

УДК 535.232.14

## МЕТОД АНАЛИЗА И РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК СПЕКТРАЛЬНОЙ ЯРКОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

О.В. БОЙПРАВ, Д.В. СТОЛЕР, Т.В. БОРБОТЬКО

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П.Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 15 мая 2012

Описан метод расчета и анализа спектральной яркости композиционных материалов, состоящих из компонентов, взятых в различных пропорциях, с известными оптическими свойствами.

*Ключевые слова:* диоксид титана, индикатриса рассеяния, композиционные материалы, коэффициент спектральной яркости, оптический диапазон длин волн, спектральный сигнал, шунгит.

### Введение

Композиционные материалы находят широкое применение в различных областях техники. Их свойства зависят от выбора исходных компонентов и технологии совмещения, призванной обеспечить прочную связь между компонентами при сохранении их первоначальных характеристик. В результате соединения армирующих элементов и матрицы формируется комплекс свойств композита, не только отражающий исходные характеристики его компонентов, но и включающий свойства, которыми изолированные компоненты не обладают. Таким образом, создание композиционных материалов с новым комплексом свойств для различных областей применения представляется весьма актуальной проблемой.

Одной из характеристик композиционных материалов являются спектрально-поляризационные свойства, которые обуславливают их взаимодействие с электромагнитным излучением оптического диапазона. При формировании композита с требуемыми спектральными характеристиками в целях снижения расхода материалов выбор соотношения исходных компонентов должен осуществляться теоретическим путем, что требует наличия определенных расчетных методов, отличающихся точностью, быстротой и простотой реализации.

Цель работы заключается в разработке метода вычисления спектральных характеристик композиционных материалов, формируемых на основе компонентов (полимерное связующее и мелкодисперсный наполнитель) с известными значениями спектральной яркости.

### Методика проведения эксперимента

В качестве компонентов для синтеза композиционных материалов с заданными оптическими свойствами были взяты прозрачный силикон, диоксид титана и шунгит. Диоксид титана представлял собой мелкодисперсный однородный порошок белого цвета с размером частиц 10 мкм. Шунгит был размолот в лабораторных условиях до порошкообразного состояния и размера фракций 10 мкм. Цвет шунгитового порошка – черный.

Исследование оптических свойств компонентов проводилось в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах длин волн – 370...2500 нм. Значения длин волн из указанного диапазона выбирались с шагом 2,2 нм.

Схема измерительной установки приведена на рис. 1 [1]. Установка включала в себя гониометр Г–5 (1), в который помещался исследуемый объект (5), спектрорадиометр ПСР-02 (2), персональный компьютер (3), поляризационную насадку (4), диафрагму (6), коллиматор (7), систему охлаждения (8), галогеновую лампу КГМ–250 (9), блок питания СНП-40 (10).

