

## **Электроразрядные процессы при облучении стекол К-208 и CMG электронами с энергией в диапазоне от 10 до 40 кэВ**

**Р. Х. Хасаншин, Л. С. Новиков, Л. С. Гаценко, Я. Б. Волкова**

---

Проведен сопоставительный анализ характеристик электростатических разрядов, возникающих на поверхности стекол К-208 и CMG при облучении их в вакууме электронами с энергиями в диапазоне 10–40 кэВ при плотности потока от  $10^{10}$  до  $2,5 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>. Для обоих стекол наблюдали разряды, сопровождающиеся выбросом плазмы в окружающее пространство и образованием на поверхности микровыступов и разрядных каналов, однако условия развития разрядов и размеры образующихся на поверхности микроструктур для стекол К-208 и CMG, облученных в одинаковых условиях, значительно отличаются. Наблюдаемые различия в развитии разрядов в стеклах К-208 и CMG обусловлены наличием у стекла CMG покрытия из фторида магния, большей проводимостью CMG и меньшей концентрацией в нем дефектов и дислокаций по сравнению с К-208

**Ключевые слова:** электронное облучение, стекла К-208 и CMG, электростатический разряд.

---

### **Введение**

Известно, что при облучении образцов диэлектриков электронами с длиной пробега, меньшей толщины облучаемого образца, в них образуется локальная область с высокой плотностью заряда, создающего внутреннее электрическое поле [1–3]. При достижении некоторых критических значений напряженности электрического поля в диэлектрике возникают электростатические разряды (ЭСР) разных видов. Исследованиям ЭСР при электронном облучении диэлектриков посвящено большое количество работ [4–9], однако до настоящего времени не определены общепринятые механизмы развития разрядов и не разработаны корректные модели их количественного описания.

Актуальность изучения ЭСР в диэлектриках, подвергающихся воздействию ионизирующих излучений, связана как с решением фундаментальных задач радиационной физики твердого тела, так и с существованием ряда важных прикладных проблем. В частности, возникновение подобных ЭСР на космических аппаратах — одна из основных причин

отказов и сбоев в работе их бортового оборудования [10].

Цель настоящей работы — лабораторные исследования условий возникновения и развития ЭСР при облучении электронами с энергией от 10 до 40 кэВ стекол К-208 и CMG, используемых в качестве защитных покрытий солнечных батарей космических аппаратов.

Варьирование условий облучения позволило изменять пространственно-временные параметры заряда термализованных электронов в образцах и исследовать влияние энергии и плотности исходного потока электронов на вид возникающего разряда и характер деструкции поверхности стекла. При этом основное внимание было уделено сравнительному анализу характеристик ЭСР в исследуемых стеклах при одинаковых условиях их облучения.

### **Материалы и методика эксперимента**

Стекла CMG, выпускаемые фирмой QIORTIOQ (Великобритания), покрыты пленкой из фторида магния (MgF<sub>2</sub>) толщиной 110 нм для снижения

коэффициента отражения стекла в рабочей спектральной области элементов солнечных батарей.

Облучение осуществляли в вакуумной камере установки “УВ-1/2” [11] при давлении  $10^{-4}$  Па электронами с энергиями 10, 20, 30 и 40 кэВ при варьировании плотности потока электронов в диапазоне от  $10^{10}$  до  $5 \cdot 10^{11}$   $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ . Пучок электронов направлялся на квадратные образцы ( $40 \times 40$  мм) стекол К-208 и СМГ толщиной 170 и 120 мкм, предварительно очищенные в ультразвуковой ванне. При облучении образцы располагались на полированной металлической поверхности заземленного охлаждаемого столика, к которому их крепили медными пластинами шириной 2 мм. Для указанных значений энергии максимальные длины пробегов электронов в стекле не превышают соответственно 1,5, 5, 9 и 16 мкм, то есть они значительно меньше толщины образцов, поэтому разрядов на металлическую подложку не возникали.

Поверхности образцов до и после облучения исследовали методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) с помощью микроскопа Solver P47–Multi–Technique SPM производства NT–MDT (Зеленоград). Для изучения топологии поверхности образцов использовали полуконтактную атомно-силовую моду, которая при высокой точности измерений не разрушает поверхность.

## Результаты и обсуждение

Облучение стекла сопровождается накоплением в нем термализованных электронов, что приводит в конечном итоге к возникновению ЭСР, изменяющих структуру поверхности стекла [12].

На рис. 1а приведено изображение поверхности облученного образца стекла К-208, из которого видно, что в результате облучения электронами с энергией  $E_e = 10$  кэВ при флюенсе  $\Phi_e = 5,4 \cdot 10^{14}$   $\text{см}^{-2}$  и плотности потока  $\phi_e = 2,8 \cdot 10^{14}$   $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$  на поверхности стекла образовались микровыступы высотой до 25 нм. Сечение этого рисунка вдоль линии 1–2 (рис. 1б) показывает, что высота основной части микровыступов не превышает 12 нм.

Такая структура поверхности облученного образца соответствует случаю возникновения разрядов первого типа: микровыступ – остаточная атмосфера вакуумной камеры, сопровождающихся выбросом в окружающую среду плазмы с избыточным электронным зарядом. В местах выхода плазмы микровыступы представляли собой капельки застывшего стекла, имеющие более рыхлую структуру.

