

УДК 629.7.023.2:535.362

ИЗМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ И РАЗДЕЛЬНОМ ОБЛУЧЕНИИ КВАНТАМИ СОЛНЕЧНОГО СПЕКТРА И ПРОТОНАМИ ПОРОШКА BaSO_4 , МОДИФИЦИРОВАННОГО НАНОЧАСТИЦАМИ SiO_2

© 2023 г. М. М. Михайлов^{а, *}, А. Н. Лапин^а, С. А. Юрьев^{а, **}

^аТомский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
Томск, 634000 Россия

*e-mail: Membrana2010@mail.ru

**e-mail: yusalek@gmail.com

Поступила в редакцию 17.11.2022 г.

После доработки 14.01.2023 г.

Принята к публикации 14.01.2023 г.

Выполнен сравнительный анализ изменений спектров диффузного отражения ρ_λ и интегрального коэффициента поглощения в области 0.2–2.2 мкм после отдельного и последовательного облучения протонами с энергией 5 кэВ и квантами солнечного излучения порошка сульфата бария, модифицированного наночастицами диоксида кремния $m\text{BaSO}_4/n\text{SiO}_2$ с регистрацией спектров после каждого периода облучения в вакууме в области облучения (*in situ*). Интегральный коэффициент поглощения солнечного излучения модифицированного пигмента $m\text{BaSO}_4/n\text{SiO}_2$ до облучения составляет 0.048, что в несколько раз меньше, чем у широко используемого во всех странах пигмента ZnO. Установлено, что коэффициент аддитивности, рассчитанный по результатам последовательного и отдельного облучения порошка $m\text{BaSO}_4/n\text{SiO}_2$ при увеличении флуенса протонов с энергией 5 кэВ уменьшается от 7.5 до 1.052 раз. Оценка изменений коэффициента аддитивности при воздействии спектра заряженных частиц на геостационарной орбите (как одной из наиболее используемых и с наиболее жесткими радиационными условиями), показала, что неаддитивность отдельного и последовательного действия протонов и квантов солнечного излучения на пигмент для терморегулирующих покрытий $m\text{BaSO}_4/n\text{SiO}_2$ при таких параметрах облучения будет сохраняться в течение 1.27 года.

Ключевые слова: сульфат бария, наночастицы, оптические свойства, облучение, кванты солнечного излучения, протоны, аддитивность.

DOI: 10.31857/S102809602310014X, EDN: NWPOIG

ВВЕДЕНИЕ

На материалы внешних поверхностей космических аппаратов в глубоком вакууме отдельно, одновременно или последовательно действуют несколько видов излучений: электроны, протоны, кванты солнечного излучения (КСИ). При полетах к Луне и планетам солнечной системы наиболее повреждающими факторами для материалов внешних поверхностей космических аппаратов являются КСИ и протоны солнечного ветра. При заходе в тень Земли, Луны или других планет действуют, в основном, только протоны солнечного ветра, поэтому получается последовательное действие (КСИ $\rightarrow p^+$).

При наземных испытаниях материалов космических аппаратов, как правило, облучение выполняют отдельно одним из видов излучений, реже — одновременно. Выполненные ранее ис-

следования [1–3] показали, что в изменении свойств и рабочих характеристик материалов наблюдается неаддитивность: сумма изменений свойств и рабочих характеристик при отдельном облучении не всегда равна изменениям при одновременном или последовательном облучении материалов. Поэтому представляют научную значимость и практическую ценность исследования, направленные на изучение аддитивности изменения свойств и рабочих характеристик материалов при отдельном, последовательном и одновременном действии излучений.

Одним из типов материалов внешних поверхностей космических аппаратов являются терморегулирующие покрытия (ТРП), поверхность которых составляет единицы и десятки м². Такие покрытия предназначены для поддержания температуры на заданном уровне за счет отражения КСИ и переизлучения в космическом пространстве теп-

ла, выделяемого при работе приборов и устройств космических аппаратов. В состав одного из типов ТРП класса “оптические солнечные отражатели” входят пигменты (до 80 мас. %) и связующие (до 20 мас. %) [4]. Под действием излучений космического пространства в них образуются фото- и радиационные дефекты, что приводит к появлению полос поглощения и уменьшению отражательной способности ТРП. Поэтому разрабатывают способы увеличения стойкости оптических свойств ТРП. К одному, наиболее эффективному в настоящее время, способу относится модификация пигментов и связующих наночастицами.

Порошки сульфата бария, используемые во многих областях техники [5–10], обладают высокой отражательной способностью в солнечном диапазоне спектра, являются перспективным пигментом для ТРП. В последние годы проводят исследования их оптических свойств и осуществляется модификация наночастицами [11].

