

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; λ – длина отраженной волны; θ – угол падения света; φ – 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° , 45° , 90° 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° , 45° , 90° . В качестве источника

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

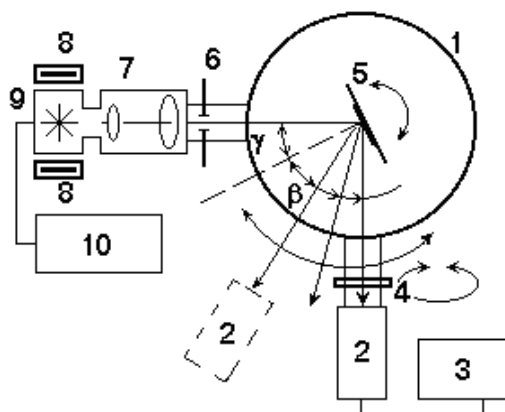


Рис. 1. Схема измерительной установки

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° , кривые 2 – 25° , кривые 3 – 65°).

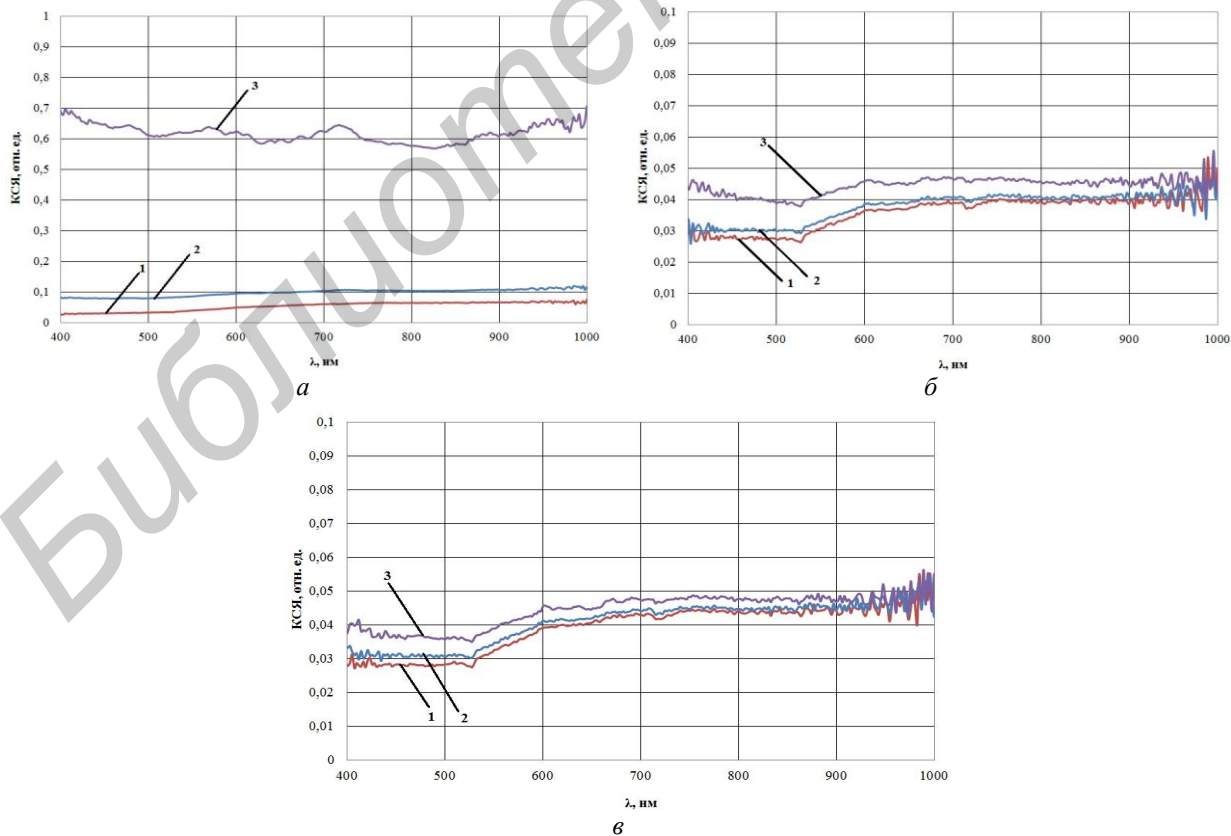


Рис. 2. Зависимость КСЯ от длины волны падающего электромагнитного излучения для: а – образца №1; б – образца №2; в – образца №5

