

УДК 535.34

## ВЛИЯНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ УФ И ВИДИМОГО ДИАПАЗОНА СПЕКТРА НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ДВУХСЛОЙНЫХ ПОЛЫХ ЧАСТИЦ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ И ОКСИДА ЦИНКА

© 2025 г. Д. С. Федосов<sup>а</sup>, В. В. Нещименко<sup>б, \*</sup>, М. М. Михайлов<sup>а, б</sup>, С. А. Юрьев<sup>а, б</sup>

<sup>а</sup>Томский государственный университет управления и радиоэлектроники, Томск, 634050 Россия

<sup>б</sup>Амурский государственный университет, Благовещенск, 675027 Россия

\*e-mail: vIta1y@mail.ru

Поступила в редакцию 25.06.2024 г.

После доработки 22.08.2024 г.

Принята к публикации 22.08.2024 г.

Проведен сравнительный анализ *in situ* спектров диффузного отражения в области от 200 до 2500 нм и их изменений после облучения покрытий на основе полиметилфенилсилоксановой смолы и порошков-пигментов двухслойных полых частиц ZnO/SiO<sub>2</sub> и SiO<sub>2</sub>/ZnO. Облучение осуществляли светом ксеноновой дуговой лампы, имитирующим спектр излучения Солнца, с интенсивностью 3 э.с.о. (э.с.о. — эквивалент солнечного облучения, 1 э.с.о. = 0.139 Вт/см<sup>2</sup>). Фотостойкость исследуемых покрытий на основе двухслойных полых частиц ZnO/SiO<sub>2</sub> и SiO<sub>2</sub>/ZnO оценивали относительно покрытий на основе поликристаллов ZnO из анализа разностных спектров диффузного отражения, полученных вычитанием спектров необлученных и облученных образцов. Установлено, что интенсивность полос наведенного поглощения в покрытиях на основе полых частиц ZnO/SiO<sub>2</sub> и SiO<sub>2</sub>/ZnO меньше, чем в покрытиях на основе микрочастиц ZnO, а радиационная стойкость при оценке изменения интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения ( $\Delta\alpha_s$ ) в два раза больше. Увеличение радиационной стойкости, вероятно, определяется различной природой накопления дефектов: в случае объемных микрочастиц радиационные дефекты могут накапливаться внутри зерна, в полых частицах накопление дефектов может происходить только в пределах тонкой оболочки сферы.

**Ключевые слова:** оксид цинка, диоксид кремния, покрытия, полиметилфенилсилоксановая смола, полые частицы, спектры диффузного отражения, фотостойкость.

DOI: 10.31857/S1028096025030087, EDN: ELUPJJ

### ВВЕДЕНИЕ

Применение двухслойных полых частиц в настоящее время является инновационным подходом для создания перспективных космических материалов с улучшенными свойствами. Объединив преимущества как полых, так и слоистых структур, двухслойные полые частицы обеспечивают улучшенную теплоизоляцию, уменьшенную массу и усиленные механические свойства, что делает их привлекательным решением в космическом материаловедении для создания теплозащитных и радиационно-стойких материалов. Диоксид кремния и оксид цинка имеют высокие

показатели фото- и радиационной стойкости благодаря их оптическим свойствам [1–4].

Воздействие квантов света на тонкие пленки в полых частицах диоксида кремния приводит к образованию центров поглощения света на нестехиометрическом атоме кислорода, поверхностных центрах  $E'_{s1}$ ,  $E'_{s2}$  и  $E'_{s3}$ , трехкоординированном атоме кремния с неспаренным электроном, пероксидных радикалах и силановых группах [5–10]. Возникающие дефекты приводят к увеличению поглощения полых частиц, что снижает рабочие параметры терморегулирующих покрытий. В оксиде цинка центры поглощения обусловлены

межузельным ионом цинка  $Zn_i$ , кислородными вакансиями  $V_O^{\bullet\bullet}$ , вакансиями цинка  $V_{Zn}^{\bullet}$  и  $V_{Zn}^{\bullet\bullet}$ , междузельным кислородом  $O_i^{\bullet}$  и  $O_i^{\bullet\bullet}$ , вакансиями кислорода  $V_O^X$  [11–16]. При поглощении фотон с энергией, равной энергии центра поглощения, возбуждает электрон из валентной зоны, который переходит на уровень соответствующего дефекта в запрещенной зоне. В результате захваченный электрон становится локализованным состоянием, что приводит к поглощению света.