Настоящая работа направлена на исследование аддитивности действия излучений на изменение оптических свойств модифицированного порошка BaSO_4 при раздельном облучении протонами (p^+) и последовательном облучении квантами солнечного излучения и протонами ($\text{КСИ} \rightarrow p^+$). Объектом исследования являлся порошок BaSO_4 с частицами размером в несколько мкм, модифицированный наночастицами SiO_2 ($m\text{BaSO}_4/n\text{SiO}_2$). Подобные наночастицы SiO_2 ранее использовали для модификации порошков пигментов оксида цинка [12].

Регистрируемыми параметрами являлись спектры диффузного отражения ρ_λ , измеренные в вакууме в области облучения (*in situ*) и рассчитанный по ним коэффициент поглощения a_s .

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В исследованиях использовали порошок BaSO_4 (квалификация “Extra pure reagent”, производитель Nacal Tesque inc., Япония). В качестве модифицирующей добавки был нанопорошок диоксида кремния (чистота 99.8%, средний размер частиц 10–12 нм, удельная поверхность 180–220 м²/г, производитель ООО “Плазмотерм”, Россия). Концентрация наночастиц выбрана на основании ранее выполненных исследований радиационной стойкости, модифицированных наночастицами порошков BaSO_4 при облучении электронами и составляла 3 мас. % [13].

Нанопорошок SiO_2 растворяли в дистиллированной воде при наложении ультразвуковых волн, в полученный раствор добавляли порошок BaSO_4 и перемешивали в течение 3 ч в магнитной мешалке. Смесь сушили при температуре 150°C, перетирали в агатовой ступке и прогревали в атмосфере 2 ч при температуре 800°C. После охлаждения порошки прессовали в подложки диаметром

24 мм, высотой 2 мм под давлением 1 МПа со временем выдержки 2 мин.

Структуру порошков исследовали с помощью рентгеновского дифрактометра XRD-6100 (Shimadzu, Япония). Спектры диффузного отражения в ИК-диапазоне (400–4000 см⁻¹) регистрировали ИК-Фурье спектрометром Shimadzu IRTracer-100 с приставкой диффузного отражения DRS-8000A.

Облучение образцов в вакууме и регистрацию спектров отражения ρ_λ в области облучения (*in situ*) осуществляли в установке-имитаторе условий космического пространства “Спектр”, позволяющей поддерживать высокий вакуум, имитировать электромагнитное излучение Солнца, создавать потоки электронов с энергией 5–150 кэВ и протонов с энергией 0.5–140.0 кэВ [14]. Облучение осуществляли при $P = 5 \times 10^{-6}$ торр, $T = 303$ К отдельно протонами с энергией 5 кэВ и последовательно: сначала 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 Дж/см²·с), затем протонами ($\text{КСИ} \rightarrow p^+$). Спектры ρ_λ регистрировали в диапазоне 200–2200 нм до облучения образцов и после каждого периода облучения. Интегральный коэффициент поглощения солнечного излучения (a_s) рассчитывали по спектрам диффузного отражения с использованием методики разделения спектра излучения Солнца на равноэнергетические участки – методики Джонсона [15] и согласно международным стандартам [16, 17].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Фазовый состав

Исследования полученных рентгенограмм показали (рис. 1), что модифицированный наночастицами SiO_2 микропорошок BaSO_4 как до облучения, так и после облучения содержит только одну фазу – орторомбический кристаллический сульфат бария. В спектрах после модификации наночастицами, после отдельного облучения протонами и последовательного облучения КСИ и протонами зарегистрированы только линии, соответствующие фазе кристаллического BaSO_4 , дополнительных фаз не обнаружено, существенных структурных изменений не произошло.

ИК-спектры поглощения

На рис. 2 приведены ИК-спектры поглощения порошка $m\text{BaSO}_4$, модифицированного 3 мас. % наночастиц SiO_2 , до и после последовательного облучения $\text{КСИ} \rightarrow p^+$. Для корректного сравнения интенсивностей полос ИК-спектры нормировали по полосе максимальной интенсивности.

