

УДК 629.7.067; 537.2; 621.38

К ИССЛЕДОВАНИЮ ВЛИЯНИЯ СОБСТВЕННОЙ АТМОСФЕРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ НА ПОВЕРХНОСТЯХ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

Савина А.С.

ФГБОУ ВПО «Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана»,
Москва, e-mail: savina_bmstu@inbox.ru

Проведен анализ результатов экспериментальных исследований электростатических разрядов при электронном облучении защитного стекла солнечных батарей К-208 частицами средних энергий. В ходе экспериментов наблюдались электростатические разряды двух типов: первый – «разряд микровыступ на поверхности стекла – окружающая ионизованная атмосфера» и второй – разряд, развивающийся по поверхности стекла с образованием на ней разрядных каналов. Выявлено, что на развитие разрядов влияют не только энергия электронов и плотность их потока, но и остаточное давление газов в вакуумной камере, где облучались образцы стекла. Показано, что зависимость минимального значения плотности потока, необходимого для развития поверхностных разрядов, от энергии электронов при фиксированном давлении определяется зависимостью ионизационных потерь электронов в остаточном газе от энергии.

Ключевые слова: электростатический разряд, собственная внешняя атмосфера, защитное стекло солнечных батарей, атомно-силовая микроскопия, микровыступ, разрядные каналы

THE STUDY OF INFLUENCE OF THE SPACE VEHICLES OWN ATMOSPHERE TO DEVELOPMENT OF ELECTROSTATIC DISCHARGES ON THE SURFACE OF THE SOLAR BATTERIES

Savina A.S.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, e-mail: savina_bmstu@inbox.ru

The analysis of results of experimental studies of electrostatic discharge under electron irradiation of the protective glass solar K-208 medium-energy particles has done. During the experiment two types of electrostatic discharge were observed: the first one is «the discharge microprojection on the glass surface – the outside ionized atmosphere» and the second one develops on the glass surface with the discharge channels formation. It was revealed that the development of discharges affect not only the energy of the electrons and the density of the flow, but the residual gas pressure in the vacuum chamber, where the glass samples were irradiated. Was shown the dependence of the minimum flux density required for the development of surface discharges, the electron energy at a fixed pressure determined by the dependence of ionization electron loss in the residual gas of the energy.

Keywords: electrostatic discharge, own outer atmosphere, solar panels safety glass, atomic force microscopy, microprojection, the discharge channels

Увеличение сроков активного существования космических аппаратов (КА) предъявляет повышенные требования к надёжности и качеству проведения испытаний материалов космического назначения на стойкость к воздействию факторов космического пространства (ФКП). Одним из индуцированных факторов, воздействие которого может нарушить нормальное функционирование КА, является его собственная внешняя атмосфера (СВА), образующаяся за счёт потери массы материалов поверхности, утечки газов из внутренних отсеков, выбросов продуктов сгорания топлива ракетных двигателей и других процессов [3, 11].

Среди негативных проявлений действия СВА на современные и перспективные спутники, оснащаемые большим количеством высокочувствительной аппаратуры, наиболее критичными являются: загрязнение поверхности материалов и элементов оборудования конденсирующимися продуктами СВА; снижение электрической

прочности открытого электротехнического и радиотехнического оборудования вследствие облегчения развития газовых форм электрического разряда при повышении давления вблизи поверхности КА; увеличение светового фона в окрестности КА за счёт рассеяния света на частицах СВА.

Деградация оптических свойств материалов внешних поверхностей космического аппарата обусловлена в основном воздействием на них ионизирующих излучений [2, 12] и продуктов собственной внешней атмосферы [4, 5, 8]. В частности, защитные покрытия солнечных батарей и радиаторов системы терморегулирования, применяемые на спутниках, функционирующих на геостационарной и высокоэллиптических орбитах, подвергаются большому радиационному нагружению. Интенсивность электростатических разрядов (ЭСР) на поверхностях защитных покрытий солнечных батарей КА должна зависеть как от уровня их загрязнения

продуктами СВА, так и от давления газов в прилегающих к ним областях.

