

ИССЛЕДОВАНИЕ СОВМЕСТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПОТОКОВ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ, ПЛАЗМЫ И КОРОТКОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПРИ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИИ В ВАКУУМНЫХ УСЛОВИЯХ

© 2008 г. Е. В. Калашников, канд. физ.-мат. наук; С. Н. Рачкулик

НИИ комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем, г. Сосновый Бор, Ленинградская обл.

E-mail: evk@sbor.net

Представлены результаты экспериментального исследования деградации серийного оптического покрытия из фторида свинца на подложке из халькогенидного стекла ИКС-25 после совместного воздействия высокоскоростных потоков твердых микрочастиц (углеродсодержащих микрочастиц размером 0,1–200 мкм, со скоростью 0,1–30 км/с и плотностью потока до $10^4 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$), релаксирующей плазмы (с концентрацией атомов и ионов кислорода, углерода, водорода, азота и их соединений около 10^{14} – 10^{17} см^{-3} , плотностью потока до $10^{23} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и скоростью потока до 10 км/с), коротковолнового излучения (с экспозицией 0,1 Дж/см² в вакуумном ультрафиолетовом диапазоне длин волн 90–180 нм и 1,2 Дж/см² в ультрафиолетовом с длинами волн 180–400 нм) в вакуумных условиях (с откачкой до 10^{-7} – 10^{-5} мм рт. ст.) при термоциклировании (в температурном диапазоне –20...+160 °С). Дана оценка возможности физического моделирования описанными методами воздействия на оптические материалы основных повреждающих факторов на низких околоземных орбитах.

Коды OCIS: 350.1850, 350.5400.

Поступила в редакцию 20.05.2008.

Введение

В оптической аппаратуре различного назначения (наблюдательной, астронавигационной, фотографической и др.), работающей в космическом пространстве, как внутри летательного аппарата, так и в открытом космосе широко используются различные оптические материалы и покрытия, а также клеи для склейки оптических деталей. Первостепенное значение для обеспечения работоспособности оптической аппаратуры, особенно при длительном нахождении в космосе и в зонах с повышенной радиацией, имеет знание стойкости этой группы материалов к воздействию различных факторов окружающей среды.

С 80-х годов систематические исследования стойкости оптических покрытий и клеев проводились в ГОИ им. С.И. Вавилова совместно с Институтом атомной энергии им. С.В. Курчатова АН СССР, Институтом ядерной физики МГУ и рядом других организаций с использованием различных источников ионизирующей радиации. Исследовались оптические покрытия различного назначения: просветляющие, отражающие, светоделительные, узкополосные фильтры, токопроводящие, защитные, светопоглощающие, а также оптические клеи.

В этих исследованиях, в отличие от натурных испытаний на возвращаемых объектах искусственных спутников Земли, не всегда учитывалось совместное воздействие основных повреждающих фак-

торов космического пространства (ФКП) на орбите космического аппарата (КА) с оптико-электронной аппаратурой (ОЭА), хотя результат воздействия такого характера может быть очень значительным. В частности, солнечное излучение, рассеиваемое на частицах собственной атмосферы КА, попадая в поле зрения ОЭА, приводит к существенным фоновым помехам. Циклическое действие фотонного излучения со спектральным составом излучения заатмосферного Солнца в совокупности с циклическим действием температуры (от –190 °С до +125 °С) на открытую поверхность КА, содержащую, как правило, теплозащитные материалы обшивки, приводит к значительной эрозии материалов [1] и, вследствие этого, к воздействию продуктов эрозии на оптику иллюминаторов и входных окон аппаратуры. При этом солнечное излучение, содержащее составляющие ультрафиолетового (УФ) и вакуумного УФ (ВУФ) излучения, поражает сравнительно тонкий слой материала (до 20 мкм) и поверхность после экспозиции имеет морфологическую структуру, близкую к структуре после травления в плазменных условиях высокочастотного разряда. Одним из следствий такого воздействия является возникновение электронной и ионной эмиссии с облучаемых поверхностей, приводящей к формированию плазменной оболочки, окружающей аппарат, и к электризации поверхностей КА. Все эти факторы создают фоновые засветки ОЭА, воздействуют на внешние покрытия оптических элементов продук-

тов плазменной оболочки, а это, в свою очередь, приводит к осаждению на оптику пылевидных структур, разрушению просветляющих и защитных покрытий и другим физическим эффектам.

В научно-технической литературе [2–4] результаты исследований, полученные как в ходе наземных испытаний, так и во время полетов космических аппаратов, показывают, что основными повреждающими факторами околоземного космического пространства (ОКП), влияющими на физико-механические свойства оптических материалов, являются вакуум, ВУФ, УФ и корпускулярное излучение, термоциклирование, атомарный кислород, потоки микрометеороидов и космический мусор, характер воздействия которых представлен в таблице.

