

Изменения морфологии стекла К-208 при облучении электронами средних энергий

А. И. Устинов*

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Россия, 105005, Москва, Рубцовская набережная, д. 2

(Поступила в редакцию 16.08.2021; подписана в печать 12.09.2021)

Представлены результаты АСМ-исследований поверхностей образцов стекол К-208, облученных электронами с энергиями $20 \div 50$ кэВ при плотности потока частиц $\varphi_e = 3.0 \cdot 10^{10} \div 1.0 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Облучение образцов проводилось в вакуумной камере при давлении 10^{-4} Па. Показано, что изменения морфологии стекла К-208 при облучении электронами средних энергий происходят за счет электростатических разрядов, в результате которых образуются микровыступы и разрядные каналы, а так же за счет образования газонаполненных пузырьков.

PACS: 77.84.-s

УДК: 537.533.9; 537.53

Ключевые слова: стекло, электронное облучение, электростатические разряды, миграция ионов щелочных металлов, немостиновый кислород, газонаполненные пузырьки молекулярный кислород, электронное облучение, электростатические разряды, миграция ионов щелочных металлов, немостиновый кислород, газонаполненные пузырьки молекулярный кислород

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность изучения взаимодействия электронного излучения с диэлектрическими материалами обусловлена их широким применением в условиях повышенных радиационных нагрузок. Например, диэлектрические материалы, используемые на внешних поверхностях высокоорбитальных космических аппаратов, подвергаются воздействию больших потоков ионизирующих излучений [1], [2]. В частности, такое воздействие сопровождается большим числом процессов, приводящих к изменениям физико-химических свойств стекла используемого в бортовой аппаратуре. Так, оптические свойства защитных стекол солнечных батарей деградируют за счет: накопления в них радиационных центров окраски [3]; осаждения продуктов собственной внешней атмосферы спутника [4, 5], в том числе и вещества, выбрасываемого в окружающее пространство при разрядах; изменения стехиометрии облучаемого слоя стекла и т.д.

При взаимодействии с космической плазмой в диэлектриках аккумулируются заряды [2], обуславливающие появления поверхностных потенциалов и электрических полей и приводящие к электростатическим разрядам (ЭСР). Разряды с амплитудой тока до сотен ампер и наносекундными передними фронтами генерируют электромагнитные импульсы создающие помехи в работе бортовой аппаратуры и сопровождаются деструкцией материалов [6–8]. Не смотря на то, что исследования ЭСР при электронном облучении диэлектриков проводятся во многих лабораториях мира, к сожалению, до настоящего времени не сформулированы общепринятые механизмы развития разрядов и не созданы расчетные модели для их количественного описания, однозначно трактующие резуль-

таты наблюдаемые в экспериментах. В случаи стекла это объясняется как сложностью самого материала, так и тем, что облучению в стекле и на его поверхности происходят сложные взаимосвязанные процессы [9, 10]. Среди них необходимо выделить следующие процессы: накопление заряда, индуцирующего электрическое поле большой напряженности, ЭСР, вторичная электронная эмиссия (ВЭЭ) [11], релаксация зарядов, протекание токов, обусловленных радиационно-стимулированной проводимостью, и т.д.

В работе приводятся результаты анализа экспериментальных данных об изменениях морфологии стекла К-208 при облучении электронами средних энергий. Это стекло, используемое в качестве защитного покрытия солнечных батарей высокоорбитальных космических аппаратов, в процессе эксплуатации подвергается воздействию больших потоков ионизирующих излучений.

1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И МАТЕРИАЛЫ

Для исследования изменения морфологии поверхности стекла при электронном облучении были изготовлены квадратные образцы (40×40 мм) покровных стекол солнечных батарей толщиной 170 мкм.

