

УДК 629.7 067; 537.2; 621.38

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ РАЗРЯДЫ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ СТЕКЛА ЭЛЕКТРОНАМИ СРЕДНИХ ЭНЕРГИЙ

Юсова А.С.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, e-mail: a.yussova@gmail.com

Методами атомно-силовой микроскопии исследованы поверхности образцов стекла К-208, облученных электронами с энергиями E_e от 10 до 40 кэВ. Облучение проводилось в вакуумной камере при давлении $p_v = 10^{-4}$ Па. Плотности потока электронов ϕ_e варьировались в диапазоне $2 \times 10^{10} \div 1,5 \times 10^{11}$ см⁻²с⁻¹. Наблюдались электростатические разряды двух типов: первого типа – объемные (стекло – ионизованная остаточная атмосфера) и второго типа – поверхностные. Исследована зависимость высоты микровыступов, образующихся при разрядах первого типа, от энергии электронов. Показано, что при плотности потока $\phi_e \approx 2,3 \times 10^{10}$ см⁻²с⁻¹ и флюенсе $\Phi_e \approx 10^{15}$ см² с ростом энергии от 10 до 40 кэВ высота микровыступов возрастает соответственно с 10 до 450 нм. Установлено, что минимальные значения ϕ_e , необходимые для реализации разрядов только второго типа, при электронном облучении с энергиями частиц от 20 до 40 кэВ составляют соответственно $1,2 \times 10^{11}$, $1,4 \times 10^{11}$ см⁻²с⁻¹, при этом глубина разрядных каналов не превышает 2,5 и 3 нм.

Ключевые слова: Защитные покрытия солнечных батарей, стекло К-208, электронное излучение, электростатические разряды

ELECTROSTATIC DISCHARGES DURING GLASS IRRADIATION OF MEDIUM ENERGY ELECTRONS

Yusova A.S.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, e-mail: a.yussova@gmail.com

The surface of the glass samples of K-208, irradiated by electrons with energies from 10 to 40 keV investigated by atomic force microscopy. Irradiation was carried out in a vacuum chamber at a pressure of $p_v = 10^{-4}$ Pa. Electron flux density varied in the range of $2 \times 10^{10} \div 1,5 \times 10^{11}$ cm⁻²s⁻¹. Electrostatic discharges were observed in two types: the first type – volume (glass – ionized residual atmosphere) and the second type – surface. The dependence of the height of the microprojections formed in the first type discharges, of the electron energy is investigated. It is shown that the flux density $\phi_e \approx 2,3 \times 10^{10}$ cm⁻²s⁻¹ and a fluence $\Phi_e \approx 10^{15}$ cm² with energy of 10 to 40 keV, respectively, increases the height of microprojections from 10 to 450 nm. It was found that the minimum values ϕ_e necessary for the implementation of discharge only the second type, under electron irradiation with the energies of the particles between 20 and 40 keV are respectively $1,2 \times 10^{11}$, $1,4 \times 10^{11}$ cm⁻²s⁻¹, the depth of discharge channels is less than 2,5 and 3 nm.

Keywords: Protective coating of solar panels, glass, K-208, electron radiation, electrostatic discharges

При воздействии на диэлектрик заряженных частиц, максимальная длина пробега которых не превышает размеры облучаемой мишени, в ней образуется локальная область с высокой плотностью заряда [2, 10]. Достижение напряженностью электрического поля заряда критического значения, связанного с существованием пороговой напряженности для образования в материале проводящих каналов, может привести к развитию электростатических разрядов (ЭСР). Изучение ЭСР при облучении диэлектриков, которому посвящено большое количество работ ученых разных стран [1, 4, 6-9], остается актуальным как с научной точки зрения, так и для решения прикладных задач.

В частности, диэлектрические материалы внешних поверхностей высокоорбитальных спутников под действием ионизирующих излучений аккумулируют заряды. Эти заряды обуславливают появление поверхностных потенциалов и сильных электрических полей, приводящих к ЭСР с амплитудой тока до сотен ампер и наносекундными передними фронтами, которые создают помехи в работе бортовой аппаратуры и сопровождаются деструкцией материалов.

