

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

Р.Х. Хасаншин<sup>1,2</sup>, Л.С. Новиков<sup>3</sup>, С.И. Никитин<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>АО "Композит" г. Королев Московской обл., <sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, <sup>3</sup>НИИЯФ МГУ им. М.В. Ломоносова г. Москва

## Введение

Одно из проявлений взаимодействия космического аппарата (КА) с окружающей плазмой заключается в накоплении в диэлектрических материалах его поверхности электрического заряда. Это влечёт за собой появление разности потенциалов, как между отдельными участками непроводящей поверхности КА, так и между его поверхностью и окружающей плазмой. Например, потенциалы поверхности высокоорбитального КА могут достигать значений до 20 кВ [1-2] и приводить к электростатическим разрядам (ЭСР), которые сопровождаются генерацией электромагнитных импульсов повреждениями и разрушениями элементов конструкции, в частности защитных стёкол солнечных батарей. Накоплен достаточно большой объём экспериментальных данных о возникновении ЭСР на поверхности стёкол при электронном облучении [2-7], однако, данные об особенностях ЭСР при совместном воздействии электромагнитного излучения (ЭМИ) и электронов практически отсутствуют. В работе приводятся результаты лабораторных экспериментов по изучению условий возникновения и развития ЭСР на поверхности образцов покровного стекла (ПС) солнечных батарей КА при раздельном и совместном облучении электронами и ЭМИ.

## Методика эксперимента

В экспериментах образец ПС размером 40×40×0,17 мм, изготовленный на основе стеклянной пластины К-208, прикрепляли к изолированной от предметного столика металлической подложке, предназначенной для измерения токов утечки. В вакуумной камере испытательного стенда УВ-1/2 (АО «Композит») одновременно облучали всю поверхность образца при следующих условиях:

- вакуум –  $10^{-4}$  Па;
- энергия электронов  $E_e = 10 \div 50$  кэВ;
- плотность потока электронов  $\phi_e = \text{от } 5 \times 10^9 \text{ до } 5 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ ;
- флюенс электронов  $\Phi_e = 5 \times 10^{14} \div 5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ;
- поток ЭМИ составлял 1 ЭСО (1400 ккал/м<sup>2</sup>);
- температура столика –  $20 \pm 1^\circ\text{C}$

Поверхности исходных и облученных образцов исследовались с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) Solver P47–Multi–Technique SPMT. Для изучения топологии поверхности образцов использовалась полуконтактная атомно-силовая мода, которая при высокой точности измерений не разрушает поверхность. По периметру образца на высоте 5 мм размещалась медная антенна диаметром 2 мм. Ток, наведенный на антенне, при ЭСР или пробое на металлическую подложку замыкался на корпус через измерительный резистор. Напряжение на резисторе фиксировалось с помощью двухлучевого осциллографа RIGOL MSO2302A.

## Стенд УВ-1/2

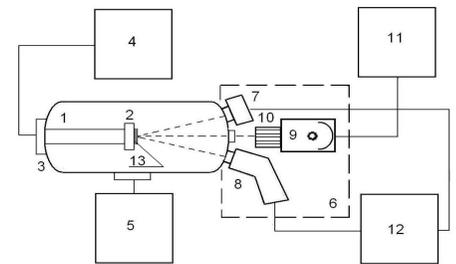


Рис. 1. Схема автоматизированного стенда УВ-1/2: 1 – вакуумная камера; 2 – рабочий и измерительный столик; 3 – термостат; 4 – система вакуумной откачки и контроля вакуума; 5 – блок измерений; 6 – блок имитаторов космического пространства; 7 – электронный ускоритель; 8 – протонный ускоритель; 9 – имитатор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

## Результаты экспериментов

### АСМ-изображение исходного стекла

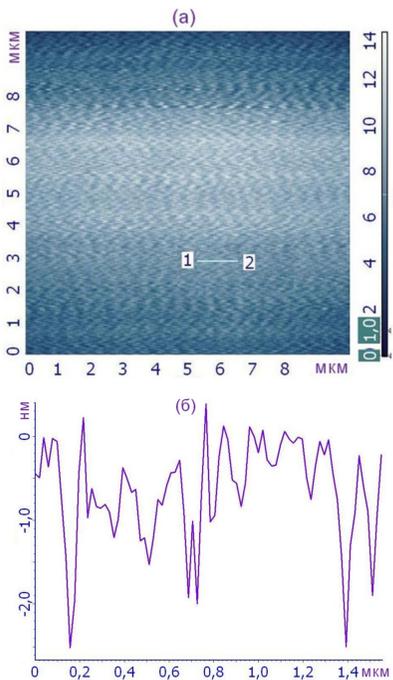


Рис. 2.: Кадр 10×10 мкм (а) и его сечение вдоль линии "1-2" (б)

