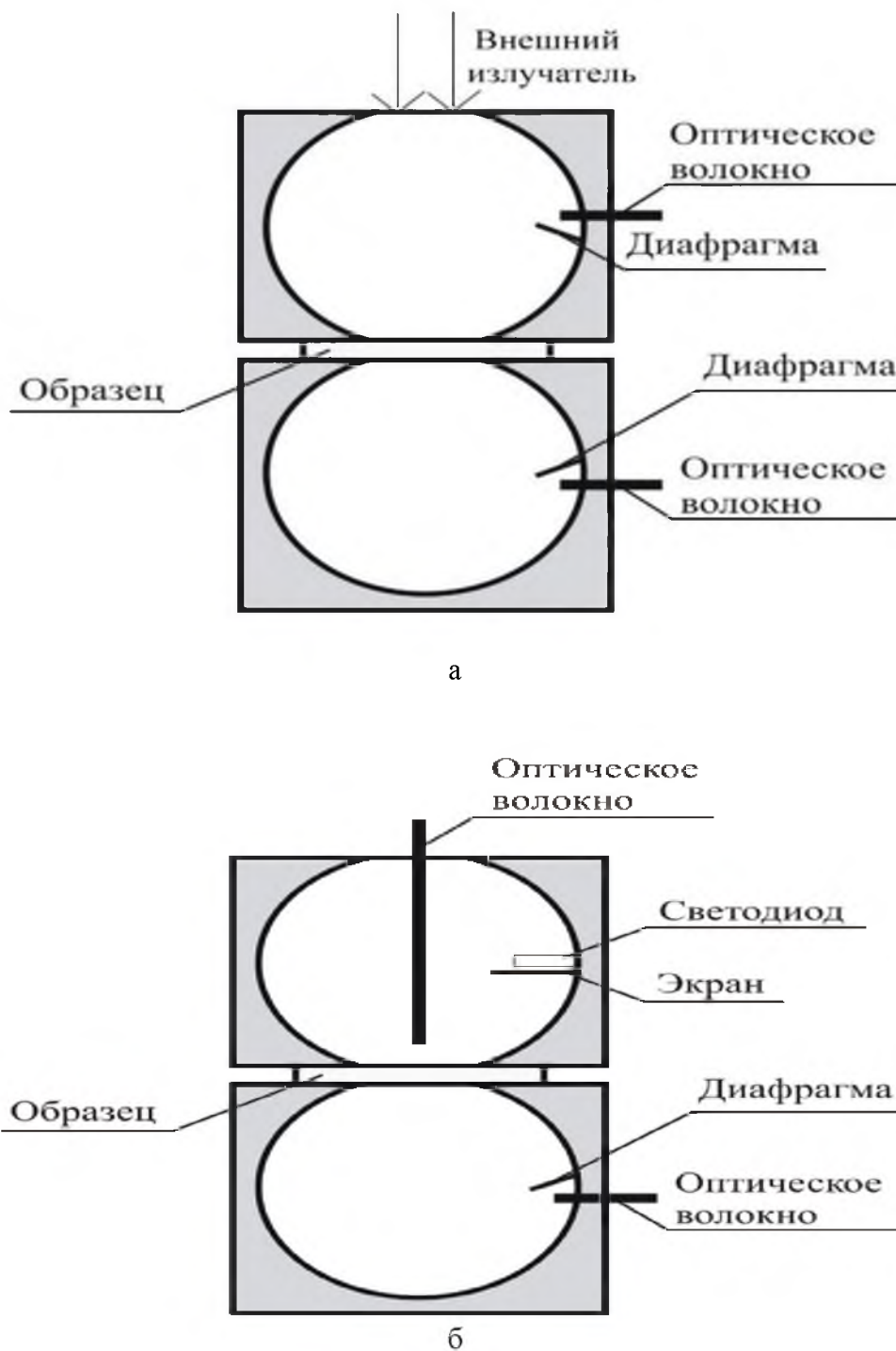


Рис.1. Конструкция ДОИС: а – без экрана, б – с экраном
 Fig.1. Design DOIS: a – without screen b– with screen