Цель исследования

Исследованию развития ЭСР под действием электронного излучения на диэлектриках с большим сопротивлением, к которым относятся стекла К-208, используемые в качестве защитных покрытий солнечных батарей КА, посвящено большое количество работ, проведенных в лабораториях разных стран [1, 6, 7, 9, 10, 13]. Однако, до настоящего времени не построено общепринятой теории развития разрядов при облучении диэлектрических материалов заряженными частицами. При этом зависимость ЭСР от условий облучения и энергии заряженных частиц подробно не изучена. Результаты таких исследований необходимы как для обоснования режимов ускоренных радиационных испытаний защитных покрытий солнечных батарей с целью прогнозирования изменения их оптических свойств в условиях космического пространства, так и для определения влияния на ЭСР спектра ионизирующих излучений и давления СВА КА.

Представленная работа в основном посвящена анализу результатов лабораторных экспериментов, проведенных в ОАО «Композит» для изучения условий возникновения и развития ЭСР при электронном облучении образцов стекла К-208.

Материалы и методы исследования

Облучение образцов стекла К-208, стандартных размеров $40 \times 40 \times 0.17$ мм, прикрепленных к охлаждае-

мому заземленному металлическому столику моделирующей установки УВ-1/2, схема которой показана на рис. 1, проводилось при давлении в вакуумной камере $p_v = 10^{-5} \div 5 \times 10^{-3}$ Па. Энергия электронов составляла $E_{e0} = 40$ кэВ, а плотность их потока варьировалась в диапазоне $\phi = 10^{10} \div 2 \times 10^{11}$ см⁻²с⁻¹. Характеристики электронного пучка контролировались цилиндрами Фарадея на расстоянии 2 см от столика с образцом. Перед облучением поверхности образцов очищались дистиллированной водой в ультразвуковой ванне, после чего образцы сушили при температуре 100 °С.

До и после облучения поверхности образцов исследовались с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) Solver P47 – Multi – Technique SPM. Для изучения топологии поверхности образцов использовалась полуконтактная атомно-силовая мода, которая при высокой точности измерений не разрушает поверхность.

Результаты исследования и их обсуждение

Известно, что при облучении диэлектрика с низкой проводимостью заряженными частицами, длина пробега которых в мишени меньше ее линейных размеров, в ней формируются области с высокой плотностью заряда, поле которого может привести к развитию электростатического разряда между областью локализации заряда и поверхностью диэлектрика. Максимальный пробег в стекле электронов с энергией 40 кэВ, составляющий порядка 16 мкм, во много раз (более чем в 10 раз) меньше толщины образца (170 мкм). Поэтому в подобных экспериментах сквозной электростатической пробой на металлический столик, к которому прикреплялись образцы, не рассматривается.

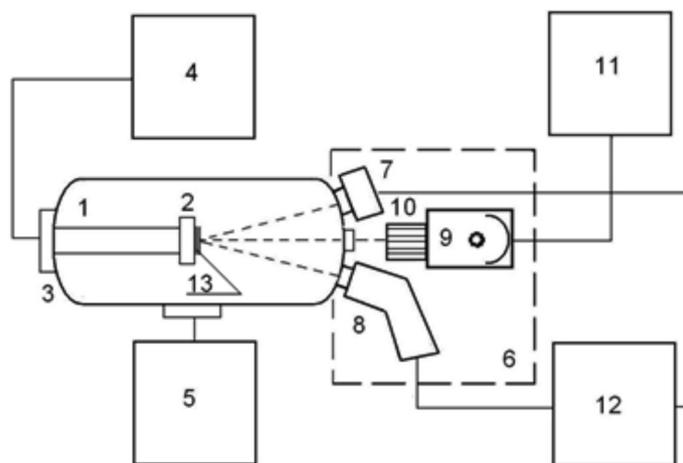


Рис. 1. Схема автоматизированного стенда УВ-1/2: 1 – вакуумная камера; 2 – измерительный столик; 3 – термостат; 4 – система вакуумной откачки и контроля вакуума; 5 – блок измерений; 6 – блок имитаторов космического пространства; 7 – электронный ускоритель; 8 – протонный ускоритель; 9 – имитатор концентрированного солнечного излучения; 10 – формирующее оптическое устройство; 11 – блок управления имитатором солнечного излучения; 12 – блок управления ускорителями; 13 – образец материала