Облучение образцов стекол электронами с энергиями $20 \div 50$ кэВ и плотностью потока $\varphi_e = 3.0 \cdot 10^{10} \div 1.0 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ проводилось в вакуумной камере (рис. 1) установки УВ-1/2 АО «Композит» при давлении 10^{-4} Па. Энергии частиц соответствуют характерным значениям энергии электронов горячей магнитосферной плазмы, а диапазон плотностей потоков частиц при облучении соответствует плотности потока электронов при ускоренных испытаниях диэлектрических материалов космического назначения. Излучение падало на образцы, прикрепленные к полированной металлической поверхности заземленного охлаждае-

* ustinov.artem@list.ru

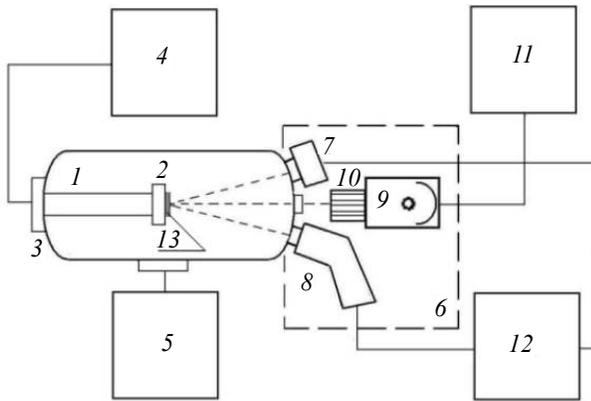


Рис. 1. Схема автоматизированного стенда УВ-1/2: 1 — вакуумная камера; 2 — измерительный столик; 3 — термостат; 4 — система вакуумной откачки и контроля вакуума; 5 — блок измерений; 6 — блок имитаторов космического пространства; 7 — электронный ускоритель; 8 — протонный ускоритель; 9 — имитатор концентрированного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

мого столика. Температура столика поддерживалась равной $20 \pm 1^\circ\text{C}$.

Стекло К-208 имеет следующий состав (мол. %): SiO_2 (69.49); B_2O_3 (11.93); Al_2O_3 (4.00); K_2O (4.25); Na_2O (010.33); CeO_2 (2.00, сверх 100%). Проводимость стекла обусловлена в основном присутствием ионов щелочных металлов. В стекле они находятся в дефектных положениях, что объясняет их способность к миграции. Подвижность иона определяется, в том числе, и его размером. И так как радиус ионов натрия Na^+ меньше, чем ионов калия K^+ , они являются более подвижными, поэтому и электропроводность стекол К-208 определяется, в основном, содержанием в них оксида натрия.

Поверхности образцов до и после облучения исследовались с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) Solver P47–Multi–Technique SPM в режиме полуконтактной атомно-силовой моды, которая при высокой точности измерений не разрушает поверхность.

Поверхности образцов стекла полученных вытягиванием через валки из разогретого стекла К-208 и последующей резки по соответствующим размерам имеют шероховатость порядка нескольких нм, что и подтверждается представленным на рис. 2 АСМ-изображение необлученного образца.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Электронное облучение стекла приводит к формированию в нем области с высокой плотностью заряда за счет аккумуляции термализованных электронов, захваченных соответствующими ловушками. При этом поле инжектированного заряда, напряженность которого изменяется во время облучения, влияет как на спектр, так и на пространственно-угловое распределение бомбардирующих электронов, следовательно, на их распределение после термализации в стекле.

С ростом накопленного заряда индуцированное им электрическое поле начинает тормозить первичные электроны и максимум их распределения в стекле сдвигается к облучаемой поверхности (рис. 3). При достижении напряженности поля критического значения в стеклах начинают развиваться ЭСР, приводящие к структурным изменениям.

Результаты экспериментов, проведенных в АО «Композит» совместно с НИИЯФ МГУ им. Д.В. Скобильцина с покровными стелами солнечных батарей К-208 и CMG [6, 7, 12, 13], показали, что основными каналами сброса накопленного заряда при облучении стекол электронами с энергиями от 10 до 50 кэВ и с $\varphi \geq 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ при давлении остаточной атмосферы $p_v \leq 10^{-4} \text{ Па}$ являются ЭСР двух основных типов. Первый тип — это разряды с микровыступа на поверхности стекла в окружающую ионизованную атмо-

