

УДК 621.315.3+533.9

Исследование явлений блистеринга и флекинга в материалах космической оптики под воздействием факторов космического пространства

В. В. Абраимов¹, Ф. Лура², Л. Боне², Н. И. Величко¹,
А. М. Маркус¹, Н. Н. Агашкова¹, Л. А. Мирзоева³

¹Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України, Харків

²Інститут космічної сенсорики Німецького аерокосмічного агентства, Берлін

³ВНІЦ Державного оптичного інституту ім. С. І. Вавилова, Санкт-Петербург, Росія

Надійшла до редакції 25.01.95

В работе представляются результаты экспериментального исследования взаимодействия факторов космического пространства — излучения протонов и электронов (с энергиями $E = 160$ кэВ), излучения заатмосферного Солнца (включая ВУФ-излучение) в интервале длин волн $\lambda 5—2500$ нм на отражающую способность зеркал масштабных моделей ИК-приборов и других материалов космической оптики. Обнаружено явление блистеринга и флекинга — образование на поверхности диэлектрических материалов (зеркала, стекла и др.) сложных дефектных структур в виде круглых углублений кратерообразной формы размером 2—5 мкм (явление флекинга), а также вздутий пленки алюминия и серебра над поверхностью зеркал размерами 10—50 мкм (блестеринг) при их облучении протонами с энергией $E = 160$ кэВ. Экспериментально обнаружено, что процесс блистерообразования и флекинга происходит скачкообразно за малое $\Delta t = 1—2$ с время по достижении критической дозы облучения Φ_{kp} , которая при температуре $T = 340$ К оказалась равной $\Phi_{kp} \approx 6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Показано, что плотность блистеров и дефектов флекинга существенно зависит от дозы облучения и температуры облучающихся зеркал. Данное явление объясняется образованием водорода при рекомбинации протона с электроном ($p^+ + e^- \rightarrow H$) в веществе, который собирается в пузырьки, лежащие в тонком приповерхностном слое стекла на длинах пробега протонов $\xi_p = 2$ мкм. При достижении давления водорода в полостях, превышающих предел прочности материалов космической оптики от, наступает хрупкое разрушение стекла с зеркальными покрытиями и защитным слоем (флекинг) или всputчивание пластичных пленок алюминия (и серебра) над поверхностью зеркал. В обоих случаях наблюдается своеобразная «космическая эрозия» поверхности зеркал, которая приводит к существенному уменьшению их отражающей способности в широком спектральном интервале. Полученные в работе экспериментальные результаты трактуются в рамках существующих моделей блистерообразования при воздействии ионов гелия (He^+) и дейтерия (D^+) на металлические материалы, используемые при создании термоядерного реактора. Данные экспериментов качественно согласуются с теорией блистеринга, развитой Ю. В. Мартыненко.

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие космической техники на современном этапе поставило целый ряд сложных и комплексных задач как в области разработки и создания космических систем нового поколения,

так и в области космического материаловедения. В области создания новых космических систем про-слеживаются следующие основные тенденции:

1. Время жизни космических аппаратов составляет 5—7 лет (иногда 10 лет).
2. Разработка и создание негерметизированных

космических систем, которые эксплуатируются на разных высотах ($250 \text{ км} < H < 80000 \text{ км}$) в радиационных поясах Земли под воздействием сильно-действующих факторов космического пространства (ФКП): одновременного влияния корпускулярного излучения протонов p^+ и электронов e^- в широком интервале энергий ($30 \text{ кэВ} < E < 10 \text{ МэВ}$), излучения заатмосферного Солнца, включая ВУФ-излучение ($\lambda = 50—2500 \text{ нм}$), термоциклирования в интервале температур $77—400 \text{ К}$ (иногда $4.2—400 \text{ К}$), глубокого вакуума 10^{-7} торр , влияния атомарного кислорода на малых орбитах ($200 \text{ км} < H < 800 \text{ км}$) с энергией частиц $E = 5 \text{ эВ}$ и некоторых других факторов.

3. Широкое применение в космических системах новых полимерных и композиционных материалов, обладающих целым рядом требуемых свойств: углепластиков и стеклопластиков, имеющих высокую удельную прочность, металло-полимерных композитов, обладающих высокой радиационной стойкостью, пленок на базе полииамида (каптона), майлара и других полимеров с покрытиями из алюминия и полимерных композиций, которые используются в качестве терморегулирующих покрытий (ТРП) КА и их элементов. Особую группу занимают материалы космической оптики, используемые при создании астрофизических приборов, работающих в открытом космосе в широком интервале длин волн: в УФ-области, в видимом интервале, в ИК-диапазоне ($2—100 \text{ мкм}$), материалы зеркал и других оптических систем, используемых при создании солнечных энергетических установок для трансформации солнечной энергии из космоса на Землю, а также другие материалы оптико-электронных приборов нового поколения. Анализ эксплуатации оптических систем КА США (типа телескопа Хаббла), а также оптических телескопов стран СНГ показал, что некоторые ИК-приборы по истечении времени ($7—9 \text{ месяцев}$, иногда одного года) их полета в радиационных поясах Земли, резко уменьшают отражательную способность зеркал, что влечет за собой существенное уменьшение чувствительности всей оптической системы в целом (в десятки, иногда и более раз).

С другой стороны известно, что важнейшими задачами космического материаловедения на современном этапе являются: комплексные исследования физико-механических свойств материалов КА под воздействием ФКП (имитируемых лабораторно), выдача научно обоснованных рекомендаций по применению материалов в элементах и конструкциях КА, а также прогнозирование поведения материалов в космосе при их длительной эксплуатации. Решение и практическая реализация указан-

ных основных задач космического материаловедения достигается в настоящее время двумя традиционными путями.

1. Проведение натурных испытаний, т. е. экспонирование образцов материалов на орбитальных станциях (типа «Мир», «Шаттл» и др.) с последующим исследованием их физико-механических свойств на Земле. Подчеркнем, что такого типа эксперименты весьма дороги.

2. Создание в земных условиях имитационного оборудования для наиболее полной имитации перечисленных выше сильно-действующих ФКП с последующим комплексным изучением физико-механических свойств новых материалов как непосредственно в имитаторах (т. е. под воздействием облучения, механических напряжений, циклирования температуры, электрических и магнитных полей), так и исследования оптических, механических, диэлектрических, структурных и других свойств облученных материалов с целью выдачи обоснованных рекомендаций по их работоспособности и применению в космической технике.

Третий — нетрадиционный путь, который концептуально является весьма важным (при наличии надежной лабораторной имитации основных ФКП), — это изучение воздействия ФКП на работоспособность и основные параметры масштабных моделей КА, а не на сами изделия в целом, помещенные в большие вакуумные камеры. При данном уровне развития имитационного оборудования этот путь принципиально реализуем, так как проведение облучения пучками протонов, электронов, ионов верхних слоев атмосферы и так далее производят в ускорителях на площадях $S \approx 100—150 \text{ см}^2$. При увеличении площади облучения происходит резкое уменьшение удельной интенсивности пучков (т. е. становится практически невозможной ускоренная имитация ФКП). Третий путь обоснован с финансовой точки зрения, так как цена таких исследований на два-три порядка ниже, чем имитация на габаритных изделиях в больших вакуумных камерах, создание которых требует также больших затрат.

Имитация воздействия ФКП на масштабные модели КА является физически обоснованной (в статистическом смысле) с точки зрения усреднения основных рабочих параметров масштабных моделей КА по объему, площади, времени воздействия ФКП, а также по тождественности результатов измерений на габаритных изделиях и их масштабных моделях.

Именно эти обстоятельства предопределили физическую постановку и практическую реализацию данной работы, которая проводилась в отделе кос-

мического материаловедения НТК ФТИНТ НАН Украины совместно со специалистами ВНЦ ГОИ им. С. И. Вавилова, а также Института космической сенсорики Берлинского центра Немецкого аэрокосмического агентства (DLR). Целью работы являлось исследование воздействия ФКП, имитируемых лабораторно, на работоспособность упрощенной масштабной модели ИК-телескопа, состоящей из объектива, бленды (изготовленной из разных материалов) и каркаса самой масштабной модели. Насколько нам известно, публикаций по аналогичным исследованиям нет. В условиях воздействия на масштабную модель ФКП ставилась задача определить:

- Физические механизмы, приводящие к резкому уменьшению отражающей способности зеркал.
- Причины изменения качества отражающей поверхности зеркал — нарушение целостности защитной пленки, алюминиевого покрытия, слоя стекла на объективе ИК-телескопа.
- Вклад каждого типа воздействия (корпускулярного и электромагнитного) в деградацию свойств материалов, процессы потери массы материалов масштабной модели и переконденсацию продуктов газовыделений, а также механизмы радиационного дефектообразования под влиянием протонов, электронов, электромагнитного излучения Солнца (включая ВУФ-излучение).

