

## Исследование электростатических разрядов при облучении элементов терморегулирующих покрытий радиаторов космических аппаратов

В.А. Басов\*

Акционерное общество «Композит», г. Королев Московской области

(Поступила в редакцию 20.04.2023; подписана в печать 21.04.2023)

В работе проведен анализ характеристик электростатических разрядов, возникающих на поверхности стекол К-208 при облучении их в вакууме  $10^{-4}$  Па электронами с энергией 40 кэВ при плотности потока частиц  $3 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , и варьировании флюенсов от  $10^{14}$  до  $10^{16} \text{ см}^{-2}$ . При облучении стекол наблюдались разряды 1-го и 2-го типа, сопровождающиеся выбросом плазмы в окружающее пространство. При варьировании флюенсов от  $10^{14}$  до  $10^{16} \text{ см}^{-2}$  частота разрядов увеличивалась, а амплитуда разрядных токов снижалась. Это объясняется увеличением электрической проводимости стекла, обусловленным изменением стехиометрии и структуры материала при разрядах. Наряду с электростатическими разрядами на облучаемой поверхности образца происходят, и пробы на металлизированную подложку стекла К-208. При определенных условиях эти процессы могут стимулировать друг друга, т.е. электростатический разряд может спровоцировать пробой и наоборот.

PACS: 52.80.-s      УДК: 537242

Ключевые слова: терморегулирующие покрытия, стекло, электростатические разряды, атомно-силовая микроскопия..

### ВВЕДЕНИЕ

С увеличением энерговооруженности и сроков активного существования (САС) современных и перспективных космических аппаратов (КА), оснащаемых большим количеством высокочувствительной аппаратуры, Федеральная космическая программа России предъявляет повышенные требования к надежности и качеству проведения испытаний материалов космического назначения на стойкость к воздействию факторов космического пространства.

Изменения функциональных характеристик диэлектрических материалов внешних покрытий высокоорбитальных КА и развитие процессов, негативно влияющих на его нормальное функционирование, происходят, в основном, в результате воздействия на такие материалы ультрафиолетового и ионизирующих излучений космического пространства [1–3] и собственной внешней атмосферы (СВА) КА [4–7]. Например, воздействие ионизирующих излучений на диэлектрические материалы высокоорбитальных КА сопровождается накоплением объемного заряда, что, в свою очередь, может привести к электростатическим разрядам (ЭСР) [8–12] с выбросом плазмы в окружающее пространство. Такие выбросы плазмы приводят к загрязнению оптических поверхностей и стимулируют развитие ЭСР на ближайших участках поверхности КА. ЭСР сопровождаются структурными разрушениями диэлектрика [13], генерацией электромагнитных импульсов, которые являются причинами большинства аномалий в работе бортовой радиоэлектронной аппаратуры и КА в целом. На развитие ЭСР влияют параметры, характеризующие как воздействующее излучение,

так и облучаемый образец диэлектрика, например, наличие технологических дефектов на поверхности мишени [14].

При исследованиях эволюции микроструктуры стекла, содержащего в своем составе ионы щелочных металлов, под действием электронов во многих лабораториях мира было обнаружено образование газовых пузырьков, изменение плотности материала и разделение фаз [15–19]. При этом показано, что большинство структурных модификаций, включая изменение плотности, увеличение полимеризации и образование газонаполненных пузырьков, были связаны с перераспределением в стекле щелочи (Li, Na и K).

В то время как зависимость воздействия на КА процессов, связанных с накоплением электрического заряда от различных условий окружающей космической среды и от используемых материалов при изготовлении КА, широко изучаются в специализированных лабораториях космических корпораций мира, влияние модификаций свойств материалов под действием космической плазмы на зарядку КА исследовано недостаточно. Отсутствие знаний об этом динамическом старении является основным препятствием для точного моделирования поведения космического корабля в течение срока его службы.

Целью работы является исследование влияния радиационно-стимулированной модификации облучаемого слоя стекла на частоту разрядов и амплитуду разрядных токов при постоянной плотности потока воздействующих электронов. Для проведения экспериментов были выбраны образцы элементов терморегулирующих покрытий на основе пластин оптически радиационно-стойкого стекла К-208, которые используются на терморadiatorах космических аппаратов.