Отдельную группу составляют оптические материалы для ИК областей спектра, используемые в ОЭА. Это бескислородные стекла, германий, кремний, сапфир, соединения индия, теллура и некоторые другие материалы. Оптические фильтры и входные окна из данных материалов не пропускают свет вплоть до 1,5–3 мкм, поэтому при воздействии широкополосного излучения Солнца и искусственных взрывных источников света они сильно разогреваются. При этом свет практически не попадает на фотоприемные устройства и концентрируется на входной оптике. Ранее [5] для окон из ряда материалов были определены пороги стойкости, выше которых начиналось их повреждение. В частности, для окон из непросветленного германия порог стой-

кости, выше которого начинается растрескивание образца, составляет 315 Дж/см², для покрытий SiO₂, ZnS – около 420 Дж/см². При импульсном воздействии широкополосного излучения на данные материалы обнаружена зависимость коэффициента пропускания образцов от плотности энергии падающего светового потока. Например, после облучения импульсом длительностью порядка 1 мс с экспозицией 150 Дж/см² коэффициенты пропускания в области длин волн от 3 до 25 мкм просветляющих покрытий типа Si₃N₄ на подложке из германия и ZrO₂ на подложке из кремния уменьшаются на 8–20%, хотя характер спектральной зависимости коэффициента пропускания при этом не изменяется. Для сравнения следует отметить, что измеренный уровень лучевой лазерной прочности просветляющих серийных покрытий ZrO₂, по данным [6], еще ниже и составляет 50 Дж/см² на длине волны 1,06 мкм в многомодовом режиме работы лазера при длительности импульса 50 нс и диаметре зоны облучения 0,7 мм с частотой повторения вспышек не менее 1 вспышки в минуту.

В данной работе проведены экспериментальные исследования характера изменений морфологии поверхности и спектрального пропускания оптического просветляющего покрытия из фторида свинца на подложке из халькогенидного стекла ИКС-25 в ходе комплексных испытаний в лабораторных условиях. Проведена оценка возможности использования разработанных нами ранее экспериментальных методов для моделирования совместного воз-

Характер воздействия основных повреждающих факторов космического пространства на оптические материалы

ФКП	Номинальные пределы изменения параметров фактора	Характер основного воздействия на материалы
Вакуум	Давление 10 ⁻³ –10 ⁻¹² Па	Дегазация, удаление влаги и растворителей, приводящие к изменению размеров и механических свойств элементов конструкции
ВУФ/УФ излучение Солнца	Длина волны 100–400 нм Яркость 3×10 ⁻⁴ –0,14 Вт/см ² ср	Деградация защитных покрытий, помутнение клеев, уменьшение предела прочности на разрыв
Микрометеоритные потоки и мелкодисперсный мусор	Размеры частиц менее 1мм Плотности потока 10 ⁻⁵ –10 ⁰ м ⁻² с ⁻¹ Скорости частиц 0,1–72 км/с	Эрозия материала корпуса, теплозащиты, металлизация участков полупроводниковых и диэлектрических материалов, пробой защитных покрытий
Потоки электронов	Энергия частиц 10 кэВ–4 МэВ Плотность потока 10 ⁸ м ⁻² с ⁻¹	Повреждение поверхности и глубинных слоев материалов, электризация поверхностей КА
Потоки протонов	Энергия частиц 10 кэВ–4 МэВ Плотность потока 10 ⁸ м ⁻² с ⁻¹	Деградация покрытий и поверхности композиционных материалов
Атомарный кислород	Энергия частиц 5 эВ Плотность потока до 10 ¹⁶ см ⁻² с ⁻¹ Скорость 0,1–10 км/с	Разрушение и вытравливание тонких полимерных пленок, эрозия полимерных композиционных материалов
Термоциклирование	Изменение температуры материала –190 °С ...+125 °С	Образование микротрещин, коробление, повреждение критических поверхностей

действия на оптические материалы основных повреждающих факторов космического пространства на низких околоземных орбитах, к которым относятся в первую очередь коротковолновое излучение Солнца, потоки микрометеороидов и мелкодисперсный мусор, а также атомарный кислород в набегающем потоке ионосферной плазмы.

Экспериментальная установка и методика испытаний

При создании экспериментальной установки для моделирования условий на орбите в наземных условиях акцент был сделан на комплексный характер воздействия ФКП на материалы. По этой причине экспериментальная установка построена на основе представлений о воздействии каждого фактора в отдельности и в комплексе с другими, об оптических свойствах ОКП, а также о технологических требованиях к материалам.

