

УДК: 537.5:637.9

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ РАЗРЯДЫ ПРИ СОВМЕСТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА СТЕКЛО К-208 ЭЛЕКТРОНОВ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2025 г. Р. Х. Хасаншин^{a, b, *}, Л. С. Новиков^c, Д. В. Уваров^a

^aАО “Композит”, Королев, 141070 Россия

^bМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Москва, 105005 Россия

^cНаучно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скobelьцына
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,
Москва, 119991 Россия

*e-mail: rhkhas@mail.ru

Поступила в редакцию 11.09.2024 г.

После доработки 30.10.2024 г.

Принята к публикации 30.10.2024 г.

Исследованы электростатические разряды и радиационно-стимулированные токи утечки при раздельном и совместном воздействии электронов с энергией 10–40 кэВ и электромагнитного излучения Солнца на образцы стекла К-208, используемого в качестве покровного стекла солнечных батарей и отражающих элементов терморадиаторов космических аппаратов. Значения плотности потока электронов (ϕ) изменяли в диапазоне $(5 \times 10^8 - 1 \times 10^{11}) \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, поток электромагнитного излучения соответствовал одному эквиваленту солнечной освещенности. Облучение проводили в вакууме 10^{-4} Па. При облучении наблюдали разряды двух типов: первый тип — разряд с конусообразного микровыступа на поверхности стекла в окружающую ионизованную среду; второй тип разряда развивается вдоль облучаемой поверхности, оставляя на ней разрядные каналы шириной около 100 нм и глубиной до 2 нм. Разряды обоих видов сопровождались выбросами плазмы и генерацией электромагнитных импульсов. Получены зависимости частоты разрядов и токов утечки от параметра ϕ при электронном и совместном облучении. Установлено, что при фиксированной энергии электронов разряды второго типа на поверхности образцов в случае совместного облучения возникают при меньшем значении ϕ , чем в случае электронного облучения. Также установлено, что при совместном воздействии значительно увеличивается доля пробоев образцов покровного стекла на проводящую подложку в регистрируемых в экспериментах событий. Доля пробоев образцов стекла растет также с увеличением энергии воздействующих электронов.

Ключевые слова: электростатический разряд, пробой, электронное облучение, электромагнитное излучение, стекло, фотоэффект, ток утечки, частота разрядов, фотоэмиссия, вторичные электроны, ионизация, атомно-силовая микроскопия.

DOI: 10.31857/S1028096025020073, **EDN:** ЕНJHPZ

ВВЕДЕНИЕ

Различные диэлектрические материалы: стекло, керамика, функциональные покрытия разного назначения и т.п. — часто используют в условиях воздействия потоков заряженных частиц. При этом воздействии в диэлектриках формируется внедренный заряд, создающий электрическое

поле, которое оказывает влияние на свойства материалов и протекающие в них физико-химические процессы. Это явление активно изучают во многих лабораториях мира, в том числе применительно к высокоорбитальным искусственным спутникам Земли (ИСЗ) [1–8]. Последнее связано с тем, что, например, материалы внешних по-

крытий высокоорбитального ИСЗ подвергаются неэкранированному воздействию заряженных частиц окружающей плазмы и электромагнитного излучения (ЭМИ) Солнца [9–13].