\* slavabas@list.ru

## 1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводились с образцами терморегулирующих покрытий (ТРП) на основе пластин стекла К-208 площадью  $40 \times 40$  мм и толщиной 170 мкм. На одну из сторон стеклянной пластины методом магнетронного напыления были последовательно нанесены слой серебра (отражающее покрытие) и слой стали (защитное покрытие).

Облучение образцов проводилось в вакууме  $10^{-4}$  Па электронами с энергией 40 кэВ. Для этого образцы керамическими винтами прикрепляли к охлаждаемому столику, температура которого поддерживалась в диапазоне  $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ . Плотность потока частиц составляла  $3 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , а флюенсы варьировались от  $10^{14}$  до  $10^{16} \text{ см}^{-2}$ . Поверхности образцов до и после облучения исследовались с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) Solver P47–Multi–Technique SPM. Радиус закругления иглы кантилевера SNG01/TiN составлял 35 нм, а резонансная частота механических колебаний балки кантилевера была равной 161.019 кГц.

Для контроля и визуализации генерируемых ЭСР электромагнитных импульсов к рабочему столику была подведена и прикреплена антенна, соединенная через специальный вывод из вакуумной камеры с осциллографом RIGOL MSO2302A. На рис. 1 приведена схема регистрации электромагнитных импульсов, генерируемых при поверхностных разрядах на образцах под воздействием потока электронного пучка в вакуумной камере. Антенна в виде проводника располагалась вдоль периметра образца на высоте около 5 мм. Она подсоединялась коаксиальным кабелем к переходному герметизированному высокочастотному соединителю, размещенному на крышке вакуумной камеры. К ответной части соединителя подключался коаксиальный кабель для соединения антенны с входами цифрового осциллографа. Входы осциллографа были подключены параллельно. К входам осциллографа подключалось внешнее сопротивление нагрузки  $R_n$  величиной 110 кОм.

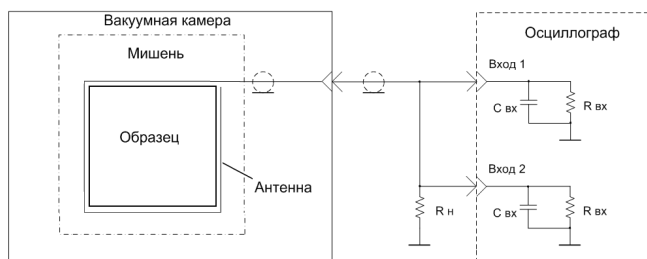


Рис. 1. Схема регистрации электромагнитных импульсов, генерируемых при ЭСР

На входе 1 осциллографа установлена низкая чувствительность (2 В/дел или 5 В/дел) для фиксации разрядных импульсов большой амплитуды, на входе 2 была установлена высокая чувствительность

(10 мВ/дел) для фиксации разрядных импульсов малой амплитуды. Для обеспечения регистрации была установлена ждущая синхронизация развертки по нарастающему фронту импульса со входа 2 осциллографа. При появлении импульса оператор заносил в журнал наблюдений амплитуду и время, одновременно производил сохранение картины экрана на внешней флэш-карте.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Известно, что при облучении электронами образца диэлектрика, линейные размеры которого больше длины пробега электронов, в нем формируется область с высокой плотностью заряда за счет аккумуляции термализованных электронов, захваченных соответствующими ловушками. При достижении напряженности поля критического значения начинают развиваться ЭСР, приводящие к структурным изменениям материала.

В наших экспериментах при электронном облучении образцов стекла К-208 с плотностью потока  $3.0 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  и давлении  $10^{-4}$  Па в вакуумной камере мы исследовали эволюцию электростатического разряда первого типа [9] — разряда стекло-окружающая ионизованная остаточная атмосфера вакуумной камеры. Он сопровождается быстрыми фазовыми переходами материала из твердого состояния в жидкое газообразное и плазменное и заканчивается выбросом плазмы в окружающее пространство и образованием микровыступов, высота которых растет с числом разрядов за счет накопления остывшего стекла. В работах [9, 12] многократные повторения ЭСР через микровыступы объясняются тем, что микровыступы и их некоторая окрестность, охваченная предыдущими разрядами, обладают большей проводимостью по сравнению с окружением и возвышаются над ним. Увеличение электрической проводимости стекла в некоторой окрестности микровыступа обусловлено изменением стехиометрии и структуры материала в процессе ЭСР. Это предположение подтверждается данными, полученными в работе [20], согласно которым проводимость стекла увеличивается при одновременном изменении его структуры и стехиометрии. Нарушение стехиометрии и деструкция материала в окрестностях микровыступов приводит к формированию в них систем локализованных состояний, отвечающих за появление электронной составляющей тока.