До настоящего времени не создано общепринятой количественной теории, описывающей ЭСР при непрерывном облучении диэлектрика, которая бы позволяла однозначно интерпретировать результаты экспериментальных исследований. Это объясняется тем, что в облучаемом диэлектрике происходят сложные взаимосвязанные процессы накопления заряда, индуцирующего электрическое поле большой напряженности, вторичной электронной эмиссии [3], электростатические разряды, релаксация зарядов, протекание токов, обусловленных радиационно-стимулированной проводимостью и т.д.

В данной работе проводится анализ структурных изменений поверхности стекла К-208, используемого в качестве защитного покрытия солнечных батарей космических аппаратов, при электростатических разрядах, обусловленных электронным облучением его образцов.

Цель исследования

Исследование изменения структуры поверхности стекла К-208 при облучении электронами с энергиями, соответствующими параметрам горячей магнитосферной

плазмы на геостационарной орбите в период магнитных возмущений.

Материалы и методы исследования

Для проведения экспериментов из стекла К-208 были изготовлены образцы квадратной формы размером 40×40 мм и толщиной 0.17 мм. Облучение образцов проводилось в вакуумной камере испытательного стенда УВ-1/2 ОАО «Композит» [9] при следующих условиях:

- вакуум – 10^{-4} Па;
- энергия электронов E_e – 10 и 40 кэВ;
- плотность потока электронов φ_e – от 2×10^{10} до $1,5 \times 10^{11}$ $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$;
- температура столика, к которому прикреплялись образцы – 20 ± 1 °С.

Характеристики электронного пучка контролировались цилиндрами Фарадея на расстоянии 2 см от столика с образцом. Перед облучением поверхности образцов очищались дистиллированной водой в ультразвуковой ванне. Далее образцы сушили при температуре 100 °С. Поверхности образцов после облучения исследовались с помощью атомно-силового микроскопа Solver P47 – Multi – Technique SPM производства NT – MDT г. Зеленоград. Для изучения топологии поверхности образцов использовалась полуконтактная атомно-силовая мода, которая при высокой точности измерений не разрушает поверхность.

она составляет около 16 мкм. Однако в результате дрейфа в поле накопленного заряда ПЭ могут мигрировать как к облучаемой поверхности и захватываться более глубокими ловушками, так и в сторону подложки, увеличивая толщину этого слоя и величину накопленного заряда. При достижении напряженностью электрического поля критического значения, величина которого для материала с данной структурой поверхности зависит в основном от значений параметров E_e , φ_e и p_v , начинают происходить ЭСР.

Перед облучением поверхности образцов исследовали с помощью атомно-силового микроскопа и для экспериментов отбирали те из них, на поверхностях которых число технологических микровыступов высотой более 5 нм было минимальным. На рис. 1 представлено АСМ-изображение структуры поверхности образца, выбранного для облучения.

В результате облучения электронами с $E_e = 10$ кэВ при $\varphi_e = 2,3 \times 10^{10}$ $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ до значения флюенса $\Phi_e = 5,0 \times 10^{14}$ см^{-2} на поверхности стекла образовались микровыступы высотой до 15 нм. При этом высота основной части микровыступов не превышает