Можно полагать, что при облучении стекла происходит отжиг структурных дефектов, содержание которых особенно велико в приповерхностном слое. Отжиг дефектов сопровождается возникновением радиационно-стимулированных напряжений и радиационно-стимулированной диффузии, что способствует ускорению транспортных процессов, обеспечивающих перенос материала к центрам роста микровыступов на поверхности стекла. В промежутках времени между разрядами, с увеличением напряженности электрического поля у облучаемой поверхности растет плотность положительных ионов, особенно в окрестности микровыступов, где напряженность поля наиболее велика. При этом бомбардировка вершечек микровыступов ускоренными ионами приводит к их локальному разогреву, стимулирующему зарождение разряда. Наблюдавшиеся

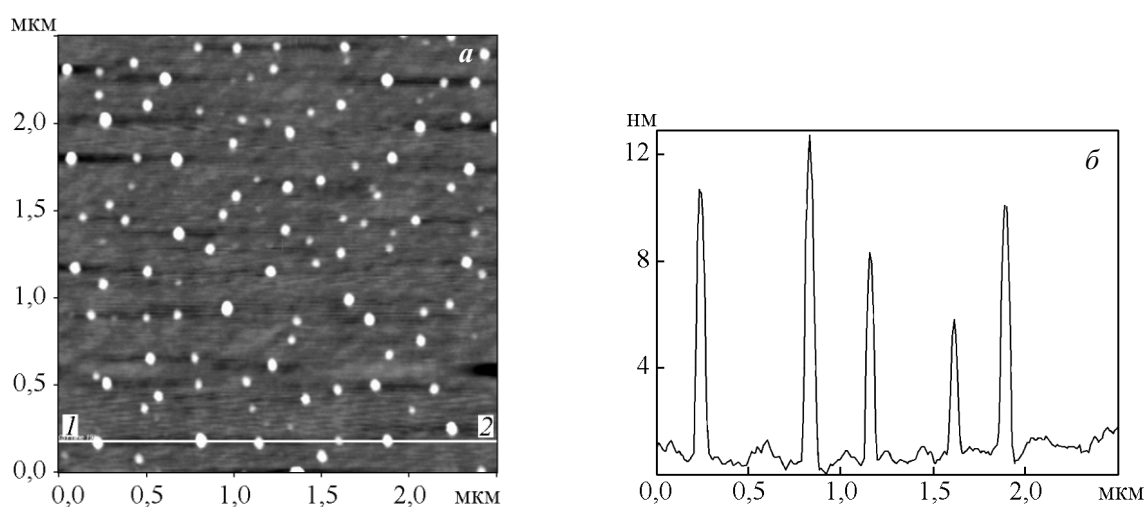


Рис. 1. АСМ-изображение рельефа образца К-208 облученного электронами с энергией  $E_e = 10$  кэВ,  $\Phi_e = 5,4 \cdot 10^{14}$   $\text{см}^{-2}$  и  $\phi_e = 2,8 \cdot 10^{14}$   $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ : а – 2D-изображение кадра  $2,5 \times 2,5$  мкм; б – сечение кадра вдоль линии 1 – 2.