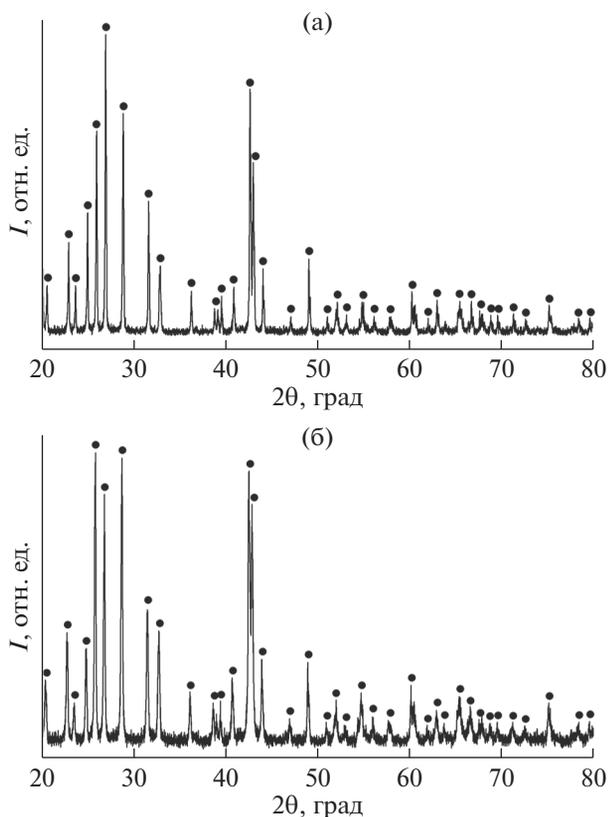


Рис. 1. Рентгенограммы порошка $m\text{BaSO}_4/n\text{SiO}_2$ до облучения (а) и после последовательного облучения $\text{КСИ} \rightarrow p^+$ (б).

Наиболее интенсивными являются полосы, которые соответствуют различным типам колебаний SO_4^{2-} -центров [18–22]: полосы при 610 и 642 см^{-1} – внеплоскостной изгибной вибрации; узкая полоса при 985 см^{-1} – симметричным растягивающим колебаниям; 3 наиболее интенсивные полосы в области 1080–1200 см^{-1} – симметричным и ассиметричным растяжениям и изгибам. Обертоны и сочетание растяжения и изгиба полос, соответствующих колебаниям серосодержащего кислорода, приводят к образованию несимметричной широкой полосы с максимумом при 2060 см^{-1} . Малоинтенсивная двойная полоса при 2325–2360 см^{-1} относится к колебаниям диоксида углерода, примеси из атмосферы, и обусловлена инструментальной особенностью ИК-спектрометра Shimadzu IRTracer100. Полосы с максимумами при 476, 980, и 1400 см^{-1} характерны для диоксида кремния, который использован при модификации порошка $m\text{BaSO}_4$ [23, 24]: колебания мостикового кислорода Si–O–Si дают максимумы поглощения при 460, 810 и 1110 см^{-1} , валентные симметричные колебания Si–Si – при 615 см^{-1} , скручивающие колебания SiO_2 – при 805 см^{-1} . Модификация так же приводит к увеличению количества дефектов на поверхности

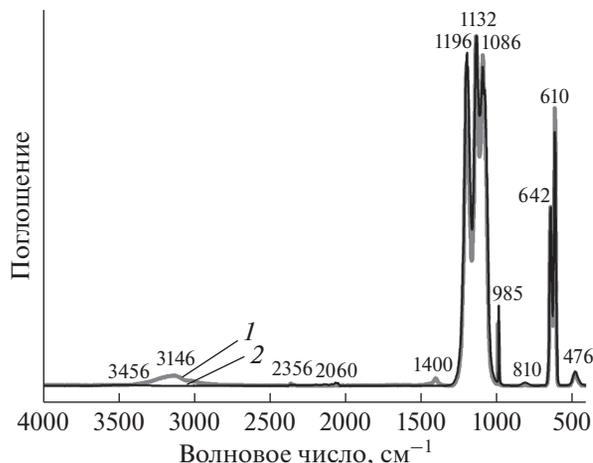


Рис. 2. ИК-спектры поглощения порошка $m\text{BaSO}_4/n\text{SiO}_2$ до (1) и после (2) последовательного облучения $\text{КСИ} \rightarrow p^+$.

порошка $m\text{BaSO}_4/n\text{SiO}_2$, благодаря чему возникает дополнительная широкая полоса поглощения ОН-группами при 3146 см^{-1} [22].

При последовательном облучении $\text{КСИ} \rightarrow p^+$ в ИК-спектрах уменьшается интенсивность полос при 1086, 1400 и 3146 см^{-1} , что обусловлено уменьшением концентрации диоксида кремния и ОН-групп на поверхности порошка $m\text{BaSO}_4/n\text{SiO}_2$. Процессом уменьшения концентрации SiO_2 на поверхности определяется и уменьшение колебаний Si–Si и интенсивности узкой полосы при 610 см^{-1} . Увеличение интенсивности полос при 985 и 1196 см^{-1} может происходить из-за увеличения концентрации SO_4^{2-} -центров, образуемых при разложении BaSO_4 во время облучения.

Спектры диффузного отражения в области 200–2200 нм

Коэффициент отражения порошка BaSO_4 , модифицированного наночастицами диоксида кремния в области спектра от 400 до 2200 нм очень высокий, достигает 90–95% (рис. 3). Отражательная способность незначительно уменьшается с ростом длины волны. На фоне непрерывного спектра зарегистрированы малоинтенсивные полосы поглощения вблизи 1400 и 1900 нм. Эти полосы ранее регистрировали в спектрах поглощения жидкостей [23, 24] и оксидных порошков [25–27]. Они определяются энергией различных типов колебаний, сорбированных на поверхности порошка ОН-групп: растягивающих-полоса при 1400 нм, деформационных-полоса при 1900 нм.