В состав лабораторно-стендового комплекса входят вакуумные камеры объемом 0,05 и 1,0 м³ с откачкой до 10⁻⁷–10⁻⁵ мм рт. ст. (1,3×10⁻⁵–1,3×10⁻³ Па) и опытные образцы имитаторов факторов космического пространства для проведения ускоренных испытаний и исследований, в том числе:

– источники коротковолнового излучения с яркостью 2×10⁻³–2 Вт/см² ср нм для ВУФ-диапазона (90–180 нм) и с яркостью 2–20 Вт/см² ср нм для УФ-диапазона (180–400 нм) на основе импульсного струйного диафрагменного разряда в вакууме (источник ПОТОК-ВУФ/СДР) [7] и тлеющего разряда в водороде, возбуждаемого в водоохлаждаемом кварцевом капилляре (источник ПВИ-02), с плотностью мощности около 3×10⁻³ Вт/см² для ВУФ-диапазона (115–130 нм);

– источник многокомпонентной плазмы с концентрацией атомов и ионов кислорода, углерода, водорода, азота и их соединений около 10¹⁴–10¹⁷ см⁻³, плотностью потока до 10²³ см⁻²с⁻¹ и скоростью потока до 10 км/с на основе релаксирующей эрозионной плазмы импульсного струйного диафрагменного разряда в вакууме (источник ПОТОК-ЭП/СДР) [8];

– источник потоков углеродсодержащих микрочастиц (размером 2r = 0,1–200 мкм со скоростью V = 0,1–30 км/с и плотностью потока до 10⁴ см⁻²с⁻¹) на основе импульсного струйного диафрагменного разряда в вакууме в магнитогазодинамическом режиме (источник ПОТОК-МЧ/СДР) [9].

Системы криогенного обеспечения позволяли осуществлять термоциклирование образцов материалов в температурном диапазоне 300–20 К, а система подогрева в вакуумных условиях – в температурном диапазоне 300–480 К.

Диагностическое оборудование позволяло определять как параметры самих источников потоков излучения, плазмы и микрочастиц [10–12], так и проводить количественные спектральные измерения приращения оптической плотности, коэффициентов пропускания, коэффициентов отражения и люминесценции исследуемых материалов в ВУФ, УФ, видимой и ИК областях спектра [13].

В качестве объекта исследования нами был выбран один из вариантов наружного элемента оптической системы из бескислородного стекла ИКС-25 с просветляющим покрытием из двухфтористого свинца. Технология нанесения покрытия соответствовала типовой технологии исполнения просветляющего покрытия В.030 по ОСТЗ-1901-95.

Для проведения экспериментов были изготовлены образцы диаметром 20 мм и толщиной 3 мм. Спектры пропускания образцов в диапазоне от 2,0 до 12 мкм до и после испытаний были получены на фурье-спектрофотометре ФСМ-1201. Микрофотографии и интерферограммы фрагментов поверхности покрытия образцов с увеличением 290× были получены на микроинтерферометре МИИ-4.

Для проведения исследований была разработана методика испытаний с совместным использованием новых методов генерации потоков мелкодисперсных частиц, плазмы и коротковолнового излучения на основе струйного диафрагменного разряда в вакууме. При исследовании характера и степени совместного повреждающего воздействия одна часть образцов подвергалась одновременно

– импульсному облучению в ВУФ (0,1 Дж/см²), УФ (1,2 Дж/см²) и видимой (11,0 Дж/см²) областях спектра от источника излучения ПОТОК-ВУФ/СДР в вакуумных условиях;

– воздействию высокоскоростного потока релаксирующей плазмы (около 10²¹ частиц/см²), содержащей ионы и атомы кислорода, водорода и углерода, от источника плазмы ПОТОК-ЭП/СДР в вакуумных условиях;

– воздействию высокоскоростного потока твердых микрочастиц (около 10² частиц/см²) с использованием источника микрочастиц ПОТОК-МЧ/СДР в вакуумных условиях;

– термоциклированию в диапазоне 20–90 °С в вакуумных условиях;

– выдержке в вакуумных условиях с разрежением около 3×10⁻⁶ мм рт. ст. в течение 240 ч.

Затем в ходе испытаний другая часть образцов подвергалась одновременному воздействию 4, 3 и 2-х факторов.

И, наконец, третья часть образцов была испытана в условиях раздельного воздействия указанных выше факторов в вакуумных условиях.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Для всех образцов, используемых при одновременном воздействии пяти факторов, в результате произошло полное разрушение покрытий с появлением “островкового” характера поверхностного рельефа и кратеров различных формы и размера, с изменением цвета покрытия с темно-фиолетового на светло-серый с характерным металлическим (свинцовым) блеском. Анализ полученных интерферограмм участков поверхности покрытий образцов свидетельствует о значительной высоте микронеровностей. В частности, глубина кратеров на поверхности достигала нескольких микрометров. На рис. 1 представлены интерферограммы различных участков поверхности для одного из образцов (а – до испытаний, б – после) и микрофотографии тех же участков поверхности образца (г, д).

Та часть образцов, которая подвергалась одновременному воздействию четырех факторов, а именно всех перечисленных выше, но без термоциклирования образцов, и одновременному воздействию трех факторов, а именно всех перечисленных выше, но без термоциклирования образцов и без длительной выдержки образцов в вакуумных условиях, также после испытаний изменилась по внешнему виду – цвет покрытия стал светло-серым с металлическим блеском, морфология поверхности, по данным микрофотографий и интерферограмм поверхности была аналогична первой группе образцов.