Электрическая зарядка диэлектриков обуславливает сложные часто взаимосвязанные процессы. Например, известно, что в стекле в результате полевой миграции ионов щелочных металлов происходит их пространственное перераспределение, приводящее к перестройке морфологии стекла и образованию на поверхности газонаполненных пузырьков [14–18]. Способность стекла эффективно аккумулировать электрический заряд обусловлена его высоким удельным сопротивлением (10^{11} – 10^{15} Ом·м), неоднородностью структуры и наличием глубоких энергетических ловушек в запрещенной зоне. Если напряженность электрического поля, индуцированного внедренным зарядом, превысит электрическую прочность стекла (20–40 МВ/м), произойдет электростатический разряд (ЭСР) [19–24]. Понимание механизмов формирования внедренного заряда и развития ЭСР имеет большое значение для устранения или минимизации аномалий в работе сложных технических объектов. В частности, для геостационарных ИСЗ известны значения средней плотности потока электронов магнитосферной плазмы (0.1 нА/см 2) и тока фотоэмиссии (2 нА/см 2) [25], использованные при выборе условий проведения экспериментальных исследований, результаты которых представлены в настоящей работе.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Условия возникновения ЭСР при раздельном и совместном воздействии на образцы покровных стекол и отражающих элементов электронами и ЭМИ Солнца исследовали в вакуумной камере установки “УВ-1/2” (АО “Композит”). В экспериментах использовали образцы, изготовленные на основе пластин стекла К-208, имеющего следующий состав: SiO_2 – 69.49%; B_2O_3 – 11.93%; Na_2O – 10.33%; K_2O – 6.25%; CeO_2 – 2.0% [28]. Пластины получают вытягиванием из расплава стекла через валки, резкой по заданным размерам и последующим отжигом. Если покровное стекло – это пластина стекла К-208 размерами $40 \times 40 \times 0.17$ мм, то отражающий элемент представляет собой такую же пластину, на одну из сторон которой методом магнетронного напыления последовательно нанесены слои алюминия (отражающий слой) и нержавеющей стали (защитный слой) [26].

Образец прикрепляли к изолированной от корпуса установки металлической подложке, предна-

значенной для измерения токов утечки, и затем облучали его поверхность при следующих условиях: вакуум 10^{-4} Па, энергия электронов (E_e) 10–40 кэВ; плотность потока электронов ϕ варьировали в пределах 5×10^8 – 1×10^{11} см $^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$; флюенс электронов ϕ не превышал 10^{15} см $^{-2}$, поток электромагнитного излучения соответствовал одному эквиваленту солнечной освещенности (0.14 Дж/(см $^2\cdot\text{с}$)).

В первой серии экспериментов для каждого фиксированного значения ϕ облучение проводили в несколько циклов, состоящих из трех этапов по 30 мин. На первом этапе образец облучали электронами, на втором подвергали совместному воздействию электронов и электромагнитного излучения, на третьем оба воздействия приостанавливали и образец охлаждали до $21 \pm 1^\circ\text{C}$, затем все этапы повторяли в той же последовательности не менее трех раз.

По периметру образца на расстоянии 5 мм размещали антенну из медной проволоки диаметром 2 мм. Ток, наведенный на антенну при ЭСР или пробое на металлическую подложку, замыкался на корпус через измерительный резистор величиной 10 кОм. Напряжение на измерительном резисторе фиксировали с помощью двухлучевого осциллографа RIGOL MSO2302A. Форма импульса напряжения (максимальная амплитуда и длительность) зависят от значений параметров измерительной цепи (сопротивлений и емкостей). Схема измерений и ее подробное описание приведены в работе [27]. Изменения морфологии поверхности образцов контролировали методами атомно-силовой микроскопии (АСМ).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При облучении покровного стекла электронами регистрировали токи, индуцируемые в антenne при ЭСР и пробоем на металлическую подложку. Характерные для этих процессов виды осциллограмм токов представлены на рис. 1а и 1б соответственно. При облучении наблюдали разряды двух типов: первый тип – разряд с конусообразного микровыступа на поверхности стекла в окружающую ионизованную среду; второй тип разряда развивается вдоль облучаемой поверхности, оставляя на ней разрядные каналы. ЭСР первого типа приводят к росту микровыступов за счет накопления остывшего стекла на последней стадии разряда и к образованию новых микровыступов на облучаемой поверхности за счет возврата на нее части плазмоидов.

