

УДК 535.015

## СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ШЛАМА ОЧИСТКИ ВАГРАНОЧНЫХ ГАЗОВ

О.В. БОЙПРАВ, Д.В. СТОЛЕР, М.Р. НЕАМАХ, В.Б. СОКОЛОВ

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

Поступила в редакцию 12 ноября 2012

Проведен анализ характеристик спектральной яркости и поляризационных характеристик композитных материалов, у которых в качестве связующего вещества выступает силикон, а в качестве наполнителей – шлам очистки ваграночных газов.

*Ключевые слова:* кремнийорганические полимерные вещества, композитные материалы, коэффициент спектральной яркости, степень поляризации, термореактивные вещества, шлам очистки ваграночных газов.

### Введение

Полимерные композитные материалы (ПКМ) представляют собой дисперсные системы, у которых в качестве дисперсной среды (связующего вещества) выступают органические полимеры, а в качестве дисперсной фазы (наполнителя) – твердые частицы (порошки), волокна, жидкости либо пены.

Связующие вещества для ПКМ принято подразделять на два класса: термопластичные (полиэтилен, полипропилен, полистирол) и термореактивные (кремнийорганические вещества, фенолоальдегидные и эпоксидные смолы). По сравнению с термопластичными полимерными веществами термореактивные характеризуются более обширным перечнем преимуществ, среди которых – высокие прочность, термическая, радиационная и химическая стойкость, низкая вязкость, хорошие адгезионные свойства, долговечность. Эти преимущества способствуют более частому использованию термореактивных полимеров в качестве связующих веществ при изготовлении ПКМ различного назначения. Наиболее технологичными термореактивными полимерами являются кремнийорганические вещества, в частности, силиконы. Они эластичны при растяжении и по адгезии. Их можно отформовать в листы, трубы или изделия сложной формы, а также превратить в массу, затвердевающую при комнатной температуре. Они сохраняют эластичность при низких температурах, когда смолы становятся хрупкими, и при высоких температурах, когда смолы превращаются в клейкую массу. Кроме того, силиконы не подвержены воздействиям погоды, воды и электричества [1].

В качестве наполнителей при изготовлении ПКМ на сегодняшний день наиболее широко используются твердые частицы (порошки). Изменяя концентрацию последних, можно варьировать в широких пределах физические характеристики ПКМ, к перечню которых, наряду с тепло-, температуро- и электропроводностью, диэлектрической проницаемостью, принято относить оптические свойства, являющиеся весьма значимыми, например, при изготовлении маскирующих конструкций для техники. На оптические свойства ПКМ существенное влияние, наряду с концентрацией компонентов, оказывают также тип наполнителя и степень дробления.

Цель работы заключается в исследовании оптических свойств ПКМ, наполнители которых отличаются друг от друга размером частиц.

## Методика проведения эксперимента

При синтезе ПКМ в рамках настоящей работы в качестве связующего вещества был использован кремнийорганический полимер (силикон), а в качестве наполнителей – шлам очистки ваграночных газов (ШОВГ) с размером частиц 5 мкм (в образце №1), 20 мкм (в образцах №2, №3, №4) и 30 мкм (в образцах №5, №6, №7). Соотношение масс силикона и ШОВГ в образцах №1, №2, №5 – 80%:20%, №3 и №6 – 70%:30%, №4 и №7 – 60%:40%. Увеличение процентного содержания в ПКМ ШОВГ с размером фракций 5 мкм до 30% либо ШОВГ с размерами фракций 20 мкм и 30 мкм до 50% является нецелесообразным, так как при этом значительно снижаются прочностные характеристики синтезируемого материала.

ШОВГ представляет собой порошкообразные отходы, образующиеся в результате фильтрации и обработки в осевом циклоне газов, отбираемых через трубы вагранок в процессе переплавки в них чугуна. В состав ШОВГ входят оксиды металлов: кальция, трехвалентного железа, магния, натрия, алюминия, калия, – а также оксиды кремния и серы. Основное преимущество использования ШОВГ при синтезе ПКМ по сравнению с иными металлосодержащими порошками заключается в низкой стоимости данного материала.