После облучения КСИ и протонами коэффициент отражения уменьшается. Уменьшение происходит в области от 200 до 1400 нм. Основные изменения происходят в УФ- и видимой областях

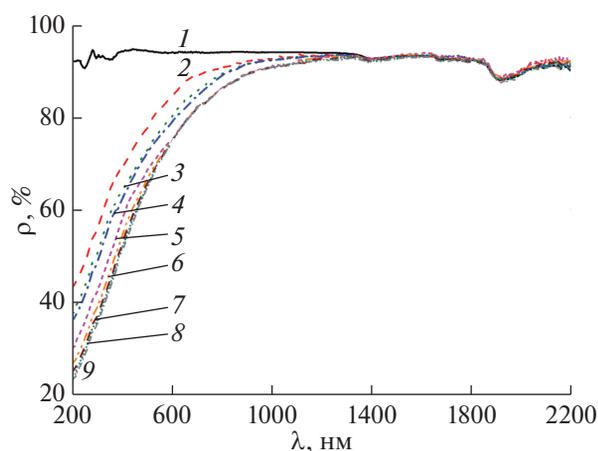


Рис. 3. Спектры ρ_λ порошка $m\text{BaSO}_4/n\text{SiO}_2$ до (1) и после облучения сначала КСИ в течение: 2 (2), 4 (3), 6 ч (4). Последовательное облучение протонами с энергией 5 кэВ флуенсом: 0.5×10^{16} (5); 1 (6); 2 (7); 3 (8) и $4 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (9).

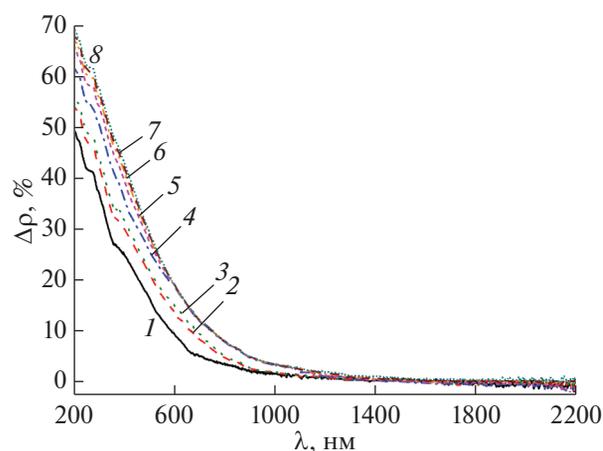


Рис. 4. Спектры $\Delta\rho_\lambda$ порошка $m\text{BaSO}_4/n\text{SiO}_2$ после облучения сначала КСИ в течение: 2 (1), 4 (2), 6 ч (3). Последовательное облучение протонами с энергией 5 кэВ флуенсом: 0.5×10^{16} (4); 1 (5); 2 (6); 3 (7) и $4 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (8).

спектра. В области около 200 нм коэффициент отражения уменьшается от 92 до 24%. С увеличением длины волны изменения становятся менее резкими, в области свыше 1200 нм изменения коэффициента отражения практически отсутствуют (не более 2–3%).

В разностных спектрах поглощения ($\Delta\rho_\lambda$, получаемых вычитанием спектров после облучения ($\rho_{\lambda\text{ф}}$) из спектра до облучения ($\rho_{\lambda 0}$), и являющихся спектрами поглощения, наведенного облучением, зарегистрирована полоса, максимум которой расположен в области $\lambda < 200$ нм (рис. 4). С увеличением времени облучения КСИ интенсивность этой полосы увеличивается, полоса расширяется в область увеличения длины волны. При последующем облучении протонами качественных изменений этой полосы поглощения не происходит: полоса все также увеличивается по интенсивности и по ширине. При наибольшем флуенсе протонов, равном $4 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$, значение $\Delta\rho$ в максимуме этой полосы поглощения достигает 70%. В области свыше 1300 нм изменений коэффициента отражения при всех значениях времени облучения КСИ и флуенса протонов практически не происходит ($1.0\% > \Delta\rho_\lambda > 2.5\%$).

Ранее было показано [26], что при облучении исходного или модифицированных порошков BaSO_4 происходит образование дефектов анионной подрешетки SO_4^- , SO_3^- , SO_2^- и SO^- . Полосы поглощения этих дефектов расположены в УФ- и видимой областях спектра. Поэтому установленное уменьшение отражательной способности в этих областях при облучении порошка $m\text{BaSO}_4/n\text{SiO}_2$ КСИ и протонами определяется образованием этих дефектов и появлением соответствующих полос поглощения.