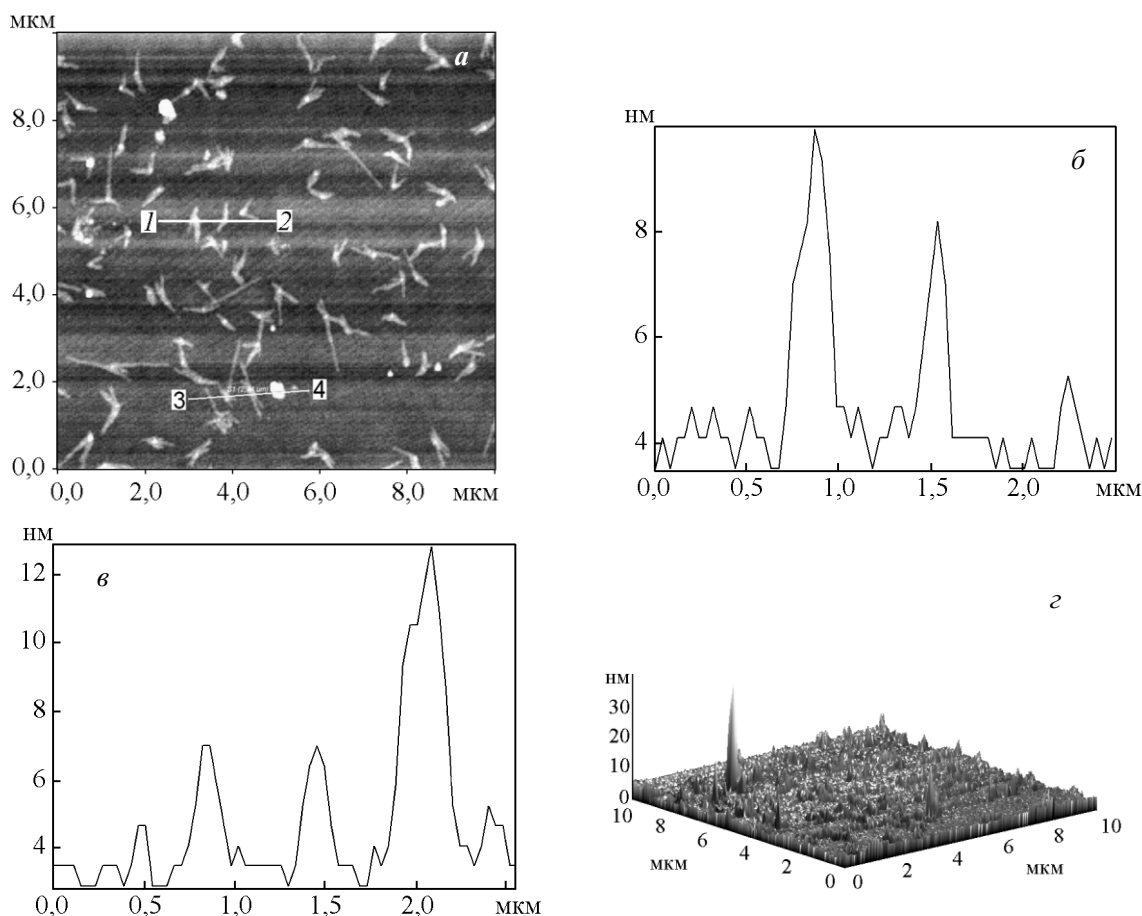


Рис. 2. АСМ-изображения образца К-208 облученного электронами с  $E_e = 10$  кэВ при  $\Phi_e = 1,0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  и  $\phi_e = 8,3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ : а – 2D-изображение кадра  $10 \times 10$  мкм; б и в – сечения кадра вдоль линий 1 – 2 и 3 – 4, соответственно; г – 3D-изображение

в экспериментах повторения разрядов с микровыступом, сопровождающиеся его ростом, обусловлены тем, что микровыступ и некоторая прилегающая область, в которой развивался предыдущий разряд, обладают большей проводимостью по сравнению со стеклом вне этой области.

По мере увеличения значения  $\phi_e$  от  $3,0 \cdot 10^{10}$  до  $9,0 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  при той же энергии электронов  $E_e = 10$  кэВ средняя высота микровыступов снижается с 12 до 8 нм, а на поверхности образца вокруг отдельных микровыступов формируются кластеры. В качестве примера на рис. 2 показаны АСМ-изображения фрагмента образца, облученного электронами с  $E_e = 10$  кэВ при  $\Phi_e = 1,0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  и  $\phi_e = 8,3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ . Изображения на рис. 2а, 2г демонстрируют кластерные структуры, появившиеся на поверхности облученного стекла, и наличие на ней отдельного микровыступа высотой около 35 нм. Сечения кадра (рис. 2а) вдоль линий 1 – 2 и 3 – 4

показывают (рис. 2б, 2в), что средняя высота кластеров не превышает 8 нм.

Облучение образцов СМГ электронами с энергией 10 кэВ при значениях  $\phi_e$  в диапазоне от  $2,0$  до  $9,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  не сопровождалось ЭСР, которые привели бы к заметным изменениям структуры поверхности образцов. Такой результат может быть связан с тем, что стекло СМГ по сравнению с К-208, во-первых, обладает большей проводимостью, обеспечивающей сток избыточного заряда с тонкого приповерхностного слоя, а во-вторых, характеризуется меньшей концентрацией дефектов и дислокаций, отжиг которых приводит к появлению микровыступов. Еще одним фактором, влияющим на развитие разрядов при облучении стекла СМГ, по-видимому, является наличие на его облучаемой поверхности покрытия из фторида магния.

Структурные изменения поверхностей образцов К-208, облученных электронами с энергией 20 кэВ,

