ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2022, том 86, № 5, с. 633–638

УДК 537.5:537.9

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБЛУЧЕНИЯ ПЛАСТИН СТЕКЛА К-208 ПРОТОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 30 кэВ

© 2022 г. Р. Х. Хасаншин[1, 2, *], Д. А. Применко[2]

[1] Акционерное общество "Композит", Королев, Россия

[2] Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана", Москва, Россия

*E-mail: rhkhas@mail.ru

Поступила в редакцию 13.12.2021 г.
После доработки 24.12.2021 г.
Принята к публикации 21.01.2022 г.

Модификация морфологии поверхности стекла К-208, под действием протонов с энергией 30 кэВ, исследована методами атомно-силовой микроскопии. Показано, что в зависимости от плотности потока и флюенса протонов изменение структуры облученной поверхности определятся преимущественно либо образованием пузырьков H_2, либо формированием микротрещин и выходом на поверхность стекла перколяционных каналов натрия.

DOI: 10.31857/S036767652205009X

ВВЕДЕНИЕ

Значительный научный и практический интерес представляют изменения свойств диэлектрических материалов, используемых в условиях повышенных радиационных нагрузок, обусловленных воздействием потоков заряженных частиц. Например, стекла, используемые на высокоорбитальных спутниках, подвергаются воздействию неэкранированных потоков ионизирующих излучений космического пространства – частиц радиационных поясов Земли и магнитосферной плазмы [1–3]. Такое воздействие сопровождается деградацией оптических свойств стекла за счет генерации в нем радиационных центров окраски [4–6], аккумулированием заряда и рядом сложных часто взаимосвязанных процессов, приводящих к изменениям стехиометрии, плотности и структуры поверхности стекла [7–14], к формированию в нем газонаполненных пузырьков [15, 16] и т.д.

Накопление инжектированных в диэлектрике зарядов приводит к электростатическим разрядам (ЭСР) [2, 17–19], которые являются основными источниками аномалий в функционировании спутников. Среди негативных проявлений разрядов, обусловленных радиационной электризацией спутника, следует отметить разрушение диэлектрика, выброс в окружающее пространство вещества, уносящего часть накопленного в диэлектрике заряда и загрязняющего окрестные оптические поверхности спутника, а также генерацию электромагнитных импульсов, создающих помехи в работе бортовой аппаратуры.

Формирование в боросиликатных стеклах пузырьков молекулярного кислорода, установленное при облучении электронами [15, 16] и ионами He [20], Ar [21], Kr [22] и Xe [23], объясняется миграцией ионов, содержащихся в стекле щелочных металлов (Li^+, Na^+ и K^+), в поле инжектированного заряда. При этом их полевая миграция сопровождается перестройкой микроструктуры стекла и высвобождением атомов немостикового кислорода, которые в дальнейшем скапливаются в окрестности дефектов и образуют пузырьки O_2.

Образование пузырьков H_2 (блистеринг) в приповерхностном слое облученных протонами металлов установлено и исследуется десятки лет. Термализованные протоны рекомбинируют с электронами металла, образуя атомы водорода, которые скапливаются в окрестностях дефектов структуры, формируя пузырьки H_2. В случае протонного облучения стекла интерпретация образования газонаполненных пузырьков в приповерхностном слое, наблюдаемого в экспериментах, не столь однозначна.

На современных спутниках часто используются изделия с недостаточной радиационной стойкостью. К ним относятся, например, изделия, изготовленные на основе полупроводниковых материалов. Для сохранения работоспособности в течение заданного срока их размещают за дополнительной защитой от космической радиации. Так, для защиты от протонного излучения фотоэлементов солнечных батарей спутников используются покровные стекла. В период геомагнит-

ных бурь такие покровные стекла подвергаются интенсивной бомбардировке частицами горячей магнитосферной плазмы, состоящей в основном из электронов и протонов. Расчеты, проведенные с использованием пакета библиотек GEANT 4, показали, что пластина стекла К-208 толщиной 0.17 мм является надежным защитным экраном для фотоэлементов от протонов с энергией до 5 МэВ, т.е. основной части протонного излучения, воздействующего на высокоорбитальные спутники.

Несмотря на то, что процессы, сопровождающие взаимодействие электронной компоненты плазмы со стеклами, достаточно широко исследуются в разных научных лабораториях более полувека, до настоящего времени не построена общепризнанная теория, однозначно описывающая экспериментальные результаты. Это связано, в том числе, со сложностью самого объекта исследования. Менее подробно изучены процессы, протекающие при воздействии на стекла протонов с энергиями, характерными для горячей магнитосферной плазмы.