Целью настоящего исследования был сравнительный анализ спектров наведенного поглощения и изменения интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения после облучения покрытий на основе объемных микрочастиц ZnO и полых двухслойных частиц ZnO/SiO<sub>2</sub> и SiO<sub>2</sub>/ZnO светом, имитирующим спектр излучения Солнца.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для получения покрытий были использованы коммерческие порошки-пигменты ZnO квалификации ОСЧ 14-2 со средним размером частиц от 1 до 3 мкм и синтезированные полые двухслойные частицы SiO<sub>2</sub>/ZnO и ZnO/SiO<sub>2</sub> со средним размером от 800 до 1200 нм, методика получения которых представлена в [17, 18].

Покрытия были приготовлены при смешивании 65 об. % порошка-пигмента и 35 об. % кремнийорганического лака (полиметилфенилсилоксановая смола КО-921), которые были нанесены на алюминиевые подложки АМг6, предварительно покрытие грунтовкой из поливинилбутирала. Толщина слоя покрытия составляла примерно 200–250 мкм.

Образцы облучали электромагнитным излучением солнечного спектра ксеноновой дуговой лампы мощностью 5 кВт с интенсивностью, в три раза превышающей интенсивность излучения заатмосферного Солнца (э.с.о. — эквивалент солнечного облучения, 1 э.с.о. = 0.139 Вт/см<sup>2</sup>) при температуре 40–45°C в вакууме  $P = 10^{-7}$  Торр. После каждого периода облучения регистрировали спектры диффузного отражения в области 200–2500 нм в месте облучения (*in situ*) в установке-имитаторе условий космического пространства “Спектр” [19]. Расчет интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения ( $\alpha_s$ ) осуществляли в соответствии с международными стандартами ASTM (E490-00a и E903-96) [20, 21]. В рамках анализа электромагнитного воздействия на полые частицы был задействован программный инструмент COMSOL Multiphysics.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Из спектров диффузного отражения (рис. 1) следует, что отражательная способность покрытий на основе кремнийорганического лака и полых двухслойных частиц SiO<sub>2</sub>/ZnO и ZnO/SiO<sub>2</sub> достигает 95% в видимом диапазоне спектра и уменьшается в области длин волн от 1000 до 2500 нм, где достигает 50%. Для покрытий на основе объемных микрочастиц ZnO снижение более выражено, изменение отражательной способности составляет от 94% при 470 нм и 35% при 2500 нм. Для всех видов покрытий регистрируются характерные пики поглощения при 1182, 1452, 1715, 1934, 2294 нм, которые типичны для исходного кремнийорганического лака без добавления порошков-пигментов. Отражательная способность образцов с лаком существенно меньше по сравнению с покрытиями, значения  $\rho$  достигает 55% при длине волны 1280 нм. В видимой области отражательная способность едва достигает 50%. Расчет интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения показал, что для покрытий с полыми двухслойными частицами  $\alpha_s = 0.146$  и 0.152, тогда как для покрытий со сплошными микрочастицами  $\alpha_s = 0.174$ .

На рис. 2 показаны разностные спектры диффузного отражения, полученные вычитанием спектров кремнийорганического лака из спектров полых двухслойных частиц SiO<sub>2</sub>/ZnO и ZnO/SiO<sub>2</sub> и объемных микрочастиц ZnO. По этим спектрам можно определить вклад, который вносят пигменты в отражательную способность покрытий. Из спектров видно, что радикалы, характерные для полиметилфенилсилоксановой смолы и поглощающие в ближней ИК-области, эффективно