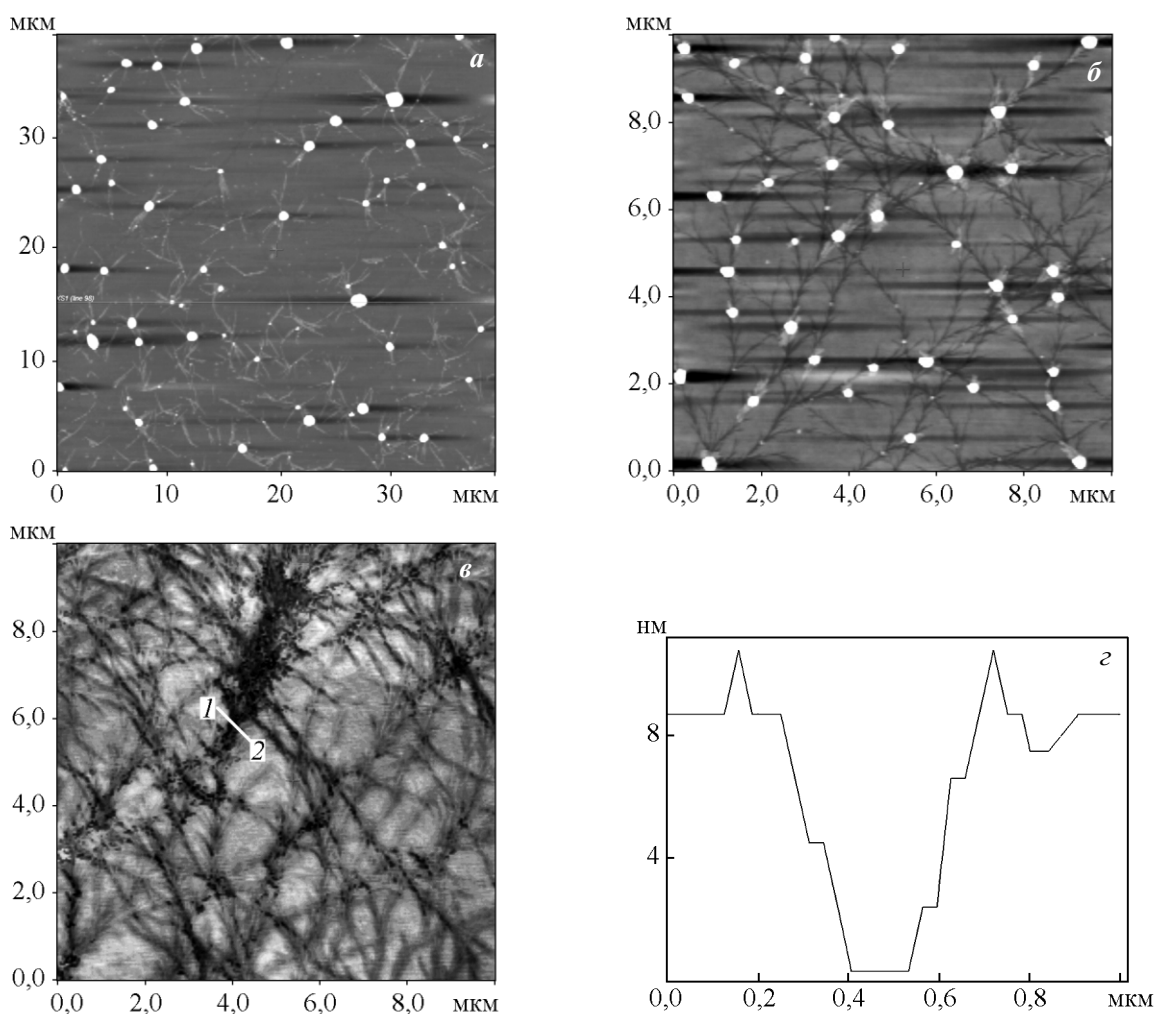


Рис. 3. АСМ-изображения образцов К-208 облученных электронами с  $E_e = 20$  кэВ при разных значениях  $\phi_e$ ,  $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ : а –  $3,4 \cdot 10^{10}$ ; б –  $6,7 \cdot 10^{10}$ ; в –  $1,2 \cdot 10^{11}$ ; з – сечение кадра в вдоль линии 1 – 2.

существенно отличаются от облученных электронами с энергией 10 кэВ показанных на рис. 1 и 2.

На рис. 3 приведены изображения поверхности образцов, облученных электронами с  $E_e = 20$  кэВ при  $\Phi_e \leq 1,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  и разных значениях  $\phi_e$ . Облучение образцов при  $\phi_e = 3,4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  сопровождалось преимущественно разрядами первого типа и образованием на поверхности стекла микровыступов высотой до 150 нм (рис. 3а). С увеличением значения  $\phi_e$  до  $6,7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  количество микровыступов возросло, однако их высота была менее 60 нм (рис. 3б). При этом значении  $\phi_e$  отчетливо проявились и разряды второго типа, развивающиеся вдоль облучаемой поверхности стекла и образующие на ней разрядные каналы. На рис. 3б такие разряды проходят преимущественно через микровыступы. Можно полагать, что их развитие, обусловленное тангенциальной

составляющей электрического поля, стимулируется происходящим с ростом  $\phi_e$  увеличением плотности ионизованного газа вблизи облучаемой поверхности и радиационной проводимости облучаемого слоя стекла.

При  $\phi_e = 1,2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  (рис. 3в) разряды второго типа становятся преобладающими, а разряды первого типа практически не наблюдаются. При этом глубина разрядных каналов в стекле К-208 достигала 9 нм (рис. 3з).

Отметим, что разряды обоих типов сопровождались выбросом плазмы в окружающее пространство, что приводило к импульсному повышению давления в вакуумной камере.

В образцах стекла CMG при облучении их электронами с  $E_e = 20, 30$  и  $40$  кэВ происходили разряды обоих типов, в зависимости от плотности потока