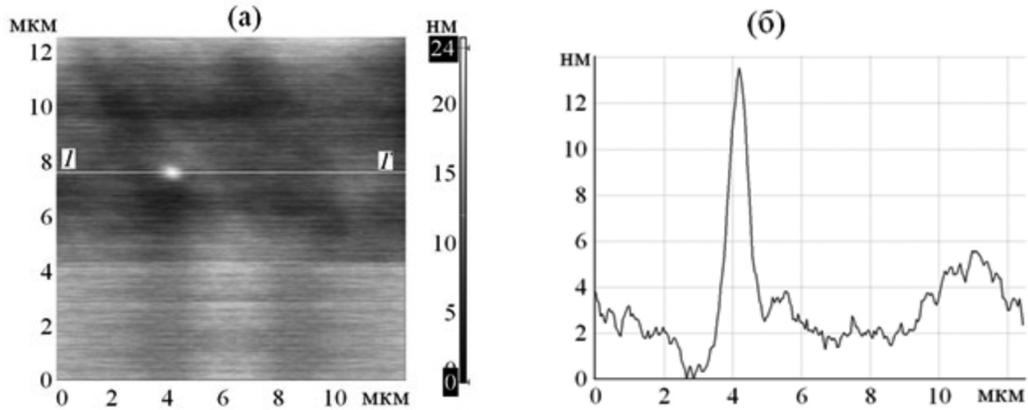


Рис. 2. АСМ – изображения необлученного образца стекла: (а) – кадр 13×13 мкм; (б) – его сечение вдоль линии «1-1'»

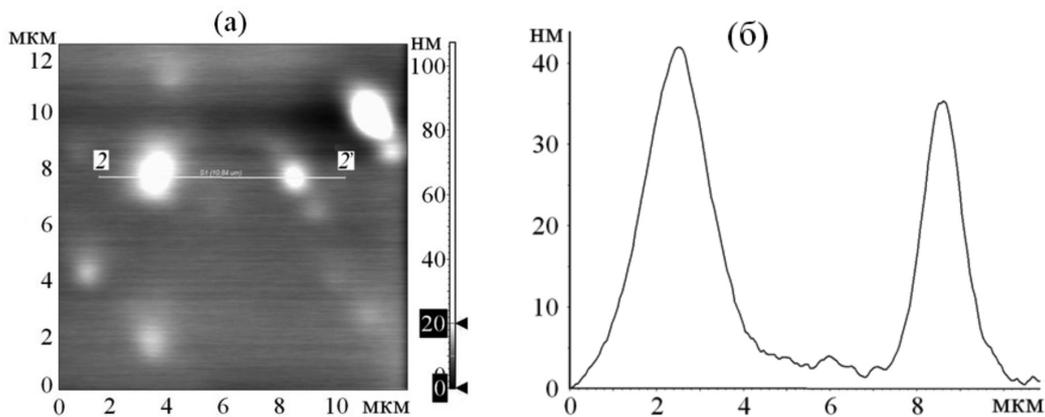


Рис. 3. АСМ – изображения облученного образца: (а), (б) – кадр 13×13 мкм; (б) – сечение кадра вдоль линии «2-2'» ($\varphi_e = 2,3 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$)

АСМ – исследования показали, что на поверхностях некоторых необлученных образцов имеются технологические микровыступы. Например, на рис. 2 (а) представлено изображение фрагмента поверхности образца стекла до его облучения. Видно, что на поверхности имеется микровыступ, высотой до 14 нм.