Интегральный коэффициент поглощения

Интегральный коэффициент поглощения солнечного излучения a_s порошка $m\text{BaSO}_4/n\text{SiO}_2$ до облучения, рассчитанный по спектру рис. 3, равен 0.048. Эта величина в несколько раз меньше по сравнению со значениями для наиболее используемого в ТРП порошка ZnO [28, 29]. Такое свойство пигментов $m\text{BaSO}_4/n\text{SiO}_2$ является значимым в практическом отношении, поскольку величина a_s определяет площадь радиаторов терморегулирования, их вес и стоимость.

Расчеты изменений интегрального коэффициента поглощения a_s по приведенным спектрам $\Delta\rho_{\lambda\text{м}}$ показывают (рис. 5), что действие КСИ в течение 6 ч приводит к увеличению коэффициента поглощения ($\Delta a_s = 0.123$). Последующее облучение протонами ($0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0$) $\times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ приводит к дальнейшему увеличению Δa_s до значения 0.175. Качественно закономерности увеличения коэффициента поглощения при воздействии КСИ и протонами близки.

Рассчитаны значения Δa_s отдельно в двух областях этого спектра: $\lambda < 800$ нм и $\lambda > 800$ нм. Первая область характеризуется наличием полосы поглощения с большими изменениями Δa_s , вторая — незначительными изменениями. Расчеты показали качественно такие же зависимости от времени действия КСИ и флуенса протонов, как и для всего спектрального диапазона от 200 до 2200 нм.

Для исследования аддитивности отдельного и последовательного облучения КСИ и протонами проводили сравнение значений Δa_s от отдельного действия протонов ($\Delta a_s^{\text{отд}}$) и от их действия после облучения КСИ ($\Delta a_s^{\text{посл}}$) на этот порошок. Для этого дополнительно облучали протонами другой

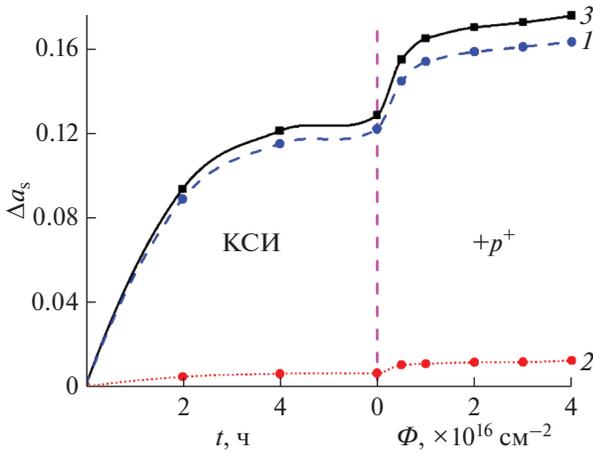


Рис. 5. Зависимость изменений коэффициента поглощения Δa_s порошка $mBaSO_4/nSiO_2$ от времени облучения КСИ (слева) в области спектра $\lambda < 800$ нм (1), $\lambda > 800$ нм (2) и во всем диапазоне $200 < \lambda < 2200$ (3) при последовательном облучении КСИ $\rightarrow p^+$ (справа).

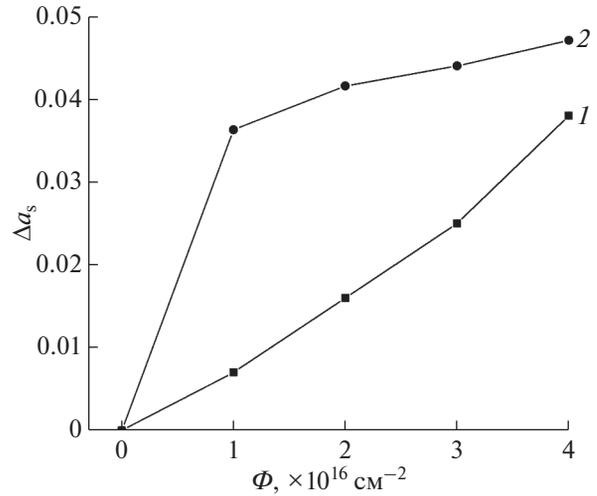


Рис. 6. Изменение коэффициента поглощения Δa_s порошка $mBaSO_4/nSiO_2$ при отдельном облучении протонами (1) и при облучении протонами после действия КСИ (2).

образец порошка $mBaSO_4/nSiO_2$ в таких же условиях, как и при последовательном облучении после КСИ. Результаты сравнения показывают (рис. 6), что в пределах флуенса электронов $\Phi \leq 4 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ изменения коэффициента поглощения при облучении после действия ЭМИ $\Delta a_s^{\text{посл}}$ значительно большие по сравнению с изменениями при отдельном облучении протонами.