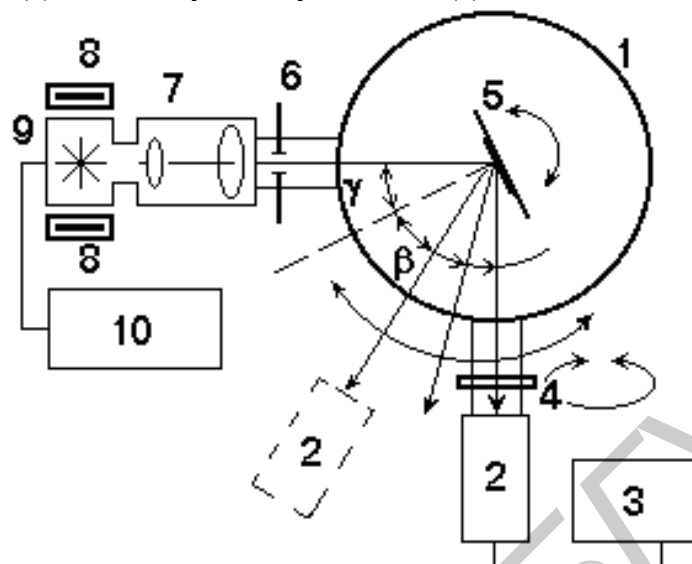


Рис. 1. Схема измерительной установки

Спектрорадиометр ПСР–02 позволял регистрировать спектральную плотность энергетической яркости (СПЭЯ) исследуемого образца, а при использовании поляризационной насадки – СПЭЯ при различных положениях оси поляроида. Галогеновая лампа КГМ–250 применялась в качестве источника света. Угол падения коллимированного пучка света на исследуемый объект составлял  $45^\circ$ , а углы наблюдения –  $45^\circ$  и  $65^\circ$ . Значения углов падения и наблюдения отсчитывались от нормали к плоскости исследуемого объекта. Полученные данные были применены для вычисления КСЯ.

КСЯ представляет собой величину, которая характеризует пространственное распределение спектральной яркости отражающей поверхности и равна отношению яркости данной поверхности в заданном направлении к яркости идеально рассеивающей поверхности с единичным коэффициентом отражения и освещенной так же, как и данная поверхность.

В качестве идеально рассеивающей поверхности использовалась пластина молочного стекла МС–20 толщиной 10 мм. Для данного материала были получены спектры отражения при условиях измерений, аналогичных условиям измерений для исследуемых образцов. На основании полученных результатов был произведен расчет КСЯ, согласно формуле

$$\rho(\lambda, \theta, \varphi) = \frac{R_{об}(\lambda, \theta, \varphi)}{R_{МС}(\lambda, \theta, \varphi)},$$

где  $R_{об}(\lambda, \theta, \varphi)$  и  $R_{МС}(\lambda, \theta, \varphi)$  – спектральные сигналы заданной длины волны, отраженные от исследуемого объекта и молочного стекла соответственно,  $\lambda$  – длина отраженной волны,  $\theta$  – угол падения света,  $\varphi$  – угол наблюдения отраженных сигналов.

### Результаты и их обсуждение

На основе результатов проведенных измерений получены зависимости КСЯ прозрачно-го силикона, диоксида титана и шунгита от длины падающей волны диапазона 370...2400 нм при углах наблюдения  $45^\circ$  и  $65^\circ$ . Графики этих зависимостей приведены на рис. 2–4 соответственно (кривые 1 соответствуют углу наблюдения  $45^\circ$ , кривые 2 – углу наблюдения  $65^\circ$ ).