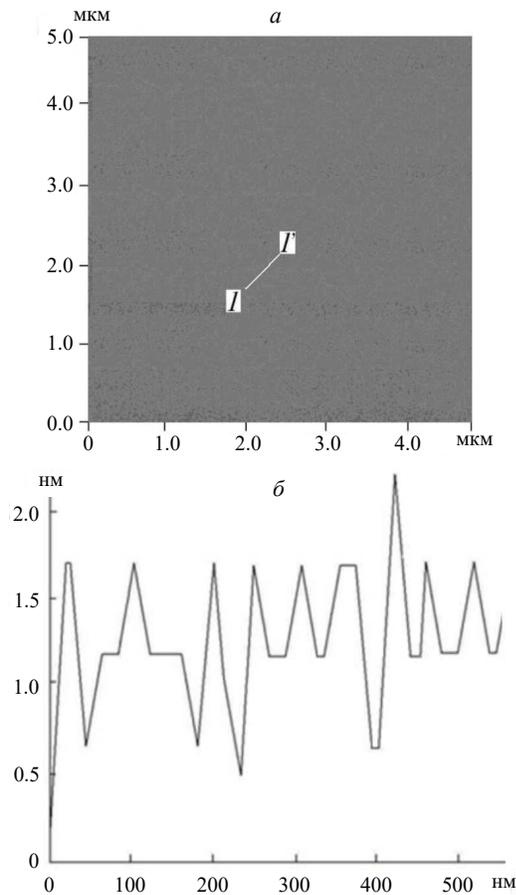


Рис. 2. АСМ-изображение образца К-208: — кадр $5,5 \times 5,5 \text{ мкм}$ (а) и его сечение вдоль линии I-I' (б)

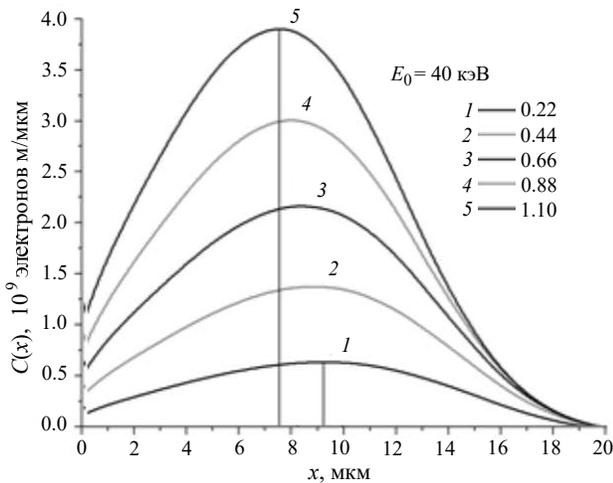


Рис. 3. Распределения концентрации термализованных в стекле электронов

сферу, второй — разряды, развивающиеся вдоль облучаемой поверхности стекла с образованием разрядных каналов. При этом оба разряда сопровождаются выбросом в окружающее пространство плазмы и генерацией электромагнитных импульсов.

Многочисленные эксперименты показали, что при малых интенсивностях облучения на поверхности стекла появляются микровыступы представляющие собой газонаполненные пузырьки. Так на рис. 4 представлено АСМ-изображение фрагмента поверхности образца К-208 облученного при плотности потока $2 \times 10^9 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ флюенсом $1,7 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Из этого рисунка видно, что на облученной поверхности стекла имеются микровыступы высотой до 10 нм и с диаметром основания до 180 нм.

Образование пузырьков кислорода в стекле К-208 исследовано, например, в работе [14]. В этой работе показано, что в поле инжектированного в стекло заряда в нем происходит перераспределение ионов натрия. Это в свою очередь, приводит к освобождению неомстиковых атомов кислорода, а в результате их скопления в окрестностях дефектов структуры стекла образуются пузырьки молекулярного кислорода.

С увеличением плотности потока воздействующих на стекло электронов до значения $2 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ на стекле облученном флюенсом $1,7 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ появляются микровыступы высотой до 20 нм, через которые реализуются разряды первого типа. На вершущках таких микровыступов остаются следы разрядов — застывшие плазмиды (рис. 5), являющиеся продуктами завершающей фазы разряда.

Таким образом, при облучении образцов стекла К-208 визуально наблюдаемые в экспериментах многократно повторяющиеся разряды через отдельные микровыступы сопровождались выбросом плазмы в окружающее пространство и увеличением их размеров.