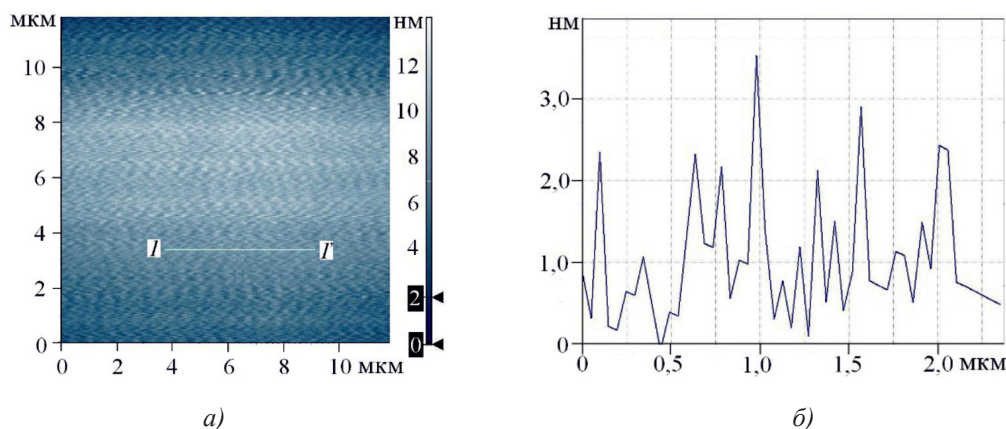


Рис. 1. АСМ-изображение структуры поверхности необлученного образца

Результаты исследования и их обсуждение

При электронном облучении диэлектрика первичные электроны (ПЭ), взаимодействуя с веществом мишени, теряют основную часть своей энергии на возбуждение электронов среды и захватываются ловушками. Это приводит к формированию в образце материала области с высокой плотностью заряда, максимум распределения которого в процессе облучения сдвигается к облучаемой поверхности за счет торможения ПЭ в поле накапливающегося заряда. Толщина плоского слоя, в котором распределяются локализованные электроны, определяется их энергией E_e и, например, для $E_e = 40$ кэВ

10 нм. Согласно предположениям, изложенным в работе [5], их появление и рост обусловлены отжигом дефектов и диффузионными процессами в облучаемом слое, а также разрядами первого типа – «микровыступ – ионизованная остаточная атмосфера вакуумной камеры», сопровождающимися выбросом в окружающее пространство плазмы с избыточным электронным зарядом. При разряде в стекле происходили быстрые фазовые переходы из твердого состояния в жидкое, газообразное и плазменное. Разряд заканчивался выбросом плазмы в окружающее пространство и ростом микровыступов, высота которых росла с числом разрядов за счёт накопления на них остывшего стекла.