- Качественные значения массопотерь материалов бленды — эмали АК-243 и аримидной ткани.
- Механизмы образования криоосадков на отражающих поверхностях зеркал.
- Воздействие ФКП на модельные материалы космической оптики, изготовленные из чистого стекла с напыленными пленками алюминия и серебра.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследования в работе использовали масштабные модели ИК-телескопа, применяемого для изучения экологического состояния Земли из космоса, схема которого показана на рис. 1. Модель телескопа включала зеркало 1, закрепленное в медном стакане 2. Зеркало окружено блендою 3 из аримидной ткани и жесткого элемента, покрытого с внутренней стороны эмалью АК-243. Коэффициент черноты бленды имел исходное значение $\varepsilon = 0.95$. Длина модели — 200 мм, диаметр переднего среза бленды $D = 80$ мм, диаметр зеркала $d = 60$ мм, боковая поверхность бленды $S = 2 \cdot 10^3$ мм². Зеркало (объектив) в каждой из исследованных масштабных моделей представляло собой композитный материал, состоящий из

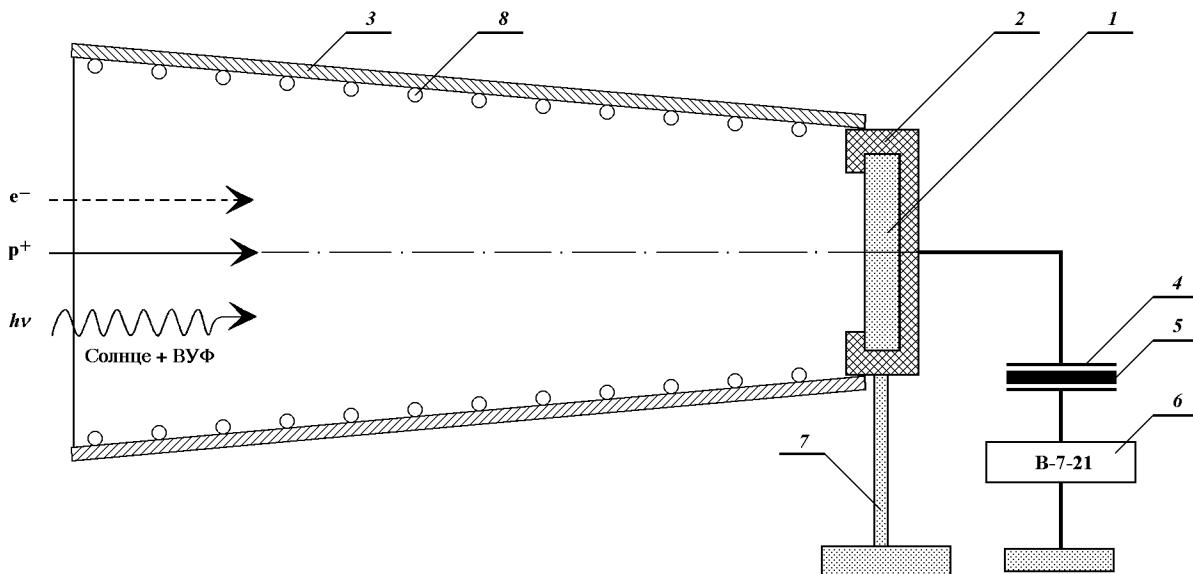


Рис. 1. Схема упрощенной модели оптической системы, работающей в радиационных поясах Земли: 1 — зеркало (объектив); 2 — медный стакан; 3 — бленда ($\varepsilon = 0.95$); 4 — пластины конденсатора; 5 — изолятор (Ф-4); 6 — блок измерения тока и числа частиц; 7 — опора (изолятор); 8 — каркас (нержавеющая сталь)

бериллиевой шайбы диаметром 60 мм, толщиной 10 мм и напеченного на нее стекла толщиной 0.5 мм, на которое напылены отражающий слой алюминия толщиной 100 нм и защитный слой SiO_2 толщиной 100 нм. Исходный коэффициент отражения зеркала в интервале длин волн 1—3 мкм составлял 83 %.

Вторым объектом исследования были стеклянные шайбы диаметром 35 мм и толщиной 4 мм. Пленки серебра и алюминия толщиной 100 нм наносились путем испарения металла чистотой 99.99 % в вакууме 10^{-6} торр на половину площади стеклянных образцов.

Для решения поставленных в работе задач был использован ряд методик по наземной ускоренной имитации основных ФКП, разработанных в отделе космического материаловедения ФТИНТ НАН Украины. Воздействие на материалы и масштабные модели ИК-телескопа полным спектром электромагнитного излучения Солнца (ЭМИС) производили с помощью имитатора искусственного Солнца ИС-160 в интервале длин волн 200—2500 нм при одновременном воздействии ВУФ-излучения в интервале 5—200 нм с помощью газоструйного источника света ГИС-1. Указанная методика подробно описана Веркиным и др. (1988). Данная методика позволила исследовать ряд физико-механических свойств материалов непосредственно в поле космической радиации (т. е. под пучком в вакууме — *in situ*), а именно: механические, электрофизические свойства, потерю массы материалов (с чувствительностью 10^{-4} г), исследование процессов газовыделений материалов масс-спектрометрическим методом (Абраимов и др., 1989а, 1989б, 1992; Abraimov et al., 1993). Облучение материалов и масштабных моделей протонами и электронами с энергиями 50—200 кэВ производили на протонно-электронном ускорителе ПЭИ-1 (Маркус и др., 1986) с совмещенными пучками, которые вводились в вакуумную камеру ($P = 5 \cdot 10^{-6}$ торр*), где размещалась масштабная модель или зеркало со слоями Al или Ag. Во всех сериях проведенных экспериментов облучение корпускулярным излучением проводилось как совместно, так и раздельно (только протонами). Энергия протонов и электронов составляла величину $E = 160$ кэВ, плотность тока $j = 0.11$ мкА/см², доза облучения изменялась в интервале $\Phi = 10^{15}—2 \cdot 10^{17}$ см⁻². Регистрацию пучков осуществляли по методу нулевого тока. Микроамперметр, соединяющий образцы с «землей», фиксиро-

вал ток $I = 0$ в процессе облучения. Вторичная электронная эмиссия с образца подавлялась металлической калибровочной диафрагмой с потенциалом $U = -250$ В. Сканирование пучков по площади зеркала осуществляли с помощью системы развертки. Совместное облучение протонами и электронами было необходимо для имитации электронейтральности плазмы, реально существующей в космосе. Все эксперименты по воздействию факторов космического пространства на структурное совершенство и топологию поверхности зеркал можно разбить на три серии.

В первой серии экспериментов масштабная модель была заземлена, отсутствовал конденсатор 4 с изолятором 5 (рис. 1), т. е. облучение проводилось без накопления заряда на масштабной модели. Отметим, что указанная традиционная схема облучения применялась как в настоящей работе, так и ранее (см. Вернов, 1983) при имитации радиационных поясов Земли. После облучения p^+ и e^- фиксированной дозой методами оптической и растровой микроскопии исследовали топологию поверхности зеркал с помощью микроскопов МИМ-8, РЭМ 200 У, проводили измерение коэффициентов отражения зеркал $R(\lambda)$ в интервале 0.75—3 мкм, а также измерение потери массы всей блонды и кинетику потери массы аримидной ткани и эмали АК-243 в интервале температур 60—140 °C с помощью специальных вакуумных весов, встроенных в камеру имитатора.

Во второй серии экспериментов облучение масштабной модели протонами и электронами (или отдельно протонами) проводили с накоплением заряда на масштабной модели (рис. 1), что вызывало подъем потенциала по отношению к земле согласно выражению $\delta U = \delta Q / (\delta C)$, где δQ — избыточный заряд, δC — емкость объекта. Для ограничения увеличения потенциала, максимальное значение которого составляет $U = 20$ кэВ, устанавливали разрядное устройство (прокладку фторопласта толщиной 2 мм) между пластинами конденсатора 4. Момент пробоя фиксировали по изменению тока, протекающего через блок 6 (рис. 1). Данной методикой облучения приближали имитацию тех процессов в масштабной модели, которые реально происходят в космосе на объекте. Предложенная методика облучения p^+ и e^- с накоплением заряда, по нашему мнению, должна была воспроизводить кинетику электрофизических процессов, происходящих в масштабной модели КА, адекватно тем процессам, которые реализуются в объектах, изготовленных из диэлектрических материалов (стекла, полимеров, эмалей и т. д.), обладающих большим электросопротивлением $\rho_v = 10^{14}—10^{15}$ Ом·см)

* 1 торр = 1 мм рт. ст. = 133.322 Па (Ред.)

при их полете в квазинейтральной плазме радиационных поясов Земли.

После совместного облучения протонами и электронами (или только протонами) и исследования свойств поверхности масштабных моделей ИК-телескопа, а также зеркал (с пленками Al и Ag), объекты подвергались совместному облучению электромагнитным излучением Солнца (ЭМИС) и ВУФ-излучением в течение 50–100 ч при нормальном падении квантов света на их поверхность. Как и в случае облучения электронами и протонами, при фиксированной дозе облучения Солнца + ВУФ-излучения, исследовали структурное совершенство поверхности зеркал, измеряли коэффициенты отражения $R(\lambda)$ в интервале 0.75–3 мкм и кинетику потери массы материалов объекта и всей масштабной модели. В процессе всех типов облучений в четырех точках масштабной модели (на объективе и в трех точках на бленде) проводили измерение температуры с помощью полупроводниковых датчиков GaAs с чувствительностью 0.1 К.