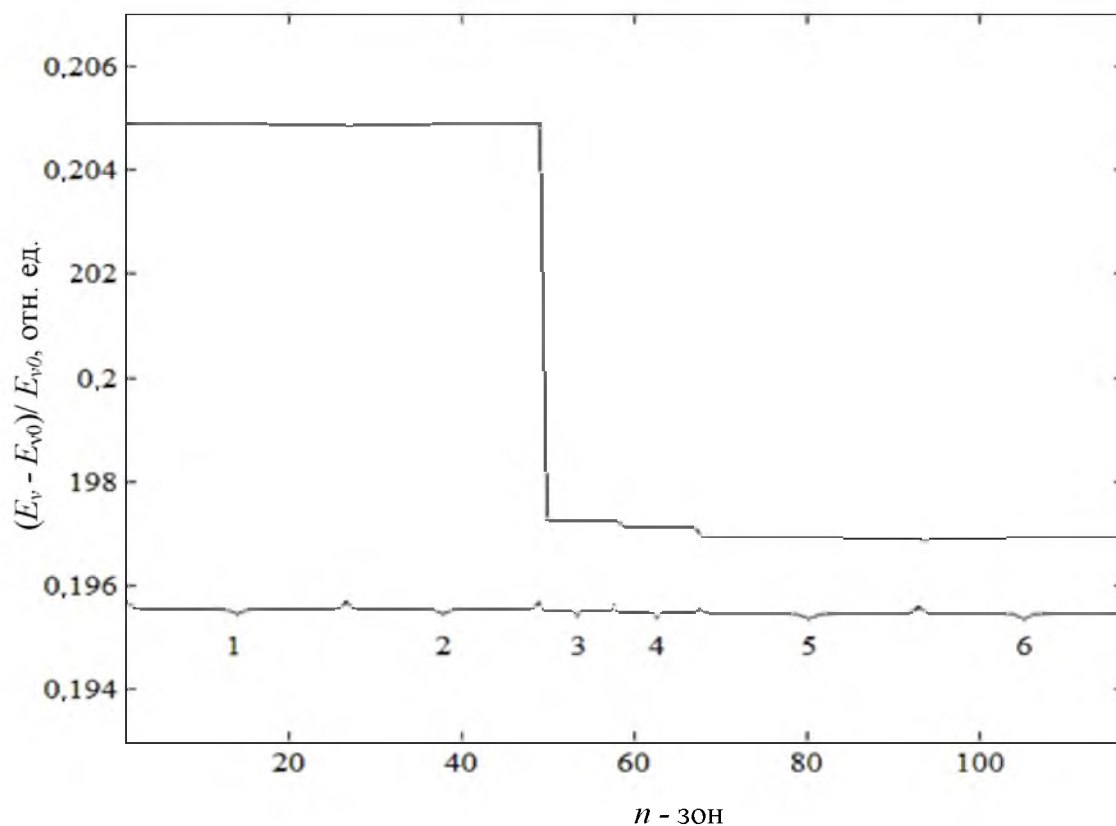
Интегрирующие сферы имели сходные оптико-геометрические характеристики: диаметр полостей 70 мм, диаметры входного (первая конфигурация) и выходных портов – 8 мм, размеры экрана (вторая конфигурация) – 7,5x12,5 мм, коэффициент отражения внутренней поверхности сфер и экрана – 97 %. Измерения спектров отражения $R(\lambda)$ и пропускания $T(\lambda)$ исследуемых объектов посредством ДОИС предполагали установку об-

разца между обеими интегрирующими сферами. Каналы отражения и пропускания могли также быть разделены и использоваться независимо.

Распределение освещенности внутри ДООС, а также на поверхности образца рассчитывалось также матричным методом [2, 3]. На внутренней поверхности сферы, на поверхностях экрана и образца выделялись кольцевые зоны. Обмен излучением между элементами зон определялся конфигурационными факторами, которые задавали направление на соответствующие элементы зон. Поверхности, участвующие в обмене излучением, были разделены на верхнюю и нижнюю поверхности образца, верхнюю и нижнюю части первой и второй сфер, верхнюю и нижнюю поверхности экрана. Если обмена излучением между зонами не происходило, то соответствующие зонам конфигурационные факторы приравнивались нулю. Расчет распределения освещенности проводился с помощью программы IAD (Inverse adding-doubling) [4]. Результаты расчетов показаны на рис. 2.