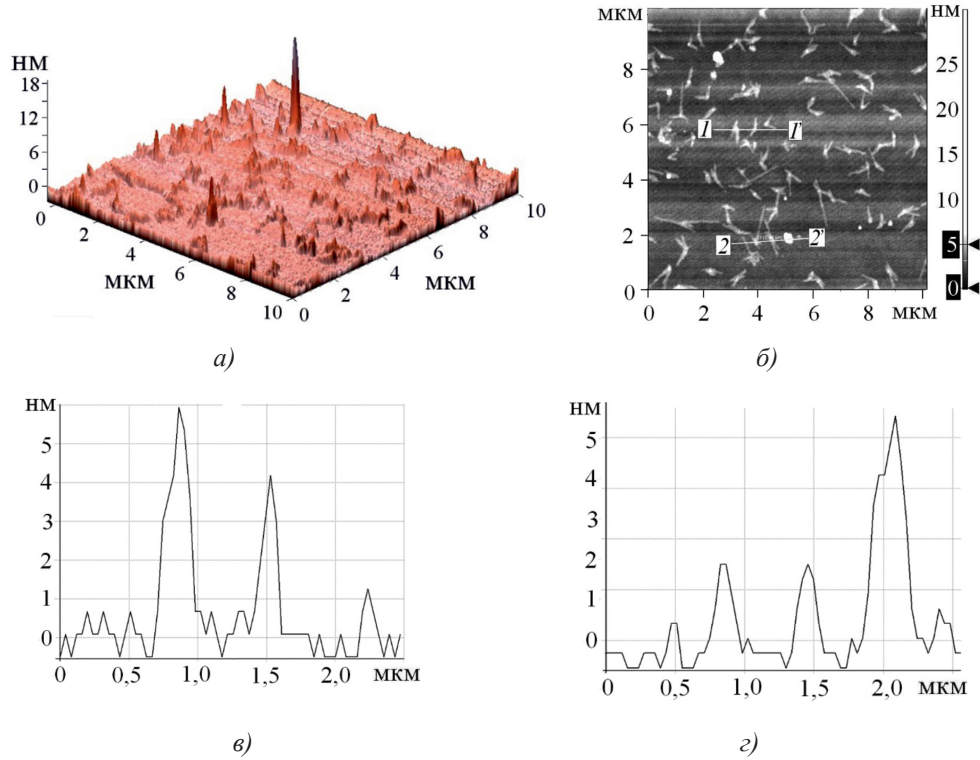


Рис. 2. АСМ-изображения облученного образца ($E_e = 10$ кэВ): а и б – 3D и 2D-изображение образца 10×10 мкм; в и г – сечения 2D-кадра вдоль линий 1 – 1' и 2 – 2' соответственно

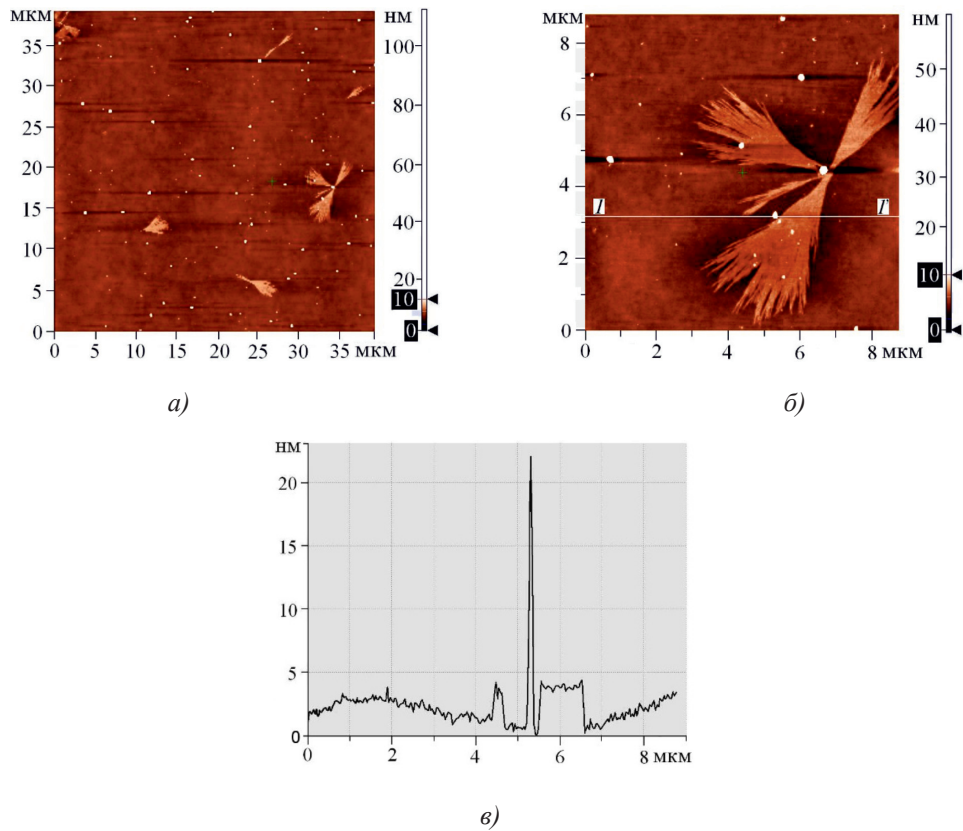


Рис. 3. АСМ-изображения облученного образца ($E_e = 20$ кэВ): а и б – 2D-изображение фрагментов образца 35×35 мкм, 10×10 мкм; в – сечение кадра (б) вдоль линии 1 – 1'

В промежутках времени между разрядами с ростом напряженности поля у облучаемой поверхности увеличивается плотность положительных ионов, особенно в окрестностях микровыступов, в которых напряженность поля имеет локальные максимумы. При этом бомбардировка вершущек микровыступов ускоренными полем ионами приводит к их локальному разогреву, стимулирующему зарождение разряда. Наблюдаемые в экспериментах повторения разрядов с микровыступа, сопровождающиеся увеличением его размеров, обусловлены тем, что он и некоторая область в его окрестности, в которой развивался предыдущий разряд, обладают большей проводимостью по сравнению со стеклом вне этой области.