Анализ АСМ-изображений поверхностей облученных образцов показал, что после облучения количество микровыступов, приходящихся на единицу площади, возрастает в несколько раз, при этом увеличиваются и их размеры. Для демонстрации сказанного на рис. 3 показано изображение облученного образца, структура поверхности которого до облучения имела вид, представленный на рис. 2.

Помимо аккумуляции термализованных в стекле электронов при облучении в нем происходит отжиг структурных де-

фектов, содержание которых особенно велико в его приповерхностном слое. Отжиг дефектов, в свою очередь, сопровождается появлением радиационно-стимулированных напряжений и радиационно-стимулированной диффузией, способствующих ускорению транспортных процессов, обеспечивающих перенос материала к центрам роста микровыступов на поверхности стекла.

В экспериментах наблюдались два типа разрядов: первый – «разряд микровыступ на поверхности стекла – окружающая ионизованная атмосфера» приводил к увеличению числа и размеров микровыступов (см. рис. 2-3), второй – разряд, развивающийся по поверхности стекла с образованием на ней разрядных каналов. Оба разряда сопровождались выбросом в окружающее пространство плазмы и изменениями структуры поверхности стекла.

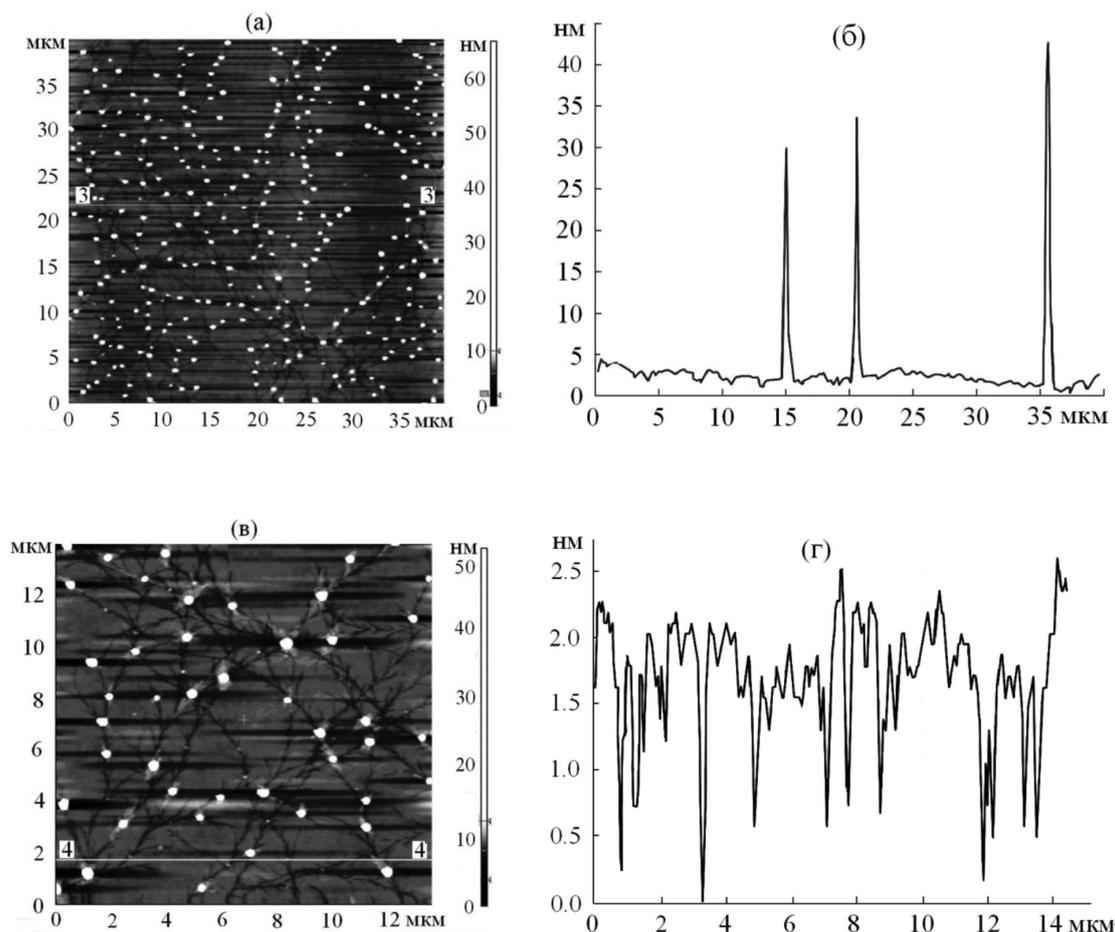


Рис. 4. АСМ-изображение поверхности облученного образца: (а), (в) – кадры 35×35 и 14×14 мкм; (б), (г) – сечения кадров вдоль линий «3-3» и «4-4» ($\varphi_e = 8.6 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$)

При разрядах первого типа стекло быстро переходит из твёрдого в жидкое, и далее – в газообразное и в плазменное состояние, что приводит к увеличению размеров микровыступов за счёт накопления на них остывшего стекла после выброса плазмы в окружающее пространство. Облучение образцов при $\varphi_e = 2,3 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ до значения флюенса 10^{15} см^{-2} сопровождалось разрядами первого типа с образованием и ростом на поверхности стекла микровыступов высотой до 100 нм (рис. 3, а).