Результаты экспериментов так же показали, что

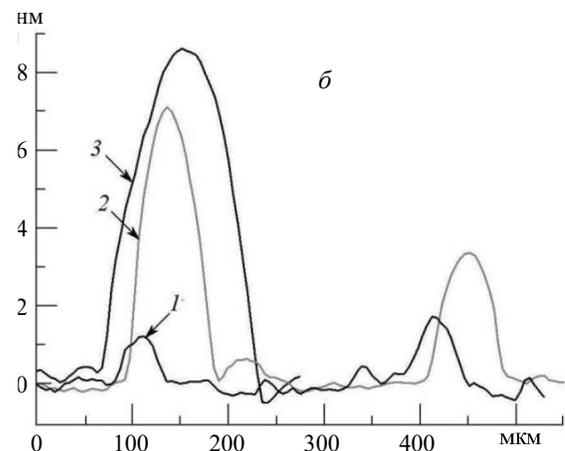
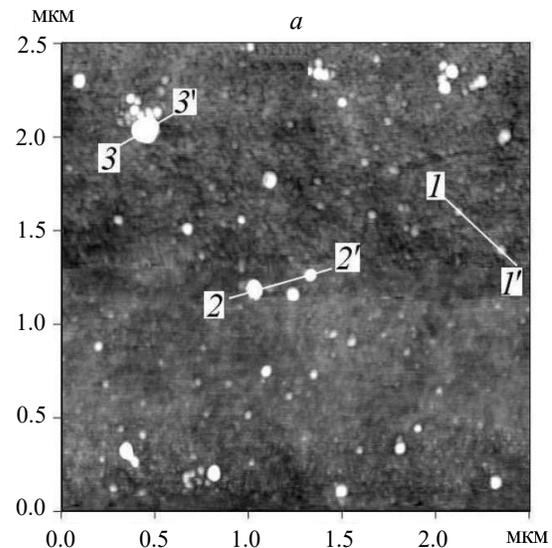


Рис. 4. АСМ-изображение облученного образца К-208 — 2D-изображение кадра 2.5×2.5 мкм (а) и его сечения (б) вдоль линий 1-1' (линия 1), 2-2' (линия 2) и 3-3' (линия 3) соответственно

с увеличением энергии первичных электронов при одинаковом значении флюенса облучения высота микровыступов возрастает, однако их среднее число на единице поверхности снижается.

Анализ экспериментальных результатов, подтверждает предположение [6] о том, что при разряде происходит сброс избыточного заряда с некоторой области стекла в окрестности микровыступа. При этом разряд, охватывающий в стекле некоторую область глубиной равной пробегу в стекле первичных электронов и сопровождался скачкообразным уменьшением напряженности поля и потенциала поверхности над этой областью. После разряда более быстрая составляющая плазмы — электроны разлетаются по объему и достигают стенок вакуумной камеры, а некоторая часть ионов и положительно заряженных плазмонов притягиваются полем и осаждаются на участках поверхности стекла, неохваченных

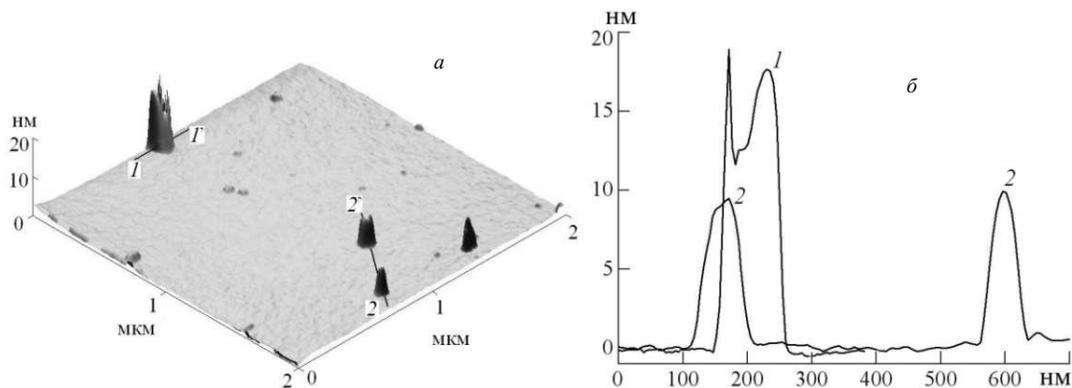


Рис. 5. АСМ-изображение облученного образца К-208 — 3D-изображение фрагмента 2.5×2.5 мкм (а) и его сечения (б) вдоль линий 1-1' (линия 1) и 2-2' (линия 2) соответственно