Коэффициент аддитивности (K), определяемый отношением значений $\Delta a_s^{\text{посл}} / \Delta a_s^{\text{отд}}$ зависит от флуенса электронов: с увеличением флуенса он уменьшается (рис. 7). Полученная зависимость описывается двумя составляющими – экспонентой и постоянным компонентом:

$$K = (A_0 - A_1) \exp(B\Phi) + A_1 = (11.720 - 1.052) \exp(-9.545 \times 10^{-17} \Phi) + 1.052. \quad (1)$$

При флуенсе протонов $\Phi \sim 8 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ коэффициент аддитивности принимает минимальное значение, равное 1.052. Облучение протонами при больших значениях флуенса отдельное или после действия КСИ приводит к практически одинаковым изменениям коэффициента поглощения.

Такое значение флуенса протонов с энергией 5 кэВ по своему действию на пигмент $mBaSO_4/nSiO_2$ соответствует действию всего спектра протонов на орбите в течение некоторого времени. Оценку этого времени действия спектра протонов на орбите можно осуществить с применением методики замены спектров заряженных частиц на орбите моноэнергетическими пучками при наземных испытаниях материалов космических аппаратов вообще и ТРП в частности [30].

Методика основана на предположении равенства значений Δa_s от действия моноэнергетического пучка и спектра заряженных частиц (протонов или электронов) на орбите:

$$\Delta a_s(E_0) = \Delta a_s \int_0^\infty (d\phi/dE) dE, \quad (2)$$

где E_0 – энергия частиц при наземных испытаниях, интеграл от $d\phi/dE$ – спектр этих частиц на орбите.

В результате преобразований с использованием степенной зависимости $\Delta a_s = f(\Phi)$ получено вы-

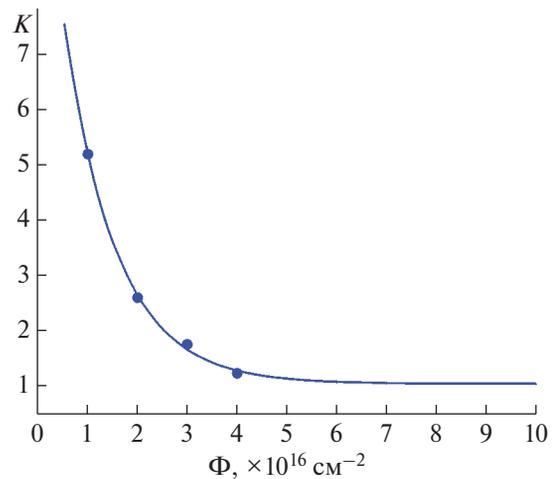


Рис. 7. Зависимость коэффициента аддитивности $\Delta a_s^{\text{посл}} / \Delta a_s^{\text{отд}}$ при облучении порошка $mBaSO_4/nSiO_2$ отдельно протонами и протонами после предварительного действия КСИ от флуенса протонов. Точки обозначены экспериментальные данные, линией – результат расчета.

ражение для определения эквивалентного потока частиц

$$\Phi_{\text{экв}}(E_0) = \left[\int_0^{\infty} (E^{\gamma/\beta} d\varphi/dE) dE \right] / E_0^{\gamma/\beta}, \quad (3)$$

где $\Phi_{\text{экв}}$ — эквивалентный поток, при котором Δa_s при облучении покрытия моноэнергетическим пучком частиц равно Δa_s при облучении частицами с дифференциальным спектром $d\varphi/dE$. Подынтегральная функция в (3) характеризует вклад частиц различных энергий в общее повреждение покрытия, отражающееся на значении Δa_s .

Для определения значения $\Phi_{\text{экв}}$ необходимы результаты дополнительных экспериментальных исследований зависимости значений Δa_s от энергии частиц в диапазоне из спектра на орбите. Оценку $\Phi_{\text{экв}}$ осуществляли с использованием ранее полученных значений для различных ТРП на геостационарной орбите [31]. Для энергии протонов 5 кэВ значение $\Phi_{\text{экв}}$ для данного пигмента $m\text{BaSO}_4/n\text{SiO}_2$ приняли равным $2 \times 10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Тогда для $\Phi = 8 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ получаем время облучения на этой орбите 1.27 года. Это означает, что полученные в наземных испытаниях значения Δa_s от отдельного действия протонов будут отличаться от значений, полученных на геостационарной орбите при их последовательном действии после действия КСИ в течение 1.27 года. При большем времени пребывания на этой орбите изменения коэффициента поглощения будут одинаковы.

