

УДК 621.315.3+533.9

Лю Хай<sup>1</sup>, Хэ Ши-юй<sup>1</sup>, В. В. Абраимов<sup>2</sup>, Ван Хуай-ий<sup>3</sup>, Ян Де-чжуан<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Центр космічного матеріалознавства та імітації факторів космічного простору  
Харбінського політехнічного університету, Харбін, 150001

<sup>2</sup>Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна, Харків

<sup>3</sup>Інститут космічного машинобудування Академії космічних технологій Китаю, Пекін, 100076

Исследование особенностей воздействия протонов  
и электронов с энергиями 60—200 кэВ  
на оптические материалы космических аппаратов

*Надійшла до редакції 26.07.01*

Подаются результаты экспериментального исследования взаимодействия протонов и электронов радиационных поясов Земли (имитированных лабораторно в комплексных имитаторах факторов космоса КІФК і УПІ) з энергиями частиц  $E = 60 \dots 200$  кэВ на оптические материалы космических аппаратов. Показано, что у исследованных материалах космической оптики при дозах  $\Phi = 5 \cdot 10^{14} \dots 4 \cdot 10^{17}$  част./см<sup>2</sup>, что ведет к изменению оптических свойств материалов — их коэффициентов пропускания  $T(\lambda)$ , поглощения  $k(\lambda)$  и коэффициентов отражения  $R(\lambda)$  в широком спектральном интервале длин волн  $\lambda = 0.2 \dots 3.2$  мкм. Экспериментально показано, что процессы блестеринга и флексинга на поверхности опромеженных зеркал и стекол протекают с трибоподобно при достижении некоторой критической дозы облучения протонами  $\Phi_{kp} = 6 \cdot 10^{15}$  част./см<sup>2</sup>. Полученные экспериментальные результаты трактуются в рамках существующих моделей «фарбования» стекол в поле ионизирующих излучений, а также теории образования блестеринга, флексинга и моделей радиационно-разрядных процессов. Результаты экспериментов якобы узгоджуются с теорией блестеринга, развитой Ю. В. Мартиненком.

## ВВЕДЕНИЕ

Известно, что оптические приборы широко используются в космической технике при создании космических аппаратов (КА) нового поколения, которые эксплуатируются в условиях открытого космического пространства. Материалы космической оптики (зеркала телескопов, кварцевые стекла и линзы, защитные оптические материалы солнечных батарей и др.) находятся при этом под воздействием ионизирующих излучений: потоков протонов и электронов радиационных поясов Земли с энергией частиц в интервале  $E = 30$  кэВ ... 1 МэВ.

Вопросу радиационной стойкости стекол посвящено значительное число работ, основные из которых отражены в монографиях [5—8]. За последние

годы интенсивно исследуются две группы явлений в материалах космической оптики. Первая группа — это процессы окрашивания (потемнения) оптических стекол и кристаллов, т.е. исследование наведенного ионизирующими излучениями дополнительного оптического поглощения в материалах в видимой и УФ-области спектра. Вторая группа — исследование явлений блестеринга и флексинга, связанных с образованием на поверхности оптических материалов (космических зеркал телескопов, стекол и других материалов) сложных дефектных структур в виде углублений кратерообразной формы размером 2—5 мкм, а также в случае зеркальных покрытий вздутий металлических пленок (алюминия, серебра, меди и др.) над поверхностью зеркал, которые также существенно изменяют оп-

тические свойства материалов КА [1, 12]. Из большого многообразия стекол важным материалом оптического (в том числе и космического) приборостроения является кварцевое стекло, широко используемое в качестве прозрачных для видимой и УФ-области спектра элементов оптических приборов, а также при создании волоконно-оптических систем. Отметим, что в литературе имеется целый ряд работ по влиянию рентгеновского ( $R$ ) и  $\gamma$ -излучений, потоков быстрых нейтронов на радиационно-оптическую стойкость кварцевых стекол [5—7]. Однако работ по исследованию влияния потоков протонов и электронов с энергиями  $E = 30\ldots200$  кэВ в области доз  $\Phi > 10^{16}$  част./ $\text{см}^2$  весьма ограниченное число [5, 8]. Отметим, что результаты данных исследований в некоторых случаях носили противоречивый характер. Весьма актуальной в настоящее время является задача комплексных исследований явлений окрашивания оптических материалов, а также новых закономерностей в явлениях блистеринга и флексинга в материалах космической оптики в области больших флюенсов  $\Phi \leq 5 \cdot 10^{17}$  част./ $\text{см}^2$ . В этой связи целью настоящей работы являлось комплексное и систематическое исследование оптических и структурных свойств материалов космической оптики (кварцевых стекол, ситалла, композиционных зеркал телескопов), работающих в УФ, видимом и ИК-диапазонах при воздействии на них потоков протонов и электронов радиационных поясов Земли, имитируемых лабораторно, с энергией частиц  $E = 60\ldots200$  кэВ в интервале флюенсов  $\Phi = 5 \cdot 10^{14}\ldots4 \cdot 10^{17}$  част./ $\text{см}^2$ , соответствующих времени эксплуатации космических аппаратов в течение  $\Delta t = 1\ldots20$  лет в интервале высот  $H = 300\ldots80000$  км (т. е. для большинства космических миссий в будущем).

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объектов исследований в работе использовали образцы кварцевых стекол с размерами  $35 \times 35$  мм $^2$  и  $10 \times 10$  мм $^2$  толщиной 2 мм с чистотой 99.99 % типа JGS3. На часть кварцевых образцов напылялись пленки алюминия и серебра толщиной  $\delta = 100$  нм. Второй группой объектов исследований были образцы чистого ситалла с размерами  $40 \times 40$  мм $^2$ , а также образцы с напыленными на ситалл пленками серебра и алюминия толщиной 100 нм в вакууме  $P = 5 \cdot 10^{-6}$  Торр.\* Третьей группой объектов исследований являлись зеркала

как элементы космических телескопов, которые представляли собой композиционный материал, состоящий из бериллиевой подложки толщиной 10 мм с нанесенным на нее слоем меди толщиной 0.5 мм, на поверхность меди было напылено отражающее зеркальное покрытие серебра толщиной  $\delta = 100$  нм и защитное покрытие  $\text{SiO}_2$  толщиной 100 нм. Исходный коэффициент отражения данных зеркал в области длин волн 0.4—3 мкм составлял  $R(\lambda) = 89\ldots90\%$ . Для решения поставленных в работе задач был использован целый ряд комплексных имитаторов по наземной, ускоренной имитации восьми и семи факторов космического пространства (ФКП) КИФК и УПИ [12], созданных специально для Харбинского политехнического университета по заказу Космического агентства Китая в рамках контрактов между НКАУ (Украина) и ВИЭКТОЧМА (КНР). Основными исполнителями созданных имитаторов являлись специалисты ФТИНТ НАНУ, УФТИ, ХНУ (г. Харьков).

Облучение указанных материалов космической оптики пучками протонов и электронов с энергиами частиц  $E = 60\ldots200$  кэВ проводили на протонно-электронном ускорителе комплексного имитатора восьми факторов космоса КИФК с совмещенными пучками частиц, которые вводились в исследовательскую вакуумную камеру имитатора в вакууме  $P = 2 \cdot 10^{-6}$  Торр, используя турбомолекулярные насосы. Во всех сериях экспериментов облучение протонами и электронами проводили как совместно в имитаторе КИФК, так и раздельно (только протонами) в имитаторах КИФК и УПИ.