В экспериментах третьей серии облучение зеркал (с пленками Al и Ag), а также исходных стекол проводили только протонами с энергией $E = 160$ кэВ и дозами в интервале $\Phi = 10^{15} - 2 \cdot 10^{17}$ см⁻², после чего исследовали топологию облученных поверхностей и коэффициенты отражения в том же интервале ИК-спектра. Измерение потери массы аримидной ткани и эмали АК-243 проводили в вакууме $P = 10^{-7}$ торр при фиксированной температуре в интервале $T = 60 - 140$ °C в течение 8 ч с чувствительностью 10^{-4} г.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты первой серии. Отметим, что в первой серии экспериментов при облучении протонами и электронами медный стакан (держатель объектива 2) был заземлен, т. е. происходило стекание заряда и выравнивание потенциала по всей поверхности масштабной модели.

На рис. 2 приведены структура исходного зеркала (а), типичная структура зеркала с границей облучения (стрелки A) (б) и фотографии характерных участков облученного дозой $\Phi = 10^{16}$ см⁻² зеркала (в, г). Наблюдались следующие основные особенности дефектной структуры зеркал и топологии их поверхности. В результате облучения корпускулярным излучением на поверхности зеркал появились дефекты в виде кратеров круглой формы с характерным диаметром 2–5 мкм. Данные дефекты были равномерно распределены по всему полю облучения. Часть указанных дефектов боль-

шого размера, диаметр которых имел величину 10–20 мкм, формировались в скопления в виде линий (стрелка B, рис. 2, в) с равномерно распределенными на них точками. Линии с дефектами также равномерно распределялись под разными углами по облучаемой поверхности. Детальное исследование указанных дефектов в растровом и интерференционном микроскопах позволило определить, что наблюдаемые дефекты представляют собой углубления (кратеры) практически полусферической формы с диаметром от 2 до 10 мкм (рис. 2, г). Во всех случаях наблюдали отрыв алюминия и защитной пленки SiO₂ от поверхности зеркала. Особенно подчеркнем, что обнаруженные в настоящей работе дефекты на поверхности зеркал, облученных протонами и электронами дозой $\Phi = 10^{16}$ см⁻², можно интерпретировать как проявление эффектов «блестеринга» (вспучивание) и «флексинга» (отшелушивание) в диэлектрических материалах космической оптики, в данном случае в стекле с напыленными алюминиевыми пленками и защитным слоем. Ниже будет описано различие двух процессов, происходящих в приповерхностных слоях зеркал при их облучении протонами.

Эксперименты второй серии. Отметим, что в этой группе экспериментов облучение модели протонами и электронами производилось с накоплением заряда по схеме, изложенной в методике данной работы, т. е. с максимальным приближением к реальным условиям полета космического аппарата в радиационных поясах Земли, до напряжений 20 кВ, при котором наступал пробой фторопласта 5 конденсатора 4 (рис. 1), масштабная модель была изолирована от земли. Таким образом, в модели происходили такие электрофизические процессы, которые максимально приближались к реальным процессам в оптической системе при ее движении в радиационных поясах Земли.

На рис. 3 приведены типичные дефектные структуры поверхности зеркала после совместного облучения (p^+ и e^-) дозой $\Phi = 10^{16}$ см⁻². Наблюдались следующие основные характерные особенности в образовании дефектов облученных зеркал. Как и в экспериментах первой серии, наблюдали явления «блестеринга» и «флексинга», т. е. образование углублений круглой формы в виде кратеров в стекле (стрелки A, рис. 3, а, б), отрыв алюминия и защитной пленки от поверхности стекла (стрелка B, рис. 3, в). Плотность указанных дефектов в данном случае весьма высока и имела значение $\rho = 10^4 - 10^5$ см⁻². Дефекты данного сорта также равномерно распределялись по полу облучения. Однако в этом случае появились новые типы дефектов: треки, широкие полосы каскадных пробоев в стек-

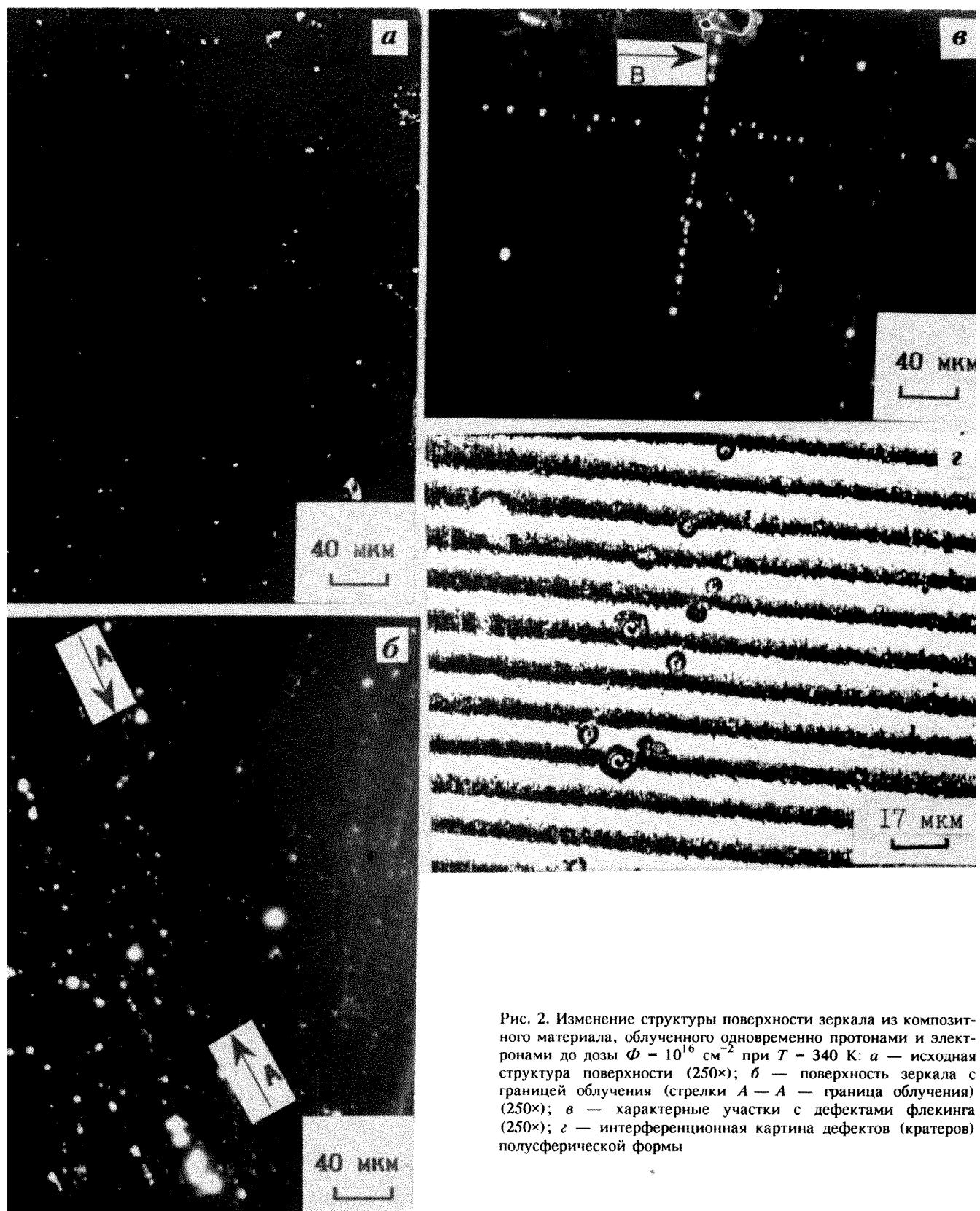


Рис. 2. Изменение структуры поверхности зеркала из композитного материала, облученного одновременно протонами и электронами до дозы $\Phi = 10^{16} \text{ см}^{-2}$ при $T = 340 \text{ K}$: *а* — исходная структура поверхности (250 \times); *б* — поверхность зеркала с границей облучения (стрелки *A* — *A'* — граница облучения) (250 \times); *в* — характерные участки с дефектами флексинга (250 \times); *г* — интерференционная картина дефектов (кратеров) полусферической формы