Часть осциллограмм электромагнитных импульсов, генерируемых при ЭСР на облучаемых стеклах, представлена на рис. 2. Осциллограммы на этом рисунке расположены в порядке возрастания флюенса (времени) облучения.

Из приведенных на рис. 2 данных следует, что амплитуда электромагнитных импульсов, сопровождающих разряды, снижается с ростом флюенса облучения.

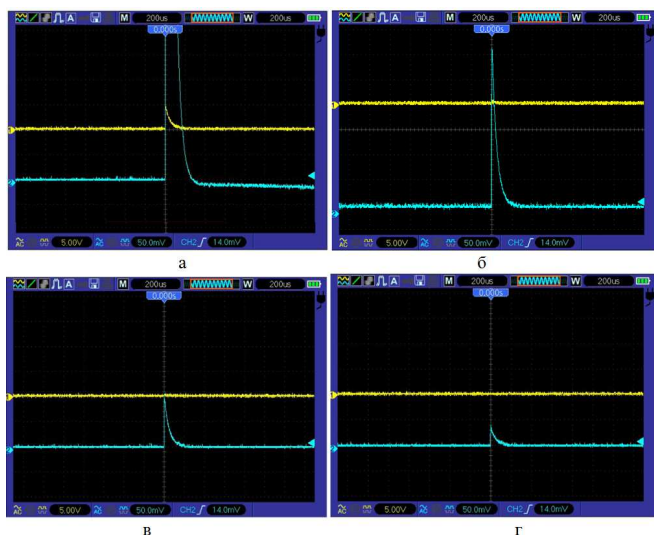


Рис. 2. Осциллограммы электромагнитных импульсов характерные при значениях флюенсов: *а* —  $\Phi = 10^{10} \div 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ; *б* —  $\Phi = 2 \times 10^{14} \div 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ; *в* —  $\Phi = 10^{15} \div 5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ; *г* —  $\Phi = 5 \times 10^{15} \div 10^{16} \text{ см}^{-2}$

В экспериментах вместе с осциллограммами импульсов фиксировались промежутки времени между разрядами. Полученные результаты представлены на рис. 3.

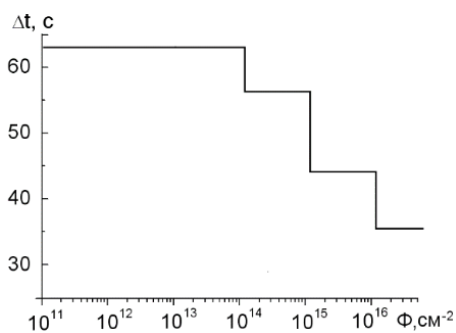


Рис. 3. Гистограмма зависимости средних промежутков времени между разрядами от флюенса облучения

Величина  $\Delta t$ , приведенная на рис. 3, представляет собой среднее значение промежутка времени между разрядами. Она рассчитывается усреднением значений промежутков времени между разрядами, зафиксированными в течение 20 мин для каждого интервала флюенсов облучения отдельно.

Помимо разрядов первого типа с микровыступов на поверхности стекла наблюдались также пробой на металлическую подложку образца и генерируемые при этом электрические импульсы (ЭИ), типовые формы, которых представлены на рис. 4, *а*, *б*.

Осциллограммы 4, *в* и *г* соответственно демонстрируют тот факт, что пробой на подложку стимулирует ЭСР первого типа на облучаемой поверхности, а разряд первого типа может стимулировать пробой на подложку.