Оптические свойства ПКМ обусловлены взаимодействием электромагнитного излучения, обладающего определенной энергией, с частицами их наполнителя. К оптическим свойствам ПКМ относятся коэффициент спектральной яркости (КСЯ) и степень поляризации.

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 (например, молочного стекла) с единичным коэффициентом отражения и освещенной так же, как и данная поверхность:

$$\rho(\lambda, \theta, \varphi) = \frac{R_{об}(\lambda, \theta, \varphi)}{R_{ирп}(\lambda, \theta, \varphi)}, \quad (1)$$

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

Степень поляризации ( $P$ ) соотносит поляризацию изучаемой световой волны с поляризацией линейно поляризованного света:

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{L}, \quad (2)$$

где  $Q$ ,  $U$ ,  $L$  – параметры Стокса, характеризующие состояние эллиптически поляризованной волны и определяемые по формулам:

$$\begin{aligned} L &= I_0 + I_{90}; \\ Q &= I_{90} - I_0; \\ U &= I_0 + I_{90} - 2 \cdot I_{45}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $I_0$ ,  $I_{45}$ ,  $I_{90}$  – интенсивности отраженного света при положениях оси поляризатора  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  соответственно.

Исследование оптических свойств синтезированных образцов ПКМ проводилось в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах длин волн – 400...1000 нм.

Схема измерительной установки приведена на рис. 1. Установка включала в себя гониометр Г-5 (1), в который помещался исследуемый образец (5), спектро радиометр 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).

Спектро радиометр ПСР-02 регистрировал спектральную плотность энергетической яркости (СПЭЯ) исследуемого образца, а при использовании поляризационной насадки – СПЭЯ при положениях оси поляроида, соответствующих  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ . В качестве источника

света применялась галогеновая лампа КГМ–250 [2, 3]. Угол падения коллимированного пучка света на исследуемый объект составлял  $45^\circ$ , а углы наблюдения –  $0^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $65^\circ$ . Значения углов падения и наблюдения отсчитывались от нормали к плоскости исследуемого образца.

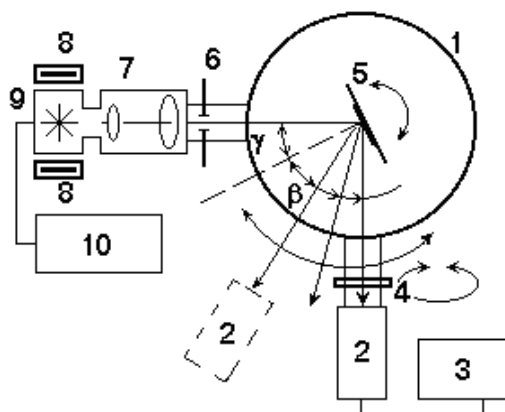


Рис. 1. Схема измерительной установки

### Результаты и их обсуждение

На основании проведенных измерений по формулам (1)–(3) были рассчитаны значения КСЯ и степени поляризации синтезированных ПКМ. По результатам этого расчета были построены зависимости КСЯ и степени поляризации синтезированных ПКМ от длины волны падающего на них света. Для образцов №1, №2 и №5 данные зависимости представлены на рис. 2 и рис. 3 (кривые 1 соответствуют углу наблюдения  $0^\circ$ , кривые 2 –  $25^\circ$ , кривые 3 –  $65^\circ$ ).