Для части образцов, которые подвергались одновременному воздействию других трех факторов, а именно всех перечисленных выше, но без термоциклирования образцов и бомбардировки потоком микрочастиц, после испытаний внешний вид образцов (цвет покрытия и морфология поверхности)

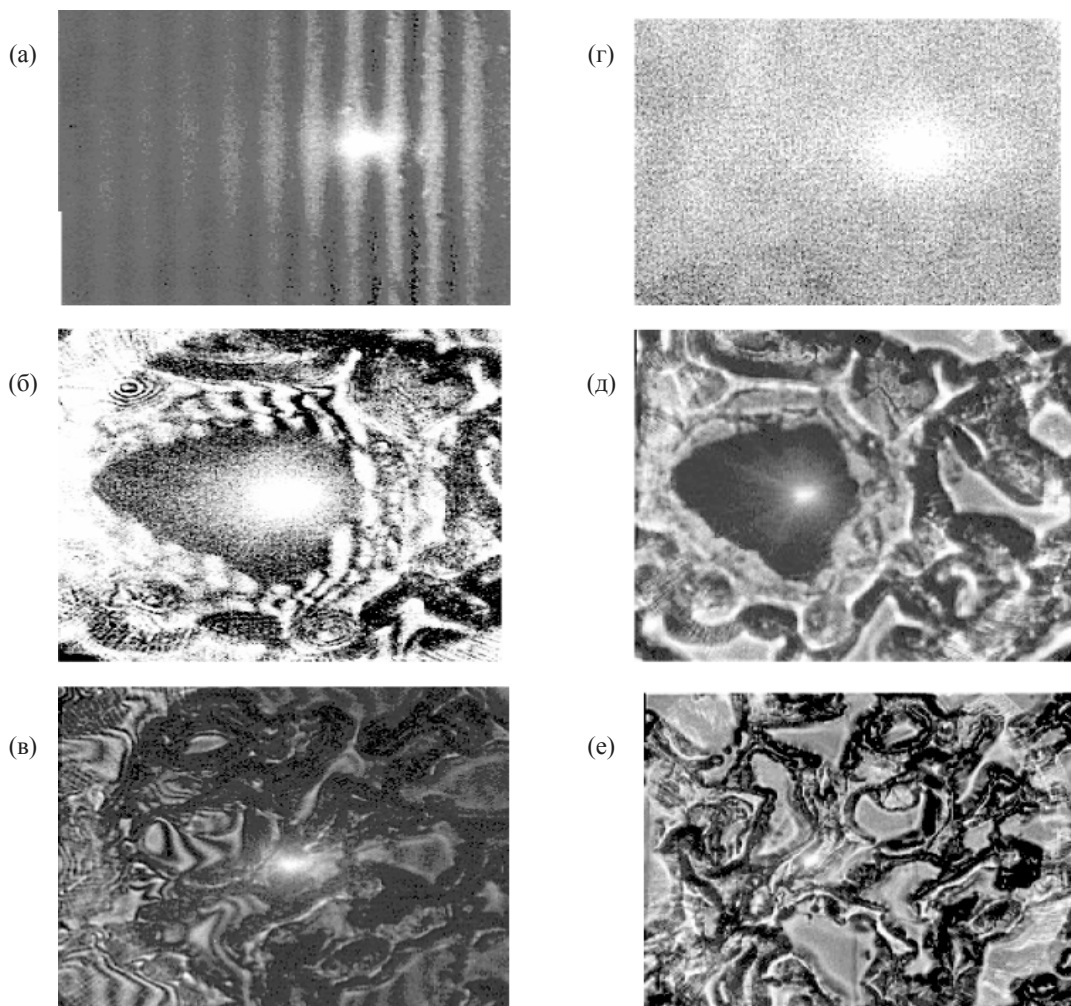


Рис. 1. Интерферограммы (а, б, в) и микрофотографии (г, д, е) участков поверхности образцов № 1–5С и № 5–1Р до (а, г) и после (б, в, д, е) испытаний. б, д – образец № 1–5С; в, е – № 5–1Р.

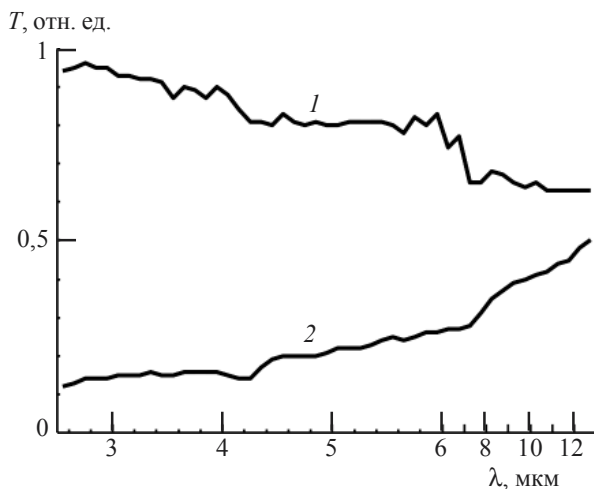


Рис. 2. Спектры коэффициента пропускания T образца №1–5С до (1) и после (2) испытаний.