Расчеты показали, что наибольшую неравномерность освещенности имела верхняя часть первой сферы во второй конфигурации ДООС. Освещенность нижней части первой сферы, поверхности образца, а также поверхность сферы во второй конфигурации оставалась практически равномерной.

На основании приведенных расчетных данных, можно сделать вывод, что экран не вносит неравномерности освещенности образца и, таким образом, не приводит к дополнительной фотометрической погрешности. Поэтому он может быть использован в конструкциях интегрирующей сферы для повышения эффективности светоотдачи излучателя при исключении прямого попадания света от излучателя на образец.



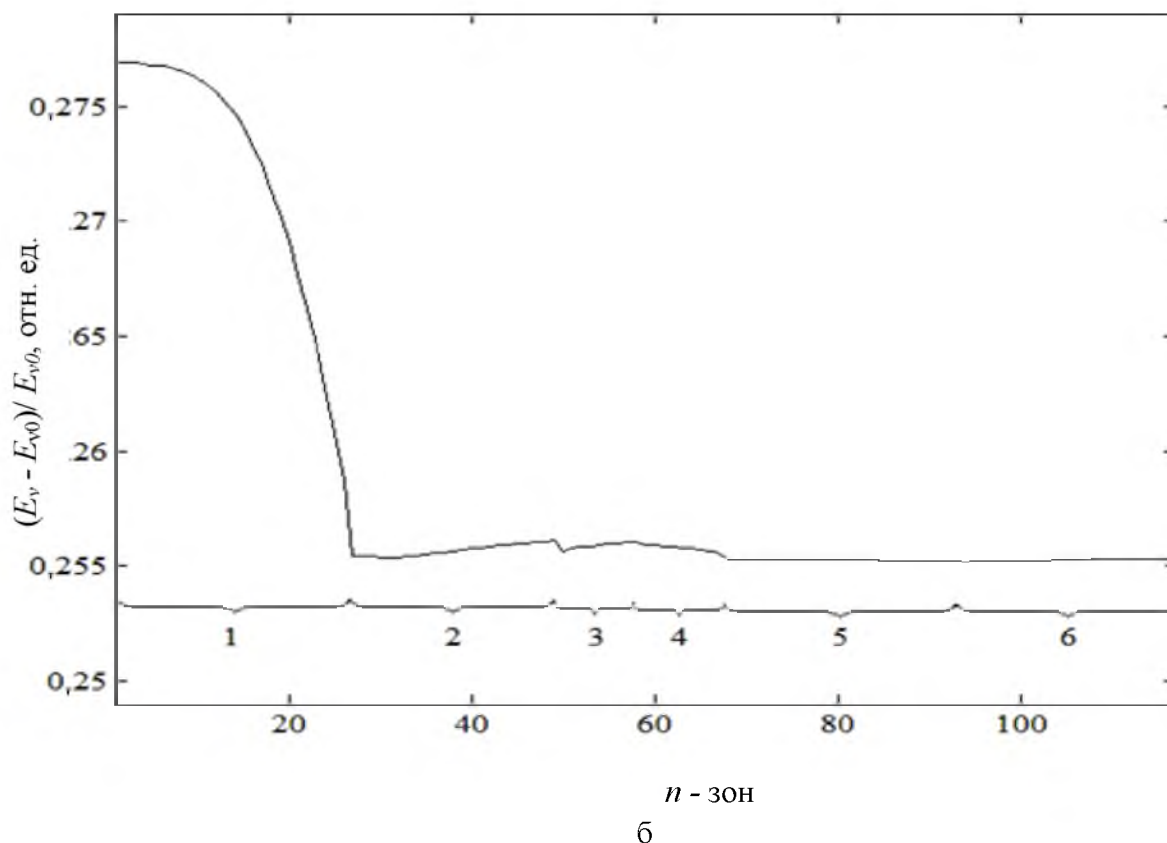


Рис. 2. Относительная разность освещенностей для ДОИС: а – без экрана, б – с экраном. 1 – верхней части первой сферы, 2 – нижней части первой сферы, 3 – верхней поверхности образца, 4 – нижней поверхности образца, 5 – верхней части второй сферы, 6 – нижней части второй сферы. (E_{v0} – начальная освещенность)