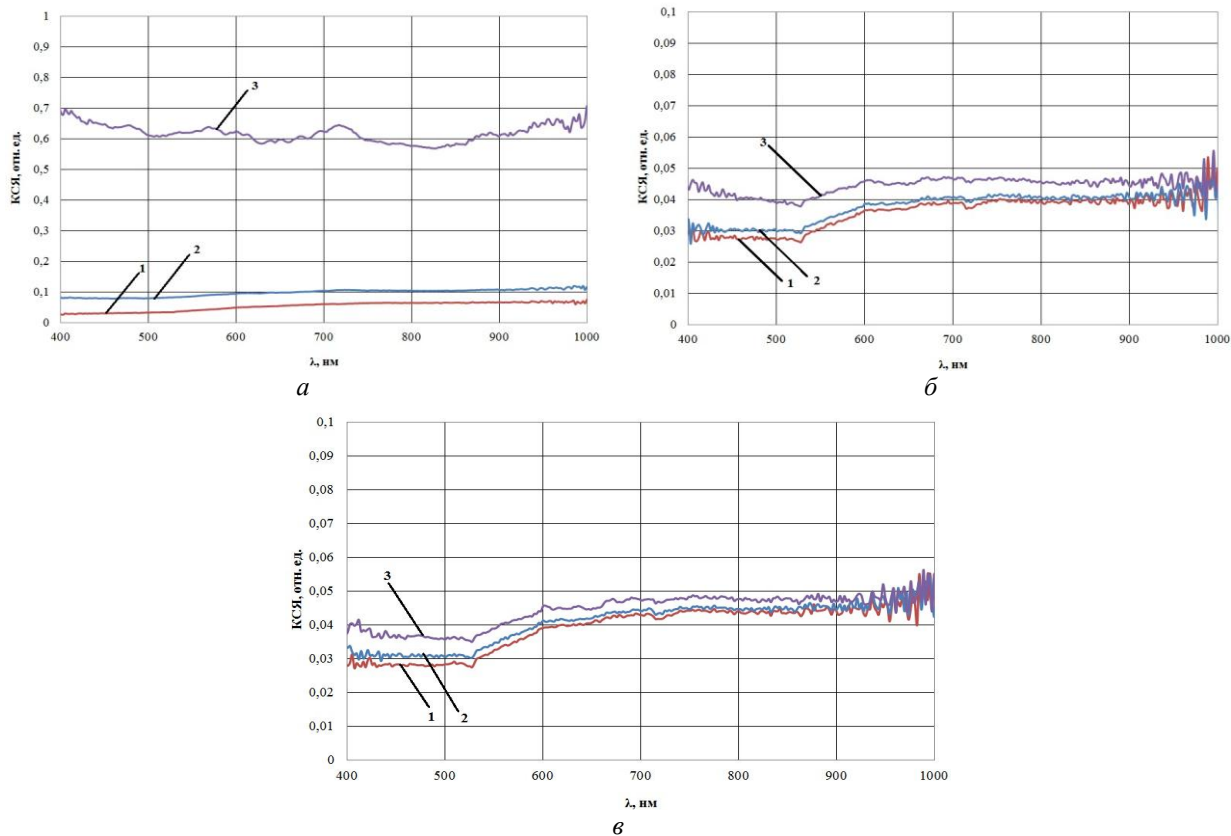


Рис. 2. Зависимость КСЯ от длины волны падающего электромагнитного излучения для: а – образца №1; б – образца №2; в – образца №5