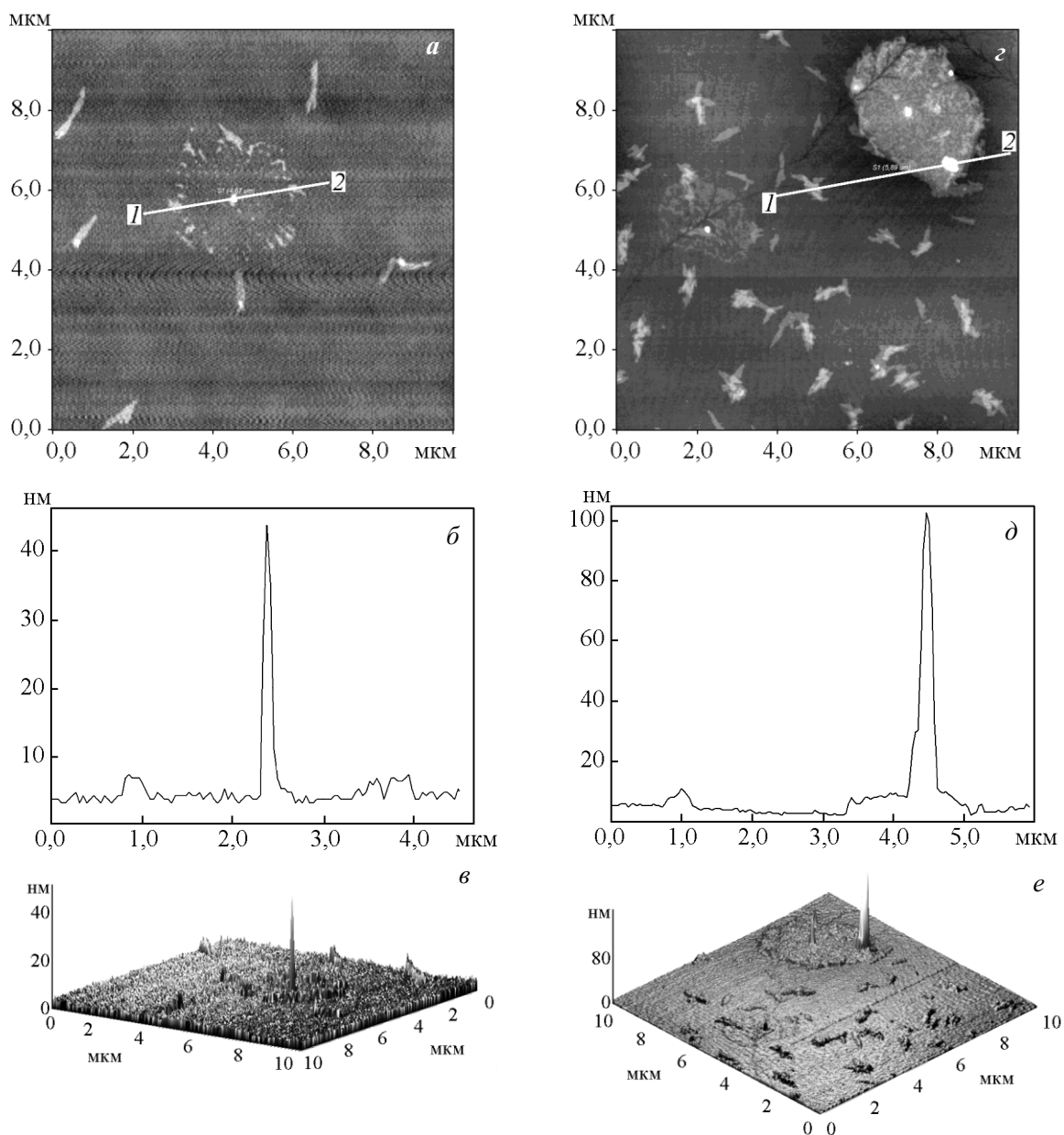


Рис. 4. АСМ-изображения образца SMG облученного электронами с энергией 20 кэВ,  $\Phi_e = 7,6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ : *a – в* –  $\Phi_e = 3,0 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , *г – е* –  $\Phi_e = 8,7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . *a, б, г, д* – 2D-изображение участка  $10 \times 10 \text{ мкм}$  и его сечение вдоль линии 1 – 2, соответственно; *в, е* – 3D-изображение.

электронов. На рис. 4–6 показаны АСМ-изображения поверхности образцов стекла SMG, облученных электронами с энергией 20 кэВ при  $\Phi_e \leq 1,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , демонстрируют некоторые особенности развития ЭСР в этом стекле.

Облучение образцов SMG при  $\Phi_e = 7,6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  и  $\phi_e = 3,0 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  привело к структурным изменениям поверхности, обусловленным, как и в случае облучения образцов К-208, радиационно-

стимулированными процессами в облучаемом слое и разрядами первого типа (рис. 4*a – в*). В экспериментах наблюдали многократно повторяющиеся разряды через отдельные микровыступы, сопровождавшиеся выбросом плазмы в окружающее пространство и ростом микровыступов. При этом на поверхности стекла в местах осаждения положительно заряженных компонентов плазмы появлялись новые центры роста микровыступов, через которые