Fig. 2. The relative difference of illumination for DOIS : a – without screen b – with screen. 1 – the top of the first sphere, 2 – the bottom of the first sphere, 3 – top surface of the sample 4, the bottom surface of the sample, 5 – upper part of the second sphere, 6 – the bottom of the second sphere. (E_{v0} is the initial illuminance)

Колориметрический датчик с RGB-элементом и ДОИС для контроля ДОО

Данный датчик может представлять интерес при исследовании «опаковыми» объективами ДОО, которые характеризуются одновременно коэффициентами отражения, пропускания и рассеяния света.

В конструкции датчика использовалась ДОИС с экраном, схематически изображённая на рис. 1 а. Оптогеометрические размеры ДОИС были следующими: диаметр полости 70 мм, диаметры входного и выходного портов 8 мм, коэффициент отражения внутренней поверхности сфер $R=0,952$. В осветителе датчика использовался RGB-светодиод.

При использовании в излучателе RGB светодиода регистрируемое отраженное и проходящее излучение передавалось на трёхэлементный RGB-фотодиод. Внешний вид датчика и электронная плата приведены на рис. 3

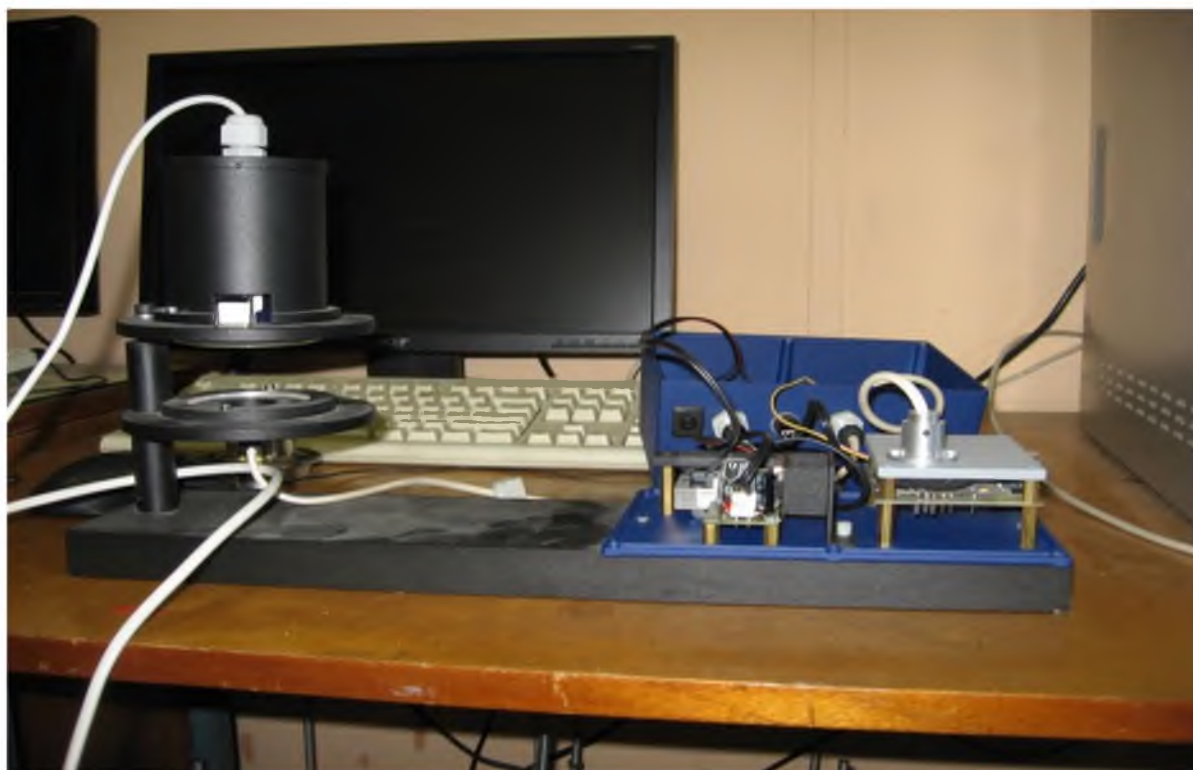


Рис. 3 Внешний вид и электронная плата датчика
Fig. 3 Appearance and electronic board of the sensor