Поэтому целью нашей работы является исследование процессов в приповерхностном слое модельного стекла при протонном облучении. Для ее достижения проводится анализ ранее и вновь полученных экспериментальных результатов по исследованию изменений морфологии облучаемой поверхности стекла К-208 под действием протонов с энергией 30 кэВ, которые используются при лабораторных испытаниях, имитирующих воздействии горячей магнитосферной плазмы на материалы.

Авторы полагают, что полученные результаты частично дополнят информацию, необходимую для понимания процессов, протекающих под действием горячей магнитосферной плазмы на стекла, и для прогнозирования возможных негативных явлений, связанных с их использованием на высокоорбитальных спутниках.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В экспериментах использовались образцы с размерами 40 × 40 × 0.17 мм из стекла К-208, имеющего состав (мол. %): SiO_2 (69.49); B_2O_3 (11.93); Na_2O (10.33); K_2O (6.25); CeO_2 (2.00). Пластины покровных стекол являются удобными модельными образцами для изучения влияния радиации на структуру поверхности стекла. Технология изготовления пластин состоит в том, что из расплава стекла К-208 вытягивают через валки ленту, нарезают по заданному размеру и отжигают. Это позволяет брать для экспериментов образцы одинакового химического состава, при этом шероховатость поверхности пластин составляет около 1 нм.

Для облучения образцы прикрепляли к полированной поверхности металлического термостатированного столика стенда УВ-1/2 [24] АО “Композит”. В работе [24] приводится описание стенда УВ-1/2, в протонном ускорителе которого предусмотрена сепарация ионного пучка по массам. Плотность потока протонов, падающих на поверхность столика, контролировалась с помощью 25 цилиндров Фарадея. Неравномерность облучения поверхности образа не превышала 2%.

Облучение проводилось при следующих условиях: давление в камере не более 10^{-4} Па; энергия протонов (E_p) 30 кэВ; плотность потока протонов (φ_p) составляла от $4.5 \cdot 10^{10}$ до $1.0 \cdot 10^{11}$ см$^{-2} \cdot$ с$^{-1}$; флюенс облучения (Φ_p) варьировался в диапазоне $5.0 \cdot 10^{14}$–$2.0 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$; температура столика 20 ± 1°С.

Поверхности образцов исследовались методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) с использованием полуконтактной атомно-силовой моды, которая при высокой точности измерений не разрушает поверхность.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При облучении стекла протонами с энергиями в несколько десятков кэВ в тонкий приповерхностный слой инжектируются энергия и заряд. Профили распределения по толщине облучаемого слоя стекла поглощенной энергии (рис. 1*а*) и концентрации $C_p(x)$ термализованных протонов с E_p = 30 кэВ (рис. 1*б*) представленные рис. 1 рассчитаны методом Монте-Карло с использованием пакета программ Geant4.

Аккумулированный заряд индуцирует электрическое поле, влияющее как на процессы, протекающие в стекле, так и на энергетически-угловое распределение бомбардирующих образец частиц. В частности, это поле стимулирует перераспределение входящих в состав стекла ионов щелочных металлов, полевая миграция которых приводит к перестройке микроструктуры стекла.

Далее кратко рассмотрены основные процессы, вызывающие изменения морфологии поверхности стекла К-208, наблюдаемые при протонном облучении.

Формирование газонаполненных пузырьков в приповерхностном слое стекла

Эксперименты показали, что при значениях $\varphi_p > 8 \cdot 10^{10}$ см$^{-2} \cdot$ с$^{-1}$ изменения морфологии облученной поверхности происходит преимущественно за счет образования пузырьков H_2. В результате рекомбинации части инжектированных в стекло протонов с электронами, появившимися в результате процесса ионизации, образуются атомы водорода. Их миграция и агломерация в окрестностях дефектов структуры стекла приводит к формированию пузырьков H_2, размеры которых увели-