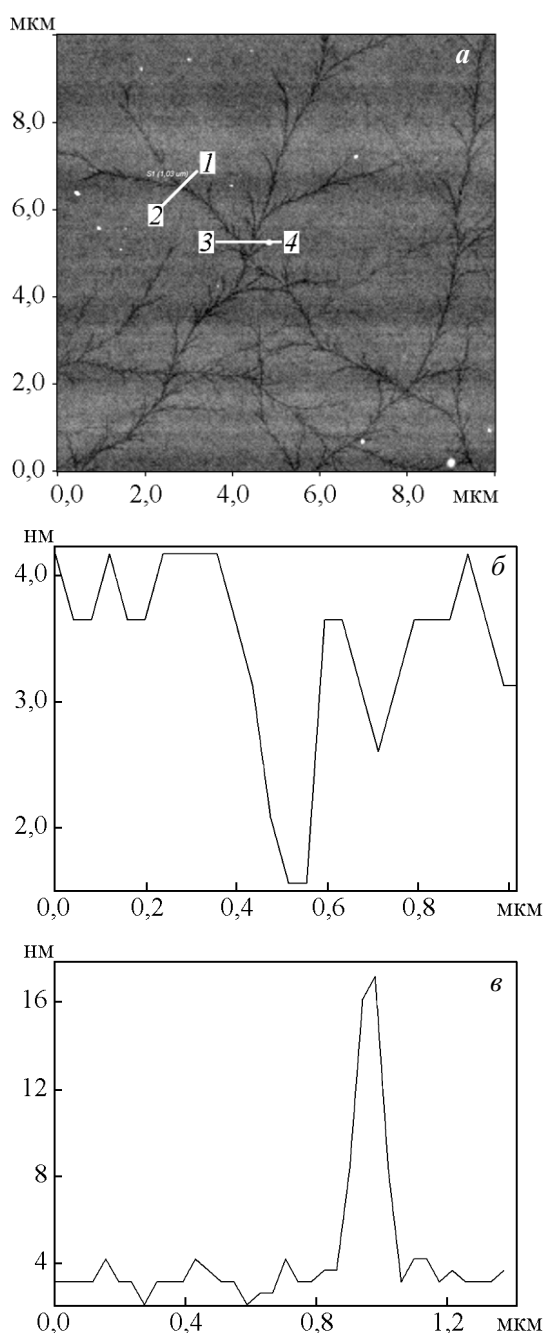


Рис. 5. АСМ-изображения образца СМГ облученного электронами с энергией 20 кэВ при  $\Phi_e = 1,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  при  $\phi_e = 1,12 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ : а – 2D-изображение кадра  $10 \times 10 \text{ мкм}$ ; б и в – сечения кадра а вдоль линии 1 – 2 и 3 – 4, соответственно.

происходили разряды первого типа. Из рис. 4б видно, что в результате ЭСР вокруг микровыступа высотой 45 нм на расстоянии порядка 1,5 мкм от него образовались микровыступы высотой до 8 нм. При облучении образцов К-208 такие процессы не происходили.

Увеличение плотности потока электронов до значения  $8,7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  привело к образованию отдельных микровыступов высотой до 120 нм и увеличению количества центров роста микровыступов (рис. 4з – е).

По мере дальнейшего увеличения плотности потока электронов происходит отмечавшийся выше рост концентрации ионов у поверхности образца и его радиационной проводимости. Эти процессы стимулирует разряды второго типа, развивающиеся вдоль облучаемой поверхности образца. На рис. 5 показаны АСМ-изображения образца СМГ облученного электронами с энергией 20 кэВ при  $\Phi_e = 1,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  при  $\phi_e = 1,12 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Видно, что при указанном режиме облучения преобладают ЭСР второго типа. Глубина разрядных каналов в стекле (рис. 5б, 5в) не превышает 2,5 нм, что в три раза меньше чем при облучении стекла К-208 в аналогичных условиях (рис. 3в, 3г). Следует также отметить, что в случае облучения стекла К-208 разряды второго типа начинали проявляться при меньших значениях плотности потока электронов ( $\phi_e = 6,0 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ).

Анализа результатов, полученных как в процессе, так и после облучения образцов К-208 и СМГ электронами с энергиями 30 и 40 кэВ, показал их качественное совпадение с данными, приведенными на рис. 3 – 5. Однако имеется ряд количественных отличий. Во-первых, с увеличением энергии электронов при фиксированных значениях остальных параметров облучения растет высота микровыступов, с которых происходят разряды первого типа. Например, при  $\phi_e \approx 3,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  и  $\Phi_e \approx 7,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  максимальная высота микровыступов при энергиях электронов 20, 30 и 40 кэВ составила соответственно для образцов стекла К-208 — 150, 190 и 250 мкм, а для образцов стекла СМГ — 45, 80 и 150 мкм. Во-вторых, с увеличением энергии электронов разряды второго типа начинают проявляться и становятся преобладающими при более высоких плотностях потока электронов. Так, для образцов К-208, облучаемых электронами с энергиями 20, 30 и 40 кэВ, значения  $\phi_e$  при которых начинали возникать разряды второго типа, были равны  $1,2 \cdot 10^{11}$ ,  $1,4 \cdot 10^{11}$  и  $2,0 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , соответственно, а для образцов СМГ —  $1,3 \cdot 10^{11}$ ;  $1,7 \cdot 10^{11}$  и  $2,3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . При указанных значениях  $\phi_e$  максимальные значения глубины разрядных каналов, образующихся за счет разрядов второго типа, лежат для образцов К-208 в интервале от 6 до 10 нм, а для образцов СМГ — в интервале от 1,5 до 3 нм. Таким образом, можно сделать вывод, что каналы разрядов второго типа при облучении стекла СМГ образуются в слое покрытия из фторида магния.

## Выводы

1. При электронном облучении стекол К-208 и СМГ происходят разряды двух типов: направленные нормально к поверхности в ионизованную остаточную атмосферу вакуумной камеры и развивающиеся вдоль облучаемой поверхности. Разряды обоих типов приводят к структурным изменениям поверхности образцов.

2. Максимальная высота микровыступов, образующихся на поверхности стекол в результате облучения электронами с энергиями 20, 30 и 40 кэВ при значениях плотности потока  $\phi_e \approx 3,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  и флюенса  $\Phi_e \approx 7,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , для стекла К-208 составила соответственно 150, 190 и 250 мкм, а для стекла СМГ — 45, 80 и 150 мкм. Увеличение  $\phi_e$  в интервале от  $2 \cdot 10^{10}$  до  $5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  при  $\Phi_e \leq 10^{15} \text{ см}^{-2}$  для указанных выше значений  $E_e$  привело к росту размеров микровыступов при незначительном изменении их числа. По мере дальнейшего увеличения  $\phi_e$  от  $5 \cdot 10^{10}$  до  $10^{11} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ , происходит увеличение числа микровыступов при снижении их высоты.