Энергия пучков протонов и электронов составляла величину  $E = 60\ldots200$  кэВ, плотность тока при облучении образцов имела значение  $J = 0.11$  мкА/ $\text{см}^2$ , полный флюенс частиц изменялся в интервале  $\Phi = 10^{14}\ldots5 \cdot 10^{17}$  част./ $\text{см}^2$ . Вторичная электронная эмиссия с образцов подавлялась электрическим полем между образцами и металлической калибровочной диафрагмой, на которую подавался отрицательный потенциал  $U = -300$  В. Сканирование пучков протонов и электронов по площади зеркал, а также образцов кварца и ситалла, осуществляли с помощью системы развертки. Совместное облучение протонами и электронами проводили для адекватной имитации электронейтральности плазмы, реально существующей в радиационных поясах Земли на высотах  $H = 300\ldots80000$  км. Отметим, что облучение образцов космической оптики проводили в вакуумных камерах имитаторов КИФК и УПИ при температурах в интервале  $\Delta T = -90\ldots-25$  °C с использованием систем охлаждения

\* 1 Торр (= 1 мм рт. ст.) = 133.322 Па

на жидком азоте. После облучения образцов протонами и электронами фиксированной дозой, проводили измерение коэффициентов пропускания образцов  $T(\lambda, \Phi)$  и отражения зеркал  $R(\lambda, \Phi)$  в интервале  $\lambda = 0.2\ldots3.2$  мкм, каждая кривая была построена по данным усреднений на трех образцах; а также исследовали топографию поверхности зеркал и образцов методами оптической и растровой микроскопии с помощью микроскопов МИМ-8, РЭМ-200У и Carl Zeiss Jena.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

**Эксперименты первой серии.** На рис. 1 представлены результаты экспериментов первой серии. Приведены спектральные кривые оптического пропускания  $T(\lambda)$  исходных (кривые 1) и облученных (кривые 2—4) кварцевых стекол потоками протонов с энергией  $E = 60\ldots200$  кэВ при интегральных дозах облучения  $\Phi = 5 \cdot 10^{14}\ldots2 \cdot 10^{16}$  част./ $\text{см}^2$  в интервале спектра  $\lambda = 200\ldots800$  нм. Видно, что при

увеличении дозы облучения протонов наблюдается значительное окрашивание исследованных кварцевых стекол, проявляющееся в уменьшении их светопропускания в указанном интервале длин волн (в основном в УФ и видимой части спектра). Это находится в качественном согласии с экспериментальными данными, приведенными в работах [5, 6], однако настоящие исследования показали более существенное уменьшение оптического пропускания  $T(\lambda)$ , особенно в области спектра  $\lambda = 200\ldots400$  нм, чем в [5]. Следует подчеркнуть, что наблюдается монотонное уменьшение пропускания  $T(\lambda)$  кварцевых стекол с увеличением поглощенной дозы облучения протонов  $\Phi$ , т. е. без ярко выраженных минимумов на кривых  $T(\lambda, \Phi)$  в интервале  $\lambda = 200\ldots400$  нм (рис. 1, а—г).

На рис. 2 представлены спектральные кривые разности оптического пропускания  $\Delta T(\lambda)$  исходных образцов  $T_0(\lambda)$  и облученных образцов дозой  $\Phi$ , т. е. величина  $\Delta T(\lambda) = T_0(\lambda) - T(\Phi)$  в зависимости от  $\lambda$  в интервале 200—800 нм. Отметим, что величина  $\Delta T(\lambda)$  пропорциональна наведенному оптиче-

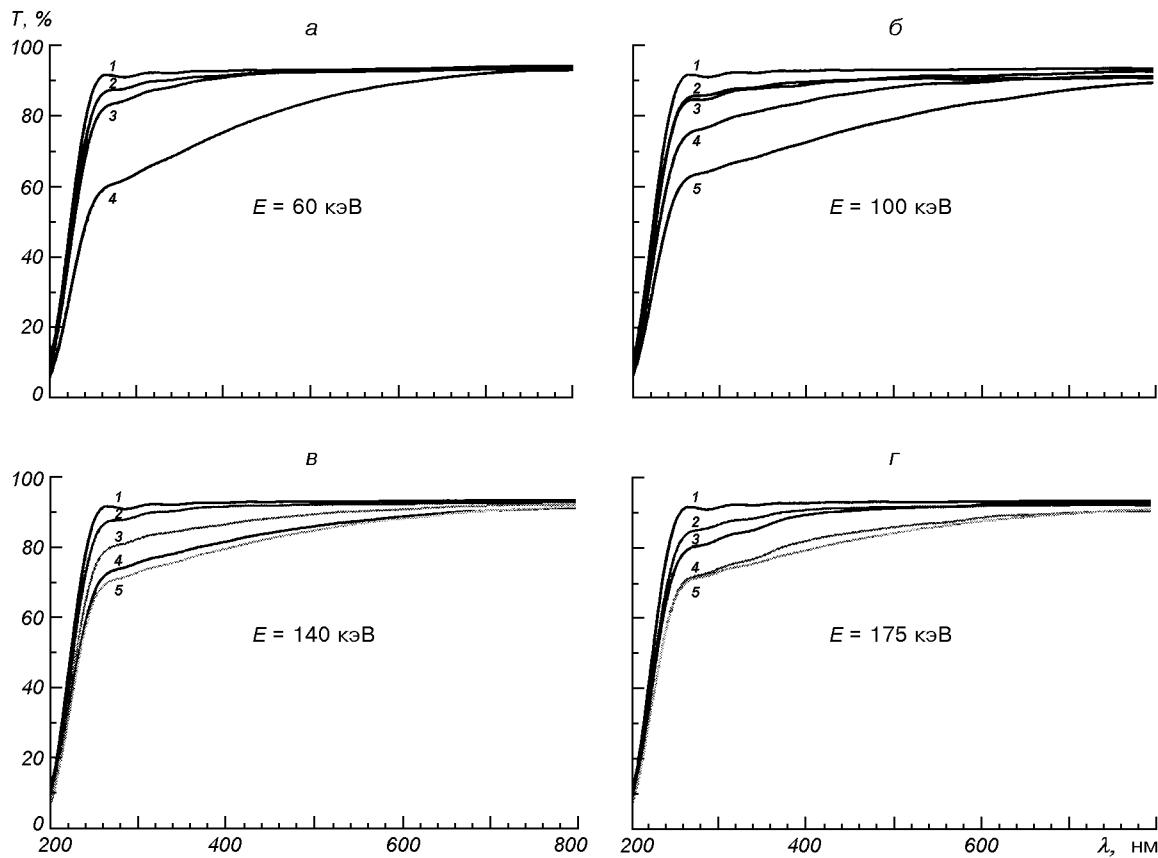


Рис. 1. Спектральные зависимости оптического пропускания  $T(\lambda)$  исходных и облученных кварцевых стекол при различных энергиях: 1 — до облучения, 2, 3, 4, 5 — при дозах облучения протонами  $(1, 2, 10, 20) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  соответственно