На рис. 4. показана последовательность определения коэффициентов отражения и пропускания [5], которая предполагала:

- измерение уровня «0» отражения $R(0, 0, 0, 0)$;
- измерение уровня «100 %» отражения $R(r_{std}, r_{std}, 0, 0)$ (r_{std} – коэффициент отражения эталона – молочного матового стекла МС-20);
- измерение уровня «0» пропускания $T(0,0,0,0)$;
- измерение уровня «100 %» пропускания $T(0,0,1,1)$;
- измерение коэффициентов отражения $R(r_s^{direct}, r_s, t_s^{direct}, t_s)$ и коэффициентов пропускания $T(r_s^{direct}, r_s, t_s^{direct}, t_s)$.

Результирующие коэффициенты отражения и пропускания определялись по формулам:

$$R = r_{std} \cdot \frac{R(r_s^{direct}, r_s, t_s^{direct}, t_s) - R(0,0,0,0)}{R(r_{std}, r_{std}, 0,0) - R(0,0,0,0)},$$

$$T = \frac{T(r_s^{direct}, r_s, t_s^{direct}, t_s) - T(0,0,0,0)}{T(0,0,1,1) - T(0,0,0,0)}.$$

Определение оптических характеристик (коэффициент рассеяния, коэффициент поглощения, анизотропия) осуществлялось с помощью программы IAD (Inverse adding-doubling).

Работа программы основана на методе Монте-Карло [6]. При вычислениях начальные приближения оптических характеристик сравнивались с результатами вычислений этих характеристик по данным измерений R и T. Если они не совпадали, то предполагались новые приближения, и процесс повторялся. Если же они совпадали, то приближения принимались за действительные оптические характеристики объектов.



Представленный датчик с ДОИС был использован в «Первом Санкт-Петербургском государственном медицинском университете им. акад. И.П. Павлова» при исследовании реставрационных стоматологических материалов [7].

Были исследованы ДОО, такие как полимеризованные образцы нанокompозита Filtek Supreme XT прозрачных оттенков *YT, GT, VT, CT*. Образцы имели цилиндрическую форму, диаметр 17-20 мм, высоту 1,05-3,15 мм. При измерениях отражения использовались белая, черная и серая подложки.

На рис. 5 показаны спектры отражения образцов оттенков *YT*. Аналогичные результаты были получены для того же нанокompозита оттенков *A1B, A1E, B2B, B3B, B3D, B1E, B2E*.

В целом полученные результаты удовлетворяли требованиям практического использования.