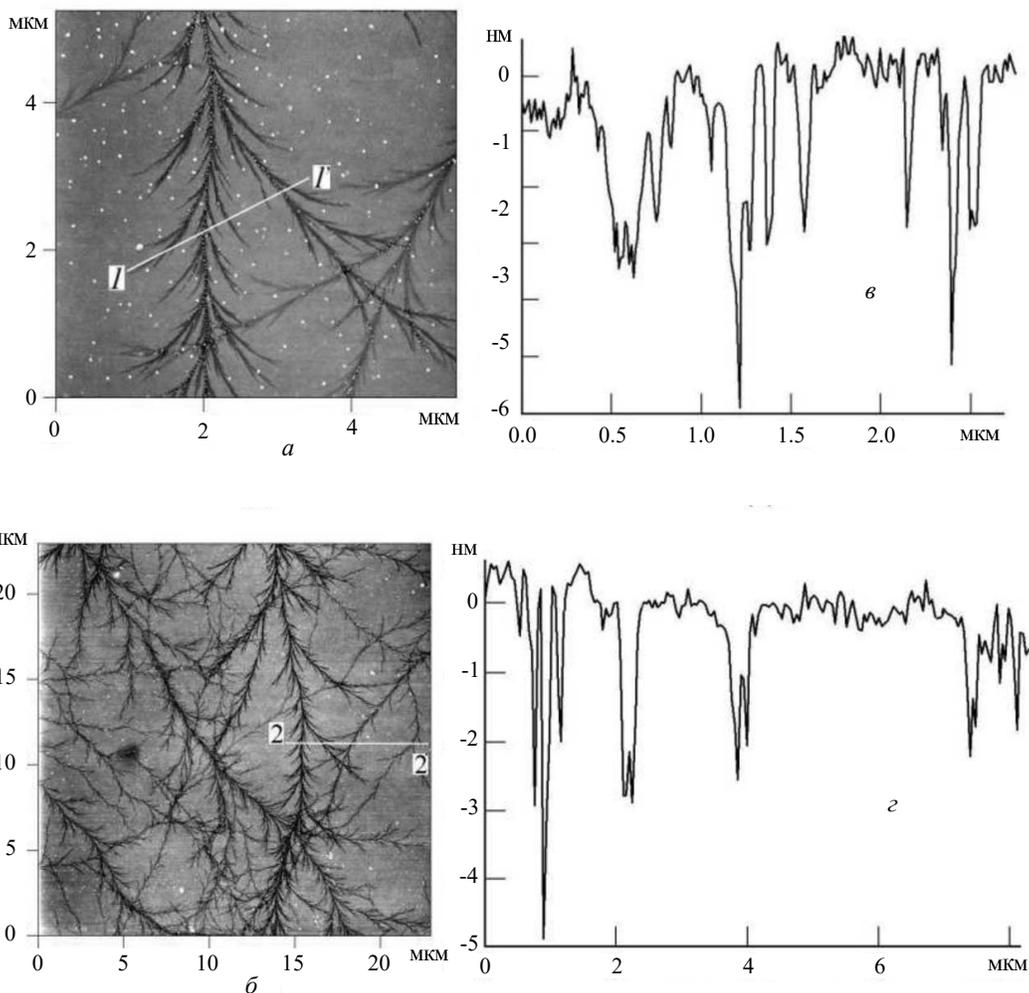


Рис. 6. АСМ-изображения облученного образца К-208 — 2D-изображение кадров 5×5 мкм (а) 20×20 мкм (б) и их сечения вдоль линий 1-1' (в) и 2-2' (г) соответственно

разрядом. При этом на поверхности стекла образуются центры роста микровыступов, через которые

в дальнейшем могут происходить разряды.

С увеличением давления остаточной атмосферы (при $p_v \geq 3 \times 10^{-4}$ Па) в вакуумной камере характерные следы электростатического разряда первого типа, появляющиеся на поверхности облученного стекла К-208 изменяются. А именно, они приобретают формы «цветков» [15]. В центре каждого «цветка» находится микровыступ, к которому сходятся «лепестки», представляющие собой следы разрядных процессов в приповерхностном слое стекла и возвышающиеся над ним на 1–2 нм, при этом их ширина достигает 1 мкм [15].

В наших экспериментах, в случае частиц с энергиями $10 \div 40$ кэВ, при значениях $\varphi_e \geq 7,2 \div 7,8 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ начинают происходить разряды второго типа, которые при значениях $\varphi_e \geq 1,2 \times 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ становятся преобладающими и разряды первого типа не наблюдаются.