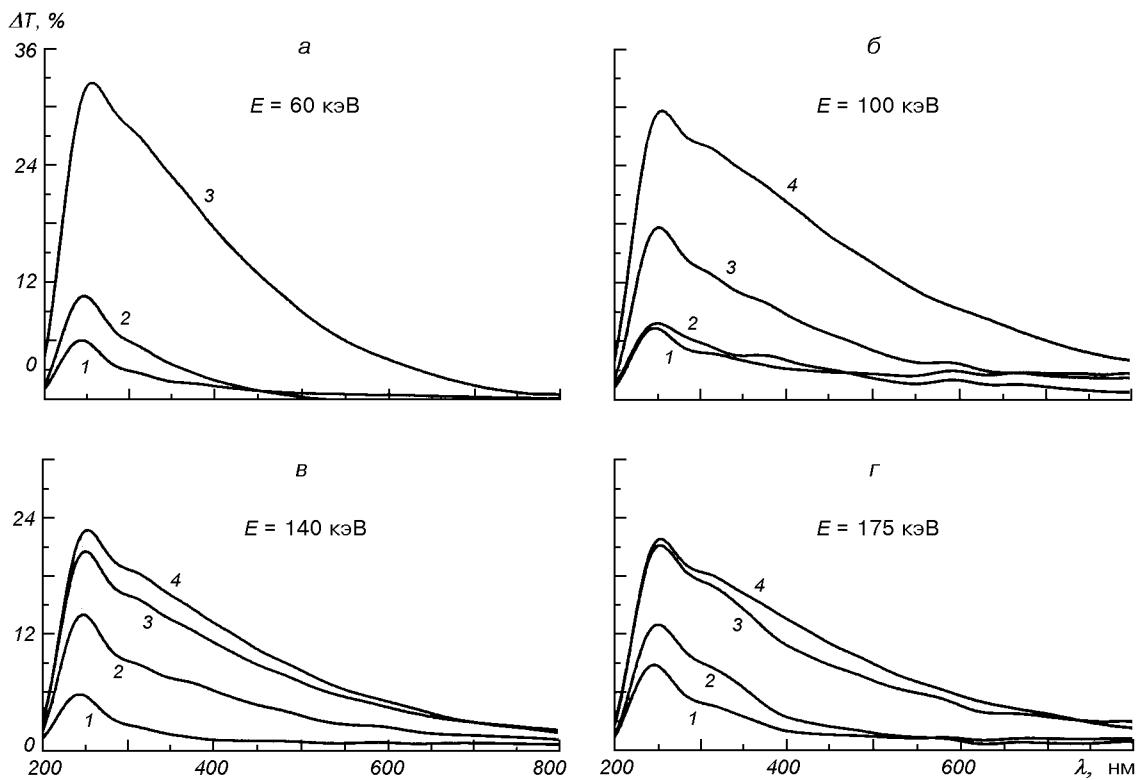


Рис. 2. Спектральные зависимости разности  $\Delta T(\lambda)$  оптического пропускания исходных и облученных кварцевых стекол при различных энергиях и дозах протонов  $\Phi = (1, 2, 10, 20) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  — соответственно кривые 1, 2, 3, 4

скому поглощению кварцевых стекол  $\Delta k(\lambda)$ , а также, соответственно, концентрации центров окраски  $n(\lambda, D)$  при их облучении протонами.

Анализ кривых рис. 2 показывает, что при всех фиксированных энергиях протонов в интервале  $E = 60\ldots200$  кэВ и дозах облучения  $\Phi = 10^{15}\ldots10^{16}$  част./ $\text{см}^2$  наблюдаются ярко выраженные максимумы величин  $\Delta T(\lambda)$ , т. е. наведенного поглощения  $\Delta k(\lambda)$  кварцевых стекол в интервале длин волн  $\lambda = 240\ldots260$  нм. Видно, что максимальное окрашивание кварцевых стекол величиной  $\Delta T \approx 33\%$  наблюдается для энергии протонов  $E_1 = 60$  кэВ при дозах  $\Phi = 10^{16}$  част./ $\text{см}^2$ . Для энергии  $E = 140$  и 175 кэВ величина наведенного поглощения уменьшается до уровня  $\Delta k \approx 22\ldots23\%$  (кривые 4, рис. 2, в—г), при дозе  $\Phi = 2 \cdot 10^{16}$  част./ $\text{см}^2$ , т. е. наблюдается явление радиационного просветления кварцевых стекол при увеличении дозы и энергии протонов.

На рис. 3 приведены зависимости наведенного оптического поглощения кварцевых стекол  $\Delta T(\lambda) \sim \Delta k(\lambda)$  от времени облучения протонами  $t$

при разных длинах волн в интервале  $\lambda = 240\ldots260$  нм для энергий 140 и 175 кэВ. Видно, что зависимости  $\Delta T(\lambda)$  от времени облучения протонами имеют затухающий характер.

**Эксперименты второй серии.** В данной серии экспериментов облучение образцов чистого ситалла и кварцевых стекол, а также образцов ситалла с пленками серебра и алюминия осуществлялось протонами или электронами, а также совместно двумя пучками ( $p^+ + e^-$ ) в вакууме  $p = 10^{-6}$  Торр при температурах  $T = 293\ldots450$  К. Энергия пучков протонов и электронов имела значения  $E = 150\ldots180$  кэВ, плотность тока на образцах  $J = 0.2\ldots2$  мкА/ $\text{см}^2$ , доза облучения  $\Phi = 10^{15}\ldots4 \cdot 10^{17}$  част./ $\text{см}^2$ . На рис. 4—6 представлены характерные дефектные структуры поверхностей различных образцов после их облучения протонами и электронами при фиксированных дозах.

Особо отметим, что в экспериментах второй серии наблюдаются четыре основных характерных класса дефектов и явлений, которые развиваются на поверхности образцов облученного ситалла и

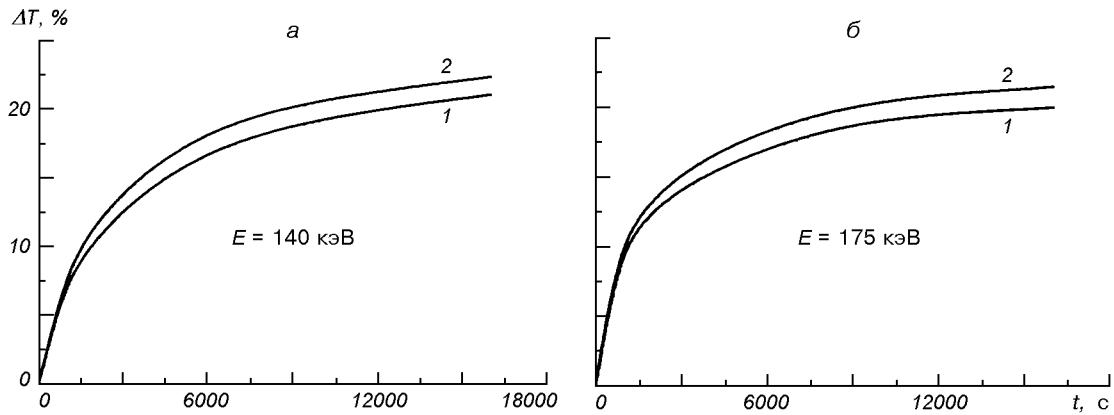


Рис. 3. Зависимости изменения оптического пропускания  $\Delta T(\lambda)$  кварцевых стекол от времени облучения протонами при разных энергиях частиц; 1 —  $\lambda = 240$  нм, 2 —  $\lambda = 260$  нм

кварцевых стекол. На зеркальных поверхностях (т. е. на образцах ситалла с пленками Ag или Al) наблюдается явление истинного блистеринга, т. е. появление вздутий пленок серебра над поверхностью ситалла (рис. 4). Аналогичное явление наблюдали ранее авторы [1] на образцах зеркал из стекла К-208, широко применяемого в космической оптике, с напыленными пленками Al и Ag при их облучении протонами дозами  $\Phi = 10^{15} \dots 10^{17}$  част./см<sup>2</sup>. В нашем случае, как и в [1], размеры этих дефектов (блестеров) и их плотность существенно зависели от дозы облучения и температуры мишени. Эксперименты показали, что при облучении образцов ситалла протонами процесс появления первых блистеров происходил практически скачкообразно по достижении некоторой критической дозы облучения  $\Phi_{kp}$ , которая в нашем случае имела значение  $\Phi_{kp} = (5 \dots 7) \cdot 10^{15}$  част./см<sup>2</sup>. Это значение совпадает с годичным интегральным флюенсом протонов, падающим на внешние элементы космического аппарата, находящегося на геостационарной орбите  $H = 36\,000$  км. Плотность блистеров при переходе от дозы  $\Phi_1 = 5 \cdot 10^{16}$  част./см<sup>2</sup> к дозе  $\Phi_2 = 4 \cdot 10^{17}$  част./см<sup>2</sup> изменялась соответственно от значения  $\rho = 2 \cdot 10^4$  см<sup>-2</sup> до  $\rho = 10^5$  см<sup>-2</sup> (рис. 4, в—г). Диаметры блистеров, как и их плотность, имели тенденцию к увеличению от начальных  $d \approx 4 \dots 10$  мкм при дозах  $\Phi = (7 \dots 8) \cdot 10^{15}$  част./см<sup>2</sup> до значений  $d_2 = 25 \dots 30$  мкм соответственно при дозах  $\Phi_2 = 4 \cdot 10^{17}$  част./см<sup>2</sup>. Многочисленные исследования показали, что наблюдалось два характерных типа распределений блистеров: их равномерное распределение в областях без видимых дефектов, а также линейное распределение блистеров, по всей

видимости, вдоль линейных поверхностных дефектов облученного ситалла (рис. 4, г).