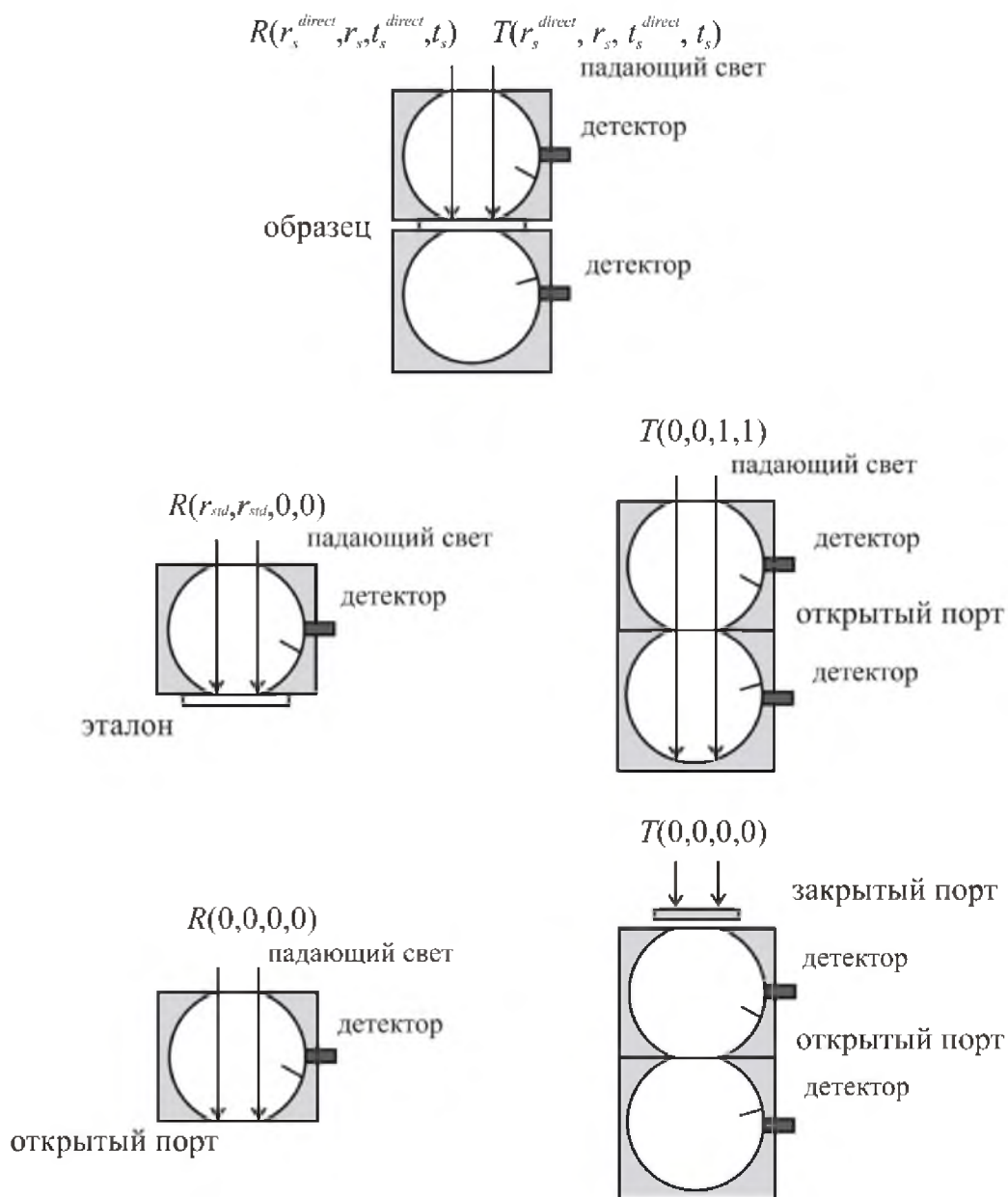


Рис.4. Последовательность определения коэффициентов отражения и пропускания
 Fig.4. The sequence of determining the coefficients of reflection and transmission