На рис. 2 – 6 представлены АСМ-изображения образцов, облученных электронами с энергией 10, 20, 30 и 40 кэВ.

Изображения на рис. 2 и 3 подчеркивают особенности структурных изменений поверхности стекла при облучении электронами 10 и 20 кэВ, соответственно. Они связаны

с тем, что разряды происходят в приповерхностных слоях стекла, толщина которых не превышает 1,5 и 4,5 мкм. Необходимо отметить, что скопление микровыступов в кластеры (см. рис. 2, а) характерно только для случая облучения с энергией в 10 кэВ.

При давлении 10^{-4} Па «выход» разряда на поверхность стекла (см. рис. 3, б), при плотности потока около $2,3 \times 10^{10}$ см $^{-2}$ с $^{-1}$, наблюдался только при облучении электронами с энергией 20 кэВ.

Из сравнения изображений, показанных на рис. 2-4, следует, что с увеличением энергии электронов высота микровыступов, появляющихся на поверхности облученного стекла, возрастает и при энергиях 30 и 40 кэВ достигает 150 и 450 нм, соответственно.

При достижении тангенциальной составляющей электрического поля критического значения, для данной концентрации ионов в окрестности облучаемой поверхности, начинают проявляться разряды второго типа, которые развиваются вдоль поверхности стекла и оставляют на нем разрядные каналы.