Частота регистрируемых событий (v_e) – возникновения ЭСР и пробоев – составляла при облучении покровного стекла электронами

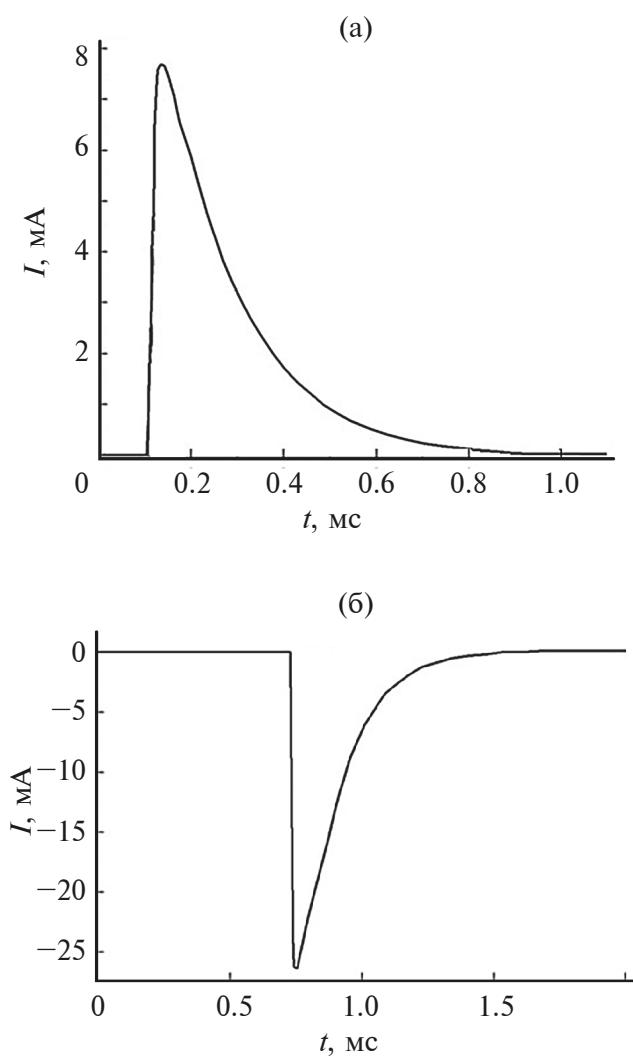


Рис. 1. Характерные формы осциллограммы токов, наведенных в антенну при разрядах первого типа (а) и при пробоях на проводящую подложку (б) при плотности потока электронов $\phi = 4.6 \times 10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Табл. 1. Зависимость количества регистрируемых событий в минуту при электронном v_e и совместном $v_{e+\text{ЭМИ}}$ облучении образцов покровного стекла от плотности потока электронов ϕ

$\phi, \times 10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	4.6	6.2	8.0	10	13	16
v_e	0.8	1.1	1.9	2.3	3.4	4.7
$v_{e+\text{ЭМИ}}$	0.6	0.84	1.0	1.4	2.0	2.8

Табл. 2. Зависимость количества регистрируемых событий в минуту при электронном v_e и совместном $v_{e+\text{ЭМИ}}$ облучении образцов покровного стекла для разных значений энергии электронов от энергии электронов E_e

$E_e, \text{ кэВ}$	12.5	15	20	25	30	35	40
v_e	0.1	0.7	1.8	3.8	4.9	5.7	8.6
$v_{e+\text{ЭМИ}}$	0.02	0.1	0.9	2.0	3.0	3.5	5.2

с энергией $E_e = 30$ кэВ и $\phi = 4.6 \times 10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ около 0.8 раза в минуту. Следует отметить, что ЭСР происходили в среднем в 5.2 раза чаще, чем пробой на подложку.

В случае одновременного воздействия на образцы электронов и электромагнитного излучения существенно возрос ток утечки, а частота регистрируемых событий ($v_{e+\text{ЭМИ}}$) снижалась по мере облучения. Доля пробоев на подложку в общем количестве зарегистрированных событий увеличивалась, а частота возникновения ЭСР на поверхности образца снижалась. Среднее значение амплитуды тока, регистрируемого при ЭСР, снизилось на 21%, а при пробое на подложку, напротив, возросло почти на 40%. В табл. 1 для разных значений ϕ приведены частоты v_e и $v_{e+\text{ЭМИ}}$ событий, наблюдавшихся в экспериментах при электронном и совместном облучении соответственно.