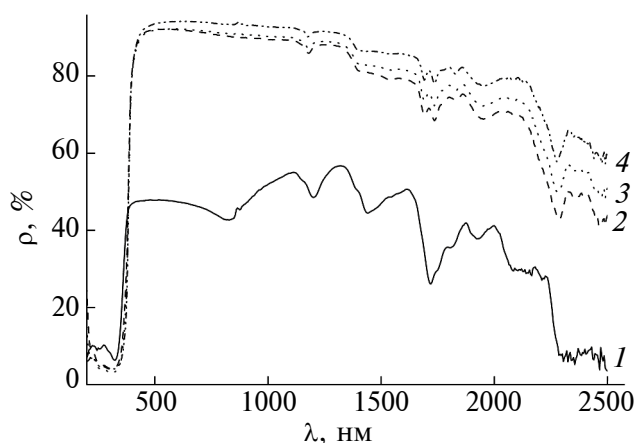
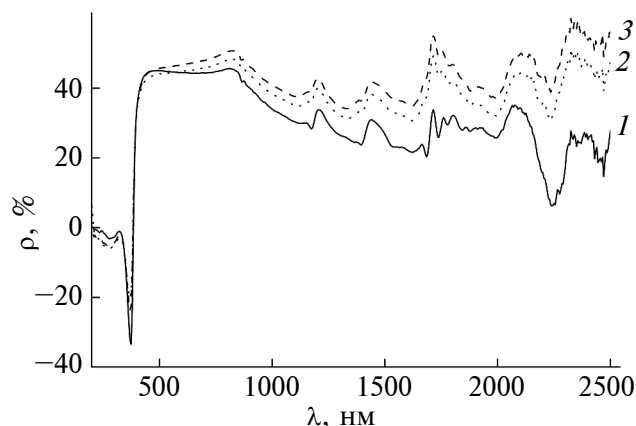


Рис. 1. Спектры диффузного отражения покрытий на основе кремнийорганического лака без пигментов (1), объемных микрочастиц ZnO (2), полых двухслойных частиц SiO<sub>2</sub>/ZnO (3) и ZnO/SiO<sub>2</sub> (4).

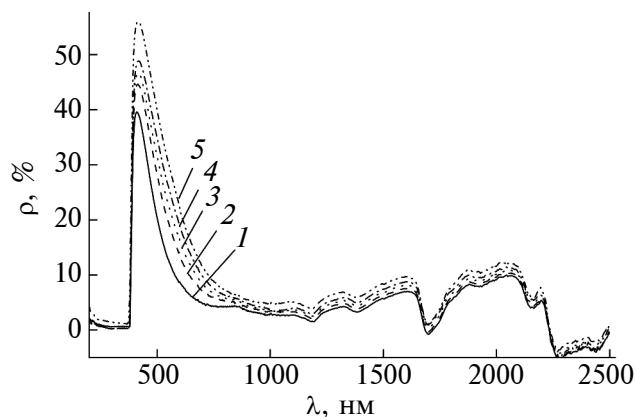


**Рис. 2.** Разностные спектры диффузного отражения, полученные вычитанием спектров кремнийорганического лака из спектров объемных микрочастиц ZnO (1), полых двухслойных частиц SiO<sub>2</sub>/ZnO (2) и ZnO/SiO<sub>2</sub> (3).

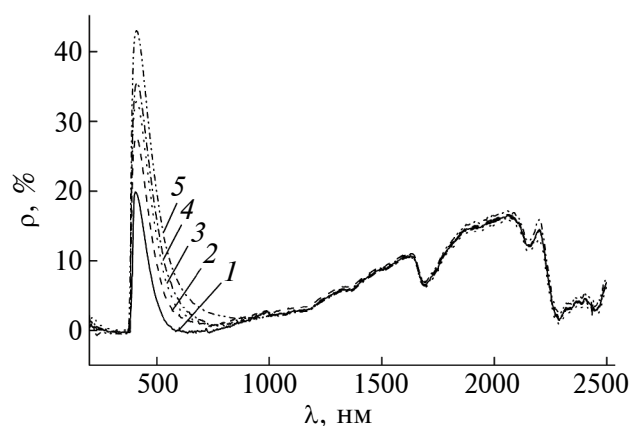
сшиваются развитой поверхностью полых частиц, тогда как в случае объемных микрочастиц ZnO это происходит менее интенсивно.