В качестве примера на рис. 6 представлены АСМ-изображения образца облученного $\varphi_e \geq 1,2 \times 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ флюенсом $2,4 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Из этого рисунка видно, что разряды, развивающиеся вдоль облучаемой поверхности стекла оставляют на его поверхности разрядные каналы глубиной до 6 нм и шириной до 500 нм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнительный анализ результатов АСМ-исследований поверхностей образцов стекол К-208, облученных электронами, показал следующее:

1. При электронном облучении образцов стекол наблюдались разряды двух основных типов: первый — разряд микровыступ на поверхности стекла — ионизованная остаточная атмосфера вакуумной камеры; второй тип — разряд, развивающийся вдоль облучаемой поверхности. Оба разряда сопровождаются выбросом в окружающее пространство плазмы и приводят к структурным изменениям поверхности образцов.
2. При облучении образцов электронами с $E_e = 20 \div 40$ кэВ разряды второго типа начинали проявляться при $\varphi_e \approx 7,2 \times 10^{10} \div 7,8 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Следовательно, пороговое значение φ_e для развития разряда этого типа возрастает вместе с энергией электронов.
3. Таким образом, изменения морфологии стекла К-208 при облучении электронами средних энергий происходят за счет электростатических разрядов и образования газонаполненных пузырьков.

-
- [1] Модель космоса. Научно-информационное издание. Под ред. Л. С. Новикова. М.: КДУ, 2007.
- [2] *Ferguson D.C., Wimberly S.C.* The Best GEO Daytime Spacecraft Charging Index. Proceed. 50th AIAA Aerospace Sci. Mtg. 2013.
- [3] *Fujii H.* et al. // Research Activity in Mitsubishi Electric Spacecraft Charging. Spacecraft and Rockets. 1988. **25**, N 2. P. 156.
- [4] *Blue M.D., Roberts D.W.* // *Applied Optics*. 1992. **31**, N 25. P. 5299.
- [5] *Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С.* // Перспективные материалы. 2014. № 8. С. 13.
- [6] *Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С., Коровин С.Б.* // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2015. № 1. С. 88.
- [7] *Frederickson A.R., Levy L., Enloe C.L.* // IEEE Trans. Electr. Insulation. 1992. **27**, № 6. P. 1166.
- [8] *Khasanshin R.H., Novikov L.S.* // *Advances in Space Research*. 2016. **57**. P. 2187.
- [9] *Henson T.D., Torrington G.K.* // *International Symposium on Optical Science and Technology: proceedings*. San Diego, United States. 2001. P. 54.
- [10] *Bochkareva E.* et al. // *Plasmonics*. 2016. **11**, № 1. P. 241.
- [11] *Бронштейн И.М., Фрайман Б.С.* Вторичная электронная эмиссия. М.: Наука, 1969. С. 407.
- [12] *Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С., Гаценко Л.С., Волкова Я.Б.* Электроразрядные процессы при облучении стекол К-208 и СМГ электронами с энергией в диапазоне от 10 до 40 кэВ. // Перспективные материалы. 2015. № 1. С. 22.
- [13] *Евстафьева Е.Н., Рау Э.И., Сенов Р.А.* // Известия РАН. Сер.: Физическая. 2008. **72**, № 11. С. 1577.
- [14] *Хасаншина Р.Х., Новикова Л.С.* // Перспективные материалы 2020. № 11. С. 5.
- [15] *Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С., Коровин С.Б.* // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2016. № 10. С. 14.

Change in glass K-208 morphology upon irradiation with medium-energy electrons

A.I. Ustinov

*Bauman Moscow State Technical University, Moscow 105005, Russia
E-mail: ustinov.artem@list.ru*

The results of AFM-researches of the glass K-208 samples are presented surfaces irradiated with electrons with energies of $20 \div 50$ keV at a particle flux density $\varphi_e = 3.0 \cdot 10^{10} \div 1.0 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. The samples were irradiated in a vacuum chamber at pressure of 10^{-4} Pa. Shown that changes in morphology of glass K-208 upon irradiation with medium-energy electrons occur due to electrostatic discharges, which resulted in forming microprotrusions and discharge channels, as well as due to forming of gas-filled bubbles.

PACS: 77.84.-s

Keywords: glass, electron irradiation, electrostatic discharges, migration of the first alkali metals, non-bridging oxygen, molecular oxygen gas-filled bubbles.

Received 16 August 2021.

Сведения об авторах

1. Устинов Артем Игоревич — студент; e-mail: ustinov.artem@list.ru