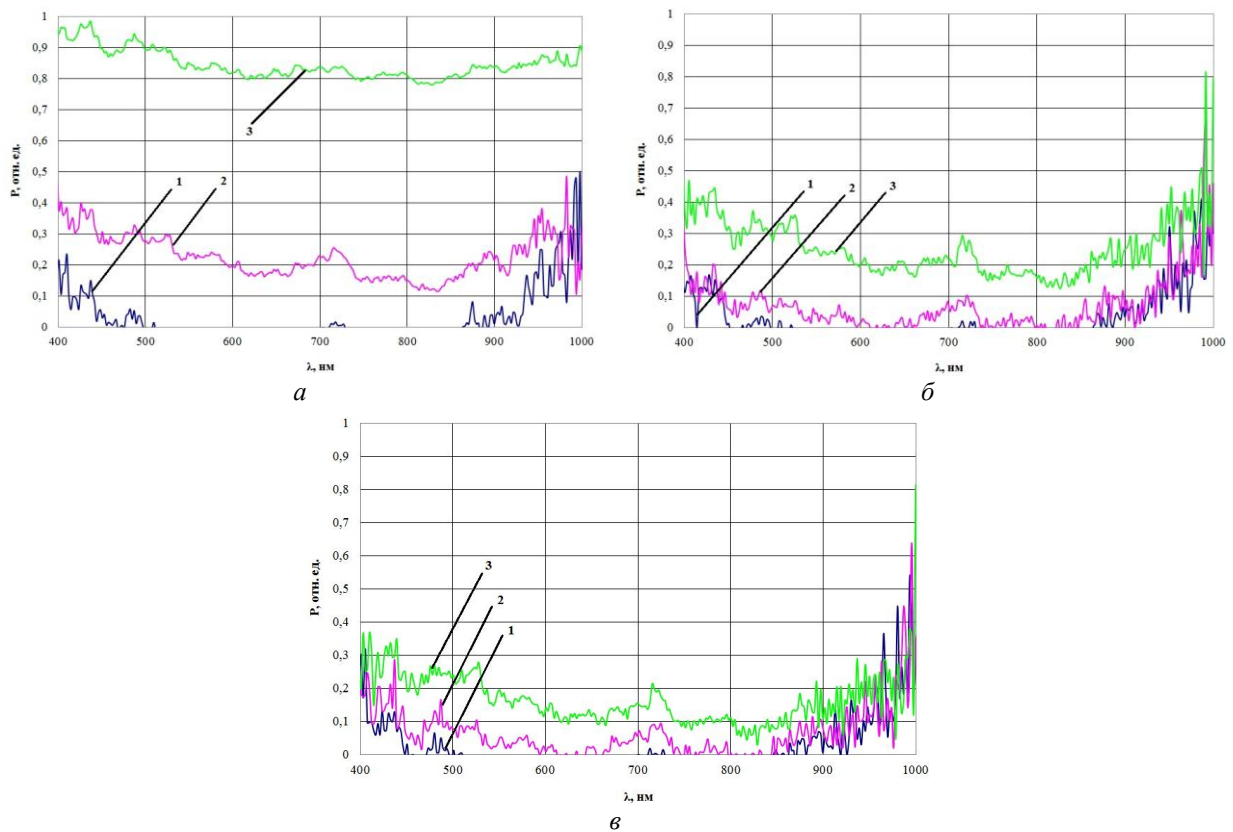


Рис. 3. Зависимость степени поляризации от длины волны падающего электромагнитного излучения для: а – образца №1; б – образца №2; в – образца №5

Увеличение процентного содержания ШОВГ в ПКМ приводит к изменению значений КСЯ последнего при угле наблюдения  $65^\circ$  и значений степени поляризации при углах наблюдения  $25^\circ$  и  $65^\circ$  (для других углов наблюдения эти изменения являются незначительными). Например, значения КСЯ у образца №2 ниже на 0,03, чем у образца №3, и на 0,02, чем у образца №4. Значения КСЯ у образца №5 выше на 0,01, чем у образца №6, но ниже на 0,02, чем у образца №7.