Из спектров наведенного поглощения после воздействия электромагнитного излучения ( $\Delta\rho_\lambda = \rho_{\lambda 0} - \rho_{\lambda \Phi}$ , где  $\rho_{\lambda 0}$  и  $\rho_{\lambda \Phi}$  соответствуют спектрам диффузного отражения до и после облучения) с интенсивностью 3 э.с.о. в течение 15 ч (рис. 3) на покрытия на основе объемных микрочастиц ZnO следует, что воздействие ионизирующего излучения создает центры поглощения, полосы которых образуют сплошной спектр поглощения в УФ- и видимой областях. Максимум интенсивности поглощения соответствует 414 нм, регистрируются другие пики поглощения вблизи 1297, 1600 и 2050 нм. Также выделяется широкая полоса поглощения затянута, в ближнюю ИК-область с максимумом вблизи 2050 нм. Интенсивность изменения значений  $\Delta\rho_\lambda$  в видимом диапазоне в зависимости от времени облучения образует следующий ряд: 39.51% → 44.53% → 46.58% → 48.63% → 56.19%, в ближней ИК-области изменения менее заметны при длине волны 2050 нм: 9.87% → 10.26% → 10.81% → 11.28% → 12.39%.

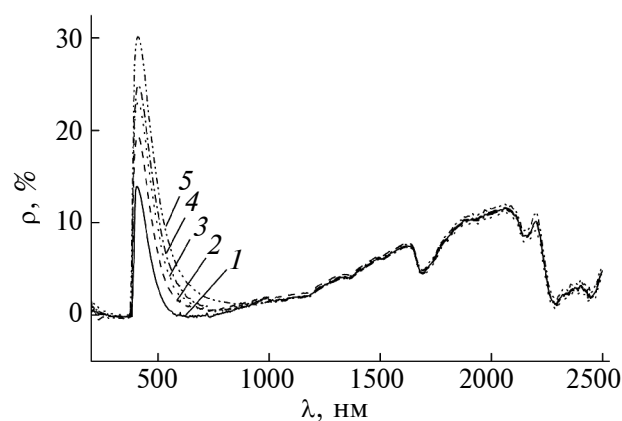
Если проанализировать изменения поглощения покрытий на основе двухслойных полых частиц ZnO/SiO<sub>2</sub> и SiO<sub>2</sub>/ZnO (рис. 4, 5), то в общем спектры наведенного поглощения схожи: наблюдаются заметное поглощение в видимой области спектра и малая интенсивность в ближней ИК-области. В видимом диапазоне спектра максимум поглощения приходится на длину волны 410 нм. В зависимости от времени облучения для покрытий на основе полых частиц ZnO/SiO<sub>2</sub> из-



**Рис. 3.** Разностные спектры диффузного отражения покрытий на основе объемных микрочастиц ZnO после воздействия электромагнитного облучения солнечного спектра в течение: 3 (1); 6 (2); 9 (3); 12 (4); 15 ч (5).



**Рис. 4.** Разностные спектры диффузного отражения покрытий на основе полых двухслойных частиц ZnO/SiO<sub>2</sub> после воздействия электромагнитного облучения солнечного спектра в течение: 3 (1); 6 (2); 9 (3); 12 (4); 15 ч (5).

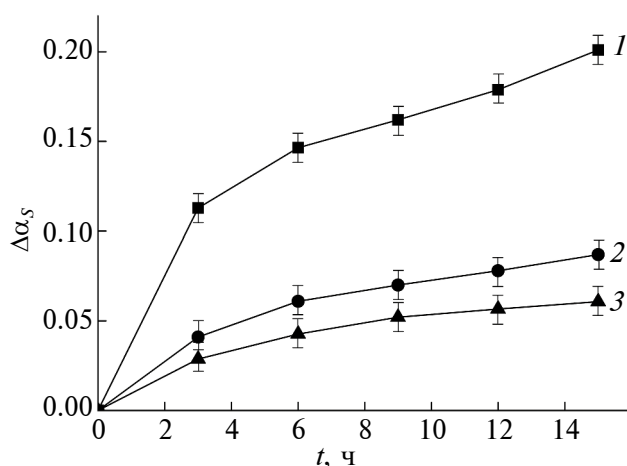


**Рис. 5.** Разностные спектры диффузного отражения покрытий на основе полых двухслойных частиц SiO<sub>2</sub>/ZnO после воздействия электромагнитного облучения солнечного спектра в течение: 3 (1); 6 (2); 9 (3); 12 (4); 15 ч (5).