Выполненные расчеты не направлены на получение точных значений коэффициента аддитивности в этих двух случаях последовательного и раздельного облучения, модифицированного наночастицами пигмента $m\text{BaSO}_4$. В этом примере время облучения КСИ составило всего 6 ч с интенсивностью 3 э. с. о., что эквивалентно 18 ч облучения на орбите. Но даже при таком столь малом времени предварительного облучения значение Δa_s при последующем облучении протонами более чем в 5 раз превышает его величину при отдельном облучении протонами. И только через 1.27 года действия всего спектра протонов на геостационарной орбите эти значения сравниваются. Поскольку максимальное время облучения при наземных испытаниях ТРП, как правило, не превышает 10–15 сут, то неаддитивность будет проявляться в полной мере. И для точного определения деградации оптических свойств ТРП на орбите, как при отдельном действии протонов, так и при одновременном их действии с другими видами излучений, необходимо учитывать наличие последовательного действия этих видов излучений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования состава и оптических свойств пигмента BaSO_4 после модифика-

ции наночастицами SiO_2 и облучения протонами с энергией 5 кэВ отдельно и после действия излучением, имитирующим электромагнитное излучение Солнца, позволяют сделать следующие выводы.

Фазовый состав пигмента BaSO_4 после модификации наночастицами SiO_2 в количестве 5 мас. % не изменяется. В ИК-спектрах поглощения модифицированного и облученного пигмента $m\text{BaSO}_4/n\text{SiO}_2$ помимо полос, свойственных BaSO_4 , появляются дополнительные полосы, характерные для диоксида кремния: соответствующие колебаниям Si—O—Si, Si—Si и дефектам SiO_2 , а также увеличивается интенсивность полос, соответствующая ОН-группам. Коэффициент отражения после облучения КСИ и протонами исходного и модифицированных порошков уменьшается в УФ- и видимой областях спектра. Максимальное его изменение достигает 70%. В ближней ИК-области ($\lambda > 1000 \text{ нм}$) изменения незначительные, не превышают 3%. Интегральный коэффициент поглощения солнечного излучения модифицированного пигмента $m\text{BaSO}_4/n\text{SiO}_2$ до облучения составляет 0.048, что в несколько раз меньше, чем у широко используемого во всех странах пигмента ZnO . Облучение модифицированного пигмента $m\text{BaSO}_4/n\text{SiO}_2$ флуенсом протонов с энергией 5 кэВ после действия квантов солнечного спектра в течение 6 ч с интенсивностью, в 3 раза превышающей солнечную, приводит к изменению коэффициента поглощения a_s на 0.052, а отдельное облучение протонами — на величину 0.037. Коэффициент аддитивности, рассчитанный по результатам последовательного и раздельного облучения, порошка $m\text{BaSO}_4/n\text{SiO}_2$ при увеличении флуенса протонов уменьшается от 7.5 до 1.052 раз. Рассчитанное с использованием методики замены спектра протонов моноэнергетическими пучками при наземных испытаниях время пребывания порошка $m\text{BaSO}_4/n\text{SiO}_2$ на геостационарной орбите, в течение которого будет сохраняться неаддитивность раздельного и последовательного действия протонов и КСИ на пигмент для ТРП $m\text{BaSO}_4/n\text{SiO}_2$ составляет 1.27 года.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ, Госзадание FEWM-2023-0012.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Groh K.K., Dever J.A. Degradation of Spacecraft Materials in Handbook of Environmental Degradation of Materials (Third Edition) // Ed. Andrew W, 2018. 684 p.
2. Awang M. // Key Engineering Materials. 2017. V. 740. P. 41.
3. Meghwal A., Anupam A., Murty B.S., Berndt C.C., Kotkata R.S., Ming A.S. // J. Thermal Spray Technol. 2020. V. 29. P. 857.