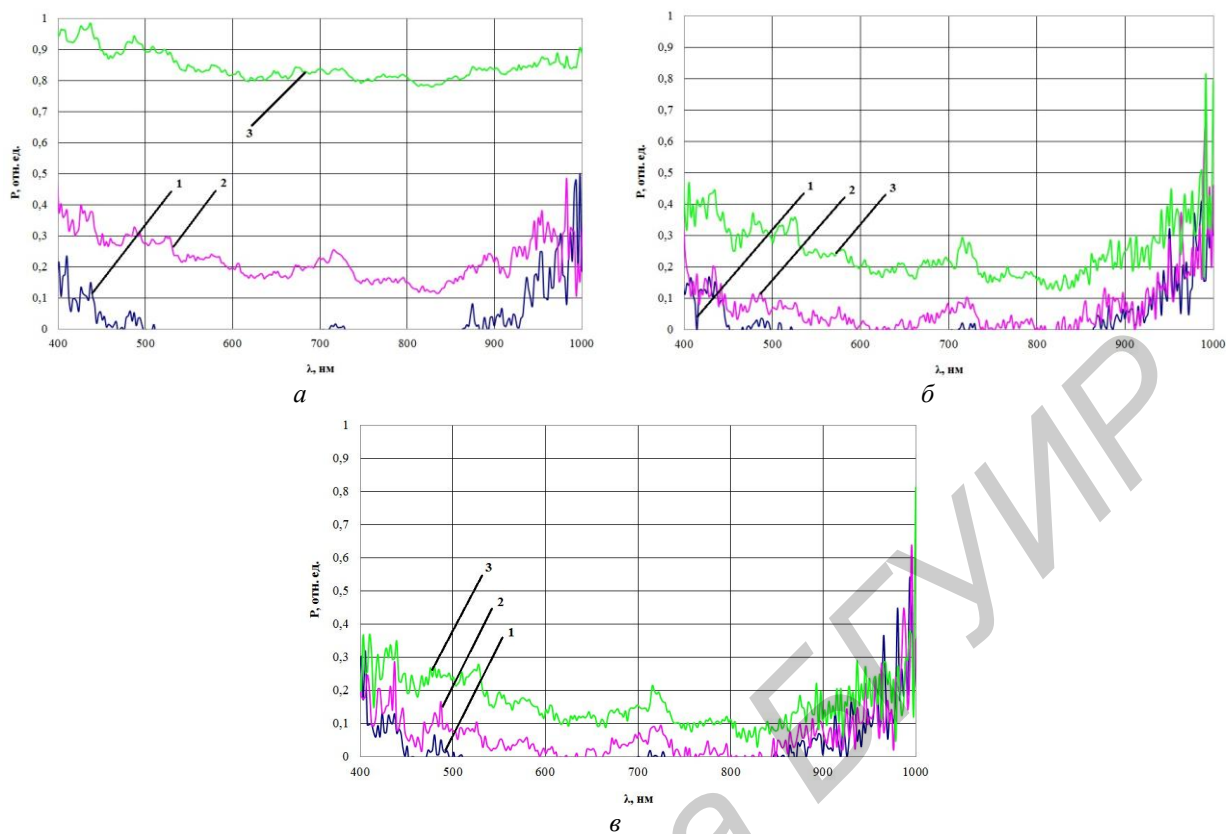


Рис. 3. Зависимость степени поляризации от длины волны падающего электромагнитного излучения для: а – образца №1; б – образца №2; в – образца №5

Увеличение процентного содержания ШОВГ в ПКМ приводит к изменению значений КСЯ последнего при угле наблюдения 65° и значений степени поляризации при углах наблюдения 25° и 65° (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° . 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 (λ_c): $a < 0,1 \cdot \lambda_c$.

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

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 (ϵ и ϵ_0 соответственно): $\sigma = \lambda_c^{-4} \cdot a^6 \cdot (\epsilon - \epsilon_0)$.

Когда $a \geq \lambda_c$, индикатриса ее рассеяния характеризуется наличием резких максимумов и минимумов (вблизи т. н. резонансов), а значения сечения равны $\propto a^2$, 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 σ для образца №1 составляет ≈ 470 мкм, для образцов №2, №3, №4 – $\approx 7,54$ мм, для образцов №5, №6, №7 – ≈ 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° и 25° во всем исследованном диапазоне длин волн схожи с аналогичными зависимостями для сфагнового (18 августа) и низинного (1 октября) торфа, а при угле наблюдения 65° 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° , 25° , 65° 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., Ведещин 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.