менения для  $\rho_{410}$  следующие: 19.69%  $\rightarrow$  27.56%  $\rightarrow$  32.74%  $\rightarrow$  35.42%  $\rightarrow$  42.98%, для полых частиц  $\text{SiO}_2/\text{ZnO}$ : 13.88%  $\rightarrow$  19.39%  $\rightarrow$  22.68%  $\rightarrow$  24.90%  $\rightarrow$  30.08%. Интенсивность пика поглощения при 2050 нм в случае покрытий на основе полых частиц  $\text{ZnO}/\text{SiO}_2$  увеличивается от 15.78 до 17.07%, в случае полых частиц  $\text{SiO}_2/\text{ZnO}$  — от 11.03 до 11.97%.

Из зависимости изменения интегрального коэффициента поглощения от времени воздействия электромагнитного излучения следует (рис. 6), что наибольшей фотостойкостью обладают покрытия на основе полых частиц  $\text{SiO}_2/\text{ZnO}$ , так при наибольшем времени облучения 15 ч значение  $\Delta\alpha_s$  составляет 0.059, для полых частиц  $\text{ZnO}/\text{SiO}_2$  — 0.087, тогда как для покрытий на основе микропорошков  $\Delta\alpha_s = 0.2$ . Улучшение фотостойкости покрытий при использовании полых частиц  $\text{SiO}_2/\text{ZnO}$  по сравнению со сплошными микрочастицами оксида цинка составляет около 70%, а при использовании  $\text{ZnO}/\text{SiO}_2$  — 60%.

Была проведена компьютерная симуляция воздействия электромагнитного излучения от 400 до 1000 нм на сплошные микрочастицы оксида цинка и полые двухслойные частицы  $\text{SiO}_2/\text{ZnO}$  и  $\text{ZnO}/\text{SiO}_2$  размером 1000 нм. На рис. 7 представлены результаты объемного распределения поглощения электромагнитного излучения. Из полученных данных следует, что максимальная поглощаемая мощность для микрогексаэдра  $\text{ZnO}$ , микросфер  $\text{ZnO}/\text{SiO}_2$  и  $\text{SiO}_2/\text{ZnO}$  не превышает порога 100 пВт/м<sup>3</sup>. Для микрогексаэдров характерна высокая способность к поглощению излучения в видимом спектре, которая превос-



**Рис. 6.** Зависимость изменений коэффициента поглощения  $\Delta\alpha_s$  после воздействия электромагнитного облучения солнечного спектра на покрытия на основе кремнийорганического лака и объемных микрочастиц  $\text{ZnO}$  (1), полых двухслойных частиц  $\text{SiO}_2/\text{ZnO}$  (2) и  $\text{ZnO}/\text{SiO}_2$  (3).

ходит полые частицы. В отличие от них, полые микросферы демонстрируют наименьшую эффективность поглощения излучения. Основную часть электромагнитного излучения в выбранном диапазоне рассеивают полые частицы.

При взаимодействии электромагнитного излучения с покрытиями на основе полых частиц и полиметилфенилсилоксановой смолы формируются центры поглощения с максимумом поглощения вблизи 414 нм, которые могут быть обусловлены образованием точечных дефектов в оксиде цинка, диоксиде кремния и свободными радикалами в кремнийорганическом лаке. Полиметилфенилсилоксановая смола  $(\text{R}[\text{M}_2\text{SiO}]_n\text{SiO}[\text{M}\Phi\text{SiO}]_m\text{SiR})$ , где  $\text{R} = (\text{CH}_3)_3$  или  $\text{CH}_3(\text{C}_6\text{H}_5)_2$ ,  $\text{M} = \text{CH}_3$ ,  $\Phi = \text{C}_6\text{H}_5$ ) под действием света подвергается процессу фотодеградации, который включает процессы, связанные с фотоокислением, фотолизом и фотохимически индуцированной перегруппировкой. Эта реакция происходит в боковых фенильных группах  $\Phi = \text{C}_6\text{H}_5$ , приводя к образованию различных продуктов разложения. Кванты света с достаточной энергией для разрыва химических связей в полиметилфенилсилоксановой смоле и возбужденные ионы кислорода в оксиде цинка и диоксиде кремния, активированные УФ-излучением, могут атаковать полимерные цепи, образуя свободные радикалы. Свободные радикалы инициируют цепные реакции окисления, приводя к разрыву основных цепей и образованию кислородсодержащих групп — карбонильных, карбоксильных и гидроксильных. Кроме того, прямое поглощение квантов света связями  $\text{Si}-\text{C}$  и  $\text{Si}-\text{O}$  может привести к их гомолитическому разрыву. Образуются новые радикалы, которые участвуют в дальнейших реакциях деградации, включая рекомбинацию и диспропорционирование.