претерпел практически такие же изменения, отмечено лишь отсутствие на поверхности кратеров.

Кроме того, для этих двух групп образцов, которые подвергались одновременному воздействию описанных выше 5, 4 и 3-х факторов, спектры коэффициента пропускания свидетельствуют о полной деградации нанесенного просветляющего эффекта покрытия из двухфтористого свинца и значительном падении коэффициента пропускания образцов во всем диапазоне длин волн от 2,4 до 12 мкм (рис. 2).

Для образцов, которые испытывали при одновременном воздействии только двух факторов, а именно — при импульсном облучении в ВУФ, УФ и видимой областях спектра ($12,3 \text{ Дж/см}^2$) от источника излучения макета имитатора ПОТОК-ВУФ/СДР в вакуумных условиях и выдержке в вакуумных условиях с разрежением до 3×10^{-6} мм рт. ст. в течение 240 ч, или

— при термоциклировании в диапазоне $20\text{--}90^\circ\text{C}$ в вакуумных условиях и выдержке в вакуумных условиях с разрежением до 3×10^{-6} мм рт. ст. в течение 240 ч изменения цвета и характера покрытий у этих образцов не обнаружено. Цвет остался темно-фиолетовым, поверхность — зеркальной, как и до испытаний, “островковый” характер поверхностного рельефа отсутствовал. Интерферограммы участков покрытия образцов свидетельствовали о сохранении высокого оптического качества поверхности покрытия. Спектры коэффициента пропускания образцов до и после испытаний практически полностью совпадали во всем диапазоне длин волн (2,4–12 мкм). Таким образом, эти две совокупности факторов при данных уровнях их параметров не являются повреждающими.

При расширении температурного диапазона испытаний с многократным термоциклированием в диапазоне $-20\text{...}+160^\circ\text{C}$ со средней скоростью нагрева 6 град/мин и средней скоростью охлаждения 3 град/мин на шестом цикле (спустя 9 ч после начала испытаний) один из трех образцов раскололся пополам. После выдержки в вакуумных условиях с разрежением около 3×10^{-6} мм рт. ст. в течение 240 ч на поверхности образцов визуально обнаружено локальное изменение цвета и характера покрытия — появление участков неравномерного покрытия желтоватого цвета со следами вспучивания.

Результаты испытаний образцов в условиях раздельного воздействия указанных выше факторов в вакуумных условиях показали высокую устойчивость покрытия к раздельному воздействию таких факторов, как

- термоциклирование в диапазоне $20\text{--}90^\circ\text{C}$ в вакуумных условиях,
- выдержка в вакуумных условиях с разрежением до 3×10^{-6} мм рт. ст. в течение 240 ч,
- импульсное облучение в ВУФ, УФ и видимой областях спектра (вплоть до $12,3 \text{ Дж/см}^2$) в вакуумных условиях.

Менее устойчивы свойства покрытия и подложки оказались при многократном термоциклировании в диапазоне $-20\text{...}+160^\circ\text{C}$ со средней скоростью нагрева 6 град/мин и средней скоростью охлаждения 3 град/мин. При этом наблюдались изменения цвета и характера поверхности покрытия, часть образцов раскалывалась.

При непрерывном облучении в вакуумных условиях на расстоянии 5 см от источника ПВИ-02 в течение 8 ч (около 6 Дж/см^2) также наблюдались локальные изменения цвета и характера поверхности покрытия (рис. 3). Однако спектры коэффициента пропускания этих образцов до и после испытаний практически полностью совпадают во всем диапазоне длин волн от 2,4 до 12 мкм.

Самое значительное изменение поверхности образцов в условиях раздельного воздействия наблюдалось при обдуве высокоскоростным потоком релаксирующей плазмы (рис. 1в, 1е, образец № 5–1Р) и в значительно меньшей степени — при высокоскоростном потоке микрочастиц. Воздействие набегающего потока релаксирующей плазмы, по нашему мнению, является главным повреждающим фактором для покрытия из двухфтористого свинца из всех воздействий, которым подвергались образцы раздельно. Это подтверждают спектры коэффициента пропускания образцов, подвергнутых раздельному испытанию: они свидетельствуют о полной деградации нанесенного просветляющего эффекта покрытия из двухфтористого свинца и значительном