Вторым характерным типом дефектов и явлений, которое развивается на поверхности облученного чистого ситалла, является явление флекинга (рис. 5), т. е. образование углублений в ситалле с характерными размерами  $\delta = 2 \dots 10$  мкм произвольных геометрических форм. Отметим, что ранее в работе [1] наблюдалось явление флекинга в облученном протонами стекле К-208 в виде полусферических углублений размером 2—5 мкм. В нашем случае при увеличении дозы и температуры образцов плотность данных дефектов резко увеличивалась. Так, например, при дозе  $\Phi = 4 \cdot 10^{17}$  част./см<sup>2</sup> плотность дефектов флекинга составляла величину  $\rho = 2 \cdot 10^6$  см<sup>-2</sup>, что на порядок выше плотности блистеров при данной дозе облучения.

При совместном облучении образцов ситалла пучками протонов и электронов энергиями  $E = 150 \dots 200$  кэВ, а также при облучении кварцевых образцов электронами наблюдали новые характерные типы дефектов (рис. 6), связанные с электроизрядными процессами в поверхностных областях облученных образцов, известные как «фигуры Лихтенберга», образующиеся при электрическом пробое в прозрачных диэлектрических материалах. Данное явление интенсивно исследуется в последние годы при облучении прозрачных диэлектриков протонами высоких энергий  $E = 1 \dots 100$  МэВ [2].

Результаты настоящих исследований показывают, что электроизрядные процессы интенсивно протекают в ситалле и кварцевых стеклах также в области средних энергий ( $E \leq 200$  кэВ).

Известно, что при облучении диэлектрических материалов заряженными частицами может возни-

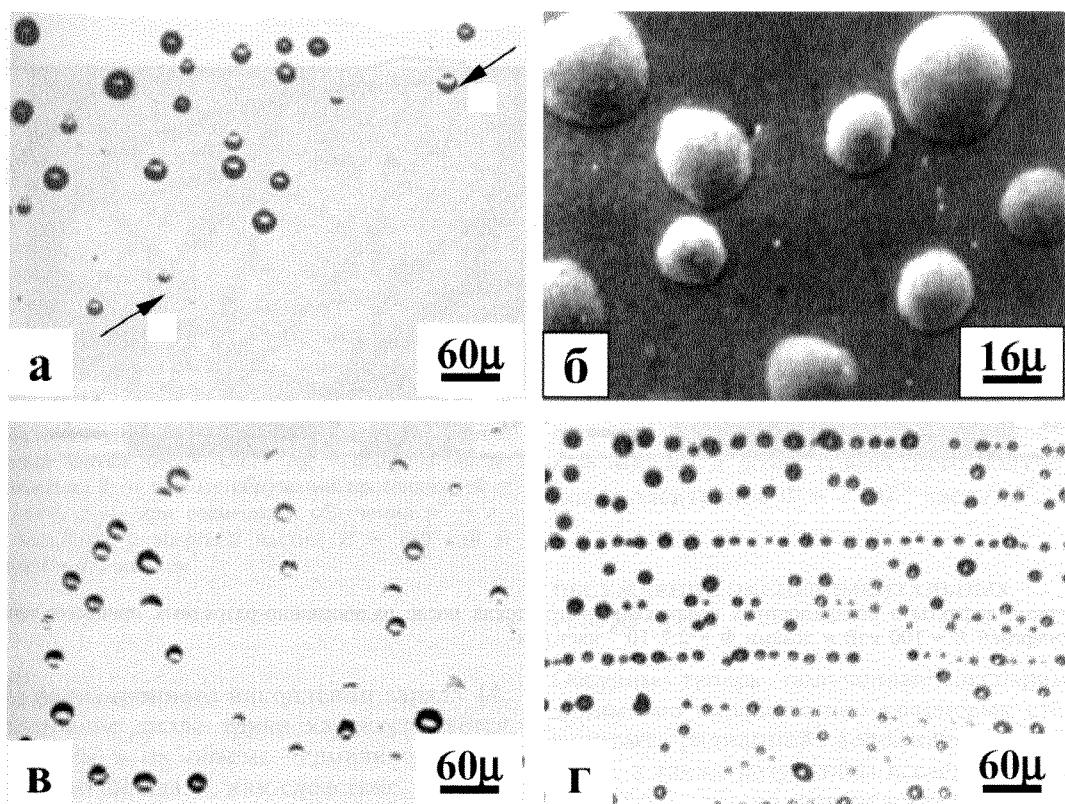


Рис. 4. Типичные дефектные структуры блистеринга на зеркальных поверхностях ситалла с пленками Ag после их облучения протонами с энергией  $E = 160$  кэВ при различных дозах: *a, в* —  $\Phi = 5 \cdot 10^{16}$  част./ $\text{см}^2$ ; *б, г* —  $\Phi = 4 \cdot 10^{17}$  част./ $\text{см}^2$

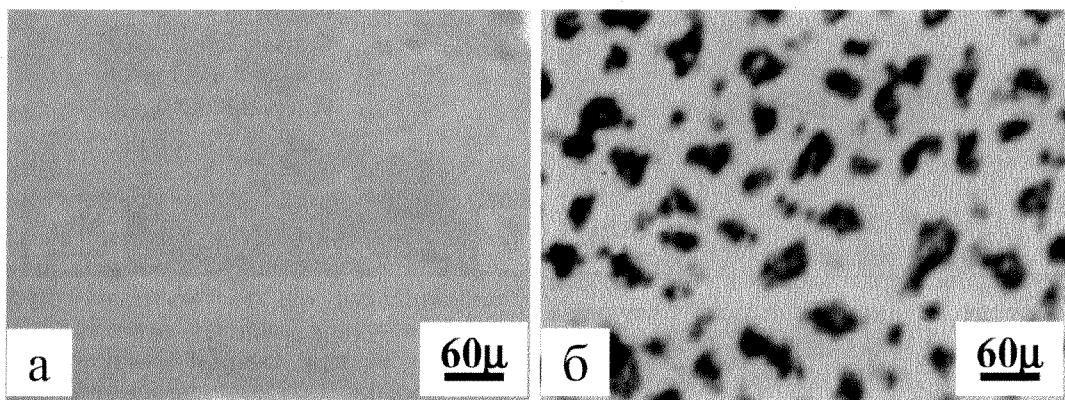


Рис. 5. Характерные дефекты флекинга в чистом ситалле после облучения протонами с энергией = 160 кэВ при дозе  $\Phi = 4 \cdot 10^{17}$  част./ $\text{см}^2$ : *а* — исходная поверхность ситалла; *б* — поверхности ситалла после облучения

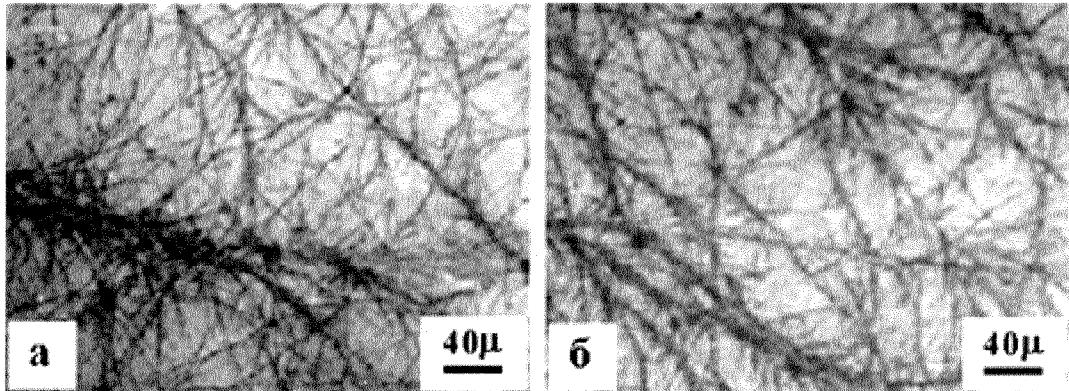


Рис. 6. Характерные дефекты в поверхностных слоях кварцевого стекла после радиационно-разрядных процессов при облучении электронами с энергией  $E = 100$  кэВ и дозами  $\Phi = 2.7 \cdot 10^{16}$  част./ $\text{см}^2$