Образование интегральной полосы наведенного поглощения при воздействии электромагнитного излучения солнечного спектра в покрытиях может определяться фотодеградацией оксида цинка за счет процессов генерации электронно-дырочных пар ( $\text{ZnO} + h\nu \rightarrow e^- + h^+$ ) и их рекомбинации ( $e^- + h^+ \rightarrow \text{тепло}$  и  $e^- + h^+ \rightarrow h\nu'$ ). Кроме того, может происходить захват носителей заряда точечными дефектами кристаллической решетки — как в катионной, так и в анионной решетках ( $V_{\text{O}}^{\bullet\bullet} + e^- \rightarrow V_{\text{O}}^{\bullet}$  или  $\text{Zn}_i^+ + h^+ \rightarrow \text{Zn}_i^{\bullet}$ ). Захваченные на поверхности  $\text{ZnO}$  электроны и дырки могут взаимодействовать с молекулами кислорода и воды, образуя активные формы кислорода:  $\text{O}_2 + e^- \rightarrow \cdot\text{O}_2^-$  и  $\text{H}_2\text{O} + h^+ \rightarrow \cdot\text{OH} + \text{H}^+$ . Электроны и дырки, а также активные формы кислорода могут участвовать в окислительно-восстановительных реакциях с радикалами полиметилфенилсилоксановой

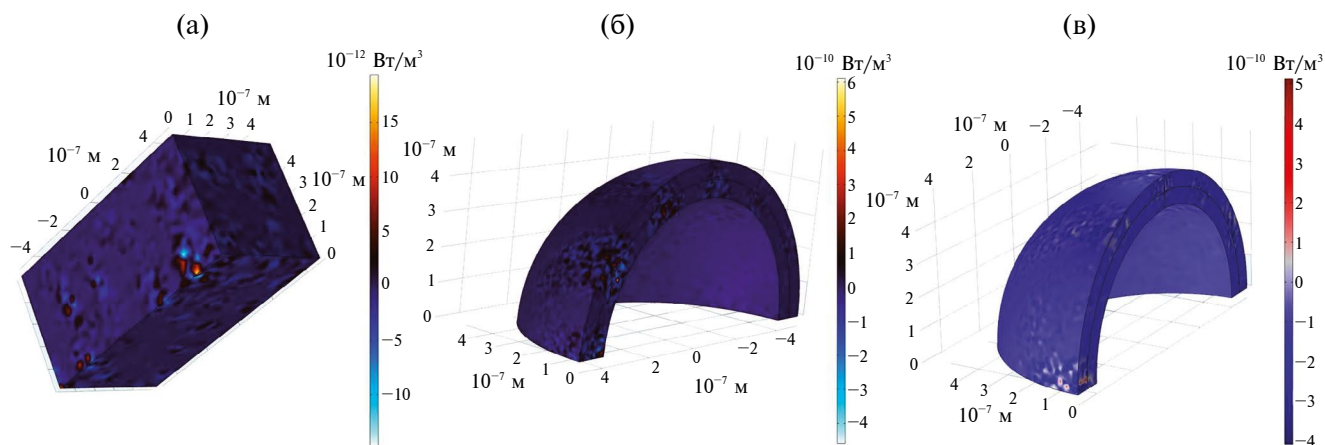


Рис. 7. Объемное распределение поглощенного излучения микрогексаэдром (а), микросферами  $\text{ZnO}/\text{SiO}_2$  (б) и  $\text{SiO}_2/\text{ZnO}$  (в).