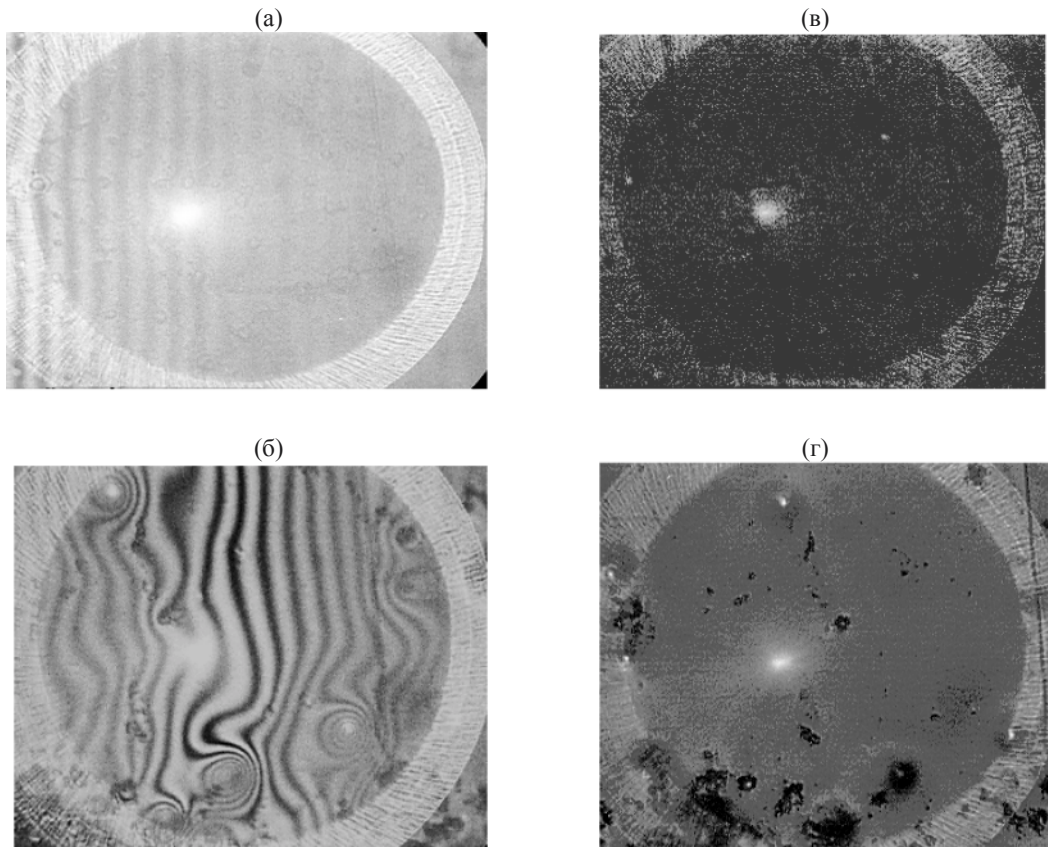


Рис. 3. Интерферограммы (а, б) и микрофотографии (в, г) участка поверхности образца №4–1Р до (а, в) и после (б, г) испытаний.

падении коэффициента пропускания образцов во всем диапазоне длин волн от 2,4 до 12 мкм (рис. 4).

Более детальный анализ состояния поверхности образца № 5–1Р после воздействия высокоскоростным потоком релаксирующей плазмы был проведен с использованием метода электронного спектрального химического анализа [14]. На обзорном спектре верхнего слоя поверхности образца № 5–1Р обнаружены линии химических элементов из состава оптического покрытия (свинца Pb 4f с атомной концентрацией около 3,2%, фтора F 1s с атомной концентрацией 0,7%), из состава подложки (селена Se 3d5 с атомной концентрацией 0,9%, олова Sn 3d5 – 0,2%) и из состава набегающего потока плазмы (кислорода O 1s с атомной концентрацией 13,5%, углерода C 1s – 80,2%). После травления поверхности образца № 5–1Р ионами аргона с энергией 5 кэВ в течение 10 мин до глубины 1,0 мкм на обзорном спектре также присутствуют линии химических элементов из состава оптического покрытия (свинца Pb 4f с атомной концентрацией около 8,1%, фтора F 1s с атомной концентрацией 6,3%), из состава подложки (селена Se 3d5 с атомной концентрацией

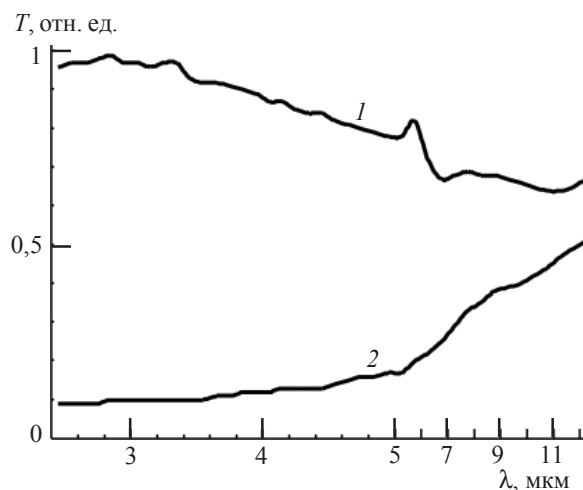


Рис. 4. Спектр коэффициента пропускания T образца № 5–1Р до (1) и после (2) испытаний.