Уменьшение частоты возникновения ЭСР во время совместного облучения может быть связано с фотоэмиссией электронов из приповерхностного слоя стекла, обуславливающей снижение потенциала поверхности. При совместном облучении скорость накопления внедренного заряда снижается за счет роста тока утечки и частоты пробоев по сравнению со случаем только электронного облучения, что также приводит к падению частоты возникновения ЭСР на облучаемой поверхности образца. Важным фактором, определяющим наблюдаемое различие в экспериментальных данных, является разогрев образца при воздействии на него электромагнитного излучения. Если при электронном облучении температура образца составляла $21 \pm 1^\circ\text{C}$, то при совместном облучении она достигала $72 \pm 1^\circ\text{C}$ в случае покровного стекла и $53 \pm 1^\circ\text{C}$ в случае отражающего элемента.

В табл. 2 приведены изменения частоты событий, регистрируемых при электронном и совмест-

ном облучении покровного стекла при разных значениях энергии электронов. Видно, что с ростом энергии электронов частота наблюдаемых событий возрастает для обоих видов облучения, но уменьшается разница между частотами v_e и $v_{e+\text{эми}}$. Следует отметить, что рост энергии электронов влечет за собой также увеличение доли пробоев стекла в фиксируемых событиях.

На рис. 2 показаны зависимости тока утечки при электронном и совместном облучении образцов отражающих элементов. Энергия электронов в обоих случаях составляла 30 кэВ. Из рассмотрения зависимостей следует, что для значений $\phi = 10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и $3 \times 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ток утечки при совместном облучении выше, чем при электронном облучении в 8 и почти 4 раза соответственно.

Экспериментально установлено, что при облучении покровного стекла электронами с энергией 30 кэВ минимальное значение ϕ , необходимое для развития ЭСР второго типа, составляет $7.6 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. При совместном облучении такие разряды наблюдали при меньших значениях ϕ , что иллюстрируется рис. 3, на котором представлено АСМ-изображение фрагмента поверхности образца, облученного при $\phi = 6.2 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. На поверхности стекла видны как микровыступы, с которых могли происходить разряды первого типа, так и разрядный канал глубиной около 1 нм, созданный разрядом второго типа. Наблюдаемая разница в пороговых значениях ϕ объясняется тем, что в случае совместного воздействия у облучаемой поверхности плотность ионизованной остаточной атмосферы выше, чем при электронном облучении. При совместном облучении ионизация остаточных газов в приповерхностной

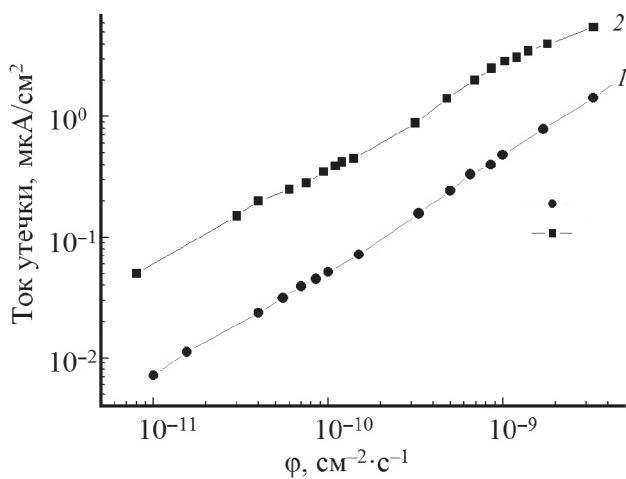


Рис. 2. Зависимости тока утечки при электронном (1) и совместном (2) облучении образцов отражающих элементов.