смолы  $(\text{CH}_3)_3$ ,  $\text{CH}_3(\text{C}_6\text{H}_5)_2$ ,  $\text{CH}_3$ ,  $\text{C}_6\text{H}_5$ , сшитыми с поверхностью оксида цинка.

Генерация электронно-дырочных пар в диоксиде кремния не характерна из-за большой ширины запрещенной зоны, однако возможны эффекты захвата носителей заряда из оксида цинка собственными дефектами диоксида кремния, которые изменяют их заряд и реакционную способность:  $\equiv\text{Si}-\text{Si}\equiv + h^+ \rightarrow \equiv\text{Si}\cdot + \equiv\text{Si}^+$  и  $\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{O}-\text{Si}\equiv + e^- \rightarrow \equiv\text{Si}-\text{O}\cdot + \equiv\text{Si}-\text{O}^-$ . Возможны процессы разрыва связи  $\text{Si}-\text{O}$  квантами света:  $\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{Si}\equiv + h\nu \rightarrow \equiv\text{Si}\cdot + \cdot\text{O}-\text{Si}\equiv$ . Дефекты, созданные в результате фотодеградаци, могут реагировать с радикалами полиметилфенилсилоксановой смолы:  $\equiv\text{Si}-\text{CH}_3 + h\nu \rightarrow \equiv\text{Si}\cdot + \cdot\text{CH}_3$ .

В целом, взаимодействие электромагнитного излучения солнечного спектра с композитом из полиметилфенилсилоксановой смолы с включениями полых двухслойных частиц будет определяться центрами окраски в порошках-пигментах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований показали, что отражательная способность покрытий на основе двухслойных полых частиц  $\text{SiO}_2/\text{ZnO}$  и  $\text{ZnO}/\text{SiO}_2$  выше, чем покрытий на основе поликристаллов  $\text{ZnO}$ . Установлено, что деградация оптических свойств покрытий при воздействии электромагнитного излучения солнечного спектра на покрытия из полиметилфенилсилоксановой смолы и двухслойных полых частиц  $\text{SiO}_2/\text{ZnO}$  и  $\text{ZnO}/\text{SiO}_2$  преимущественно происходит в видимой части спектра. При облучении светом с интенсивностью 3 э.с.о в течение 16 ч наибольшей фотостойкостью обладают покрытия на основе полых частиц, значения  $\Delta\alpha_s$  которых составляют

0.059 и 0.087, тогда как для покрытий на основе микропорошков оксида цинка  $\Delta\alpha_s = 0.2$ .

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (госзадание № FZMU-2022-0007, 122082600014-6).

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li C., Liang Z., Xiao H., Wu Y., Liu Y. // Mater. Lett. 2010. V. 64. № 18. P. 1972. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2010.06.027>
2. Wang Y., Sunkara B., Zhan J., He J., Miao L., McPherson G.L., John V.T., Spinu L. // Langmuir. 2012. V. 28. P. 13783. <https://doi.org/10.1021/la302841c>
3. Rasmidi R., Duinong M., Chee F.P. // Radiat. Phys. Chem. 2021. V. 184. P. 109455. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109455>
4. Li C., Mikhailov M.M., Neshchimenko V.V. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2014. V. 319. P. 123. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2013.11.007>
5. Zatsepin A.F., Kortov V.S., Biryukov D.Y. // Radiat. Eff. Def. Solids. 2002. V. 157. P. 595. <https://doi.org/10.1080/10420150215765>
6. Nishikawa H., Watanabe E., Ito D., Ohki Y. // J. Non-cryst. Solids. 1994. V. 179. P. 179. [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(94\)90695-5](https://doi.org/10.1016/0022-3093(94)90695-5)
7. Boscaino R., Cannas M., Gelardi F.M., Leone M. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 1996. V. 116. P. 373. [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(96\)00073-0](https://doi.org/10.1016/0168-583X(96)00073-0)