С увеличение плотности потока электронов до значения $7 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ количество микровыступов возросло, однако их высота не превышала 60 нм. При этом значении φ_e проявились разряды второго типа. Обусловленное тангенциальной составляющей электрического поля, их развитие стимулируют увеличивающиеся вместе с φ_e плотность ионизованного газа, особенно вблизи облучаемой поверхности, и радиационная проводимость облучаемого слоя стекла.

В качестве иллюстрации на рис. 4 показаны фрагменты поверхности образца, облученного при $\varphi_e = 8.6 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, на которых имеются как микровыступы высотой до 50 нм, так и разрядные каналы глубиной до 2 нм.

Увеличение плотности потока электронов до $10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ приводит к тому, что поверхностные разряды начинают преобладать, а при энергии электронов 40 кэВ, давлении $p_v \cdot 10^4 \text{ Па}$ и значениях потока $\varphi_e > 1,3 \times 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ образование микровыступов – следов выброса плазмы – не наблюдается.

На рис. 5 представлен случай, когда при облучении происходят только поверхностные разряды. При этом глубина разрядных каналов достигает 2,5 нм. Можно предположить, что при этих условиях облучения ионизованный приповерхностный газ и радиационная проводимость стекла обеспечивают стекание заряда через металлические прижимы на столик за счет поверхностных разрядов.

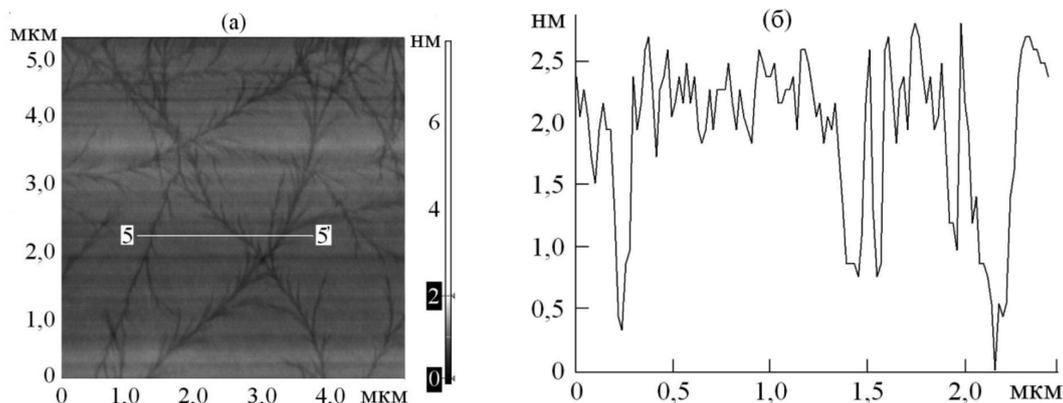


Рис. 5. АСМ-изображение поверхности облученного образца: (а) – кадр $5,5 \times 5,5$ мкм; (б) – сечение кадра вдоль линии «5-5» ($\phi_e = 1,4 \times 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$)