Особенности оптических свойств дисперсных систем определяются природой частиц, их размерами, соотношением между длиной световой волны и размерами частиц. При падении луча света на дисперсную систему могут наблюдаться следующие явления: прохождение света через систему; преломление света частицами дисперсной фазы; отражение света частицами дисперсной фазы; рассеяние света; абсорбция (поглощение) света. Прохождение света характерно для прозрачных систем молекулярной или ионной степени дисперсности (газы, большинство индивидуальных жидкостей и истинных растворов, аморфные и кристаллические тела). Преломление и отражение света всегда наблюдаются у микрогетерогенных систем (эмульсии, суспензии, пены, порошки) и проявляются при помутнениях, которые наблюдаются как в проходящем (прямом), так и отраженном (боковом) свете. Для ПКМ характерны явления абсорбции света и его рассеяния. Абсорбция света осуществляется дисперсной фазой ПКМ и обусловлена превращением световой энергии в тепловую. Рассеяние заключается в преобразовании дисперсной системой света, которое сопровождается изменением его направления (эффект Гиндаля). Световая волна вызывает поляризацию частиц дисперсной фазы. При этом возникает дипольный момент. Диполи колеблются с частотой падающего света и создают вторичное излучение во всех направлениях. В однородной среде свет, излучаемый всеми диполями, вследствие интерференции, распространяется прямолинейно. В неоднородных средах, в том числе и в ПКМ, у которых показатели преломления дисперсных среды и фазы различны, интерференция отсутствует, и испускается некомпенсированное излучение в виде рассеянного света. Свет, являясь векторной величиной, рассеивается во всех направлениях. Однако его интенсивность неодинакова по направлениям. Рассеянный свет обычно поляризован. Причина поляризации – поперечная анизотропия (неоднородность) световых лучей. Максимальная ин-

тенсивность поляризованного света достигается, когда угол между падающим и рассеянным светом ( $\varphi_{\text{ПР}}$ ) равен  $55^\circ$ . Если падающий свет не поляризован, то интенсивность рассеянного света равна  $(1 + \cos^2 \varphi_{\text{ПР}})$ . При  $\varphi_{\text{ПР}} = 0$  рассеяние максимально, при  $\varphi_{\text{ПР}} = 90^\circ$  оно отсутствует.

Если энергия поглощенного кванта света равна энергии испускаемого кванта, то рассеяние будет рэлеевским (упругим), в противном случае – неупругим (эффект Рамана). Рэлеевское рассеяние реализуется, когда размеры частиц дисперсной фазы ( $a$ ) намного меньше длины волны света ( $\lambda_c$ ):  $a < 0,1 \cdot \lambda_c$ .

Количественной характеристикой процесса рассеяния света (как упругого, так и неупругого) является параметр, называемый сечением рассеяния ( $\sigma$ ).

Особенности неупругого рассеяния света частицами описываются теорией, разработанной английским ученым А. Лявом и немецким ученым Ми. Согласно этой теории, когда радиус частицы меньше длины волны света, рассеяние света на ней аналогично нерезонансному рассеянию света атомом. Сечение и интенсивность рассеянного света в этом случае сильно зависят от  $a$  и от разности диэлектрических проницаемостей рассеивающей среды и окружающей среды ( $\varepsilon$  и  $\varepsilon_0$  соответственно):  $\sigma = \lambda_c^{-4} \cdot a^6 \cdot (\varepsilon - \varepsilon_0)$ .

Когда  $a \geq \lambda_c$ , индикатриса ее рассеяния характеризуется наличием резких максимумов и минимумов (вблизи т. н. резонансов), а значения сечения равны  $6\pi a^2$ , т.е. с увеличением размера частиц рассеяние усиливается. При этом значительно усложняется зависимость поляризации от угла рассеяния.

Рассеяние света большими частицами ( $a \gg \lambda_c$ ) рассматривается на основе законов геометрической оптики с учетом интерференции лучей, отраженных и преломленных на поверхности частиц. Важная особенность этого случая – периодический (по углу) характер индикатрисы рассеяния и периодическая зависимость значения сечения от параметра  $\frac{a}{\lambda_c}$  [4–6].

Таким образом, синтезированные в рамках настоящей работы ПКМ осуществляют неупругое рассеяние света. Значение  $\sigma$  для образца №1 составляет  $\approx 470$  мкм, для образцов №2, №3, №4 –  $\approx 7,54$  мм, для образцов №5, №6, №7 –  $\approx 17$  мм. То есть образец №1 обеспечивает наименьшую интенсивность рассеяния света и, в связи с этим характеризуется наибольшими значениями КСЯ и степени поляризации, что наглядно демонстрируют приведенные на рис. 2 и рис. 3 графические зависимости.