3. При облучении стекла К-208 электронами с  $E_e = 20, 30$  и  $40$  кэВ разряды второго типа начинали проявляться при  $\phi_e > 5 \cdot 10^{10}, 5,8 \cdot 10^{10}$  и  $6,7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ , соответственно. Аналогичные значения  $\phi_e$  для стекла СМГ оказались в среднем на 30% выше.

4. Для тех же условий облучения пороговые значения  $\phi_e$ , начиная с которых наблюдали разряды только второго типа, составили для стекла К-208 —  $1,2 \cdot 10^{11}, 1,4 \cdot 10^{11}$  и  $2,0 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ , а для стекла СМГ —  $1,3 \cdot 10^{11}, 1,7 \cdot 10^{11}$  и  $2,3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ .

5. При облучении стекол электронами с  $E_e = 10$  кэВ и значениях  $\phi_e$  от 2,0 до  $9,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  разряды наблюдались только в образцах К-208. Количество микровыступов, образующихся на единице поверхности образцов К-208 при облучении электронами с  $E_e = 20, 30$  и  $40$  кэВ, значительно больше по сравнению с образцами СМГ при одинаковых условиях облучения. При значениях  $\phi_e = 1,0 \cdot 10^{11} - 2,5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  максимальная глубина разрядных каналов в образцах К-208 и СМГ изменялась в пределах от 2 до 10 нм и от 1,5 до 3,0 нм, соответственно.

6. Наблюдаемые различия в развитии разрядов в стеклах К-208 и СМГ обусловлены наличием у стекла СМГ покрытия из фторида магния, большей проводимостью СМГ и меньшей концентрацией в нем дефектов и дислокаций по сравнению с К-208.

## Литература

1. Lackner H., Kohlberg I., Nablo S.V. Production of large electric fields in dielectrics by electron injection. *J. Appl. Phys.*, 1965, v. 36, no. 6, p. 2064 – 2065.

2. Furuta J., Hiraoka E., Okamoto. Discharge figures in dielectrics by electron injection. *J. Appl. Phys.*, 1966, v. 37, no. 4, p. 1873 – 1878.
3. Gross B., Nablo S.V. High potentials in electron-irradiated dielectrics. *J. Appl. Phys.*, 1967, v. 38, no. 5, p. 2272 – 2275.
4. Летин В.А. Проблемы электризации солнечных батарей космических аппаратов. *Космонавтика и ракетостроение*, 2003, т. 30, № 1, с. 43 – 53.
5. Fujii H., Shibuya Y., Abe T. et al. Research activity in mitsubishi electric on spacecraft charging. *J. Spacecraft and Rockets*, 1988, v. 25, no. 2, p. 156 – 163.
6. Евстафьева Е.Н., Пау Э.И. Сенов Р.А. Некоторые аспекты кинетики зарядки диэлектрических мишеней электронными пучками с энергией 1 – 50 кэВ. *Известия РАН, серия физическая*, 2008, т. 72, № 11, с. 1577 – 1582.
7. Frederickson A.R., Levy L., Enloe C.L. Radiation-induced electrical discharges in complex structures. *IEEE Trans. Electrical Insulation*, 1992, v. 22, no. 6, p. 1166 – 1187.
8. Gross B., Wright K.A. Charge distribution and range effects produced by 3 MeV electrons in plexiglas and aluminum. *Phys. Rev.*, 1959, v. 114, p. 725 – 733.
9. Бабкин Г.В., Гостищев Э.А., Смекалин Л.Ф. и др. Условия возникновения низковольтных электрических дуг между элементами солнечных батарей при радиационной электризации космических аппаратов. *Космонавтика и ракетостроение*, 2003, т. 30, № 1, с. 75 – 81.
10. Модель космоса. Научно-информационное издание. Под ред. Л.С. Новикова. Т. 2. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. М.: КДУ, 2007, 1144 с.
11. 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.
12. Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С. Влияние электронного облучения стекла К-208 на процесс загрязнения его поверхности высокомолекулярными соединениями. *Перспективные материалы*, 2014, № 8, с. 13 – 21.

## References

1. Lackner H., Kohlberg I., Nablo S.V. Production of large electric fields in dielectrics by electron injection. *J. Appl. Phys.*, 1965, vol. 36, no.6, pp. 2064 – 2065.
2. Furuta J., Hiraoka E., Okamoto. Discharge figures in dielectrics by electron injection. *J. Appl. Phys.*, 1966, vol. 37, no.4, pp. 1873 – 1878.
3. Gross B., Nablo S.V. High potentials in electron-irradiated dielectrics. *J. Appl. Phys.* 1967, vol. 38, no.5, pp. 2272 – 2275.
4. Letin V.F. Problems electrifying of solar spacecraft Space and Rocket Science, 2003, vol. 30, no. 1, p. 43 – 53.
5. Fujii H., Shibuya Y., Abe T., Kasai R., Nishimoto H. Electrostatic charging and arc discharges on satellite dielectrics simulated by electron beam. *J. Spacecraft and Rockets*. 1988, vol. 25, no. 2, pp. 156 – 161.