4. Thermal Control Coatings. Nonmetallic Materials (2022) JSC Kompozit. <https://kompozit-mv.ru/index.php/nemetallicheskie-materialy.html>.
5. Cao R., Qin Z., Yu X. et al. // Int. J. for Light and Electron Optics. 2016. V. 127. № 3. P. 1126.
6. Annalakshmi O., Jose M.T., Madhusoodanan U. // Radiat. Prot. Dosimetry. 2012. V. 150 (2). P. 127.
7. Bahl S., Lochab S.P., Pandey A., Kumar V., Aleynikov V.E., Molokanov A.G., Kumar P. // J. Luminescence. 2014. V. 149. P. 176.
8. Патент на изобретение. 2524384 (РФ) Терморегулирующее покрытие / ОАО Композит. Странолова В.Н., Куселева Л.В., Токарь С.В., Юртов Е.В., Мурадова А.Г. // Б.И. 2014. № 21.
9. Siddiqi K.S., Husen A. // Nanoscale Res. Lett. 2017. V. 12. P. 92.
10. Cao R., Qin Z., Yu X., Wu D., Zheng G., Li W. // Optik – Int. J. Light Electron Opt. 2016. V. 127. Iss. 3. P. 1126.
11. Mikhailov M.M. Optical properties and radiation stability of Metal Oxide Powders modified with Nanoparticles. Volume 6. Publishing House of Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, 2019. 312 p.
12. Li C., Liang Z., Xiao H., Wu Y., Liu Y. // Mater. Lett. 2010. V. 64. P. 1972.
13. Mikhailov M.M., Yuryev S.A., Lapin A.N. // Acta Astronautica. 2019. V. 165. P. 191.
14. Kositsyn L.G., Mikhailov M.M., Kuznetsov N.Y., Dvoretzkii M.I. // Instrum. Exp. Tech. 1985. V. 28. P. 929.
15. Johnson F.S. // J. Meteorological. 1954. V. 11. № 6. P. 431.
16. ASTM E490-00a. Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables (2005) ASTM Int. PA, USA. <https://www.astm.org/e0490-00ar19.html>.
17. ASTM E903-96. Standard Test Method for Solar Absorbance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres (2005) ASTM Int. PA, USA. <https://www.astm.org/e0903-96.html>.
18. Zhang M., Zhang B., Li X., Yinb Z., Guo X. // Appl. Surf. Sci. 2011. V. 258. P. 24.
19. Prameena B., Anbalagan G., Sangeetha V., Gunasekaran S., Ramkumaar G.R. // Int. J. Chem. Tech. Res. 2013. V. 5. № 1. P. 220.
20. Manam J., Das S. // Indian J. Pure Appl. Phys. 2009. V. 47. № 6. P. 435.
21. Накамото К. ИК-спектры и спектры КР неорганических и координационных соединений. Пер. с англ. М.: Мир, 1991. 536 с.
22. Окабе Х. Фотохимия малых молекул. М.: Мир, 1981. 504 с.
23. Wilson R.H., Nadeau K.P., Jaworski F.B., Tromberg B.J., Durkin A.J. // J. Biomed. Opt. 2015. V. 20 (3). P. 030901.
24. Cooper C.D., Mustard J.F. // Icarus. 1999. V. 142. I. 2. P. 557.
25. Михайлов М.М., Дворецкий М.И. // Известия вузов. Физика. 1988. № 7. С. 86.
26. Mikhailov M.M., Yuryev S.A., Lapin A.N., Lovitskiy A.A. // Dyes and Pigments. 2019. V. 163. P. 420–424.
27. Нецименко В.В. Исследование структуры, свойств и радиационной стойкости оксидных порошков, модифицированных: Дис. ... д-ра физико-математических наук: 01.04.07. Томск: ИФПМ, 2017. 325 с.
28. Chen H., Li P., Zhou H., Zhang W., Cong L., Ma J.G. // Mater. Res. Bull. 2021. V. 146. P. 111572.
29. Brown R.R., Fogdall L.B., Cannaday S.S. // Prog. Astronautic: Thermal Desing Principles of Spacecraft and Entru. 1969. V. 21. P. 697.
30. Mikhailov M.M. // J. Adv. Mater. 1995. V. 2. № 3. P. 200.
31. Михайлов М.М. Спектры отражения терморегулирующих покрытий космических аппаратов. Томск: Изд-во Томского университета. 2007. 314 с.

Changes in the Optical Properties under Sequential and Separate Irradiation with Solar Spectrum and Protons of a BaSO₄ Powder Modified with SiO₂ Nanoparticles

M. M. Mikhailov¹, *, A. N. Lapin¹, S. A. Yuryev¹, **

¹Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, 634000 Russia

*e-mail: Membrana2010@mail.ru

**e-mail: yusalek@gmail.com

A comparative analysis of changes in the diffuse reflectance spectra ρ_λ and the integral absorption coefficient in the region of 0.2–2.2 μm after separate and sequential irradiation with 5 keV protons and solar radiation quanta of a barium sulfate powder modified with silicon dioxide nanoparticles $m\text{BaSO}_4/n\text{SiO}_2$ was performed with registration of the spectra after each period of irradiation in vacuum in the area of irradiation (*in situ*). The integrated solar radiation absorption coefficient of the modified $m\text{BaSO}_4/n\text{SiO}_2$ pigment before irradiation is 0.048, which is several times lower than that of the ZnO pigment widely used in all countries. It has been found that the additivity coefficient calculated from the results of sequential and separate irradiation of the $m\text{BaSO}_4/n\text{SiO}_2$ powder decreases from 7.5 to 1.052 times with an increase in the fluence of protons with an energy of 5 keV. An assessment of the changes in the additivity coefficient under the influence of the spectrum of charged particles in the geostationary orbit (as one of the most used and with harsh radiation conditions) showed that the non-additivity of the separate and sequential action of protons and solar radiation quanta on the pigment for thermal control coatings $m\text{BaSO}_4/n\text{SiO}_2$ at such irradiation parameters will be kept for 1.27 years.

Keywords: barium sulfate, nanoparticles, optical properties, irradiation, solar radiation quanta, protons, additivity.