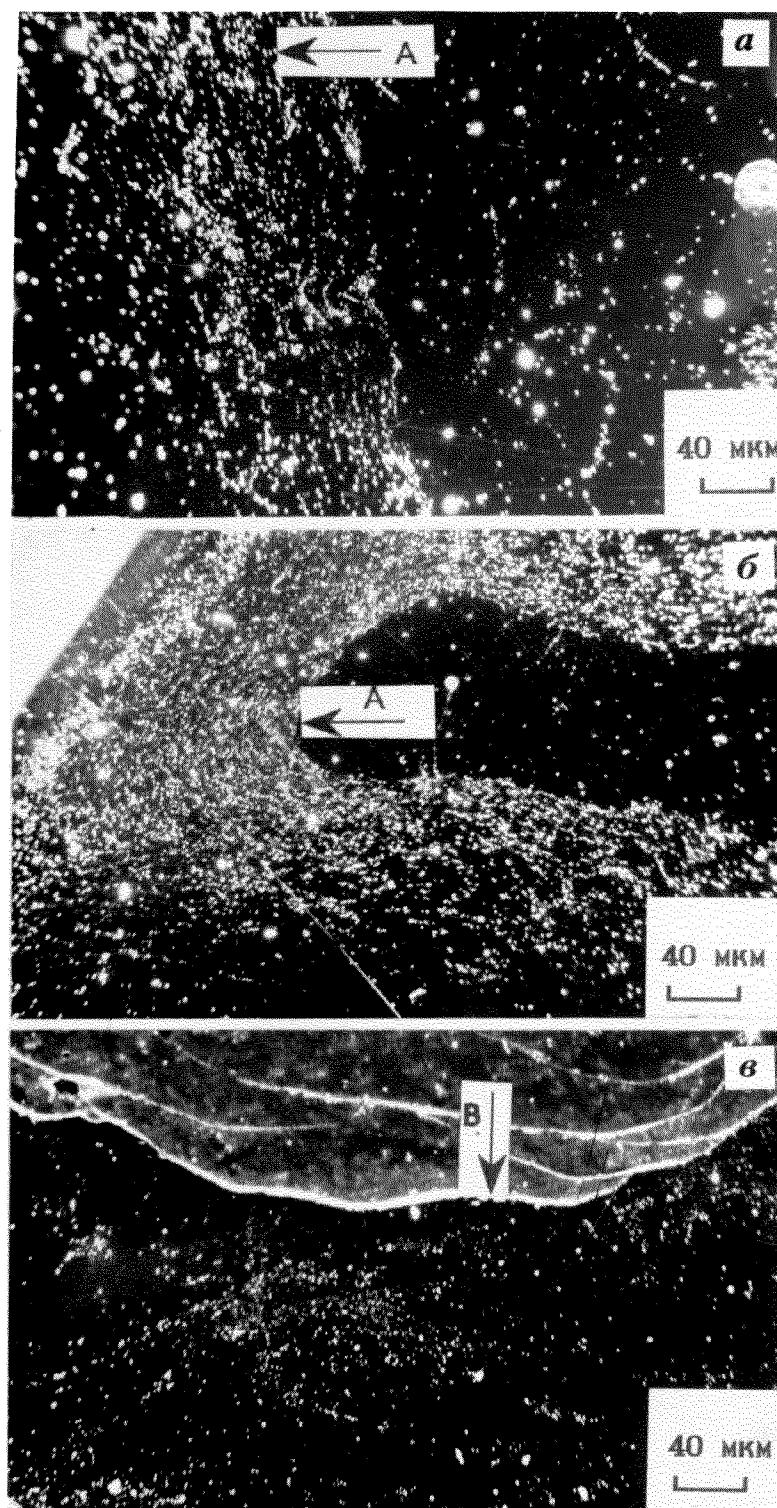


Рис. 3. Типичные дефектные структуры флекинга и внутренних пробоев в зеркале (а, б) после совместного облучения протонами и электронами дозой 10^{16} см^{-2} (стрелки А) и отрыв слоя алюминия (в) по периметру зеркала (верхняя часть — структура после отрыва алюминия, виден рельеф стекла и бериллия; стрелка В) (250×)

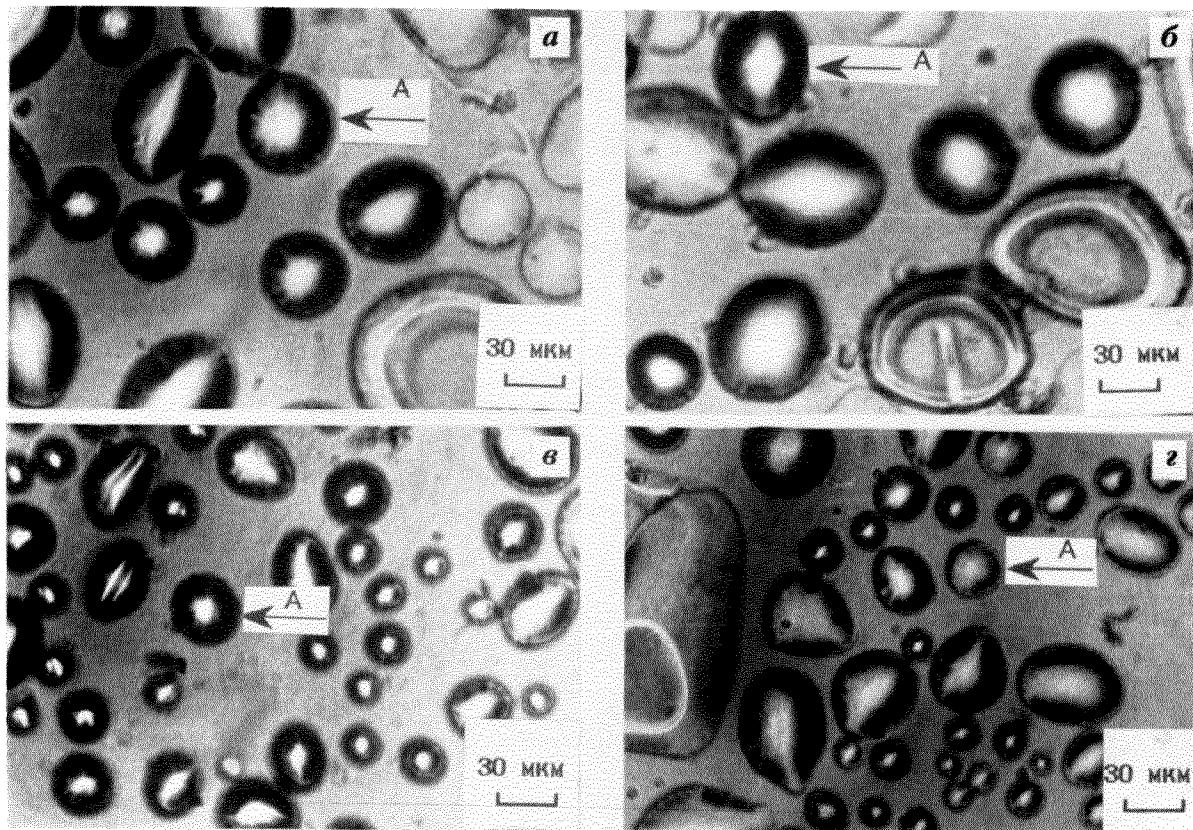


Рис. 4. Блистеринг на поверхности зеркал — характерные вздутия пленок алюминия и серебра (стрелки A) после облучения протонами дозой $\Phi = 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (330 \times): а, б — при $T = 340 \text{ К}$; в, г — при $T = 490 \text{ К}$

ле. На рис. 3, а (стрелка A) хорошо видно образование «лавин» и «ливней пробоя» на поверхности зеркал и стекание зарядов от центра на край зеркала (стрелка A, рис. 3, б), т. е. в область максимальной напряженности электрического поля. Более чем на 1/3 части по периметру зеркала произошел полный отрыв слоя алюминия в виде кольца шириной 4—5 мм. Это хорошо видно из рис. 3, в (стрелка В). В микроскопе наблюдается слой стекла и текстура берилля (верхняя часть рис. 3, в). Видна характерная картина подготовки отрыва слоя алюминия от стекла. Видно, что у края зеркала плотность дефектов внутри широких линий «лавин» значительно превышает плотность дефектов в центральной части зеркала (рис. 3, б).

После облучения p^+ и e^- дозой $\Phi = 10^{16} \text{ см}^{-2}$ масштабная модель подвергалась облучению заатмосферным Солнцем (включая ВУФ-излучение) в течение 100 часов.

Эксперимент показал, что в этом случае (т. е. при облучении только внутренней части бленды и

объектива) на поверхности зеркала хорошо наблюдается слой криосадков, уменьшающий коэффициент отражения объектива. Особо подчеркнем, что после облучения зеркал электромагнитным излучением Солнца (включая ВУФ-излучение), новых дефектов на их поверхности (т. е. дефектов в виде «блестеров») обнаружено не было. Анализ структуры после результирующего влияния $p^+ + e^-$ и ЭМИС-излучения показал, что в областях отрыва алюминиевой пленки (в полосе по периметру зеркала) наблюдается сильное растрескивание поверхности стекла. Это вызвано, по-видимому, резким градиентом температуры на границе отражения от алюминия и нижнего слоя берилля зеркала, что вызывает появление термоупругих напряжений в пограничной области и, как следствие, образование трещин. Таким образом, в представленных двух сериях экспериментов процесс блистеринга и флексинга, вызванный облучением зеркал протонами с энергией $E = 160 \text{ кэВ}$ полным флюенсом $\Phi = 10^{16} \text{ см}^{-2}$, приводит к своеобразной «косми-