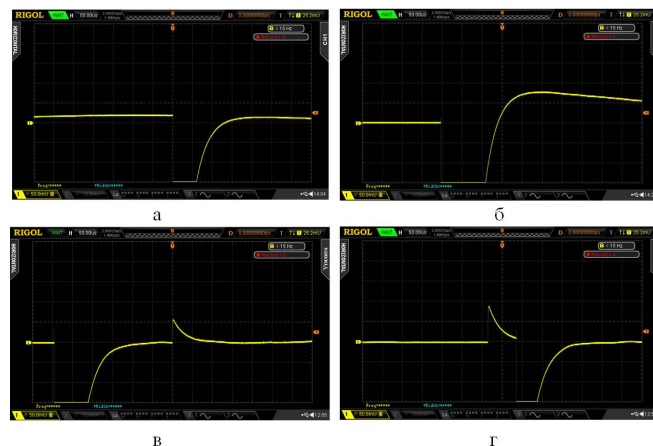


Рис. 4. Осциллограммы ЭИ характерные для случаев: *а* и *б* — пробой на металлическую подложку; *в* — пробой на подложку стимулирует ЭСР первого типа на облучаемой поверхности; *г* — ЭСР первого типа стимулирует пробой на подложку

Для сравнительного анализа изменений морфологии поверхностей образцов стекла на рис. 5 приводится АСМ-изображение исходного образца, а на рис. 6–8 — АСМ-изображения облученных образцов, расположенных в порядке возрастания флюенса облучения. Из рис. 5 видно, что шероховатость поверхности К-208 не превышает 1 нм (см. рис. 5, *б*), поэтому его часто выбирают в качестве модельного стекла для исследования радиационно-стимулированных изменений структуры поверхности.

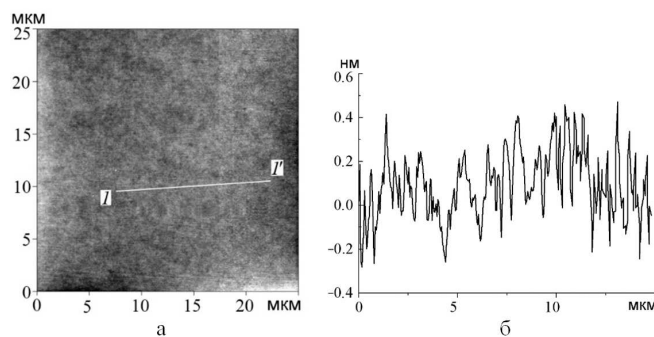


Рис. 5. АСМ-изображение исходного образца: *а* — 2D-изображение фрагмента поверхности; *б* — сечение фрагмента вдоль линии 1–1'

Результаты анализа АСМ-изображения фрагментов поверхностей образцов, облученных разными флюенсами, и, представленных на рис. 6–8 показали, что при плотности потока электронов  $3.0 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  с увеличением флюенса число микровыступов на поверхности стекла растет незначительно, в отличие от их размеров.

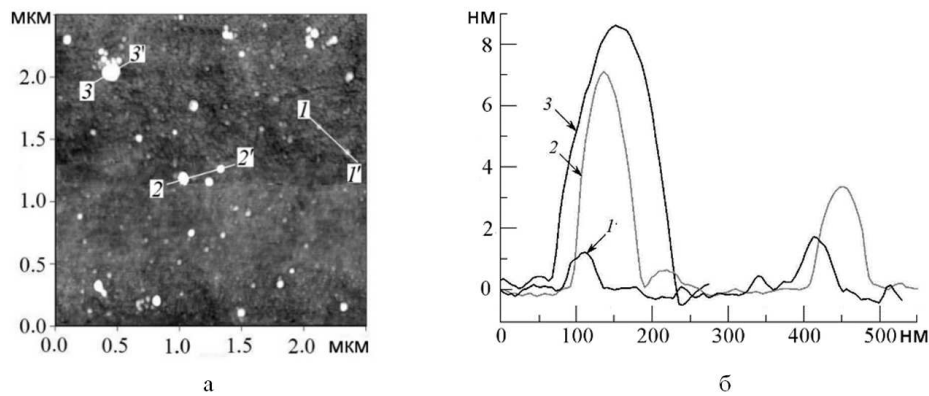


Рис. 6. АСМ-изображение облученного образца  $\Phi = 5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ : а — 2D-изображение фрагмента поверхности; б — сечения фрагмента вдоль линий 1–1' и 2–2'