8. *Radtsig R.A.B., Senchenya I.N.* // Russ. Chem. Bull. 1996. V. 45. P. 1849.  
<https://doi.org/10.1007/BF01457762>
9. *Skuja L.* // J. Non-Cryst. Solids. 1998. V. 239. P. 16.  
[https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(98\)00720-0](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(98)00720-0)
10. *Pantelides S.T., Lu Z.-Y., Nicklaw C., Bakos T., Rashkeev S.N., Fleetwood D.M., Schrimpf R.D.* // J. Non-Cryst. Solids. 2008. V. 354. P. 217.  
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2007.08.080>
11. *Erhart P., Albe K., Klein A.* // Phys. Rev. B. 2006. V. 73. P. 205203.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.73.205203>
12. *Oba F., Togo A., Tanaka I., Paier J., Kresse G.* // Phys. Rev. B. 2008. V. 77. P. 245202.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.77.245202>
13. *Lima S.A.M., Sigoli F.A., Jafelicci M.Jr., Davolos M.R.* // Int. J. Inorg. Mater. 2001. V. 3. P. 749.  
[https://doi.org/10.1016/S1466-6049\(01\)00055-1](https://doi.org/10.1016/S1466-6049(01)00055-1)
14. *Hu J., Pan B.C.* // J. Chem. Phys. 2008. V. 129. P. 154706.  
<https://doi.org/10.1063/1.2993166>
15. *Sun Y., Wang H.* // Physica B. 2003. V. 325. P. 157.  
[https://doi.org/10.1016/S0921-4526\(02\)01517-X](https://doi.org/10.1016/S0921-4526(02)01517-X)
16. *Lin B., Fu Z., Jia Y.* // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 79. P. 943.  
<https://doi.org/10.1063/1.1394173>
17. *Дудин А.Н., Юрина В.Ю., Михайлов М.М., Ли Ч., Нещименко В.В.* // Изв. вузов. Физика. 2023. Т. 66. № 7 (788). С. 117.  
<https://doi.org/10.17223/00213411/66/7/14>
18. *Дудин А.Н., Нещименко В.В., Ли Ч.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2022. № 4. С. 70.  
<https://doi.org/10.31857/S1028096022040069>
19. *Kositsyn L.G., Mikhailov M.M., Kuznetsov N.Y., Dvoretiskii M.I.* // Instrum. Experim. Tech. 1985. V. 28. P. 929.
20. ASTM E490-00a Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables. 2019.
21. ASTM E903-96 Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres. 2005.

## Influence of UV and Visible Radiation on Optical Properties of Coatings Based on Two-Layer Hollow Particles of Silicon Dioxide and Zinc Oxide

**D. S. Fedosov<sup>1</sup>, V. V. Neshchimenko<sup>2,\*</sup>, M. M. Mikhailov<sup>1,2</sup>, S. A. Yuryev<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, 634050 Russia*

<sup>2</sup>*Amur State University, Blagoveshchensk, 675000 Russia*

\*e-mail: [v1ta1y@mail.ru](mailto:v1ta1y@mail.ru)

A comparative analysis in situ of diffuse reflection spectra in the range from 200 to 2500 nm and their changes after irradiation of coatings based on polymethylphenylsiloxane resin and pigment powders of two-layer hollow particles ZnO/SiO<sub>2</sub> and SiO<sub>2</sub>/ZnO was carried out. Irradiation was performed with light from a xenon arc lamp simulating the solar radiation spectrum, with an intensity of 3 e.s.i. (equivalent of solar irradiation, 1 e.s.i. = 0.139 W/cm<sup>2</sup>). The photostability of the studied coatings based on two-layer hollow ZnO/SiO<sub>2</sub> and SiO<sub>2</sub>/ZnO particles was estimated relative to coatings based on ZnO polycrystals from an analysis of the difference diffuse reflectance spectra obtained by subtracting the spectra of unirradiated and irradiated samples. It has been found that the intensity of the induced absorption bands in coatings based on ZnO/SiO<sub>2</sub> and SiO<sub>2</sub>/ZnO hollow particles is lower than in coatings based on ZnO microparticles, and the radiation resistance when assessing changes in solar absorptance ( $\Delta\alpha_s$ ) is twice as high. The increase in photostability is probably determined by the different nature of defect accumulation: for bulk microparticles, radiation defects can accumulate inside the grains, while in hollow particles, the accumulation of defects can occur only within the thin shell of the sphere.

**Keywords:** zinc oxide, silicon dioxide, coatings, polymethylphenylsiloxane resin, two-layer hollow particles, diffuse reflectance spectra, photostability.