Анализ экспериментальных результатов облучения образцов стекла электронами с энергией 40 кэВ позволяет утверждать, что при увеличении давления в вакуумной камере с 10^{-5} до 5×10^{-3} Па величина минимальной плотности потока электронов, обеспечивающих появление разрядов второго типа, снижается с $1,7 \times 10^{11}$ до $1,4 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Выводы

Из анализа экспериментальных результатов следует, что при электронном облучении стекла К-208 происходят два типа разрядов: первый – «разряд микровыступ на поверхности стекла – окружающая ионизованная атмосфера», приводящий к увеличению числа и размеров микровыступов; второй – разряд, развивающийся по поверхности стекла с образованием на ней разрядных каналов. Оба разряда сопровождаются выбросом в окружающее пространство плазмы и изменениями структуры поверхности стекла. При этом зависимость минимального значения плотности потока электронов, необходимого для развития поверхностных разрядов от давления, определяется концентрацией ионов, образующихся в слое газа, прилегающего к облучаемой поверхности стекла.

Список литературы

1. Боев С.Г. Ушаков В.Я. Радиационное накопление заряда в твердых диэлектриках и методы его диагностики. – М. Энергоатомиздат. 1991. 240 с.

2. Бреховских С.М., Викторова Ю.Н., Ланда Л.М. Радиационные эффекты в стеклах. М: Энергоиздат, 1982. 182 с.

3. Модель космоса. Под ред. Новикова Л.С. Выпуск 8. Т. 2 // М.: Изд. МГУ, 2007. 1144 с.

4. Хасаншин Р.Х., Надирадзе А.Б. Изменение оптических свойств функциональных поверхностей космических аппаратов при совместном воздействии электронов и ультрафиолета // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2013, № 3, С. 73-78.

5. Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С. Изменения спектра пропускания стекла марки К-208 под действием ионизирующих излучений и молекулярных потоков // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2014, № 7, С. 83-87.

6. Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С., Коровин С.Б. Исследования электростатических разрядов при облучении стекла К-208 электронами // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2015, № 1, С. 88-93.

7. DeNatale J.F., Howitt D.G. / Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 1 (1984) p. 489.

8. Fong M.C., Lee A.L., and Ma P.T., «External Contamination Environment of Space Station Customer Servicing Facility», Lockheed Missiles Space Company, Inc. Sunnyvale, CAAAIA 22nd Thermophysics Conference June 8-10, 1987/Honolulu, Hawaii, AAI-87-1623.

9. Gavenda T., Gedeon O., Jurek K. Volume changes in glass induced by an electron beam/ Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 322 (2014) p.7-22.

10. Gedeon O., Charvátová S., Macháček J.: Structural Changes in Alkali Depleted Alkali-Silicate Glass- MD Study, Advanced Materials Research 2008, 65-68 (2008).

11. Khasanshin R.H., Grigorevskiy A.V., and Galygin A.N. «Simulation of Outgassing Processes in Spacecraft Coatings Induced by Thermal Vacuum Influence», Journal of Spacecraft and Rockets, Vol.41, No. 3 (2004), pp. 384-388. doi: 10.2514/1.10933.

12. Mackey I.H., Smith H.L., Halperin A. // J. Phys. Chem. Sol. 1996. Vol. 27, №11. P. 1759.

13. Zanderna A.W., Madey T.E., Powell C.J./N. Y.: Kluwer Academic Publisher. 2004. 451 p.