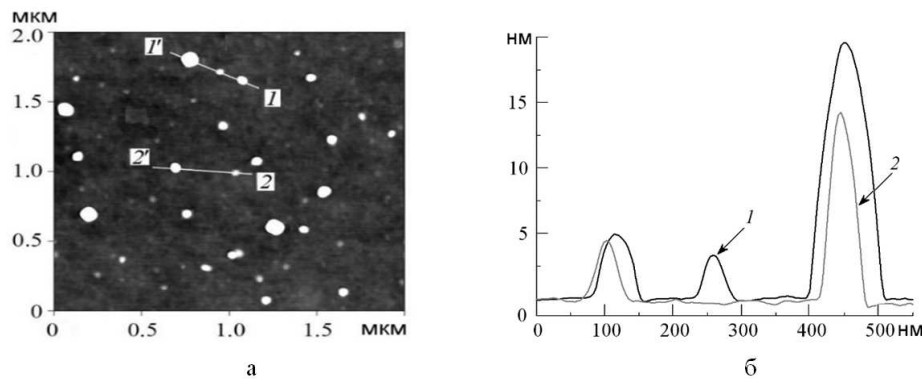


Рис. 7. АСМ-изображение образца, облученного флюенсом  $2.5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ : а — 2D-изображение фрагмента поверхности; б — сечения фрагмента вдоль линий 1–1' и 2–2'

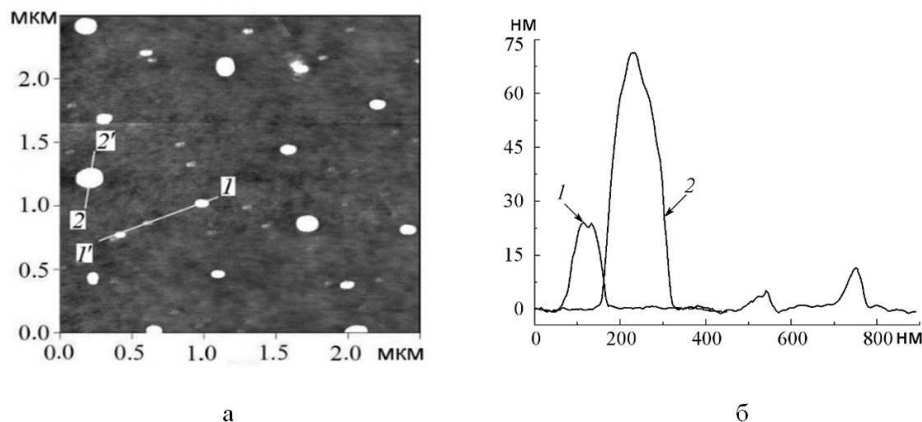


Рис. 8. АСМ-изображение образца, облученного флюенсом  $10^{16} \text{ см}^{-2}$ : а — 2D-изображение фрагмента поверхности; б — сечения фрагмента вдоль линий 1–1' и 2–2'

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнительный анализ осциллограмм электромагнитных импульсов, сопровождающих ЭСР, и результатов АСМ-исследований морфологий облученных поверхностей образцов ТРП, позволяет сделать следующие выводы:

1. Облучение стекла ТРП электронами с энергией 40 кэВ при плотности потока частиц  $3.0 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  флюенсами от  $10^{14}$  до  $10^{16} \text{ см}^{-2}$  частота разрядов увеличивается, а амплитуда разрядных токов снижается. Это объясняется увеличением электрической проводимости



стекла, обусловленным изменением стехиометрии и структуры материала при разрядах. Нарушение стехиометрии и деструкция материала в некоторой области стекла, в которой происходили разряды, приводит к формированию в ней систем локализованных состояний, отвечающих за появление электронной составляющей тока.

2. Результаты экспериментов показали, что наряду с ЭСР на облучаемой поверхности образца проис-

ходят и пробои на металлизированную подложку ТРП. При определенных условиях эти процессы могут стимулировать друг друга, т.е. ЭСР может спровоцировать пробой и наоборот.