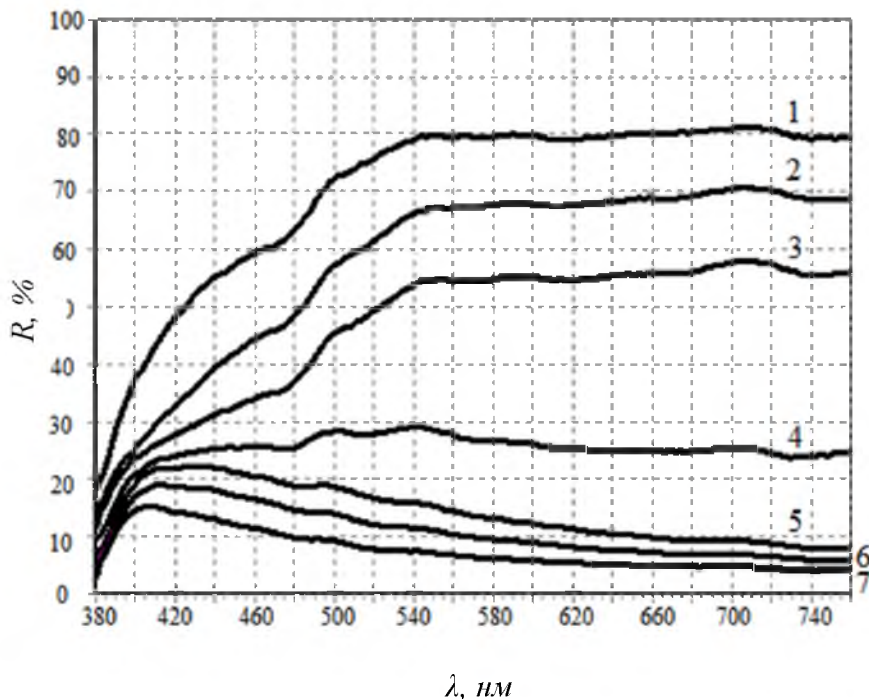


Рис. 5. Спектры отражения образцов реставрационного материала оттенка *YT*: 1 – образец толщиной 1,05 мм на белой подложке, 2 – образец толщиной 2,10 мм на белой подложке, 3 – образец толщиной 3,15 мм на белой подложке, 4 – образец толщиной 3,15 мм на серой подложке, 5 – образец толщиной 3,15 мм на черной подложке, 6 – образец толщиной 2,1 мм на черной подложке, 7 – образец толщиной 1,05 мм на черной подложке

Fig. 5. Reflection spectra of samples of restoration material shade *YT*: 1 – sample with a thickness of 1.05 mm on a white substrate, 2 – sample with a thickness of 2.10 mm high on a white substrate, 3 – sample with 3.15 mm thickness on a white substrate, 4 – sample with a thickness of 3.15 mm on the grey base, 5 – sample with a thickness of 3.15 mm on the black background, 6 – sample with a thickness of 2.1 mm on the black substrate, 7 – a sample with a thickness of 1.05 mm on the black background

Заключение

В представленной статье обоснована актуальность работы и её перспектива развития для различных областей науки и техники. Разработан колориметрический датчик с трехмерным RGB-фотодиодом и новой ДОИС. Проведен расчет распределения освещенности для ДОИС в двух конфигурациях, который показал, что наибольшую неравномерность освещенности имела верхняя часть первой сферы. Освещенность нижней части первой сферы, поверхности образца, а также поверхность сферы во второй конфигурации оставалась практически равномерной. Разработанный колориметрический датчик с RGB-элементом и ДОИС был использован для контроля полимеризованных образцов нанокompозита Filtek Supreme XT различных прозрачных оттенков. Полученные спектры отражения образцов *YT* для разных толщин имеют важное значение в медицине, в частности, стоматологии.

Список литературы References

1. Юстова Е.Н. 2000. Цветовые измерения (Колориметрия), СПб: Издательство СПбГУ, 397.
2. Майоров Е.Е. Белов Н.П., Грисимов В.Н., Смирнов Ю.Ю., Шерстобитова А.С., Яськов А.Д. 2011. Колориметрический датчик на основе трехэлементного RGB-фотодиода для определения параметров цвета диффузно отражающих объектов. *Materialy VII Miedzynarodowej naukow...*



praktycznej konferencji «Perspektywiczne opracowania sa nauka I techikami – 2011» Vol.50 Fizyka: Pizemysl, Nauka I studia : 64-66

3. Clare J. F. 1998. Comparison of four analytic methods for the calculation of irradiance in integrating spheres. *Optical Society of America*, 15(12): 3086-3096.

4. Prahl S. 2013. Inverse Radiative Transport Calculator [Electronic program]: on-line calculator. Oregon medical laser center. – Electronic data. – Mode of access: http://omlc.ogi.edu/calc/iad_calc.html/ (date of access: 15.09.2013).

5. Pickering J.W., Prahl S.A., N. van Wieringen, Beek J. F., Sterenborg H. J. C. M., M. J. C. van Gemert. 1993. A Double integrating sphere system for measuring the optical properties of tissue. *Appl. Opt.*, 32: 399-410.

6. Prokhorov A.V., Mekhontsev S.N., Hanssen L.M. 2003. Monte Carlo modeling of an integrating sphere reflectometer. *Appl. Opt.*, 42(19): 3832-3842.

7. Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т. 2014. Интерферометрия диффузно отражающих объектов. СПб.: Издат. НИУ ИТМО: 193.