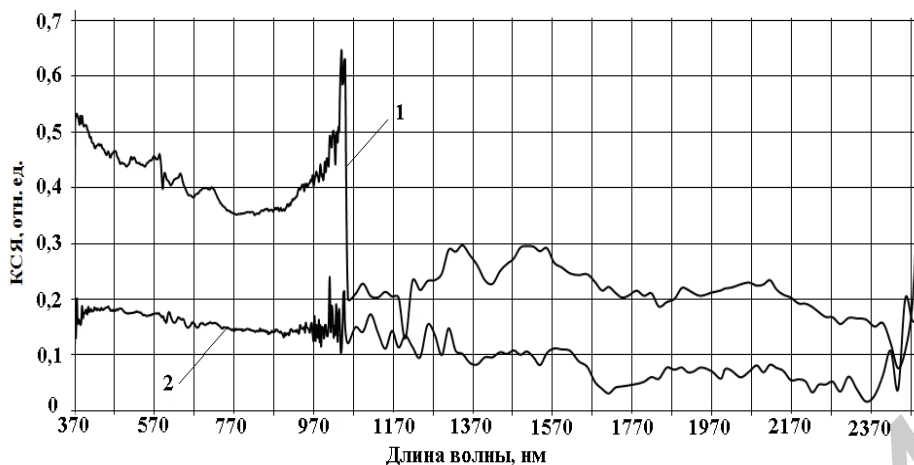


Рис. 2. Зависимость КСЯ прозрачного силикона от длины волны

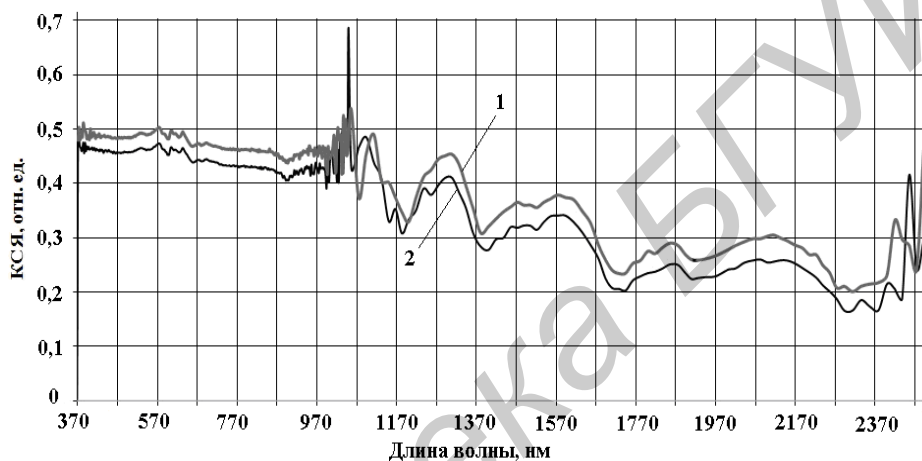


Рис. 3. Зависимость КСЯ диоксида титана от длины волны

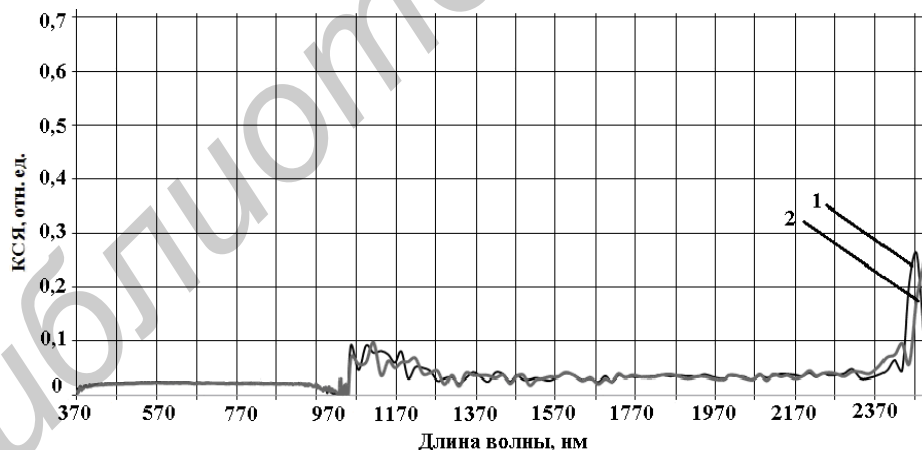


Рис. 4. Зависимость КСЯ шунгита от длины волны

В результате смешивания прозрачного силикона с порошкообразными диоксидом титана, шунгитом либо иным мелкодисперсным порошком должен получаться композиционный материал, значения КСЯ которого пропорциональны сумме КСЯ выбранных компонентов:

$$\rho_{\text{КМ}}(\lambda, \theta, \varphi) = K \cdot (\rho_{\text{С}}(\lambda, \theta, \varphi) + \rho_{\text{П}}(\lambda, \theta, \varphi)),$$

где  $\rho_{\text{С}}(\lambda, \theta, \varphi)$ ,  $\rho_{\text{П}}(\lambda, \theta, \varphi)$ ,  $\rho_{\text{КМ}}(\lambda, \theta, \varphi)$  – значения КСЯ связующего вещества, порошка и полученного в результате смешивания этих компонентов композиционного материала соответственно,  $K$  – коэффициент пропорциональности, определяемый физическими

характеристиками порошка и его объемным содержанием в синтезируемом композиционном материале,  $0 < K < 1$ .

Значение коэффициента  $K$  так же, как и КСЯ, для композиционного материала зависит от его состава, влажности, текстуры, структуры поверхности, а также цвета порошкообразного наполнителя. В частности, добавление в силикон порошка приводит к сокращению содержания в нем влаги, что обуславливает уменьшение показателя преломления (с  $n=1,4$  до  $n=1,2\dots1,3$ ) и увеличение показателя поглощения. Оба эффекта приводят к снижению КСЯ, а значит, и снижению коэффициента  $K$ .