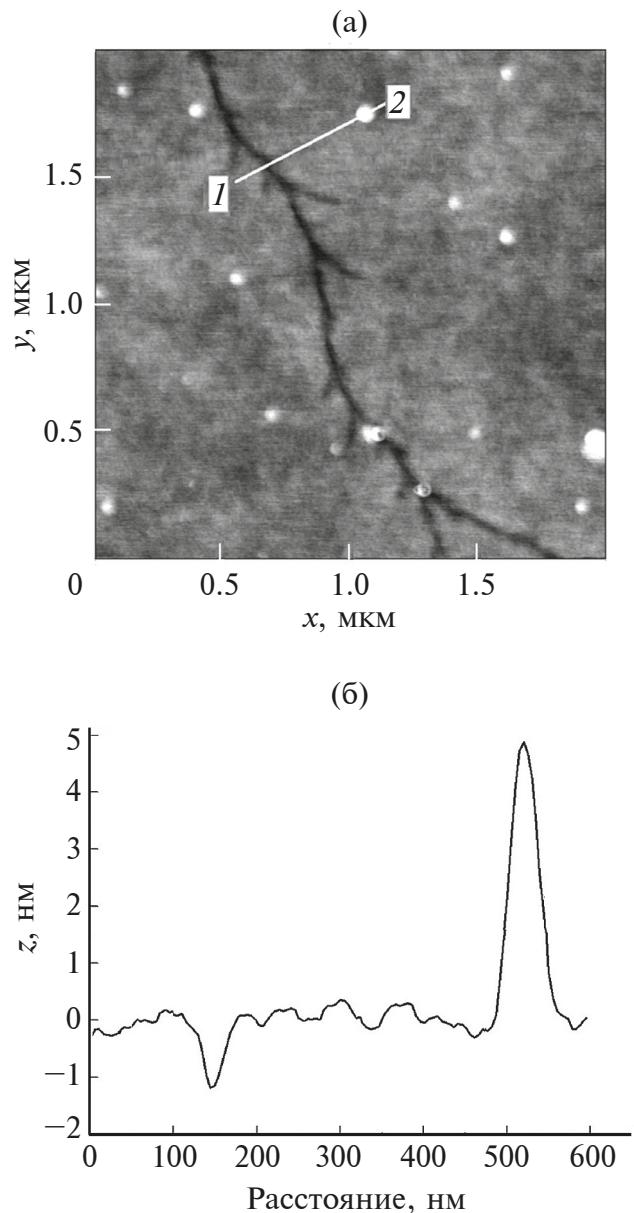


Рис. 3. АСМ-изображения поверхности образца покровного стекла: а — фрагмент размером $2 \times 2 \text{ мкм}$; б — сечение фрагмента вдоль линии 1–2 при плотности потока электронов $\phi = 6.2 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; флуенсе $\Phi = 10^{14} \text{ см}^{-2}$.

области образца в основном происходит под действием вторичных электронов и фотоэлектронов, ускоренных полем накопленного в стекле заряда. В поле заряженного образца вторичные электроны и фотоэлектроны быстро приобретают энергию (около 100 эВ), соответствующую максимальному сечению ионизации атмосферных газов.

Разряды обоих типов сопровождались выбросом в окружающее пространство плазмы, что в экспериментах приводило к скачкам давления в вакуумной камере и интенсивности катодолю-