### АСМ-изображения образцов облученных электронами

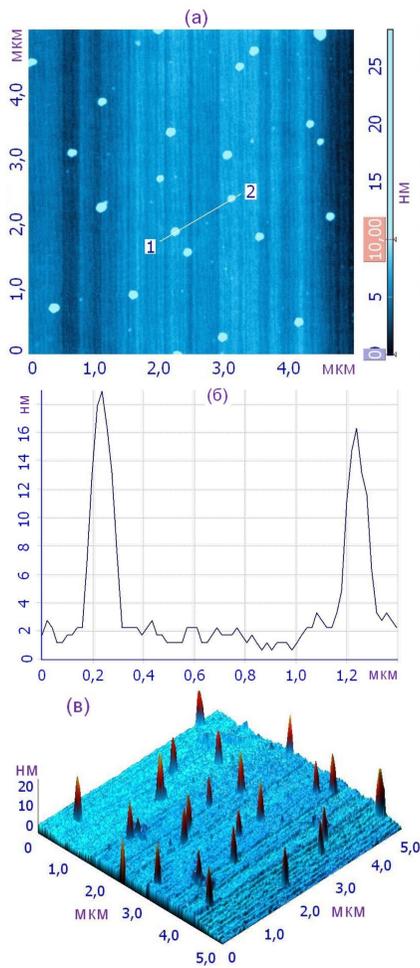


Рис.3.: Кадр 5×5 мкм (а), его сечение вдоль линии "1-2" (б) и 3D-изображение (в) ( $\phi = 3.4 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ ;  $\Phi = 10^{15} \text{ см}^{-2}$ )

### АСМ-изображения образцов облученных электронами и ЭМИ

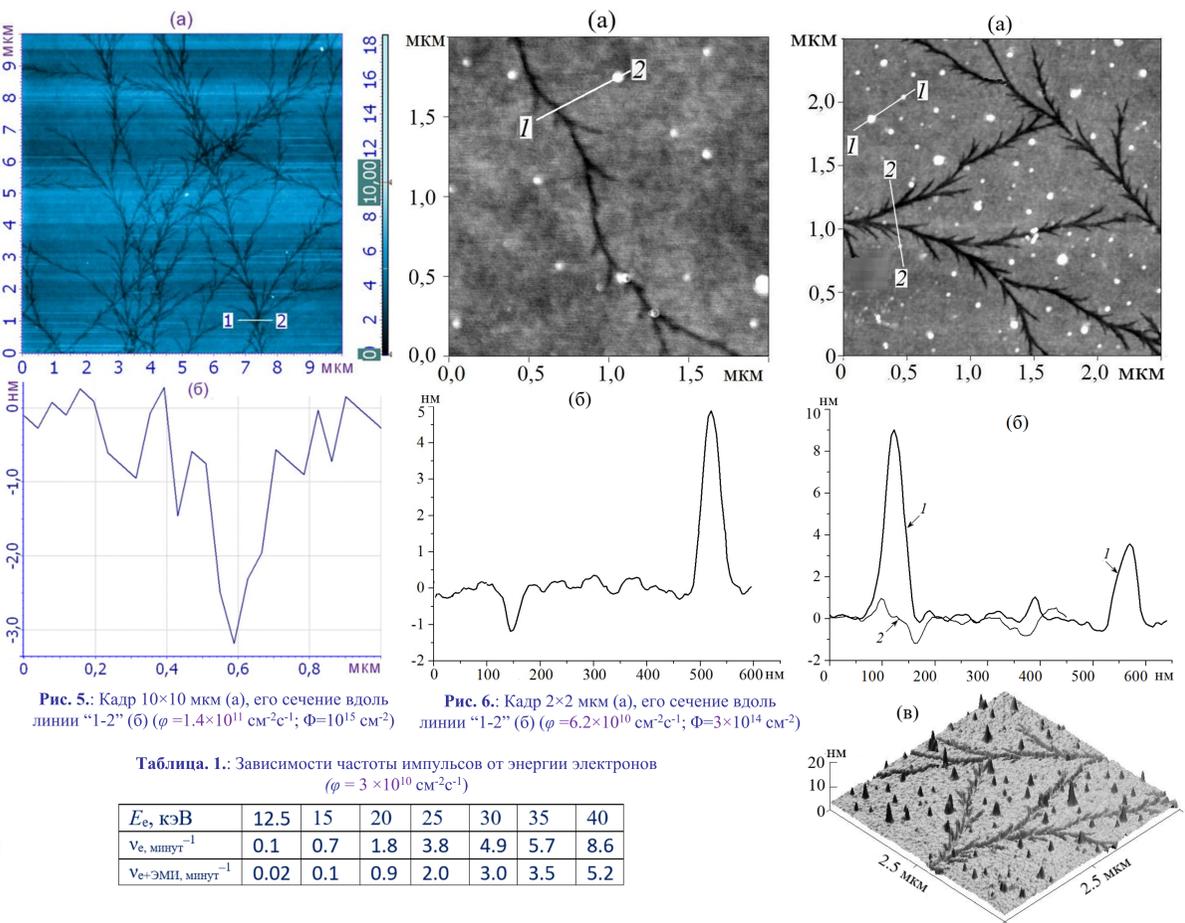


Рис. 5.: Кадр 10×10 мкм (а), его сечение вдоль линии "1-2" (б) ( $\phi = 1.4 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ ;  $\Phi = 10^{15} \text{ см}^{-2}$ )