3. При фиксированной плотности потока электронов  $3.0 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  с ростом флюенса облучения число микровыступов на поверхности стекла растет незначительно, в отличие от их размеров

- [1] *Ferguson D.C., Wimberly S.C.* The Best GEO Daytime Spacecraft Charging Index // *50th AIAA Aerospace Sci. Mtg: proceedings. Nashville, Tennessee, January 2013.*
- [2] *Hirokazu M., Kazuhiro T.* // *IEEE Transactions on Plasma Science.* **36.** 2387. (2008).
- [3] Модель космоса. Научно-информационное издание / под ред. Л.С. Новикова. **2:** Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. М.: КДУ, 2007.
- [4] *Urayama F.* // *Japan Society for Aeronautical and Space Sciences.* **56.** 543. (2008).
- [5] *Fong M.C., Lee A.L., Ma P.T.* External contamination environment of space station customer servicing facility / 22nd CAAAIA Thermophys. Conf: proceedings. Honolulu, Hawaii, June 8–10, 1987.
- [6] *Хасанишин Р.Х., Новиков Л.С.* // Перспективные материалы. № 8. 13. (2014).
- [7] *Khassanchine R.H., Timofeev A.N., Galygin A.N., Kostyuk V.I.* // *Journal of Spacecraft and Rockets.* **43.** N 3. 509. (2006).
- [8] *Cho M., Kawakita Sh., Nakamura M.* et al. // *J. Space. Rockets.* **42.** N 4. 740. (2005).
- [9] *Хасанишин Р.Х., Новиков Л.С., Коровин С.Б.* // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. № 1. 88. (2015).
- [10] *Ferguson D.C., Katz I.* // *IEEE Transactions on Plasma Science.* **43.** N 9. 3021. (2015).
- [11] *Masui H., Toyoda K., Cho M.* // *IEEE Transactions on Plasma Science.* **36.** N 5. 2387. (2008).
- [12] *Хасанишин Р.Х., Новиков Л.С., Гаценко Л.С., Волкова Я.Б.* // Перспективные материалы. № 1. 22. (2015).
- [13] *Khasanshin R.H., Novikov L.S.* // *Advances in Space Research.* **57.** 2187. (2016).
- [14] *Хасанишин Р.Х., Новиков Л.С.* // Физика и химия обработки материалов. № 2. 14. (2017).
- [15] *Ollier N., Boizot B., Reynard B.* et al. // *Journal of Nuclear Materials.* **340.** 209. (2005).
- [16] *Boizot B., Petite G., Ghaleb D.* et al. // *J. Non-Cryst. Solids.* **243.** 268. (1999).
- [17] *Boizot B., Petite G., Ghaleb D.* et al. // *Nucl. Instr. Meth.* **166–167.** 500. (2000).
- [18] *Boizot B., Petite G., Ghaleb D., Calas G.* et al. // *J. Non-Cryst. Solids.* **283.** 179. (2001).
- [19] *Sun K., Wang L.M., Ewing R.C., Weber W.J.* // *Philos. Mag.* Vol. **85.** 597. (2005).
- [20] *Пичугин В.Ф., Франгульян Т.С.* // Перспективные материалы. № 6. 26. (2000).

## Investigation of electrostatic discharges during irradiation of elements of thermal control coatings of spacecraft radiators

V.A. Basov

JSC «Kompozit», Korolev, Moscow region  
E-mail: slavabas@list.ru

This study analyzes the characteristics of electrostatic discharges occurring on the surface of K-208 glasses irradiated in a vacuum of  $10^{-4}$  Pa by electrons with an energy of 40 keV at a particle flux density of  $3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  and varying the fluences from  $10^{14}$  to  $10^{16} \text{ cm}^{-2}$ . Discharges of type 1 and type 2 with plasma ejection into the surrounding space were observed when the glasses were irradiated. The frequency of discharges increased and the amplitude of discharge currents decreased when the fluences were varied from  $10^{14}$  to  $10^{16} \text{ cm}^{-2}$ . This is explained by the increase of glass electric conductivity caused by the change of stoichiometry and structure of the material during discharges. Along with electrostatic discharges, there are also breakdowns on the irradiated surface of the sample to the metal subsurface material of glass K-208. Under certain conditions, these processes may stimulate each other, that is, an electrostatic discharge may provoke a breakdown and vice versa.

PACS: 52.80.-s

*Keywords:* thermostatic coatings, glass, electrostatic discharges, atomic force microscopy.

*Received 2023.*

### Сведения об авторах

Басов Вячеслав Александрович — инженер; e-mail: slavabas@list.ru.