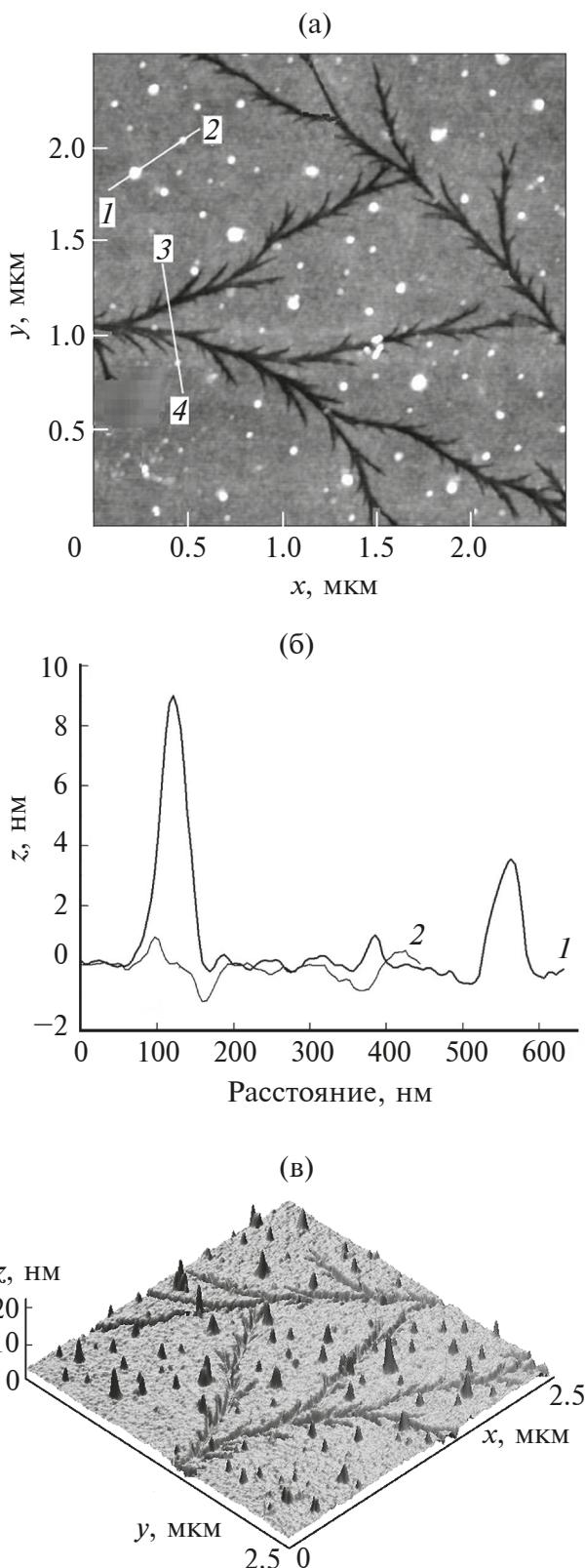


Рис. 4. ACM-изображения поверхности образца покровного стекла: а — фрагмент размером 2.5×2.5 мкм; б — сечение фрагмента вдоль линий 1–2 (1) и 3–4 (2); в — трехмерное изображение фрагмента размером 2.5×2.5 мкм.

минесценции, которая снижалась по мере облучения образца и возрастала после ЭСР или пробоя. Последнее связано с тем, что поле накопленного в стекле заряда влияет на пространственно-энергетическое распределение действующих электронов [29].

С увеличением ϕ и флюенса облучения количество разрядов второго типа растет и на поверхности покровного стекла образуется сеть разрядных каналов. В качестве примера на рис. 4 показано ACM-изображение фрагмента поверхности покровного стекла после совместного облучения при $\phi = 7.5 \times 10^{10}$ см $^{-2} \cdot$ с $^{-1}$ до значения $\phi = 10^{15}$ см $^{-2}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что облучение образцов стекла К-208, используемого в качестве покровного стекла солнечных батарей и терморадиаторов космических аппаратов, электронами с энергиями (10–40) кэВ при плотности потока $(5 \times 10^8$ – 1×10^{11}) см $^{-2} \cdot$ с $^{-1}$ и совместное облучение электронами с указанными параметрами и солнечным электромагнитным излучением приводит к возникновению ЭСР двух типов: с микровыступом на поверхности стекла в окружающую ионизованную среду и вдоль облучаемой поверхности, создавая на ней разрядные каналы шириной до 100 нм и глубиной около 1 нм. ЭСР обоих типов сопровождаются выбросом плазмы в окружающую среду. Помимо ЭСР, в экспериментах наблюдали пробои облучаемого стекла на проводящую подложку. Величина токов утечки на подложку возрастала с увеличением плотности потока электронов и их энергии. При одинаковых значениях параметров электронного пучка в случае совместного облучения частота фиксируемых событий (возникновения ЭСР и пробоев) сокращается, а в случае электронного облучения остается стабильной. Разряды второго типа, возникающие в случае электронного облучения при $\phi \geq 7.5 \times 10^{10}$ см $^{-2} \cdot$ с $^{-1}$, в случае совместного облучения наблюдали при $\phi \geq 6.2 \times 10^{10}$ см $^{-2} \cdot$ с $^{-1}$. Это объясняется ростом плотности ионизированной остаточной атмосферы у облучаемой поверхности стекла, что увеличивает вероятность развития разрядов второго типа. При совместном облучении значительно увеличивается доля пробоев стекла К-208 на проводящую подложку в общем количестве регистрируемых событий, что обусловлено в основном внутренним фотоэффектом в облучаемом образце и его разогревом до 72 ± 1 °С. Доля пробоев стекла растет также с увеличением энергии действующих электронов.

Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования возможных негативных явлений, связанных с электризацией диэлектрических материалов при воздействии на них заряженных частиц, в частности, в условиях космического пространства.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Norris C.B., Eernisse E.P.* // *J. Appl. Phys.* 1974. V. 45. Iss. 9. P. 3876. <https://doi.org/10.1063/1.1663878>
2. *Primak W., Kampwirt R.* // *J. Appl. Phys.* 1968. V. 39. Iss. 12. P. 5651. <https://doi.org/10.1063/1.1656029>
3. *Gavenda T., Gedeon O., Jurek K.* // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B.* 2014 V. 322. P. 7. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2013.12.017>
4. *Ollier N., Boizot B., Reynard B., Ghaleb D., Petite G.* // *J. Nucl. Mater.* 2005. V. 340. P. 209.
5. *Boizot B., Petite G., Ghaleb D., Pellerin N., Fayon F., Reynard B., Calas G.* // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B.* 2000. V. 166. P. 500.
6. *Chen L., Wang T.S., Zhang G.F., Yang K.J., Peng H.B., Zhang L.M.* // *Chin. Phys. B.* 2013. V. 22. P. 126101.
7. *Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С., Применко Д.А.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2020. № 9. С. 47. <https://doi.org/10.31857/S1028096020090113>
8. *Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С., Коровин С.Б.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2017. № 9. С. 28. <https://doi.org/10.7868/S0207352817090049>
9. *Ferguson D.C., Wimberly S.C.* The Best GEO Daytime Spacecraft Charging Index. // Proc. 50th AIAA Aerospace Sci. Mtg, Dallas, Texas. 2013. P. AIAA 2013-0810. <https://doi.org/10.2514/6.2013-810>
10. *Messenger S.R., Wong F., Hoang B., Cress C.D., Walters R.J., Kleuver C.A., Jones G.* // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2014. V. 61. № 6. P. 3348. <https://doi.org/10.1109/TNS.2014.2364894>
11. *Toyoda K., Okumura T., Hosoda S., Cho M.* // *J. Spacecraft Rockets.* 2005. V. 42. № 5. P. 947. <https://doi.org/https://doi.org/10.2514/1.11602>.
12. *Liu Y., Feng W., Wang S., Huang J., Tang X., Wang Zh.* GEO Spacecraft potential estimation in worst-case environment by SPIS. // Proc. 14th Spacecraft Charging Technology Conference, ESA/ESTEC, Noordwijk, NL. 2016.
13. Модель космоса. Вып. 8. Т. 2. / Ред. Новиков Л.С. М.: Изд. МГУ, 2007.
14. *Zhang G.F., Wang T.S., Yang K.J., Chen L., Zhang L.M., Peng H.B., Yuan W., Tian, F.* // *Nucl. Instr. Methods Phys. Res. B.* 2013. V. 316. P. 218. <https://doi.org/10.1016/j.nimb>
15. *Boizot B., Petite G., Ghaleb D., Reynard B., Calas G.* // *J. Non-Cryst. Solids.* 1999. V. 243. P. 268.
16. *Boizot B., Petite G., Ghaleb D., Calas G.* // *J. Non-Cryst. Solids.* 2001. V. 283. P. 179.
17. *Sun K., Wang L.M., Ewing R.C., Weber W.J.* // *Philos. Mag.* 2005. V. 85. P. 597.
18. *Chen L., Wang T.S., Zhang G.F., Yang K.J., Peng H.B., Zhang L.M.* // *Chinese. Phys. B.* 2013. V. 22. P. 126101.
19. *Masui H., Toyoda K., Cho M.* // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2008. V. 36. P. 2387. <https://doi.org/10.1109/TPS.2008.2003191>
20. *Khasanshin R.H., Novikov L.S.* // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2019. V. 47. № 8. P. 3796. <https://doi.org/10.1109/TPS.2019.2916210>
21. *Ferguson D.C., Katz I.* // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2015. V. 43. № 9. P. 3021. <https://doi.org/10.1109/TPS.2015.2432718>
22. *Cho M., Kawakita S., Nakamura M., Takahashi M., Sato T., Nozaki Y.* // *J. Spacecraft Rockets.* 2005. V. 42. № 4. P. 740. <https://doi.org/10.2514/1.6694>
23. *Khasanshin R.H., Novikov L.S.* // *Adv. Space Res.* 2016. V. 57. P. 2187. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2016.02.23>
24. *Purvis C., Garrett H.B., Whittlesey A.C., Stevens N.J.* // *NASA Tech.* 1984. P. 2361.
25. *Свечкин В.П., Савельев А.А., Соколова С.П., Бородина О.В.* // Космич. техника и технология. 2017. № 2. С. 99.
26. *Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С.* // Перспективные материалы. 2023. № 1. С. 19. <https://doi.org/10.30791/1028-978X-2023-1-19-27>
27. *Хасаншин Р.Х., Уваров Д.В.* // Известия РАН: Сер. физ. 2024. Т. 88. № 4. С. 454.