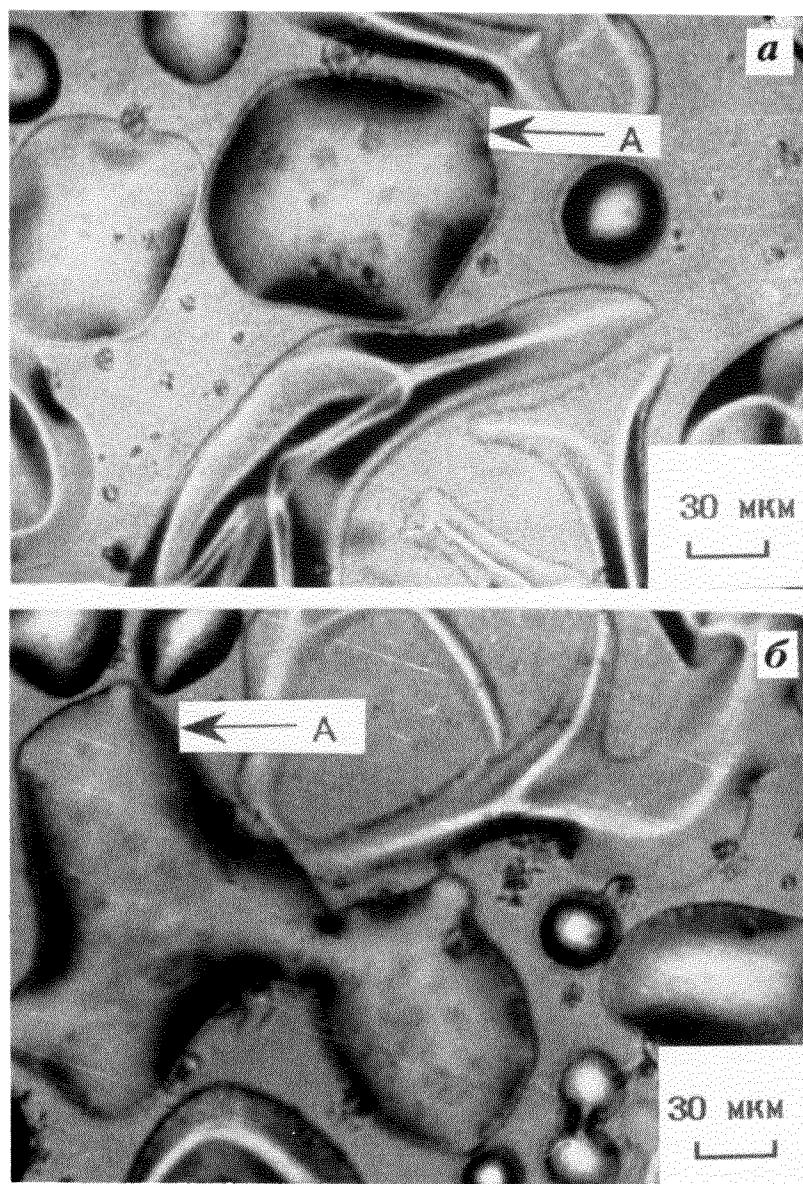


Рис. 5. Блистеринг на поверхности зеркал (вздутия пленок алюминия и серебра, стрелки A) после облучения протонами дозой $\Phi = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, $T = 490 \text{ K}$ (330×)

ческой эрозии» поверхности диэлектрических материалов, работающих в открытом космосе под влиянием потоков частиц радиационных поясов Земли.

Эксперименты третьей серии. В данной серии экспериментов облучение стеклянных образцов с пленками алюминия и серебра осуществлялось только протонами p^+ . Третья серия экспериментов была проведена для моделирования и углубленного изучения результатов экспериментов первой и второй серий. Пучок протонов площадью $S = 4 \text{ см}^2$ падал на образец таким образом, что одновременно

облучались чистое стекло и зеркальная поверхность с напыленными пленками алюминия или серебра. Энергия пучка протонов составляла $E = 150 \text{ кэВ}$, плотность тока пучка на образце $j = 2-3 \text{ мКА/см}^2$, доза — $\Phi = 10^{15}-2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Как и в первом случае, вторичная эмиссия электронов с поверхности образца подавлялась отрицательным потенциалом $U = -250 \text{ В}$, подаваемым на калибровочную диафрагму перед образцом. В третьей серии экспериментов облучение проводилось в вакууме $P = 10^{-6} \text{ торр}$ в интервале температур $T =$

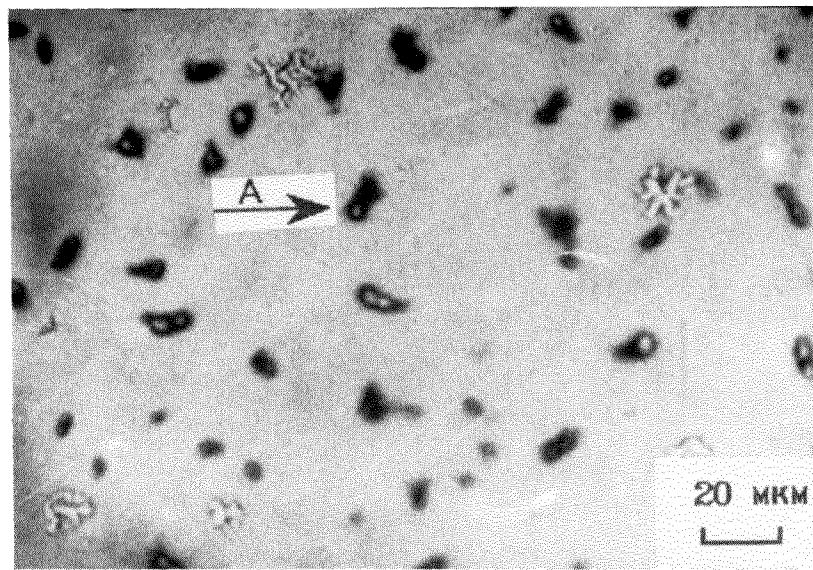


Рис. 6. Дефекты флекинга в чистом стекле после облучения протонами дозой $\Phi = 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (стрелки A) (500 \times)

$= 340\text{--}490 \text{ К}$. На рис. 4 и 5 представлены характерные дефектные структуры зеркальных поверхностей с напыленными пленками Al и Ag, а также топология поверхности чистого стекла после облучения протонами при фиксированных дозах (рис. 6). Особо отметим, что в экспериментах третьей серии наблюдается два характерных класса дефектов. На зеркальных поверхностях имеет место истинный «блисторинг» (т. е. «пузыри», «воздутия») пленок Al и Ag над стеклом (стрелки A рис. 4). Размеры этих дефектов и их плотность существенно зависели от дозы облучения и температуры мишени. Так для температуры 340 К в работе была определена критическая доза Φ_{kp} облучения, при которой наблюдали первые блистеры (рис. 4, a, б, стрелки A). Особо подчеркнем, что процесс появления первых блистеров происходил по достижении Φ_{kp} скачкообразно в течение нескольких секунд. Многочисленные эксперименты показали, что на разных образцах стекол из одной партии критическая доза протонов, приводящая к блистеробразованию, имела значение $\Phi_{kp} = 5 \cdot 10^{15} \text{--} 7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Подчеркнем, что указанная доза облучения совпадает с годичным интегральным флюенсом протонов, падающих на космический аппарат, находящийся на геостационарной ($H = 36000 \text{ км}$) орбите — $\Phi = 6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. При флюенсе протонов $\Phi = 10^{16} \text{ см}^{-2}$ и температуре образца $T = 340 \text{ К}$ наблюдалась высокая плотность

блистеров, которые равномерно заполняли все поле облучения. Диаметр блистеров был приблизительно одинаков для указанных доз и составлял $d = 30\text{--}60 \text{ мкм}$. Плотность блистеров для дозы протонов $\Phi = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ составляла величину $\rho = 10^4 \text{ см}^{-2}$, а для дозы $\Phi = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ и температуры $T = 340 \text{ К}$ соответственно $3 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$. При увеличении дозы облучения и температуры наблюдалась коалесценция блистеров, последние объединялись друг с другом, при этом очертания дефектов приобретали самые разные геометрические формы. Это хорошо видно на рис. 5 (стрелки A), где представлены характерные блистеры для дозы $\Phi = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ и температуры мишени $T = 490 \text{ К}$. При температуре облучения $T = 490 \text{ К}$ плотность блистеров на поверхности зеркал имела величину $\rho = 1.4 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$ при флюенсе $\Phi = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, т. е. для указанного флюенса при переходе от температуры $T = 340 \text{ К}$ к температуре $T = 490 \text{ К}$ плотность блистеров увеличивалась почти на порядок. Этот экспериментальный результат хорошо согласуется с теоретическими представлениями о механизмах блистеробразования (Мартыненко, 1979), скорость которого зависит от диффузационной подвижности атомов водорода (что будет видно из дальнейшего изложения). Эксперименты показали, что облучение протонами чистого стекла критической дозой $\Phi_{kp} = 6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ приводит к появлению дефектов, аналогичных дефектам на поверхности композитного зеркала в

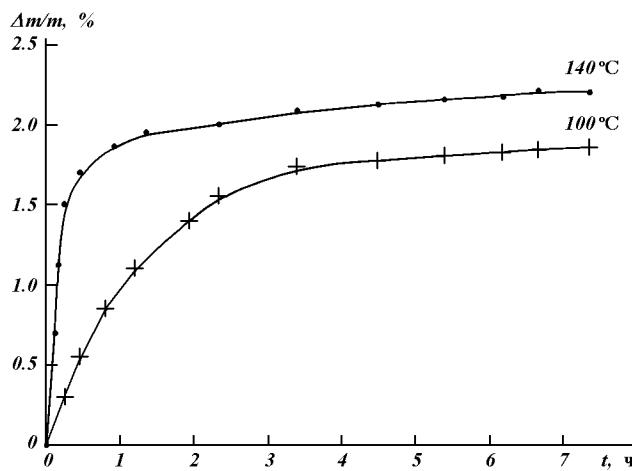


Рис. 7. Кинетика потери массы аримидной ткани в вакууме 10^{-7} торр при $T = 140$ °C

первой серии экспериментов, т. е. к появлению полусферических углублений кратерообразной формы с характерным диаметром 2—5 мкм, что хорошо видно из рис. 6 (стрелки A). При увеличении дозы облучения и температуры мишени плотность дефектов резко увеличилась.