Текстура материала характеризуется соотношением в нем частиц различных размеров. Увеличение содержания в материале частиц малых размеров приводит к уменьшению КСЯ, обусловленному увеличением многократного внутреннего рассеяния света. В рассматриваемом случае в силикон добавляется порошок с одинаковым размером частиц, следовательно, текстура синтезируемого композиционного материала является однородной [2].

Влияние микрорельефа поверхности материала на величину КСЯ обусловлено изменением площади, занимаемой тенями. Увеличение шероховатости поверхности силикона вследствие добавления в него порошка приводит к увеличению доли этой площади и, следовательно, к уменьшению КСЯ. Для оценки шероховатости поверхности применяются критерий Рэля [3]. Согласно этому критерию, поверхность считается гладкой, если

$$h \leq \frac{\lambda}{16 \cdot \cos \theta},$$

где  $h$  – высота шероховатости,  $\theta$  – угол падения света, составляющий в рамках рассматриваемого исследования  $45^\circ$ .

Следовательно, поверхность композиционных материалов, синтезируемых на основе порошков диоксида титана и шунгита с размером фракций 10 мкм, будет считаться шероховатой относительно  $\lambda \leq 113,1$  мкм. Диапазон длин волн, выбранный для проведения исследований, удовлетворяет указанному условию.

Кроме того, КСЯ зависит от угла наблюдения. Данная зависимость характеризуется индикатрисой рассеяния, на тип которой оказывает влияние шероховатость поверхности материала. Композиционным материалам, как правило, свойственна неортогруппная поверхность, т.е. их яркость определяется углом наблюдения. Индикатрисы неортогруппных типов отражающих поверхностей можно аппроксимировать комбинацией полусферы и эллипсоидов (рис. 5) [3].

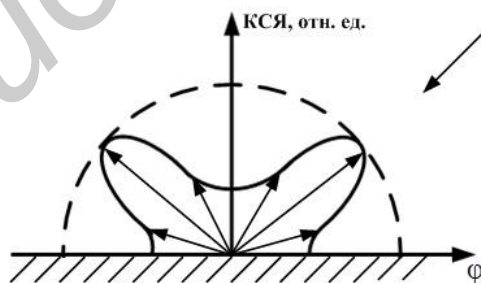


Рис. 5. Общий вид индикатрисы для неортогруппных типов отражающих поверхностей

Зависимость коэффициента пропорциональности  $K$  от процентного содержания  $P$  в синтезированном композиционном материале порошка диоксида титана для углов наблюдения  $45^\circ$  и  $65^\circ$  представлена на рис. 6, порошка шунгита – на рис. 7.

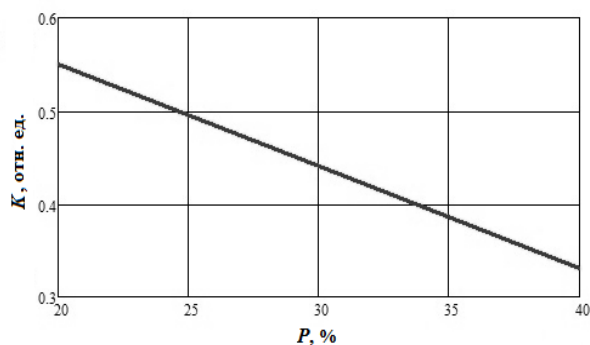


Рис.6. Зависимость коэффициента пропорциональности от процентного содержания диоксида титана в композиционном материале при углах наблюдения  $45^\circ$  и  $65^\circ$