Зависимости значений КСЯ и степени поляризации материала от угла наблюдения описываются индикатрисой рассеяния [7]. Для материалов с горизонтально-неоднородной ламбертовой поверхностью (в том числе и для ПКМ) индикатриса рассеяния может быть получена путем аппроксимации комбинации эллипсоидов и полусферы. Значения величин осей эллипсоидов и углов их расположения относительно стенок полусферы зависят от физических характеристик ПКМ и определяют характер индикатрисы рассеяния: крутизну ее линий и значения точек ее экстремума (точек максимума и минимума).

Резкое возрастание значений КСЯ и степени поляризации образца №1 при  $\varphi = 65^\circ$  свидетельствуют о том, что точка максимума его индикатрисы рассеяния расположена в окрестности точки  $\varphi = 65^\circ$  и крутизна линий данной индикатрисы превосходит крутизну линий индикатрис образцов №2 и №5.

На характер индикатрисы рассеяния синтезированных в рамках настоящей работы ПКМ, наряду с размером фракций их наполнителя, оказывает влияние и процентное содержание последнего. Увеличение процентного содержания ШОВГ с размером фракций 20 мкм либо 30 мкм существенно не изменяет характер индикатрисы ПКМ при  $\varphi = 0^\circ \dots 25^\circ$ , но смещает расположение точки экстремума в области  $\varphi = 25^\circ \dots 90^\circ$

## Заключение

Управляемо изменять физические характеристики (в частности, параметры спектральной яркости и степени поляризации) композитного материала возможно не только путем изменения типа его наполнителя, но и путем изменения размера (степени дробления) частиц последнего и их процентного содержания. Это представляет удобство в том случае, если перечень

возможных компонентов для создания композитного материала с требуемыми оптическими свойствами является узким.

Синтезированные в рамках настоящей работы ПКМ при определенных условиях могут быть использованы для маскирования объектов на открытой местности. Зависимости КСЯ от длины волны падающего света для образца №1 при углах наблюдения  $0^\circ$  и  $25^\circ$  во всем исследованном диапазоне длин волн схожи с аналогичными зависимостями для сфагнового (18 августа) и низинного (1 октября) торфа, а при угле наблюдения  $65^\circ$  в диапазоне длин волн 750 нм...1000 нм – с зависимостями для сныти, папоротника орляка, вейника Лангсдорфа.

Зависимости КСЯ от длины волны падающего света для образцов №2 и №3 при углах наблюдения  $0^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $65^\circ$  в диапазоне длин волн 400 нм...700 нм схожи с аналогичными зависимостями для толокнянки и вереска во всех стадиях его цветения [8].

## **SPECTRAL AND POLARIZATION CHARACTERISTICS OF ORGANOSILICON POLYMER COMPOSITE MATERIALS BASED ON SLUDGE TREATMENT CUPOLA GASES**

O.V. BOIPRAV, D.V. STOLER, M.R. NEAMAN, V.B. SOKOLOV

### **Abstract**

The analysis of the spectral brightness and polarization characteristics of the composite materials in which silicone as a binder and sludge treatment cupola gases as fillers is conducted.

### **Список литературы**

1. Алентьев А.Ю., Яблокова М.Ю. Связующие для полимерных композиционных материалов. М., 2010.
2. Беляев Ю.В., Дж. Саад Омер, Цикман И.М. // Докл. БГУИР. 2011. № 1 (55). С. 75–80.
3. Бойправ О.В., Столер Д.В., Борботько Т.В. // Докл. БГУИР. 2012. № 6 (68). С. 19–24.
4. Ландсберг Г.С. Оптика. М., 1957.
5. Прохоров А.М. Физическая энциклопедия. М., 1994.
6. Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами. М., 1961.
7. Шухостанов В.К., Цыбанов А.Г., Ведешин Л.А. // Сб. докл. Всероссийской конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 2004. С. 102–116.
8. GIS-Lab: Спектры отражения природных объектов – база данных. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gis-lab.info/projects/spectra>. – Дата доступа: 10.11.2012.