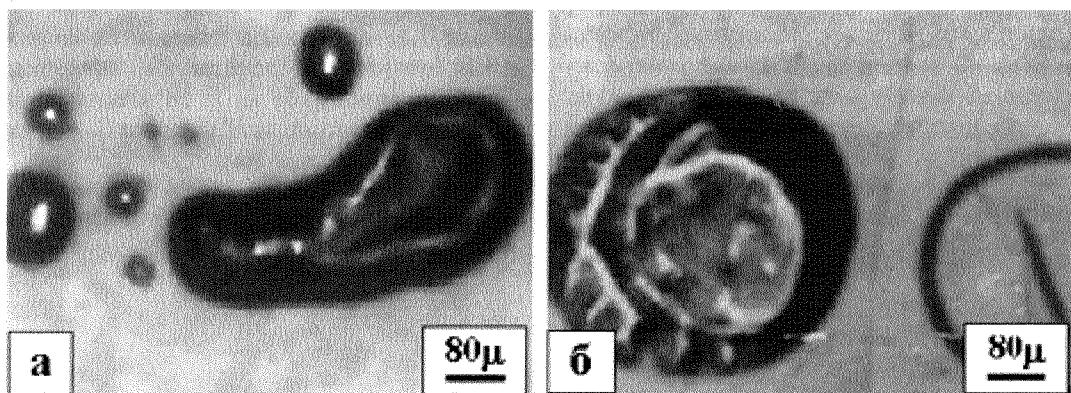


Рис. 7. Характерные дефекты блистеринга на поверхности композитных зеркал после их облучения протонами с энергией частиц  $E = 130$  кэВ и дозами  $\Phi = 10^{16}$  част./ $\text{см}^2$

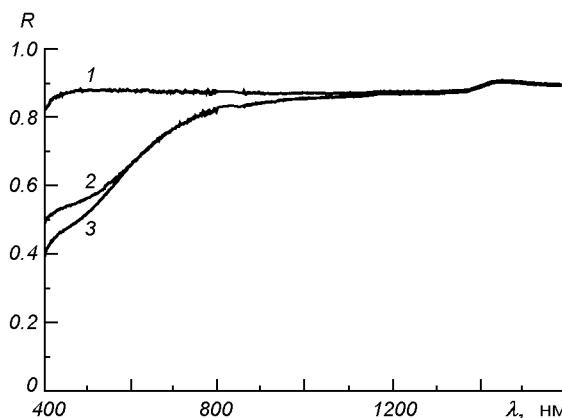


Рис. 8. Спектральные зависимости коэффициентов отражения  $R(\lambda)$  композитных зеркал ( $\text{Be} + \text{Cu} + \text{Ag} + \text{SiO}_2$ ): 1 — до облучения протонами, 2 — при их облучении протонами ( $\Phi = 4 \cdot 10^{16}$  част./ $\text{см}^2$ ), 3 — при совместном облучении  $p^+ + e^-$  ( $\Phi = 2 \cdot 10^{16}$  част./ $\text{см}^2$ ) с энергией частиц  $E = 130$  кэВ и плотностью тока  $J = 0.2$  мкА/ $\text{см}^2$

кать явление радиационного накопления заряда [4, 9]. Такое состояние диэлектрика характеризуется аккумулированием в их объеме термализованного инжектированного заряда и, как следствие, образование высокой напряженности внутреннего электрического поля  $E_{\text{вн}}$ . Если данное поле становится больше электрической прочности диэлектрика  $E_{\text{вн}} \geq E_{\text{пр}}$ , возникает электрический пробой аккумулированного заряда на поверхность диэлектрика, что имеет место в случае облучения диэлектрика потоком частиц, превышающих критический флюенс  $\Phi_{\text{кр}}$ , который, в свою очередь, зависит от материала и условий облучения. Электроразрядные процессы в радиационно-заряженных диэлектрических материалах и элементах могут значительно снижать ресурс космического оборудования [3].

Четвертое явление, которое интенсивно развивается в нашем случае в облученном ситалле при дозах  $\Phi > 10^{15}$  част./ $\text{см}^2$  — его радиационное окрашивание. Эксперименты показали, что образцы ситалла существенно темнеют при увеличении дозы, приобретая темно-коричневую окраску. Как будет показано ниже, это связано с образованием в оптических материалах центров окраски, концентрация которых увеличивается с дозой облучения.

**Эксперименты третьей серии.** В экспериментах данной серии облучение перспективных образцов композиционных зеркал, структура которых была описана ранее, производили как протонами, так и совместно двумя пучками ( $p^+ + e^-$ ) с энергиями частиц  $E = 130 \dots 200$  кэВ и плотностью тока на

образцах  $J = 0.1 \dots 0.3$  мкА/ $\text{см}^2$  в интервале доз  $\Phi = 10^{15} \dots 4 \cdot 10^{16}$  част./ $\text{см}^2$ . Структурные исследования топологии облученных зеркал показали, что на их поверхности, как и на образцах ситалла, появляются дефекты блистеринга (рис. 7), которые могут привести к значительному уменьшению коэффициента отражения зеркал. Коэффициенты отражения зеркал  $R(\lambda)$  в интервале длин волн  $\lambda = 400 \dots 1600$  нм измерялись до и после облучения зеркал фиксированными дозами. Спектральные кривые отражения, представленные на рис. 8, показывают, что исследованные облученные композиционные образцы с зеркальной поверхностью демонстрируют существенное уменьшение коэффициента отражения  $R(\lambda)$ , которое максимально проявляется при  $\lambda \approx 400$  нм и дозах совместного облучения протонов и электронов  $\Phi = 2 \cdot 10^{16}$  част./ $\text{см}^2$ .

#### ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обсудим теперь полученные экспериментальные данные по окрашиванию кварцевых стекол (наведенному радиацией дополнительному поглощению), а также результаты исследований блистеринга и флексинга на поверхности зеркал и стекол с точки зрения современных представлений о взаимодействии излучений с веществом в рамках существующих теорий [5, 6, 8, 10, 11].

Оценим вначале поглощенные дозы исследованных материалов для флюенсов протонов в интервале  $\Phi = 10^{15} \dots 4 \cdot 10^{17}$  част./ $\text{см}^2$  и их энергий  $E = 60 \dots 200$  кэВ. Величина поглощенной дозы исследованных образцов определяется известным соотношением

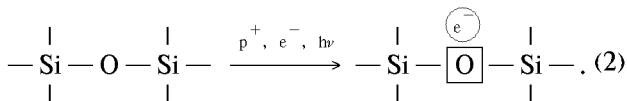
$$D = \Phi E / \rho \xi, \quad (1)$$

где  $\Phi$  — полный флюенс частиц, падающих на образец;  $E$  — энергия протонов;  $\rho$  — плотность стекол;  $\xi$  — глубина проникновения протонов в вещество, которая зависит от энергии частиц и материала. В нашем случае  $E = 60 \dots 200$  кэВ,  $\Phi = 10^{15} \dots 4 \cdot 10^{17}$  част./ $\text{см}^2$ ,  $\rho = 2.2$  г/ $\text{см}^3$ ,  $\xi = 0.6 \dots 2$  мкм. Расчет поглощенной дозы для энергии протонов  $E_1 = 60$  кэВ и флюенса  $\Phi_1 = 10^{16}$  част./ $\text{см}^2$  дал значение  $D_1 = 5 \cdot 10^{10}$  рад, а для энергии  $E_2 = 175$  кэВ и флюенса  $\Phi_2 = 2 \cdot 10^{16}$  част./ $\text{см}^2$  — значение  $D_2 = 2 \cdot 10^{11}$  рад, т. е. в четыре раза больше. Отметим, что доза  $\Phi = 10^{16}$  част./ $\text{см}^2$  соответствует эквивалентной поглощенной дозе материалами КА на геостационарной орбите в течение двух лет.