6. Evstafyeva Ye.N., Rau E.I., Senov R.A. Nekotorye aspekty kinetiki zaryadki dielektricheskikh misheney elektronnyimi puchkami s energiyey 1 – 50 keV [Some aspects of dielectric targets charge kinetics under irradiation by electrons with 1 – 50 keV energies]. *Izvestiya RAN, Seriya fizicheskaya — Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2008, vol. 72, no. 11, pp. 1577 – 1582.
7. Frederickson A.R., Levy L., Enloe C.L., Radiation-induced electrical discharges in complex structures, *IEEE Trans. Electrical Insulation*, 1992, vol. 27, no. 6, pp. 1166 – 1187.
8. Gross B., Wright K.A. Charge distribution and range effects produced by 3 MeV electrons in plexiglas and aluminum. *Phys. Rev.*, 1959, vol. 114, pp. 725 – 733.
9. Babkin G.V., Gostishchev E.A., Smekalin L.F. i dr. Usloviya vozniknoveniya nizkovoltnykh elektricheskikh dug mezhdru elementami solnechnykh batarey pri radiatsionnoy elektrizatsii kosmicheskikh apparatov [Conditions for low-voltage electric arc formation between solar battery elements under radiation electrization of space vehicles]. *Kosmonavtika i raketostroyeniye — Cosmonautics and rocket building*. 2003, vol. 30, no. 1, pp. 75 – 81.
10. Novikov L.S. *Model kosmosa. T.2. Vozdeystviye kosmicheskoy sredy na materialy i oborudovaniye kosmicheskikh apparatov* [Model of space. Vol.2. Effect of space environment on materials and equipment of space vehicle]. Moscow, KDU, 2007, 1144 p.
11. Khasanshin R.Kh., Novikov L.S. Izmeneniya spektra propuskaniya stekla marki K-208 pod deystviyem ioniziruyushchikh izlucheny i molekulyarnykh potokov [Changes of transmission spectra of K-208 glass under effect of ionizing radiation and molecular flows]. *Poverkhnost. Rentgenovskiy, sinkhrotronnyy i neytronnyy issledovaniya — Journal of surface investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2014, no. 7, pp. 83 – 87.
12. Khasanshin R.Kh., Novikov L.S. Vliyaniye elektronnoy obluheniya stekla K-208 na protsess zagryazneniya ego poverkhnosti vysokomolekulyarnymi soyedineniyami [Effect of electron irradiation of K-208 glass on process of surface pollution by high-molecular compounds]. *Perspektivnyye materialy — Advanced materials*, 2014, no. 8, pp. 13 – 21.

Статья поступила в редакцию 7.07.2014 г.

**Хасанишин Рашид Хусаинович** — Открытое акционерное общество “Композит” (141070 г. Королев Московской области, ул. Пионерская 4, , ОАО “Композит”), кандидат физико-математических наук, доцент, начальник лаборатории математического моделирования, специалист в области взаимодействия ионизирующего излучения с веществом, математического моделирования. E-mail: rhkhas@mail.ru.

**Новиков Лев Симонович** — НИИЯФ имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова (119991 Москва, ГПС-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2), доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом, специалист в области космического материаловедения и взаимодействия ионизирующего излучения с веществом. E-mail: novikov@sinp.msu.ru.

**Волкова Яна Борисовна** — Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (105005 Москва, ул. 2-я Бауманская, д.5), инженер, специалист в области сканирующей зондовой микроскопии и исследования углеродных наноструктур. E-mail: Volkovayb@gmail.com.

**Гаценко Ленина Серафимовна** — ОАО “НПП “КВАНТ” (129626 Москва, 3-я Мытищинская, 16), старший научный сотрудник, специалист в области разработки и исследования солнечных батарей.



## **Electrical discharges in K-208 and CMG glasses being radiated by 10- to 40-keV electrons**

**R. Kh. Khasanshin, L. S. Novikov, L. S. Gatsenko, Ya. B. Volkova**

A comparative analysis of electrostatic discharges on surfaces of K-208 and CMG glasses under irradiation by 10- to 40-keV electrons with flux densities from  $10^{10}$  to  $2,5 \cdot 10^{11}$   $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  in vacuum was done. The discharges accompanied by plasma ejections into surrounding and formation of microprotrusions and discharge channels were observed on the both glasses. However, the conditions of discharge formation and microprotrusion sizes on the K-208 and CMG glass surfaces irradiated under the same conditions are essentially different.

**Keywords:** electron radiation, K-208 glass, CMG glass, electrostatic discharges, atomic force microscopy, surface destruction.

---

**Khasanshin Rashid** — JSC “Kompozit” (141079 Russia, Korolev, Moscow region, Pionerskaya st., 4), Russia, associated professor, head of laboratory. E-mail: rhkhas@mail.ru.

**Novikov Lev** — Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics Lomonosov Moscow State University (119991, Russia, Moscow, Leninskie gory, 1, str. 2) professor, DrSci (Phys.Math.), head of department. E-mail: novikov@sinp.msu.ru.

**Volkova Yana** — Federal State Educational Institution of Higher Professional Education “Bauman Moscow State Technical University” (105005 Russia, Moscow, BMSTU, 2-Baumanskaya, 5-1) — Educational research centers of nanotechnology and nano- and micro-system technology BMSTU, engineer. E-mail: volkovayb@gmail.com.

**Gatsenko Lenina** — Open Joint-Stock Company “Research-Production Enterprise “KVANT” (129626 Russia, Moscow, 3-rd Mytischinskaya, 16).