На рис. 7 приведены типичные результаты по измерению кинетики потери массы аримидной ткани в вакууме 10^{-7} торр при $T = 140$ °C в течение 8 ч. Видно, что максимальное значение $\Delta m/m_0$ имеет величину 2 %, и кинетика процесса такова, что основная потеря массы происходит за время 1—1.5 ч.

ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обсудим теперь возможные причины образования сложных дефектных структур на поверхности зеркал при их облучении протонами и электронами дозами, превышающими критическую дозу $\Phi_{kp} = 6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, которые могут быть одной из причин резкого снижения отражательной способности зеркал, используемых в космической оптике, что может приводить к снижению чувствительности регистрирующей аппаратуры оптических приборов, работающих в открытом космосе.

Основные механизмы образования дефектных структур на поверхности зеркал, по нашему мнению, следующие. Первая группа механизмов — это возможные электрофизические механизмы при облучении зеркал протонами и электронами, которые

схематически показаны на рис. 8. Вторая группа механизмов — это образование криосадков на зеркалах, вызываемое процессом газовыделений из материалов бленды при ее облучении заатмосферным Солнцем + ВУФ-излучением и образование на поверхности зеркал полимеризованных пленок под воздействием квантов ВУФ-излучения.

Эффект блистеринга и флексинга на поверхности стекла под воздействием протонов радиационных поясов Земли. Рассмотрим первую группу механизмов. Основные из них следующие: 1. Эффект блистеринга и флексинга (вспучивание и отшелушивание) — образование дефектной структуры на поверхности стекла под воздействием протонов радиационных поясов Земли. Согласно современным представлениям это происходит по следующей причине. Ранее (Primak, Luthra, 1966) обнаружено образование пузырей на поверхности металлов (Cu, Ni, Al), облученных ионами гелия (He^+) и дейтерия (D^+). Это явление получило название «блестеринг» — от английского *blister* — волдырь, вспучивание. В последующем в 1970-е и 1980-е годы началось интенсивное изучение блистеринга в связи с проблемой создания термоядерного реактора, в котором материалы реактора подвергаются одновременному облучению ионами гелия, а также дейтерия и трития. Было показано, что при увеличении дозы облучения блистеры вскрываются и их крышки удаляются. Данное явление получило название «флексинг» — отшелушивание. Исследование явлений блистеринга и флексинга представляет в настоящее время большой интерес как для материаловедческой проблемы термоядерного реактора, в котором металлы (нержавеющая сталь и другие конструкционные материалы) будут облучаться ионами плохо растворимых газов (He^+ и D^+), так и с физической точки зрения, расширяющей наше понимание процессов взаимодействия атомных частиц с твердым телом. Именно с этих позиций попытаемся объяснить полученные в настоящей работе экспериментальные результаты в рамках моделей, развитых Мартыненко (1979); Гусевой, Мартыненко (1981).

При облучении протонами, глубина проникновения которых составляет $\xi_p^+ = 2$ мкм (рис. 8, a), в тонком слое материала происходит присоединение электрона к протону: $p^+ + e^- \rightarrow H$, т. е. протекает процесс образования атома водорода. Атомы водорода могут объединяться с вакансиями, созданными при облучении материала ионами, и образовывать пузырьки. При попадании в пузырек атомы водорода образуют молекулу H_2 . Такие пузырьки размером 1—10 нм действительно наблюдались (Evans, 1975) при бомбардировке металлов ионами He^+ .

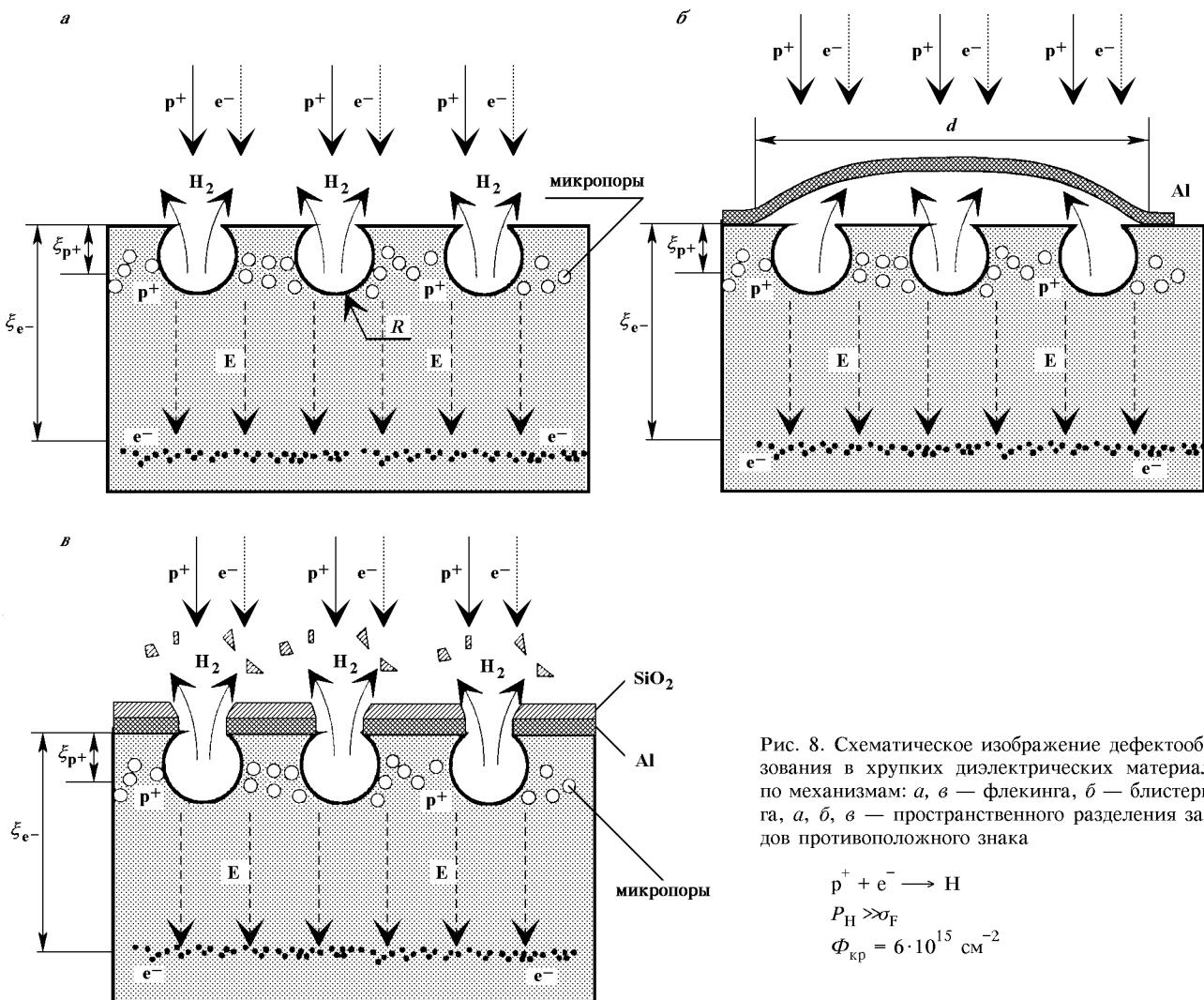
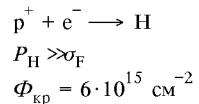


Рис. 8. Схематическое изображение дефектообразования в хрупких диэлектрических материалах по механизмам: *a*, *в* — флексинга, *б* — блистеринга, *a*, *б*, *в* — пространственного разделения зарядов противоположного знака



дозой несколько меньшей, чем критическая доза Φ_{kp} , при которой образуются блистеры. Ранее было получено даже распределение таких пузырьков по глубине облучаемого металла (Das, Kaminsky, 1973). Согласно модели Evans (1973) вследствие плохой растворимости газа давление в пузырьке может достигать огромных значений $P = 0.1 E$, где E — модуль Юнга материала. Оценка для стекла, например, показывает, что $P_{kp} = 700 \text{ кгс}/\text{мм}^2$. Разрыв материала в промежутках между пузырьками и образование трещин в веществе происходит на глубине свободного пробега частиц, т. е. $\xi_{p+} = 2 \text{ мкм}$ при такой критической дозе облучения Φ_{kp} , когда максимальное напряжение σ_{max} (обязанное давлению водорода в пузырьках) станет равным пределу прочности материала σ_F (в нашем

случае стекла). Поскольку стекло является хрупким материалом, вспучивание, которое имеет место в металлах, не наблюдается. Под действием возникающего давления водорода может происходить хрупкое разрушение некоторых областей стекла (экспериментально наблюдаются части сфер), лежащих в приповерхностном слое толщиной $\xi_{p+} = 2 \text{ мкм}$. Этому процессу может способствовать также наличие достаточно больших внутренних радиальных напряжений в поверхностном слое материала толщиной ξ_{p+} , обязанных внедрению водорода в стекло. Разрушение материала сопровождается отрывом указанных областей (кусков) стекла (рис. 8, *a*), а также части поверхности слоя стекла со всей расположенной на ней слоистой структурой $\text{Al} + \text{SiO}_2$ (первая и вторая группа