13,5%, олова Sn 3d5 – 2,5%, сурьмы Sb 3d5 – 3,6%, мышьяка As 3d5 – 6,4%) и из состава набегающего потока плазмы (углерода C 1s – 58,6%). Это свидетельствует о существенном изменении хими-

ческого состава слоя. Дальнейшая обработка рентгеноэлектронных спектров поверхности образца № 5–1Р на глубине 0,5–1,0 мкм показала, что повреждения оптического покрытия и подложки значительны и его химический состав не соответствует исходному составу просветляющего слоя. Используя основные закономерности изменения экспериментальных значений энергии связи в рентгеноэлектронных спектрах и влияние степени окисления атомов [15], установили, что на глубине 0,5 мкм большая часть фтора находится в виде химического соединения SnF_2 (67,3%) и лишь 19,05% составляет исходный состав для просветляющего покрытия PbF_2 . Для свинца на глубине 0,5 мкм от поверхности основная его часть находится в виде химического соединения PbSe (58,2%), а также в виде металлического свинца Pb (2,1%). Это является экспериментальным доказательством деградации исходного оптического покрытия в ходе испытаний с использованием воздействия высокоскоростным потоком релаксирующей плазмы. При этом химический состав поверхностного слоя в зависимости от глубины определяется составом набегающего потока плазмы, первоначальным составом просветляющего покрытия и материала подложки.

Сопоставление всех полученных результатов моделирования воздействий на просветляющее покрытие из двухфтористого свинца на подложке из стекла ИКС-25 с основными факторами космического пространства на низких околоземных орбитах показало следующее:

1. Вакуум. В наших испытаниях просветляющего покрытия из двухфтористого свинца на подложке ИКС-25 степень откачки до 10^{-7} – 10^{-5} мм рт. ст соответствует высоте полета КА на низких орбитах (около 200–300 км). Время выдержки испытуемых образцов в вакуумных условиях порядка 240 ч (10 суток) определялось из условия сопоставимости длительности воздействия других факторов, которые моделировались в наших экспериментах.

2. Излучение Солнца. При моделировании воздействия на просветляющее покрытие из двухфтористого свинца на подложке ИКС-25 электромагнитного излучения Солнца нами учитывалась его средняя интенсивность, равномерность облучения, параллельность лучей, спектральный состав излучения. Условия испытаний образцов соответствовали длительности солнечного облучения вблизи L_α -линии (от 121 до 122 нм) на орбите порядка 56 ч. Облученность в импульсе используемого источника излучения ПОТОК-ВУФ/СДР в спектральном диапазоне от 180 до 400 нм составляла около $1,2 \text{ Дж/см}^2$, что в этом спектральном диапазоне соответствует облучению на орбите в течение прибли-

зительно 7 ч. Облучение от источника ПВИ-02 в течение 8 часов с плотностью мощности 3 мВт/см^2 вблизи линии L_α излучения атомарного водорода соответствует 139 суткам нахождения образца на орбите.

3. Твердые микрочастицы. При моделировании воздействия потока микрочастиц в окрестности Земли на высотах ниже 500 км на просветляющее покрытие из двухфтористого свинца на подложке ИКС-25 нами учитывались их масса (порядка 10^{-8} г), средний размер (0,1–100 мкм), плотность потока (до $10^4 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$) и скорость (до 30 км/с). Условия испытаний образцов (около 10^2 частиц/см²) соответствовали длительности их бомбардировки микрочастицами на орбите порядка 280 ч.

4. Набегающий поток ионосферной плазмы и собственная атмосфера. При моделировании воздействия потока ионосферной плазмы в окрестности Земли, на высотах около 200 км, на просветляющее покрытие из двухфтористого свинца на подложке ИКС-25 нами учитывались состав используемого потока (нейтральные атомы и ионы кислорода, водорода), его скорость (до 10 км/с) и плотность (до $10^{23} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$). Нейтральные атомы и ионы углерода, а также и его соединения в составе воздействующего потока можно приписать окружающей космической аппаратуры его собственной атмосфере, сформированной в процессе его жизнедеятельности. Условия испытаний образцов (около 10^{21} частиц/см² за одну вспышку) соответствовали длительности их обдува ионосферной плазмой на орбите порядка 28 ч.

Заключение

Использование разработанных нами ранее новых экспериментальных методов физического моделирования факторов космического пространства показывает возможность проводить оценку устойчивости оптических материалов и покрытий наружных элементов ОЭА при совместном воздействии основных повреждающих факторов космического пространства в наземных испытаниях.

В рамках использованных экспериментальных методов воздействия получены данные об устойчивости просветляющего покрытия из двухфтористого свинца на подложке из стекла ИКС-25 к комплексному воздействию ряда повреждающих ФКП. В частности, показано следующее:

1. Покрытие из двухфтористого свинца характеризуется высокой устойчивостью свойств лишь к раздельному воздействию таких факторов, как

– термоциклирование в диапазоне 20–90 °С в вакуумных условиях,

– выдержка в вакуумных условиях с разрежением около 3×10^{-6} мм рт. ст. в течение 240 ч,
– импульсное облучение (до 12 Дж/см²) в ВУФ, УФ и видимой областях спектра в вакуумных условиях.