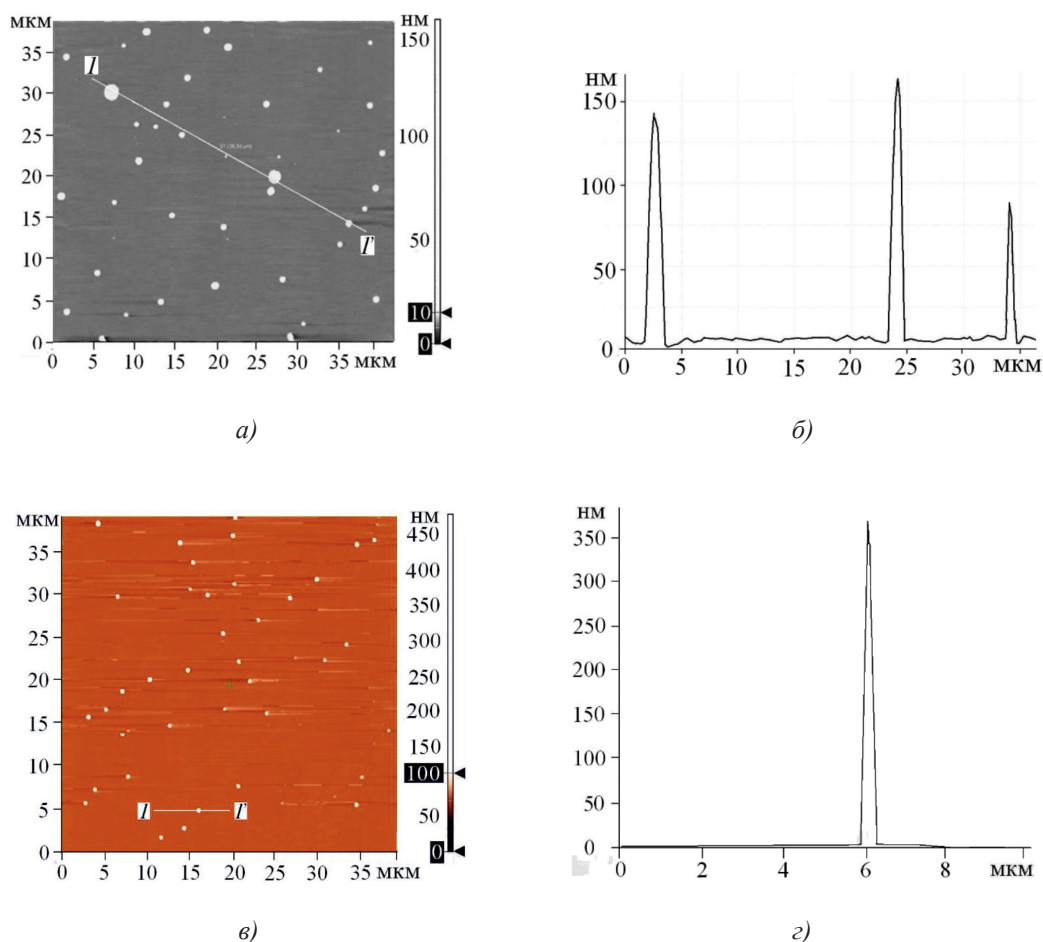


Рис. 4. АСМ-изображения облученного образца (а и б – $E_e = 30$ кэВ, в и г – $E_e = 40$ кэВ): а, в – 2D-изображение фрагментов образца 35×35 мкм; б, г – сечение кадра (а) вдоль линии 1 – 1'