Обсудим основные результаты экспериментов первой серии: монотонное уменьшение пропускания  $T(\lambda)$  при увеличении дозы облучения (рис. 1); явление радиационного просветления, т. е. уменьшение оптического поглощения кварца при увеличении дозы облучения протонов при переходе от энергии  $E = 60$  кэВ к энергии  $E = 175$  кэВ, т. е. уменьшение максимумов на кривых 3—4 рис. 2, *a*, *g*; а также временные зависимости наведенного поглощения  $\Delta k(\lambda)$  от времени облучения протонами (рис. 3).

В рамках современных теорий окрашивания процесс наведенного поглощения в поле ионизирующего излучения описывается следующим образом. Первичные падающие заряженные частицы (в нашем случае протоны с энергией  $E = 60\ldots200$  кэВ) при прохождении через стекло за время  $\Delta t = 10^{-15}\ldots10^{-12}$  с образуют треки, состоящие из ионизированных атомов, свободных (вторичных) электронов и различных дефектов в структуре стекла. Вторичные электроны в свою очередь также ионизируют вещество, создавая в нем электроны, дырки и различные дефектные структуры. Перемещение электронов и дырок по объему материала приводит или к прямой их рекомбинации между собой, или к захвату их дефектами структуры стекла (или атомами примесей в стекле). В том случае, если электрон захватывается отрицательной (анионной) вакансиеи (т. е. областью стекла, из которой удален отрицательный ион), то образуется  $F$ -центр окраски; если вакансия захватывает два электрона, то образуется  $F'$ -центр окраски (в некоторых моделях и теориях их принято называть  $E$  и  $E'$ -центрами) [5, 6].

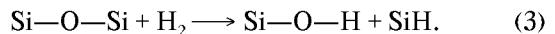
В случае кварцевого стекла  $\text{SiO}_2$   $E$ -центром окраски является электрон, захваченный, например, вакансиеи кислорода, что можно изобразить схематически



Центры окраски могут образовываться и на других дефектах структуры (например, при захвате дырки катионной вакансиеи), а также на атомах примесей. Наличие в оптических стеклах большого количества радиационных дефектов структуры и атомов примесей приводит к возможности образования в них после облучения большого числа различных типов центров окраски [6] по разным механизмам с разными временами жизни, что ведет к появлению в спектрах поглощения дополнительных полос, интенсивность которых изменяется с дозой и температурой облучения. Данные полосы

поглощения могут перекрываться между собой, образуя в большинстве случаев монотонную кривую наведенного поглощения, что именно и наблюдается в настоящих экспериментах (рис. 1).

Явление радиационного просветления, т. е. уменьшение наведенного радиацией поглощения, наблюдалось ранее в работах для некоторых типов кварцевых стекол при дозах, превышающих  $10^4\ldots10^5$  рад [5, 6] и описывается также для образцов кварца, содержащих водород. В настоящее время предложено несколько моделей, объясняющих эффект радиационного просветления в кварцевых стеклах при увеличении дозы облучения и концентрации водорода. В некоторых из них определяющая роль отводится процессам рекомбинации центров окраски (т. е. процессу их разрушения при увеличении дозы облучения) или стабилизации их числа. Как было показано в работе [6], при облучении водородосодержащего  $\text{SiO}_2$  дырки локализуются на кислородных ионах, а электроны захватываются катионами  $H^+$ , т. е. происходит стабилизация процесса образования новых центров окраски, а затем и их рекомбинация, т. е. уменьшение концентрации  $n(D)$  с дозой облучения. С этих позиций можно объяснить явление просветления кварцевых стекол в нашем случае при увеличении дозы протонного облучения (кривые 4 рис. 2). Действительно, при переходе от дозы  $D_1 = 5 \cdot 10^{10}$  рад к дозе  $D_2 = 2 \cdot 10^{11}$  рад при облучении кварца протонами происходит рекомбинация протонов с электронами вещества:  $p^+ + e^- \rightarrow H$  с образованием атомов водорода, которые, объединяясь с вакансиями, образуют молекулы водорода  $H_2$ . С увеличением дозы облучения протонов происходит накопление водорода  $H_2$  в поверхностных слоях кварцевых стекол, а также рекомбинация центров окраски по механизмам, изложенным в работе [6]. К этому можно добавить еще один механизм просветления кварца в поле облучения протонов. При облучении стекла возможна радиационно-химическая реакция молекулярного водорода с дефектами структуры, приводящая к росту гидроксильных и гидридных групп:



В результате такого взаимодействия с водородом происходит процесс блокирования зарождения новых центров окраски [6].

Экспериментальные результаты затухающего характера зависимости наведенного поглощения  $\Delta T(\lambda) = \Delta K$  от времени облучения протонами  $t$  (рис. 3), находятся в качественном согласии с феноменологическими теориями окрашивания стекол в поле ионизирующих излучений [5, 6, 8],

согласно которым приращение наведенного поглощения  $\Delta k(\lambda)$  имеет вид

$$\Delta k_D(\lambda) = \Delta k_\infty [1 - e^{-J\sigma t}], \quad (4)$$

где  $\Delta k_D(\lambda)$  — оптическое поглощение при дозе  $D$ ;  $\Delta k_\infty$  — поглощение образцов при  $t \rightarrow \infty$ ;  $J$  — интенсивность ионизирующего излучения;  $\sigma$  — сечение захвата электронов или дырок на дефектах структуры или примесях стекла.

Обсудим теперь возможные причины образования сложных дефектных структур на поверхности зеркал — явление блистеринга (вспучивание пленок серебра) и флекинга (образование кратеров) в образцах ситалла при их облучении протонами с дозами, превышающими критическую дозу  $\Phi_{kp} = (5...7) \cdot 10^{15}$  част./см<sup>2</sup>, которые могут быть одной из причин резкого снижения коэффициента отражения исследованных композиционных зеркал (рис. 7). Как отмечалось ранее, в работе [1] наблюдались аналогичные дефекты в композитных [Be+стекло K-208+Al+SiO<sub>2</sub>] и модельных зеркалах на стекле K-208 с напыленными пленками Al и Ag.

Согласно теоретическим моделям блистеринга и флекинга, развитым в [10, 11], при облучении твердых тел потоками ионов ( $H^+$ ,  $He^+$ ,  $D^+$  и др.) в материалах протекают следующие основные процессы, приводящие к образованию сложных дефектных структур на поверхности материалов. При облучении протонами, глубина проникновения которых составляет  $\xi_{p+} \approx 2$  мкм (при  $E = 200$  кэВ), в тонком слое материала происходит присоединение электрона вещества к имплантированному протону:  $p^+ + e^- \rightarrow H$ , т.е. образуются атомы водорода. Последние могут объединяться с вакансиями, созданными при облучении материала ионами и образовывать микроскопические пузырьки размерами 1—10 нм, которые наблюдались в работе [13] при облучении ряда металлов ионами  $He^+$  при дозах, несколько меньших, чем критические дозы  $\Phi_{kp}$  блистерообразования. При попадании в пузырьки атомы водорода образуют молекулы  $H_2$ , концентрация которых увеличивается с увеличением дозы протонного облучения. Согласно модели Эванса [13] вследствие плохой растворимости газа давление в пузырьке может достигать весьма значительных значений:  $P_{H2} \approx 0.1E_c$ , где  $E_c$  — модуль Юнга материала. Оценка для ситалла, например, показывает, что  $P_{kp} = 130$  кг/мм<sup>2</sup>, а для меди  $P_{kp} = 900$  кг/мм<sup>2</sup>. Разрыв материала в промежутках между пузырьками и образование трещин в веществе происходит на глубине свободного пробега протонов, т. е.  $\xi_{p+} \approx 2$  мкм при некоторой крити-