Electrostatic Discharges During the Joint Impact of Electrons and Electromagnetic Radiation on Glass K-208

R. Kh. Khasanshin^{1, 2, *}, L. S. Novikov³, D. V. Uvarov¹

¹*NPO “Kompozit”, Korolev, 141070 Russia*

²*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005 Russia*

³*Skobeltsyn Research Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

*e-mail: rhkhas@mail.ru

Electrostatic discharges and radiation-stimulated leakage currents were studied under separate and combined action of 10–40 keV electrons and solar electromagnetic radiation on K-208 glass samples used as cover glass for solar batteries and reflective elements for spacecraft thermal radiators. The values of the electron flux density (ϕ) were changed in the range of $(5 \times 10^8 - 1 \times 10^{11}) \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, the electromagnetic radiation flux corresponded to one equivalent of solar illumination. Irradiation was carried out in a vacuum of 10^{-4} Pa . During irradiation, two types of discharges were observed: the first type is a discharge from a cone-shaped microprotrusion on the glass surface into the surrounding ionized medium; the second type of discharge developed along the irradiated surface leaving about 100 nm wide and up to 2 nm deep discharge channels on it. Discharges of both types were accompanied by plasma emissions and generation of electromagnetic pulses. The dependences of the discharge frequency and leakage currents on the parameter ϕ for electron and combined irradiation were obtained. It was found that for fixed electron energy, discharges of the second type on the samples surface in the case of combined irradiation occur at a lower ϕ value than in the case of electron irradiation. It was also found that with combined action the share of breakdowns of cover glass samples on the conductive substrate in the events recorded in the experiments increases significantly. The share of breakdowns of glass samples also increases with increasing energy of the impacting electrons.

Keywords: electrostatic discharge, breakdown, electron irradiation, electromagnetic radiation, glass, photoelectric effect, leakage current, discharge frequency, photoemission, secondary electrons, ionization, atomic force microscopy.