Рис. 6.: Кадр 2×2 мкм (а), его сечение вдоль линии "1-2" (б) ( $\phi = 6.2 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ ;  $\Phi = 3 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ )

Рис. 7.: Кадр 2.5×2.5 мкм (а), его сечения вдоль линии "1-1" и "2-2" (б) и 3D-изображение кадра (в) ( $\phi = 1.0 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ ;  $\Phi = 10^{15} \text{ см}^{-2}$ )

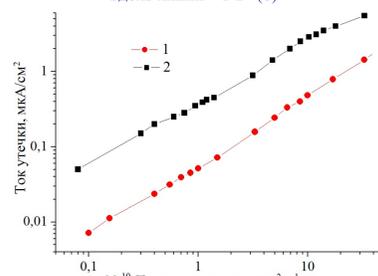


Рис. 8.: Токи утечки при электронном (1) и совместном (2) облучении образцов ( $E = 30$  кэВ)

Таблица. 1.: Зависимости частоты импульсов от энергии электронов ( $\phi = 3 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ )

$E_e$ , кэВ	12,5	15	20	25	30	35	40
$V_e$ , минут <sup>-1</sup>	0.1	0.7	1.8	3.8	4.9	5.7	8.6
$V_{e+\text{ЭМИ}}$ , минут <sup>-1</sup>	0.02	0.1	0.9	2.0	3.0	3.5	5.2

Таблица. 2.: Зависимости частоты импульсов от плотности значения  $\phi$  ( $E = 30$  кэВ)

$\phi_e$ , $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$	$4.6 \cdot 10^9$	$6.2 \cdot 10^9$	$8.0 \cdot 10^9$	$1.0 \cdot 10^{10}$	$1.3 \cdot 10^{10}$	$1.6 \cdot 10^{10}$
$V_e$ , минут <sup>-1</sup>	0.8	1.1	1.9	2.3	3.4	4.7
$V_{e+\text{ЭМИ}}$ , минут <sup>-1</sup>	0.6	0.84	1.0	1.4	2.0	2.8



Рис.9.: Типовые формы импульсов, регистрируемых при совместном облучении электронами и ЭМИ

## Выводы

Показано, что при облучении электронами с энергиями от 10 до 50 кэВ при плотности потока в диапазоне  $10^9 \div 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  и совместном облучении электронами и ЭМИ стекла К-208 протекают разряды двух типов, которые сопровождаются выбросом плазмы в окружающее пространство. Первый тип – разряд с микровыступом на поверхности стекла в окружающую ионизованную среду приводит к росту микровыступа за счет накопления остывшего стекла на последней стадии разряда и к образованию новых микровыступов на облучаемой поверхности за счет возврата на нее плазмонидов. Второй тип – разряд развивается вдоль облучаемой поверхности, оставляя на ней разрядные каналы шириной до 300 нм и глубиной до 4 нм. Помимо разрядов в экспериментах наблюдались пробои облучаемого стекла на проводящую подложку, с которой снимались токи утечки, величина которых возрастала как с увеличением плотности потока электронов, так и с ростом их энергии.

Необходимо отметить, что при совпадающих значениях параметров электронного пучка в случае совместного облучения частота разрядов сокращается. При этом разряды второго типа, возникающие в случае электронного облучения в вакууме  $10^{-4}$  Па, когда значения плотности потока становится выше  $7.5 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , при совместном облучении наблюдались уже при значениях  $6.0 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Это объясняется ростом плотности ионизованной остаточной атмосферы у облучаемой поверхности стекла, что, в свою очередь, увеличивает вероятность развития разрядов второго типа. Установлено так же, что при совместном облучении электронами и ЭМИ значительно увеличивается доля пробоев стекла К-208 на проводящую подложку, что, по-видимому, обусловлено в основном внутренним фотоэффектом в облучаемом образце. Доля пробоев стекла в количестве фиксируемых импульсов растет вместе с энергией воздействующих электронов.

## Литература

[1]. Ferguson D.C., Wimberly S.C., Proceed. 50th AIAA Aerospace Sci. Mtg. (2013) AIAA 2013-0810.  
 [2]. Модель космоса. Научно-информ. издание / под ред. Л.С. Новикова. Т.2. М. КДУ, 2007, 1144 с. [3]. Frakhfakh S., Jbara O., Belhaj M., et al. // J. Appl. Phys. 2008. V.104. 093704.  
 [4]. Kazuhiro Toyoda, Tepei Okumura, Satoshi Hosoda, Mengu Cho // J. of Spac. and Roc., 42, (2005) 947.  
 [5]. Guerch K., Paulmier T., Guillemet-Fritsch S., Lenormand P. // Nucl. Instr. Meth. B. 2015. V. 349. P. 147.  
 [6]. Miyake H., Tanaka Y., Takada T., Liu R. // IEEE Trans. on Dielec. and Elect. Insul. 2007. V. 14. No. 2. P. 520.  
 [7]. Khasanshin R.H., Novikov L.S. // Adv. in Space Res. 2016. V. 57. P. 2187.