ческой дозе облучения  $\Phi_{kp}$ , когда максимальное напряжение  $\sigma_{max}$  (обязанное давлению водорода в пузырьках) станет равным пределу прочности материала  $\sigma_{kp}$  (в нашем случае ситалла или меди в композитном зеркале). Под действием возникающего давления водорода в хрупких и пластичных материалах происходят разные процессы. В хрупких веществах (как в случае ситалла) происходит хрупкое разрушение некоторых областей ситалла, лежащих в приповерхностных слоях толщиной  $\xi_{p+} \approx 2$  мкм. Разрушение материала сопровождается отрывом указанных областей (кусочков) ситалла с отражающими на них покрытиями и выходом водорода в свободное пространство. Появление аналогичных дефектов флекинга (произвольных геометрических форм) описаны, например, в работе [10] при хрупком разрушении графита. Это явление приводит к весьма значительной эрозии поверхности образцов, существенно изменяя, например, их коэффициенты оптического отражения. Несколько иная картина наблюдается при образовании дефектов на зеркальных поверхностях ситалла с напыленными пленками серебра при их облучении протонами. Водород, который образуется в полостях по механизму флекинга, описанному выше, а также за счет миграции к поверхности раздела фаз, выходит в этом случае не в свободное пространство, а в пограничный слой между сплошной пленкой серебра и поверхностью ситалла. Внутреннее давление водорода при некоторой дозе  $\Phi_{kp}$  отрывает пленку металла от ситалла (в местах расположения кратеров или стоков для водорода, т. е. первичных дефектов флекинга с размерами  $d = 2...6$  мкм). В дальнейшем устанавливается равновесная форма блистеров, которая определяется балансом сил внутреннего давления водорода  $P_H$ , зависящего от дозы облучения протонов (т. е. от концентрации водорода  $H_2$ ) и от величины силы адгезии пленки серебра к ситаллу. Макроскопически при этом наблюдаются дефекты в виде сферических пузырей, диаметр которых увеличивается с дозой облучения (рис. 4). В процессе роста может происходить их коалесценция с образованием дефектов самых разных геометрических форм и пластическая деформация пленок вплоть до их разрыва.

С этих позиций становятся понятными появление блистеров на поверхности композитных зеркал (Be+Cu+Ag+SiO<sub>2</sub>) в экспериментах третьей серии. При облучении данных зеркал протонами водород накапливается в тонких поверхностных слоях меди на глубине  $\xi_{p+} \approx 2$  мкм. Под действием возникающего давления водорода в меди, как в материале,

обладающем высокой пластичностью, происходит пластическая деформация элементов поверхностных слоев толщиной  $\delta \approx 2$  мкм, т. е. равной глубине проникновения протонов в меди, с образованием характерных вздутий (истинных блистеров) над поверхностью зеркал. С увеличением дозы и температуры облучения наблюдается увеличение диаметра блистеров до некоторых размеров с последующим их разрушением (раскрытием крышек блистеров) и выходом водорода также в свободное пространство. Указанное дефектное состояние поверхности зеркал — явление блистеринга, как и явление флексинга, может привести к существенному изменению коэффициента отражения зеркал (рис. 7).

Эксперименты, проведенные в настоящей работе, показали, что критическая доза для образования флексинга в ситалле и блистеринга в зеркалах, найденная экспериментально, имела значение  $\Phi_{kp} = (5...7) \cdot 10^{15}$  част./см<sup>2</sup>. Сравним данную величину с критической дозой блистерообразования согласно теории Мартыненко [10, 11]. В рамках данной теории образование блистеров в пластичных материалах и флексинга в хрупких веществах происходит по достижении критической дозы  $\Phi_{kp}$ , которая определяется выражением

$$\Phi_{kp} = (\sigma_F / H) \cdot \sqrt{\delta R^2(E)}, \quad (5)$$

где  $\sigma_F$  — предел прочности ситалла ( $\sigma_F = 4.5$  кг/мм<sup>2</sup>);  $H$  — энергия внедрения атома водорода в ситалл ( $H \approx 1.6$  эВ);  $\delta R^2$  — средние квадратичные разбросы пробегов протонов в ситалле. Подставляя численные значения в выражение (5), получим теоретическую оценку для  $\Phi_{kp}$ , равную  $\Phi_{kp} \approx 4 \cdot 10^{15}$  част./см<sup>2</sup>, что хорошо согласуется с наблюдаемым в эксперименте значением критической дозы образования флексинга в ситалле  $\Phi_{kp} = (5...7) \cdot 10^{15}$  част./см<sup>2</sup>.

**Группа электростатических эффектов.** Дополнительным механизмом появления дефектов в ситалле при их одновременном или раздельном облучении протонами и электронами может служить явление образования пространственно разделенных областей заряда противоположного знака в поверхностном слое ситалла, обладающего высоким удельным сопротивлением  $\rho_v = 10^{15}...10^{16}$  Ом·см с последующими разрядными процессами. Глубина проникновения протонов с энергией  $E = 180$  кэВ составляет  $\xi_p^+ \approx 2$  мкм, а электронов  $\xi_e^- = 100...150$  мкм. Таким образом, в ситалле образуются две пространственно разделенные области зарядов противоположного знака, между которыми возникает электрическое поле

$$E_{bh} = \sigma / \epsilon \approx 1.5 \cdot 10^9 \text{ В/см}, \quad (6)$$

где  $\sigma$  — поверхностная плотность заряда;  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость ситалла. Эта величина значительно превышает напряжение электрического пробоя в ситалле ( $E_{kp} = 7 \cdot 10^5$  В/см). Таким образом, наблюдаемые дополнительные дефекты — фигуры разрядов в ситалле (в экспериментах второй серии) могут быть связаны с внутренними пробоями в ситалле, и как следствие, с появлением дополнительных дефектов в поверхностных слоях образцов.

В заключение особо отметим, что при облучении исследованных материалов космической оптики протонами и электронами при дозах, превышающих  $\Phi_{kp} > 5 \cdot 10^{15}$  част./см<sup>2</sup>, в них интенсивно протекают явления окрашивания (наведенного оптического поглощения), а также комплекс явлений: блистеринга, флексинга, радиационно-разрядных процессов, приводящих к значительному изменению оптических свойств материалов — их коэффициентов пропускания  $T(\lambda)$ , поглощения  $k(\lambda)$  и отражения  $R(\lambda)$  в широком спектральном интервале  $\lambda = 0.2...20$  мкм. Данная критическая доза  $\Phi_{kp} = 5 \cdot 10^{15}$  част./см<sup>2</sup>, как уже отмечалось выше, равна эквивалентной годичной дозе протонов, падающих на материалы КА, находящиеся на геостационарной орбите ( $H = 36000$  км). Отсюда следует, что работоспособность материалов космической оптики, защитных стекол солнечных батарей в течение их длительного срока эксплуатации 5—20 лет напрямую зависит от нашего понимания процессов, протекающих в материалах КА при воздействии на них протонов и электронов радиационных поясов Земли, а также потоков ионов  $N_2^+$ ,  $Ar^+$ ,  $O_2^+$ ,  $He^+$  верхней атмосферы Земли на высотах  $H = 300...1000$  км, которые приводили бы к уменьшению, а в лучшем случае к подавлению блистеринга и флексинга в материалах космических аппаратов.

## выводы

Проведенные исследования по воздействию потоков протонов и электронов ( $p^+ + e^-$ ) радиационных поясов Земли с энергией  $E = 60...200$  кэВ и флюенсами  $\Phi = 5 \cdot 10^{14}...4 \cdot 10^{17}$  част./см<sup>2</sup> на оптические и структурные свойства материалов космической оптики: кварцевых стекол, образцов чистого ситалла и ситалла с напыленными пленками серебра и алюминия, а также образцов композитных зеркал космических телескопов позволяют сделать следующие выводы.