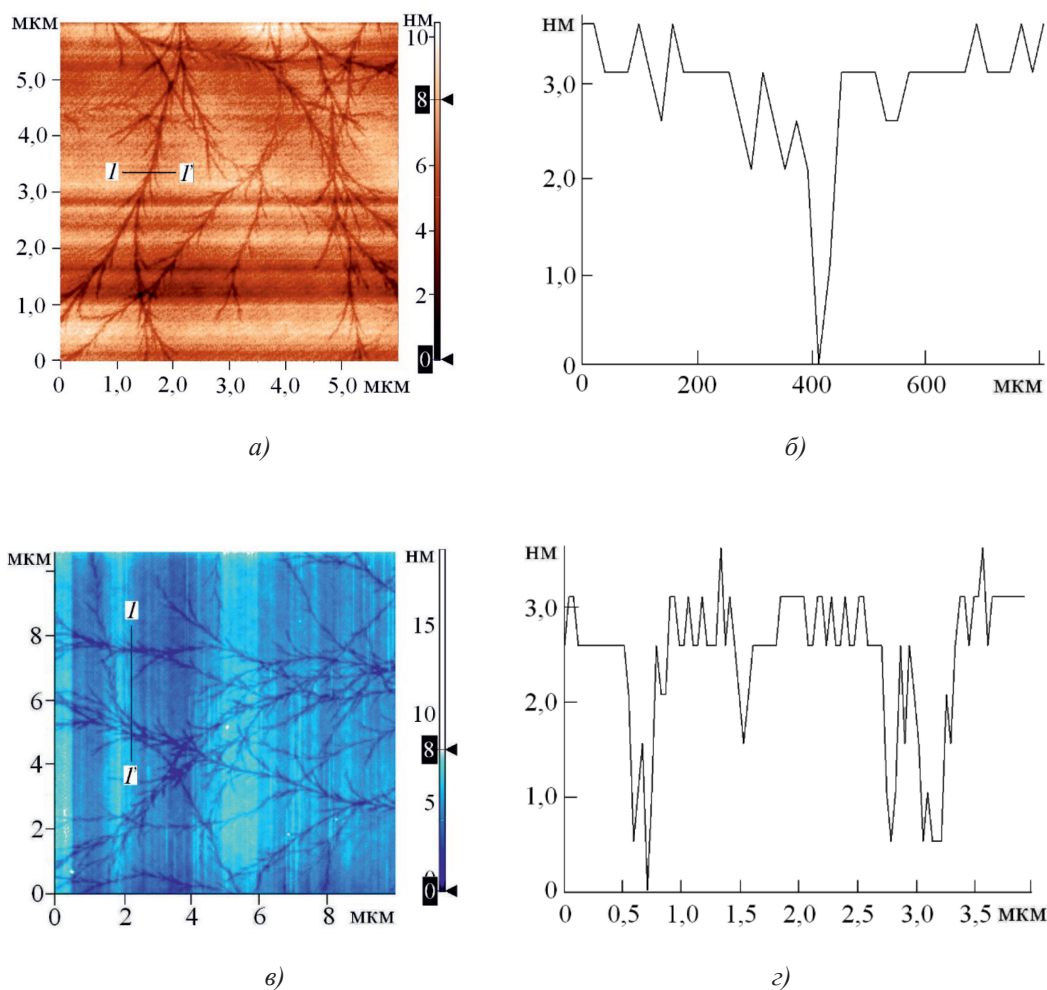


Рис. 5. АСМ-изображения облученного образца (а, б – $E_e = 20$ кэВ, в, г – $E_e = 40$ кэВ): а, в – 2D-изображение фрагментов образца 35×35 мкм; б, г – сечение кадра (а) вдоль линии 1 – 1'

Значения плотностей потоков электронов, при которых поверхностные разряды становятся доминирующими, а разряды первого типа не наблюдаются, при фиксированном значении давления, зависят от энергии электронов. Например, при облучении стекла К-208 электронами с $E_e = 20$ кэВ при давлении 10^{-4} Па значение плотности потока, при которой имели место только разряды второго типа (см. рис. 5, а), составило 1.2×10^{11} см $^{-2}$ с $^{-1}$. При этом глубина разрядных каналов составила 3 нм (см рис. 5, б).

С увеличением энергии электронов до 40 кэВ значение плотности потока, необходимой для реализации разрядов только второго типа (см. рис. 5, в, г), возросло до 1.4×10^{11} см $^{-2}$ с $^{-1}$. В этом случае глубина разрядных каналов не превышала 2,5 нм (см рис. 5, г).

Заключение

Параметры структурных изменений поверхностей образцов стекла К-208, об-

лученных электронами, изучали, наблюдая разряды типа «микровыступ на поверхности стекла – ионизованная остаточная атмосфера вакуумной камеры» и разряды, развивающиеся вдоль облучаемой поверхности с образованием разрядных каналов. Анализ рельефов поверхностей облученных образцов методами атомно-силовой микроскопии показал, что:

Высота микровыступов, образующихся при разрядах первого типа на образцах, облученных пучками электронов с плотностью потока до $\varphi = 3 \times 10^{10}$ см $^{-2}$ с $^{-1}$, флюенсами $\Phi_e \leq 10^{15}$ см $^{-2}$ с увеличением энергии частиц от 10 до 40 кэВ возрастает, соответственно от 10 до 450 нм.

Минимальные значения плотности потока электронов, необходимые для реализации разрядов только второго типа, при облучении частицами с энергиями от 20 до 40 кэВ составляют соответственно 1.2×10^{11} , 1.4×10^{11} см $^{-2}$ с $^{-1}$. При этом глу-

бина разрядных каналов не превышает 2,5 и 3 нм.

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. – Москва: Энергоиздат, 1982. – 182 с.
3. Бронштейн И.М., Фрайман Б.С. Вторичная электронная эмиссия. – М.: Наука, 1969. 407 с.
4. Модель космоса. Под ред. Новикова Л.С. Выпуск 8. Т. 2 // М.: Изд. МГУ, 2007.
5. 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.
6. Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С. Поверхностные электростатические разряды на стеклах CMG при электронном облучении // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2015, № 9, С. 34-39.
7. Chopra N., Singh N.P., Vaccaro S., Sharma. G. UV-vis spectroscopic investigation on γ -irradiated alkali aluminoborate glasses/ Phys. B : Physics of Condensed Matter 2012 . Vol. 407, Issue 8, p. 1209-1213 2012.
8. 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.
9. Khasanshin R.H., Novikov L.S. Structural changes of surfaces of spacecraft solar array protective glasses being irradiated by 20-keV electrons // Advances in Space Research, 57 (2016), pp. 2187-2195. doi:10.1016/j.asr.2016.02.023.
10. Zanderna A.W., Madey T.E., Powell C.J. // N.Y.: Kluwer Academic Publishers, 2004. 451 p.