экспериментов), что схематически показано на рис. 8, *в*, т. е. в данном случае протекает процесс флексинга. Несколько иная картина образования дефектов на зеркальных поверхностях при облучении протонами имеет место, по нашему мнению, в третьей серии экспериментов (рис. 8, *б*). Водород, который образуется в полостях по механизму флексинга, описанному выше, выходит при разрушении поверхностного слоя не в свободное пространство, а в пограничный объем между сплошной пленкой алюминия (или серебра) и поверхностью стекла. Учитывая, что пленки Al и Ag обладают пластичностью, внутреннее давление водорода вначале отрывает пленку металла от стекла в местах расположения кратеров (первичных дефектов с размерами $d = 2\text{--}5 \text{ мкм}$), а затем пластически деформирует пленки Al и Ag. Макроскопически при этом наблюдаются дефекты в виде вздутий пленки алюминия и серебра над поверхностью стекла. Другими словами, в композитном материале стекло—алюминий наблюдается процесс образования «чистых» блистеров, аналогичных блистерам в металлах, в которых крышки блистеров также пластичны. Равновесная форма блистеров определяется в этом случае балансом сил внутреннего давления водорода, зависящего от дозы облучения, т. е. от концентрации атомов H и от величины силы адгезии пленки Al к стеклу. С этих позиций становятся понятными результаты экспериментов первой и второй серий, т. е. наличие не блистеров, а кратеров в стекле, наблюдаемые в сложном композиционном материале зеркал объектива ИК-телескопа (рис. 8, *в*), а также результаты экспериментов в космосе по эксплуатации ИК-приборов, сопровождающиеся резким уменьшением отражательной способности зеркал после 7–9 месяцев (иногда 1 года) их полета в радиационных поясах Земли. В этом случае поверхность отражающего слоя Al (100 нм) была покрыта защитным слоем хрупкого материала SiO₂, который препятствовал протеканию процесса «блестеринга», т. е. вспучивания алюминия. Явление развивалось в этом случае по механизму флексинга (рис. 8, *а*), т. е. происходил процесс образования кратеров, протекающий также в чистом стекле. Это могло привести к уменьшению отражающей способности зеркал. Следует особо подчеркнуть, что согласно ранним исследованиям в металлах (Das et al., 1975), блистеринг и флексинг являются явлениями повторяющимися, т. е. возможно образование дефектов блистеринга и флексинга следующих поколений при достижении новой критической дозы облучения Φ_{kp} . Эксперименты, проведенные в настоящей работе, показали, что критическая доза (протоны) флексинга в стекле

и в зеркале, найденная экспериментально, имела значение $\Phi_{kp} = 6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Сравним данную величину с критической дозой блистеробразования, предсказываемой теорией Мартыненко (1979). Согласно данной теории, образование блистеров в пластичных материалах и флексинга в хрупких веществах происходит по достижении критической дозы Φ_{kp} , которая определяется выражением:

$$\Phi_{kp} = \sigma_F / H \cdot \sqrt{\delta R^2(E)}, \quad (1)$$

где σ_F — предел прочности стекла ($\sigma_F \approx 4 \text{ кг/мм}^2$), H — энергия внедрения атома водорода в стекло ($H \approx 1.5 \text{ эВ}$), δR^2 — средние квадратичные разбросы пробегов протонов с энергией $E = 160 \text{ кэВ}$ в стекле. Подставляя численные значения в (1), получим оценку для Φ_{kp} , равную $\Phi_{kp} = 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, что хорошо согласуется с наблюдаемой в эксперименте критической дозой блистеробразования $\Phi_{kp} = 6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Особо отметим, что Φ_{kp} , найденная экспериментально, равна эквивалентной годичной дозе протонов ($D = 1 \text{ год}$), падающей на космический аппарат, находящийся на геостационарной орбите. Для радиационно-жестких орбит космических аппаратов КА на высотах $300 \text{ км} < H < 1000 \text{ км}$ годичная доза облучения имеет величину $D = 10^{16} \text{ см}^{-2}$, т. е. критический флюенс протонов (или ионов) газов для образования блистеринга-флексинга будет наблюдаться уже через 6 месяцев полета космического аппарата в радиационных поясах Земли. Данное обстоятельство, по нашему мнению, следует особо учитывать при прогнозировании поведения материалов с длительной эксплуатацией в условиях открытого космоса. Отсюда следует, что работоспособность материалов космической оптики, солнечных батарей и т. д. в течение 5–10 лет напрямую зависит от нашего понимания процессов, протекающих в материалах при воздействии на них протонов и ионов (N₂, Ar и др.) верхней атмосферы Земли на малых орbitах космических аппаратов, которые приводили бы к уменьшению, а в лучшем случае — к подавлению блистеринга и флексинга в диэлектрических материалах космических аппаратов. Анализ показывает, что в пористых материалах, получаемых, например, спеканием порошков, из которых можно изготавливать изделия космических систем, процесс блистеринга и флексинга резко заторможен. Отметим, что класс диэлектрических материалов, таких как стекла, полимеры, лаки, терморегулирующие покрытия и др., применяемые при конструировании космических аппаратов нового поколения, практически не исследованы в настоящее время в

отношении их стойкости к образованию блистеринга и флексинга под воздействием протонов и ионов верхней атмосферы Земли. Фундаментальное понимание природы перехода от микроскопического механизма образования газонаполненных пузырьков размером 1—10 нм к макроскопическому проявлению процесса флексинга — отрыва больших областей вещества, т. е. к явлению «космической эрозии» поверхности материалов, а также изучение особенностей структуры указанных дефектов в растровых микроскопах типа Jeol или Катевах (с высоким разрешением), требует дальнейших интенсивных исследований.

Группа электростатических эффектов. Дополнительным механизмом появления дефектов в диэлектрических материалах при их одновременном облучении протонами и электронами может служить явление образования пространственно разделенных областей заряда противоположного знака в слое стекла, обладающего высоким значением удельного сопротивления $\rho_v = 10^{14}—10^{15}$ Ом·см. Оценки показывают, что глубина проникновения протонов с энергией $E = 160$ кэВ составляет величину $\xi_{p+} = 2$ мкм, а электронов — $\xi_{e-} = 100—150$ мкм. Таким образом, в стекле образуются две пространственно разделенные зоны зарядов противоположного знака, между которыми возникает электрическое поле высокой напряженности E (рис. 8, *a—c*). Пренебрегая флюктуациями ионизационных потерь и утечкой заряда в стекле для указанных выше флюенсов облучения, получаем следующую напряженность электрического поля E :

$$E = \sigma/\epsilon = 1.6 \cdot 10^9 \text{ В/см},$$

где σ — поверхностная плотность заряда, ϵ — диэлектрическая проницаемость стекла. Это значение значительно превышает величину напряжения пробоя в стекле ($E_{\text{пр}} = 3 \cdot 10^5$ В/см). Таким образом, наблюдаемые дополнительные дефекты в материале объектива и зеркал (эксперименты первой и второй серий) могут быть связаны с внутренними пробоями в стекле, сопровождаемые хрупким разрушением некоторых областей объектива, с последующим отрывом слоев Al + SiO₂ и выбросом вещества, сопровождающего электрический пробой. Данный механизм дефектообразования позволяет объяснить тот экспериментальный факт, что плотность дефектов во второй серии экспериментов (с накоплением электрического заряда на объективе) сильно увеличивается от центра зеркала к его краям, где реализуется максимальная напряженность электрического поля в зеркале и на его поверхности.

Электростатические процессы протекают как

внутри материала зеркала, так и в тонких приповерхностных слоях и обязаны образованию разности потенциалов между элементами самого изделия, т. е. между, например, объективом и элементами бленды.

Попытаемся объяснить отрыв алюминия по краю зеркала: напряженность электрического поля на краях зеркала будет максимальной, и образование лавин пробоя будет происходить интенсивней по всему периметру зеркал. Лавинообразные пробои могут привести к большим локальным разогревам в приповерхностных слоях стекла, резкому повышению локальной температуры. Стекло и алюминий сильно отличаются по коэффициентам теплового расширения: $\alpha_{\text{ст}} = 10^{-7}$ град⁻¹; $\alpha_{\text{ал}} = 5 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹. Если предположить, что повышение локальной температуры в местах больших лавин происходит на несколько десятков градусов (что вполне достижимо), то напряжения на границе стекло—алюминий, обязаные разности α могут достигать:

$$\delta\sigma \approx \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\delta TE} \approx 10 \div 15 \text{ кг/мм}^2,$$

где E — модуль Юнга стекла. Эта величина значительно больше адгезионной прочности алюминиевого покрытия на стекле.

Таким образом, в третьей серии экспериментов (с незаземленным объективом), т. е. в ситуации реальной работы приборов в космосе, могут происходить, по нашему мнению, три основных электрофизических процесса, которые существенно влияют на тонкий алюминиевый слой и стекло, создавая в нем дефекты по разным механизмам: блистеринг и флексинг, внутренние пробои в стекле, обязаные пространственному разделению зарядов, а также внешние электрические пробои между объективом и элементами бленды.

Образование криоосадков на поверхность и зеркал. Вторая группа механизмов создания дефектов на зеркалах — это образование криоосадков. Потеря массы конструкционных материалов может происходить под влиянием следующих факторов:

- прямого попадания солнечного излучения на поверхность материалов;
- воздействие протонов и электронов радиационных поясов Земли;
- совместного воздействия Солнца и ионизирующей радиации солнечных вспышек (фоторадиационный эффект);
- газовыделения за счет повышения температуры.

Суммарная толщина осажденного слоя получается путем суммирования по всем вышеуказанным

факторам и материалам.