1. Экспериментально показано, что при увеличении дозы протонного облучения в интервале  $\Phi = 5 \cdot 10^{14} \dots 4 \cdot 10^{17}$  част./ $\text{см}^2$  исследованные кварцевые стекла продемонстрировали значительное окрашивание, проявляющееся в монотонном уменьшении их светопропускания  $T(\lambda)$  в интервале длин волн  $\lambda = 200 \dots 800$  нм. Спектральные кривые разности оптического пропускания  $\Delta T(\lambda)$  исходных образцов  $\Delta T_0(\lambda)$  и облученных образцов  $\Delta T_D(\lambda)$  при всех энергиях и дозах облучения обнаружили ярко выраженные максимумы в интервале длин волн  $\lambda = 240 \dots 260$  нм. Максимальное окрашивание кварцевых стекол величиной  $\Delta T(\lambda) = \Delta k(\lambda) \approx 33\%$  наблюдается для энергий  $E = 60$  и  $100$  кэВ при дозах  $\Phi = 2 \cdot 10^{16}$  част./ $\text{см}^2$ . При увеличении энергии протонов величина наведенного поглощения уменьшается до уровня  $\Delta k(\lambda) \approx 23\%$ , т.е. наблюдается явление радиационного просветления кварцевых стекол.

Эксперименты по исследованию кинетики радиационного окрашивания кварцевых стекол показали, что зависимости наведенного поглощения  $\Delta T(\lambda) = \Delta k(\lambda)$  от времени облучения протонами имеют затухающий экспоненциальный характер. Экспериментальные результаты по наведенному поглощению кварцевых стекол трактуются в рамках феноменологических теорий окрашивания стекол в поле ионизирующих излучений.

2. В работе экспериментально показано, что при облучении образцов чистого ситалла и образцов ситалла с пленками серебра потоками протонов и электронов с энергиями  $E = 140 \dots 200$  кэВ и дозами  $\Phi = 10^{15} \dots 4 \cdot 10^{17}$  част./ $\text{см}^2$  на их поверхности наблюдаются четыре характерных типа дефектов и явлений, которые развиваются в приповерхностных слоях облученного ситалла:

- явление блистеринга (вспучивание пленок серебра и алюминия над поверхностью ситалла, т.е. образование дефектов сферической формы с размерами 5—30 мкм);
- явление флекинга (т. е. образование углублений произвольных геометрических форм с размерами 2—8 мкм — «космическая эрозия материалов»)
- радиационно-разрядные процессы, приводящие к появлению характерных фигур при электрических пробоях в поверхностных слоях облученного ситалла, а также явление окрашивания, т. е. значительного потемнения образцов облученного ситалла при дозах  $\Phi > 10^{16}$  част./ $\text{см}^2$ .

Показано, что плотность дефектов блистеринга и флекинга в ситалле существенно изменяется с уве-

личением дозы облучения протонов.

В работе показано, что дефекты блистеринга и флекинга в ситалле образуются практически скачкообразно, по достижении некоторой критической дозы  $\Phi_{kp}$ , равной  $\Phi_{kp} = (5 \dots 7) \cdot 10^{15}$  част./ $\text{см}^2$ .

3. Экспериментальные результаты по образованию дефектов блистеринга и флекинга в исследованных материалах трактуются в рамках существующих теорий блистерообразования (Ю. В. Мартыненко, Эванс и др.), согласно которых указанные дефекты появляются под воздействием давления водорода, который образуется при рекомбинации протонов с электронами вещества:  $p^+ + e^- = H$  (т. е. в рамках газовой теории блистерообразования).

4. Проведенная в работе оценка критической дозы  $\Phi_{kp} = 4 \cdot 10^{15}$  част./ $\text{см}^2$  блистерообразования по теории Мартыненко Ю. В. показала хорошее согласие с настоящим экспериментом, в котором критическая доза оказалась равной  $\Phi_{kp} = (5 \dots 7) \times 10^{15}$  част./ $\text{см}^2$ .

5. Экспериментально показано, что облучение композитных зеркал ( $\text{Be}+\text{Cu}+\text{Ag}+\text{SiO}_2$ ) протонами и электронами с энергиями  $E = 130 \dots 200$  кэВ и дозами  $\Phi = 10^{15} \dots 4 \cdot 10^{16}$  част./ $\text{см}^2$  приводит к значительному уменьшению их коэффициентов отражения  $R(\lambda)$  в интервале длин волн  $\lambda = 200 \dots 3000$  нм. Структурные исследования показали, что на поверхности облученных композиционных зеркал, как и на образцах ситалла, появляются дефекты блистеринга и флекинга, которые могут привести к значительному уменьшению коэффициента отражения зеркал.

6. Для полного понимания процессов блистеринга, флекинга, окрашивания и радиационно-разрядных процессов, происходящих в материалах космической оптики и диэлектрических материалах космических аппаратов нового поколения, требуются дальнейшие интенсивные экспериментальные и теоретические исследования взаимодействия атомных частиц с веществом.

Авторы выражают глубокую благодарность ректору Харбинского политехнического университета профессору Ян Шичин за обсуждение, а также за фундаментальную поддержку работ в области космического материаловедения.

1. Абраимов В. В., Лура Ф., Боне Л. и др. Исследование явлений блистеринга и флекинга в материалах космической оптики под воздействием факторов космического пространства // Космічна наука і технологія.—1995.—1, № 2—6.—С. 39—54.
2. Акишин А. И., Витошкин Э. А., Захаров П. И., Цепляев Л. И. Об электроразрядном механизме разрушения твердых диэлектриков протонным излучением // ФІЗХОМ.—1996.—№ 3.—С. 36—39.

3. Акишин А. И., Теплов И. Б. Имитация воздействия космических излучений на материалы // ФИЗХОМ.—1992.—№ 3.—С. 47—57.
4. Боев С. Г., Ушаков В. Я. Радиационное накопление заряда в твердых диэлектриках. — М.: Энергоиздат, 1991.—238 с.
5. Бреховских С. М., Викторова Ю. Н., Гринштейн Ю. Л., Ланда Л. М. Основы радиационного материаловедения стекла и керамики. — М.: Изд-во лит-ры по строительству, 1971.—256 с.
6. Бреховских С. М., Тюльнин В. А. Радиационные центры в неорганических стеклах. — М.: Энергоатомиздат, 1988.—200 с.
7. Бюргановская Г. В., Варгии В. В., Леко Н. А., Орлов Н. Ф. Действие излучения на неорганические стекла. — М.: Атомиздат, 1968.—235 с.
8. Вернов С. Н., Акишин А. И. Модель космического пространства. — М.: НИИЯФ МГУ, 1983.—Т. 2.—771 с.
9. Громов В. В. Электрический заряд в облученных материалах. — М.: Энергоиздат, 1982.—112 с.
10. Гусева М. И., Мартыненко Ю. В. Радиационный блистеринг // Успехи физ. наук.—1981.—135, вып. 4.—С. 671—691.
11. Мартыненко Ю. В. Теория блистеринга. — М.: Ин-т атомной энергии им. И. В. Курчатова, 1979.—40 с.
12. Abraimov V. V., Yang Shiqin, He Shiyu, et al. Complex simulator of the effect of eight space environment factors on space vehicle materials // The Fifth Sino-Russian-Ukrainian Symposium on Space Science and Technology. — Harbin, 2000.—P. 700—705; 706—713.
13. Evans J. H. Formation of blisters in molybdenum bombarded with helium // Nature.—1973.—256, N 5515.—P. 299—300.

**A STUDY ON THE SPECIAL EFFECT OF PROTONS AND ELECTRONS WITH ENERGIES FROM 60 TO 200 keV ON OPTICAL MATERIALS FOR SPACECRAFT APPLICATION**

Liu Hai, He Shiyu, V. V. Abraimov, Wang Huaiyi,  
YangDezhuang

The effects of the radiation belt protons and electrons with energies from 60 to 200 keV on the optical materials for spacecraft application were studied using the complex space environmental factors simulators KIFK and UPI. In the dose range from  $\Phi = 5 \times 10^{14}$  to  $4 \times 10^{13}$  part/cm<sup>2</sup>, distinct phenomena of dye, blister or flake (complex structural defects formed on the surface of glass and reflecting mirror) and radiation discharge occurred in the materials tested. These phenomena remarkably changed the transparency, absorption, and reflection of the materials. The results showed that the blister and flake on the surface of glass and reflecting mirror took place instantaneously at the critical radiation dose  $\Phi_c = 6 \times 10^{15}$  part/cm<sup>2</sup>. The results were analyzed within the scope of the present-day theories of dye, blister, and discharge. They are primarily in accordance with the blister theory of Martynenko.