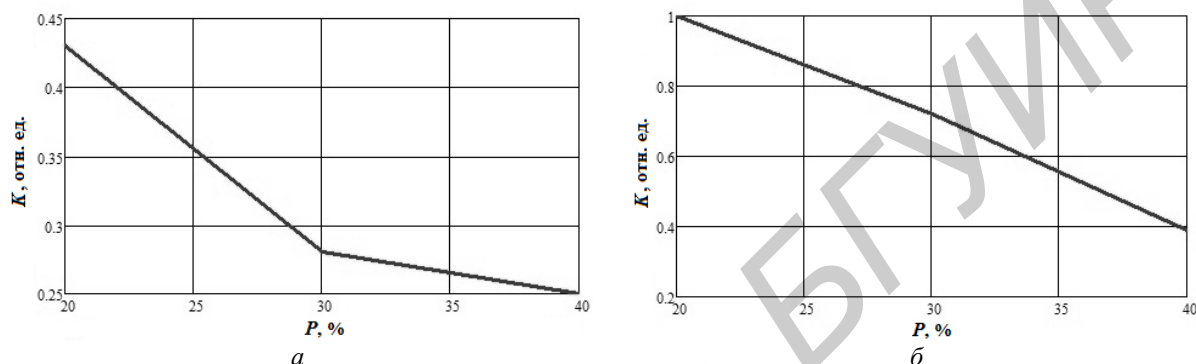


Рис. 7. Зависимость коэффициента пропорциональности от процентного содержания шунгита в композиционном материале при углах наблюдения  $45^\circ$  (а) и  $65^\circ$  (б)

Добавление в силикон порошкообразных компонентов способствует снижению его прозрачности. В случае, когда контрастное соотношение между наполнителем и связующим в композиционном материале велико (как между шунгитом и прозрачным силиконом), то изменение угла наблюдения приводит к более четкому обозначению границ раздела между компонентами на поверхности материала. При этом КСЯ последнего увеличивается. Снижение контрастности между наполнителем и связующем сокращает степень влияния угла наблюдения на значения КСЯ композиционного материала.

Установлено, что относительная погрешность определения КСЯ композиционного материала предложенным методом составляет 10%. Погрешность обусловлена усреднением значений коэффициентов пропорциональности К на всем исследуемом диапазоне длин волн.

### Заключение

Использование разработанного метода способствует сокращению времени, затрачиваемого на получение требуемых спектральных характеристик. Это является важным, т.к. условия применения формируемых материалов разнообразны и в определенных случаях быстро изменчивы.

Описанный в рамках настоящей работы метод расчета характеристик спектральной яркости композиционных материалов был апробирован на образцах, изготовленных на основе силикона, шунгита и диоксида титана. Оптические характеристики этих образцов, полученные в результате расчета, в пределах 10% расходятся со значениями аналогичных характеристик, полученных экспериментальным путем. Источником погрешности в данном случае служит усреднение результатов поправочных коэффициентов на всем исследуемом диапазоне длин волн. Уменьшить значение погрешности можно путем разбиения рассматриваемого диапазона длин волн на поддиапазоны и расчета для каждого из них значения коэффициента пропорциональности.

Полученные материалы отличаются технологичностью и могут использоваться при создании оптических приборов (космических телескопов, систем ночного видения, высокоточных проекционных объективов для микроэлектроники и т.д.), а также для

маскирования объектов в оптическом диапазоне длин волн. Например, КСЯ синтезированных в рамках настоящей работы композиционных материалов на основе шунгита схожи с КСЯ покрова из *Polytrichum commune* (кукушкиного льна обыкновенного) через 30 мин. после начала облучения прямыми лучами солнца, а также с КСЯ низинного осоково-хвощового болота с вахтой трилистной в июле месяце. Спектральные характеристики материалов, полученных на основе силикона и диоксида титана в диапазоне длин волн 450...800 нм подобны спектральным характеристикам лишайника.

## ANALYSIS AND CALCULATION METHOD OF COMPOSITE MATERIALS SPECTRAL BRIGHTNESS CHARACTERISTICS

O.V. VOIPRAV, D.V. STOLER, T.V. BORBOTKO

### Abstract

A method for calculation and analysis of the spectral brightness of composite materials consisting of components combined in various proportions with known optical properties is described.

### Список литературы

1. *Беляев, Ю.В., Дж. Саад Омер, Цикман, И.М.* // Докл. БГУИР. 2011, Т. 55, № 1. С. 75–80.
2. *Харук, В.И.* Мониторинг биосферы и дистанционное зондирование. Красноярск. 2007.
3. *Шухостанов, В.К., Цыбанов, А.Г., Ведешин, Л.А.* // Сб. докладов Всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 2004.