Оценка слоя криосадков, образующихся при потере массы аримидной ткани (рис. 7) и последующей конденсации продуктов газовыделений с равномерным осаждением вещества на всей площади зеркала диаметром 60 мм показала, что толщина пленки имеет значение $d_{kp} = 10$ мкм. Существенное уменьшение отражательной способности зеркала с пленкой криосадков следует ожидать при толщине пленки, сравнимой с длиной падающей волны ИК-излучения (точнее $\lambda/2$, т. е. при $d_{kp} = 1.5$ мкм). В поле ВУФ-излучения на поверхности объектива происходит также интенсивная полимеризация осажденного слоя, а также радиационное изменение оптических свойств, что в свою очередь несомненно может привести к уменьшению отражающей способности зеркал, работающих в условиях открытого космического пространства.

Выводы

Проведенные исследования по воздействию факторов космического пространства, имитируемых лабораторно: излучения протонов и электронов с энергией $E = 160$ кэВ, электромагнитного излучения Солнца (включая ВУФ-излучение) в интервале длин волн ($\lambda = 5$ —2500 нм) на отражательную способность зеркал масштабных моделей ИК-телескопа, а также на модельные зеркала (с пленками Al и Ag), позволяют сделать следующие основные выводы.

1. Наблюданное существенное уменьшение отражательной способности зеркал ряда ИК-приборов и устройств космической оптики при их эксплуатации в течение 7—9 месяцев в условиях открытого космоса (в радиационных поясах Земли) обуславливается образованием дефектных структур на поверхности зеркал. Основные механизмы образования этих дефектных структур, по нашему мнению, следующие:

- первая серия механизмов деградации и дефектообразования связана с электрофизическими процессами, происходящими в тонких слоях объектива (на глубине проникновения протонов и электронов — $\xi = 2$ —100 мкм);
- в работе обнаружено явление флекинга и блистеринга, т.е. образование сложных дефектных структур на поверхности композитных зеркал в виде углублений круглой кратерообразной формы размерами $d = 2$ —5 мкм (явление флекинга), а также вздутий пленок алюминия и серебра над поверхностью зеркал размерами 10—50 мкм (явление блистеринга).

2. В работе обнаружено, что процесс образования блистеринга и флекинга в стеклах зеркал элементов космической оптики происходит практически скачкообразно, за малые промежутки времени $\delta t = 1$ —2 с по достижении некоторой критической дозы облучения протонов Φ_{kp} , которая при $T = 340$ К оказалась равной $\Phi_{kp} = 6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Показано, что плотность блистеров и дефектов флекинга существенно зависит от дозы облучения и температуры мишени, резко увеличиваясь при повышении последней.

3. В работе показано, что блистеринг и дефекты флекинга могут рождаться под воздействием водорода, образующегося при рекомбинации протона с электроном в стекле (газовая модель блистеробразования (Мартыненко, 1979; Гусева, Мартыненко, 1981)), который собирается в пузырьки, лежащие в тонком приповерхностном слое стекла на длинах пробега протонов $\xi_{p+} = 2$ мкм. При достижении давления водорода в полостях, превышающих предел прочности вещества σ_F , может наступить хрупкое разрушение стекла, а также пленки алюминия и защитного слоя с образованием кратеров (флекинг). Наблюдается также второе явление — вспучивание пластичных пленок алюминия (или серебра) над поверхностью зеркал (блестеринг). В обоих случаях наблюдается своеобразная «космическая эрозия» поверхности зеркал, которая приводит к существенному уменьшению коэффициентов их отражения в широком спектральном интервале.

4. Проведенная в работе оценка критической дозы $\Phi_{kp} = 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ блистеробразования по теории Мартыненко (1979) показала, что данная модель дефектообразования хорошо согласуется с настоящим экспериментом, в котором критическая доза оказалась равной $\Phi_{kp} = 6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

5. В работе показано, что дополнительным механизмом появления дефектов в диэлектрических материалах элементов космической оптики при их одновременном облучении протонами и электронами может служить явление образования пространственно разделенных областей заряда противоположного знака за счет различной глубины проникновения этих частиц в материал, что может привести к внутренним пробоям в стекле на разном уровне (треки, лавины и т. д.).

6. Показано, что вторая группа механизмов создания дефектов на поверхности зеркал связана с пленками криосадков, которые образуются при конденсации продуктов газовыделений из материалов космических аппаратов (или масштабной модели телескопа в условиях настоящего эксперимента) при воздействии факторов космоса.

7. В работе показано, что максимальное воздей-

ствие на процесс дефектообразования зеркал космической оптики (по механизму блистеринга и флексинга) оказывает корпускулярное облучение протонами и электронами.

Экспериментально показано, что излучение заатмосферного Солнца (включая ВУФ-излучение с энергией квантов 5—100 эВ) не вносит заметного вклада в процесс блистеринга и флексинга. Электромагнитное излучение Солнца (включая ВУФ-излучение) может являться причиной создания лишь пленок криосадков (в процессе газовыделений материалов при их термодеструкции) с последующей конденсацией продуктов гажения на холодных поверхностях зеркал.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволяют дать некоторые практические рекомендации по выбору материалов, используемых в качестве конструкционной основы зеркал космической оптики, а также элементов будущих солнечных энергетических систем, базирующихся в космическом пространстве.

Блистеринг и флексинг может быть резко уменьшен или полностью подавлен в пористых, например, спеченных веществах, в которых газ при повышении давления выделяется по порам. Поэтому такими материалами могут служить образцы, спеченные, например, из алюминиевых или бериллиевых порошков. Перспективными материалами для основы зеркал могут быть, по нашему мнению, композиты, изготовленные из мелкодисперсного углерода со связующими из полимерных лаков и смол.

Полностью алюминиевые зеркала также весьма перспективны для космической оптики из-за большой электрической проводимости (отсутствие накопления зарядов и выравнивание потенциала по всему изделию). Критические дозы блистеробразования (Мартыненко, 1979) в алюминии составляет $\Phi_{kp} \approx 10^{18} \text{ см}^{-2}$, т. е. порядка 50—70 лет эксплуатации в открытом космосе, что требует тщательной экспериментальной проверки.

Отметим, что для полного понимания и управления процессами блистеринга и флексинга в материалах космической оптики и диэлектрических мате-

риалах космических аппаратов в целом требуется дальнейшие интенсивные фундаментальные исследования по взаимодействию атомных частиц с веществом.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность академику В. Г. Барьятару и профессору И. М. Неклюдову за обсуждение полученных в работе результатов.

- Абраимов В. В., Агашкова Н. Н., Будняк И. В. и др. Влияние низких температур, радиации и глубокого вакуума на физико-механические свойства полимерных светопоглощающих покрытий // ФизХОМ.—1992.—№ 2.—С. 26—29.
- Абраимов В. В., Агашкова Н. Н., Соловьев В. Н. и др. Термостойкость светопоглощающих покрытий в интервале температур 4.2—300 К // ФизХОМ.—1989.—№ 6.—С. 83—87.
- Абраимов В. В., Бочаров К. Ш., Галузя А. И., Удовенко В. Ф. Влияние электромагнитного излучения в области 5—2500 нм на механические и оптические свойства некоторых полимерных материалов // Радиационная стойкость органических материалов в условиях космоса. — М.: НИИТЭХИМ, 1989.—С. 23—30.
- Веркин Б. И., Удовенко В. Ф., Абраимов В. В., Бочаров К. Ш. Влияние электромагнитного излучения в области 0.01—25 мкм на механические свойства некоторых полимерных материалов // Космическая наука и техника.—1988.—Вып. 3.—С. 54—57.
- Вернов С. Н. (ред.) Моделирование воздействия космической среды на материалы и оборудование космических летательных аппаратов // Модель космического пространства. — М.: НИИЯФ МГУ, 1983.—Т. 2.—771 с.
- Гусева М. И., Мартыненко Ю. В. Радиационный блистеринг // Успехи физ. наук.—1981.—135, вып. 4.—С. 671—691.
- Маркус А. М., Удовенко В. Ф. и др. Установка для комплексных работ по радиационной физике твердого тела // ПТЭ.—1986.—№ 3.—С. 211—213.
- Мартыненко Ю. В. Теория блистеринга. — М.: Ин-т атомной энергии им. И. В. Курчатова, 1979.—40 с.
- Abraimov V. V., Lura F., Bohne L., et al. Untersuchung von Erscheinungen nichtlinearen Degradation der physikalisch-mechanischen Eigenschaften von Materialien unter dem Einfluss Kosmischer Umgebungsfaktor // Deutscher Luft und Raumfahrt Kongress DGfR. — Berlin, 1993.—P. 80—91.
- Das S. K., Kaminsky M. Radiation blistering of polycrystalline niobium by helium - ion implantation // J. Appl. phys.—1973.—44, N 1.—P. 25—31.
- Das S. K., Kaminsky M., et al. Correlation between blister skin thickness the maximum in the damage — energy distribution, and projected ranges of He⁺ ions in metals // Appl. phys. Lett.—1975.—27, N 10.—P. 521—523.
- Evans J. H. Formation of blisters in Mo bombarded with Helium // Nature.—1973.—256, N 5515.—P. 299—300.
- Primak W., Luthra J. Radiation blistering: Interferometric and microscopic observations of Oxides, Silicon, and Metals // J. Appl. phys.—1966.—37, N 6.—P. 2287—2294.