2. Менее устойчивы просветляющие свойства покрытия при многократном термоциклировании образцов в диапазоне $-20 \dots +160$ °С со средней скоростью нагрева 6 град/мин и средней скоростью охлаждения 3 град/мин, а также при непрерывном коротковолновом облучении до 6 Дж/см².

3. Полная деградация свойств покрытия из двухфтористого свинца наблюдается при совместном воздействии импульсного облучения (12 Дж/см²) в ВУФ, УФ и видимой областях спектра, высокоскоростного потока релаксирующей плазмы (около 10^{21} частиц/см²), высокоскоростного потока микрочастиц (около 10^2 частиц/см²), термоциклирования в диапазоне 20–90 °С и с выдержкой в вакуумных условиях с разрежением около 3×10^{-6} мм рт. ст. в течение 240 ч.

Авторы благодарят за внимание и поддержку работы И.Ю. Дмитриева (ФГУП НИИКИ ОЭП), А.Л. Шахина (РНЦ “Прикладная химия”, Санкт-Петербург) за регистрацию и обработку рентгено-электронных спектров, а также Е.Ф. Михайлова (НИИ физики им. В.А. Фока СПбГУ, Санкт-Петербург) и В.Г. Докучаева (ФГУП НИИКИ ОЭП) за полезные советы и замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барбашев Е.А., Душин М.И., Ивонин Ю.Н. Результаты испытаний полимерных материалов после экспонирования в условиях открытого космоса // Космическая технология и материаловедение. М.: Наука, 1982. С. 78.
2. Акишин А.И., Новиков Л.С. Методы имитации воздействия окружающей среды на материалы космических аппаратов. Ч. 1. М.: Изд-во МГУ, 1986. 92 с.
3. Забелина И.А. Воздействие факторов космического пространства на оптические приборы // Оптический журнал. 1997. Т. 64. № 7. С. 3–19.
4. Надежность и эффективность в технике: Справочник. Т. 10. Справочные данные по условиям эксплуатации и характеристикам надежности / Под ред. В.А. Кузнецова. М.: Машиностроение, 1990. С. 160–193.
5. Андерсен Г.И., Заитов Ф.А., Паневин Т.М. Особенности воздействия ионизирующего и светового излучения на характеристики ФПУ ИК диапазона. Вопросы оценки стойкости РЭА к воздействию ИИ, ЭМИ, ИИКП. М., 1988.
6. Васильев М.Ф., Герасюк А.К., Гоев А.И., Кириленко В.В., Ноздрачев А.В., Потелов В.В., Сенник Б.Н., Сухачев А.Б. Применение новых пленкообразующих материалов – цирконата гадолиния и цирконата лютеция – для получения высококачественных оптических покрытий // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 10. С. 79–84.
7. Калашиников Е.В., Бедрин А.Г., Рачкулик С.Н., Жилин А.Н., Эльц В.К. ВУФ-спектры излучения эрозивной плазмы струи сильноточного диафрагменного разряда в вакууме // ТВТ. 2005. Т. 43. № 1. С. 32–38.
8. Калашиников Е.В., Костицына Т.Г. Экспериментальное исследование кинетики состояния $V^{2\Sigma^+}$ радикалов циана CN в струе диафрагменного разряда на стадии послесвечения // Опт. и спектр. 1995. Т. 78. № 1. С. 60–64.
9. Калашиников Е.В., Рачкулик С.Н. Способ получения потока микрочастиц и устройство для его осуществления // Патент РФ 2220518. 2003.
10. Калашиников Е.В. Излучение и проводимость струи плазмы диафрагменного разряда в вакууме // ТВТ. 1995. Т. 33. № 3. С. 339–345.
11. Калашиников Е.В. Радиальное распределение давления в струе плазмы сильноточного диафрагменного разряда в вакууме // ТВТ. 1996. Т. 34. № 4. С. 501–505.
12. Данилов М.Ф., Калашиников Е.В. Компонентный состав оболочки плазменной струи диафрагменного разряда в вакууме // ТВТ. 1996. Т. 34. № 4. С. 501–505.
13. Калашиников Е.В., Рачкулик С.Н. Исследование радиационных повреждений в ионных кристаллах фторида кальция в условиях мощного воздействия вакуумного ультрафиолетового и ультрафиолетового излучения // ЖТФ. 2007. Т. 77. В. 5. С. 69–74.
14. Нефедов В.И., Черетин В.Т. Физические методы исследования поверхности твердых тел. М.: Наука, 1983. 296 с.
15. Нефедов В.И. Рентгено-электронная спектроскопия химических соединений. Справочник. М.: Химия, 1984. 256 с.