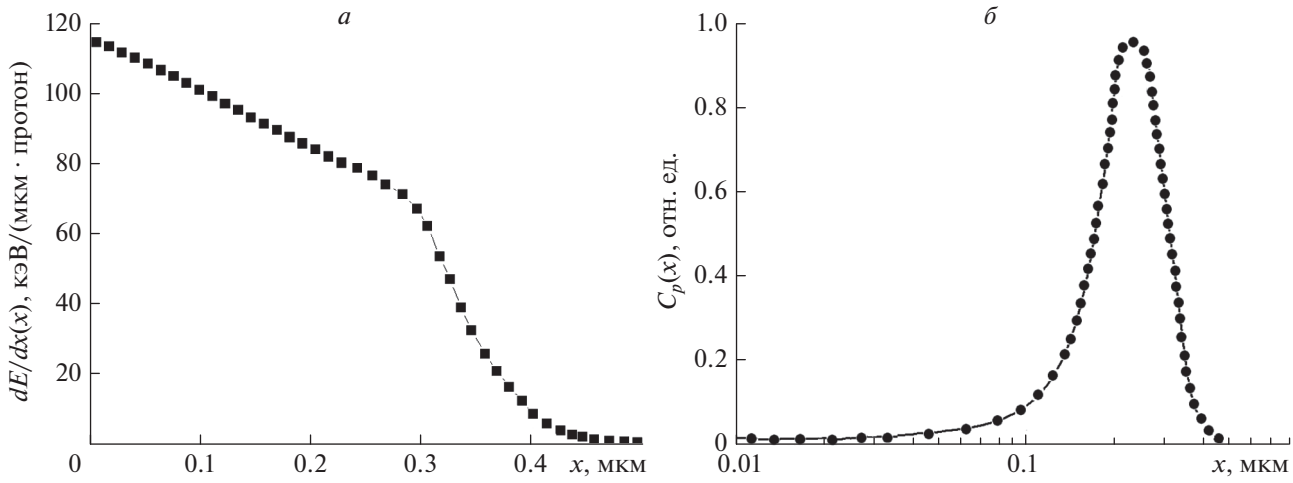

Рис. 1. Профили распределения в облучаемом слое стекла: выделенной энергии (*а*) и концентрации термализованных протонов (*б*).

чиваются вместе с флюенсом облучения. В качестве иллюстрации, на рис. 2*а* и 2*в* показаны АСМ-изображения фрагментов поверхностей образцов, облученных при $\varphi_p = 9 \cdot 10^{10}$ см$^{-2} \cdot$ с$^{-1}$ флюенсами $2.0 \cdot 10^{15}$ и $7.9 \cdot 10^{15}$ см$^{-2}$ соответственно. Следует отметить, что в этой серии экспериментов микровыступы высотой не более 6 нм, по форме напоминающие газонаполненные пузырьки, начали появляться при $\Phi_p = 8.0 \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$.

Атомы водорода намного меньше, чем атомы содержащихся в стекле веществ, однако их присутствие вносит дополнительное напряжение в его микроструктуру, а также влияет на электронную структуру ближних атомов. Это приводит к увеличению энергии структуры, которая может быть уменьшена, в том числе и в результате миграции и агрегации атомов водорода в кластеры в окрестности дефектов, что в дальнейшем приводит к образованию пузырьков H_2. Так как водород может агломерировать в H_2-кластеры только в окрестности дефектов, то число пузырьков в основном определяется количеством дефектов в стекле, концентрация которых особенно велика в приповерхностном слое. Рост пузырьков обеспечивается за счет диффузионной подпитки – образующийся в облучаемом слое стекла водород мигрирует к облучаемой поверхности. По мере роста пузырьков в приповерхностном слое увеличиваются механические напряжения, приводящие к деформациям поверхности.

Формирование микротрещин

При $\varphi_p = 4.5 \cdot 10^{10}$ см$^{-2} \cdot$ с$^{-1}$, начиная со значения $\Phi_p = 2.0 \cdot 10^{15}$ см$^{-2}$, облучение привело к формированию на образцах микротрещин, размеры которых увеличивались вместе с дозой облучения. Для демонстрации характерной формы микротрещины на рис. 3 представлено АСМ-изображение фрагмента образца, облученного флюенсом $4.6 \cdot 10^{15}$ см$^{-2}$. Формирование микротрещин обусловлено неравномерностью распределения инжектированных в стекло энергии (рис. 1*а*) и заряда (рис. 1*б*), а также уплотнением материала, связанным с перестройкой его структуры за счет перераспределения в нем ионов щелочных металлов, что приводит к появлению боковых растягивающих напряжений [11]. При этом газонаполненные пузырьки создают в стекле дополнительное давление, нормально направленное к облучаемой поверхности, что в совокупности с указанными напряжениями может привести к образованию микротрещин (рис. 3*а*) и переносу материала к области их формирования.

Выход перколяционных каналов натрия на облучаемую поверхность

Миграция ионов щелочных металлов к облучаемой поверхности стимулируется полем накопленного в стекле заряда и “радиационной тряской”. Последнее связано с тем, что воздействие протонов приводит к появлению в облучаемом слое состояний микроскопической неравновесности. Они связанны с отклонением функции распределения атомов по энергии колебаний от термодинамически равновесной. В этих условиях частота переходов ионов щелочных металлов из положений равновесия увеличивается, что облегчает их полевую миграцию и образование перколяционных каналов.

С ростом флюенса облучения при $\varphi_p = 4.5 \cdot 10^{10}$ см$^{-2} \cdot$ с$^{-1}$ на поверхность образцов в месте выхода перколяционных каналов образуются микровыступы. На рис. 4*а* и 4*б* показано, что по-

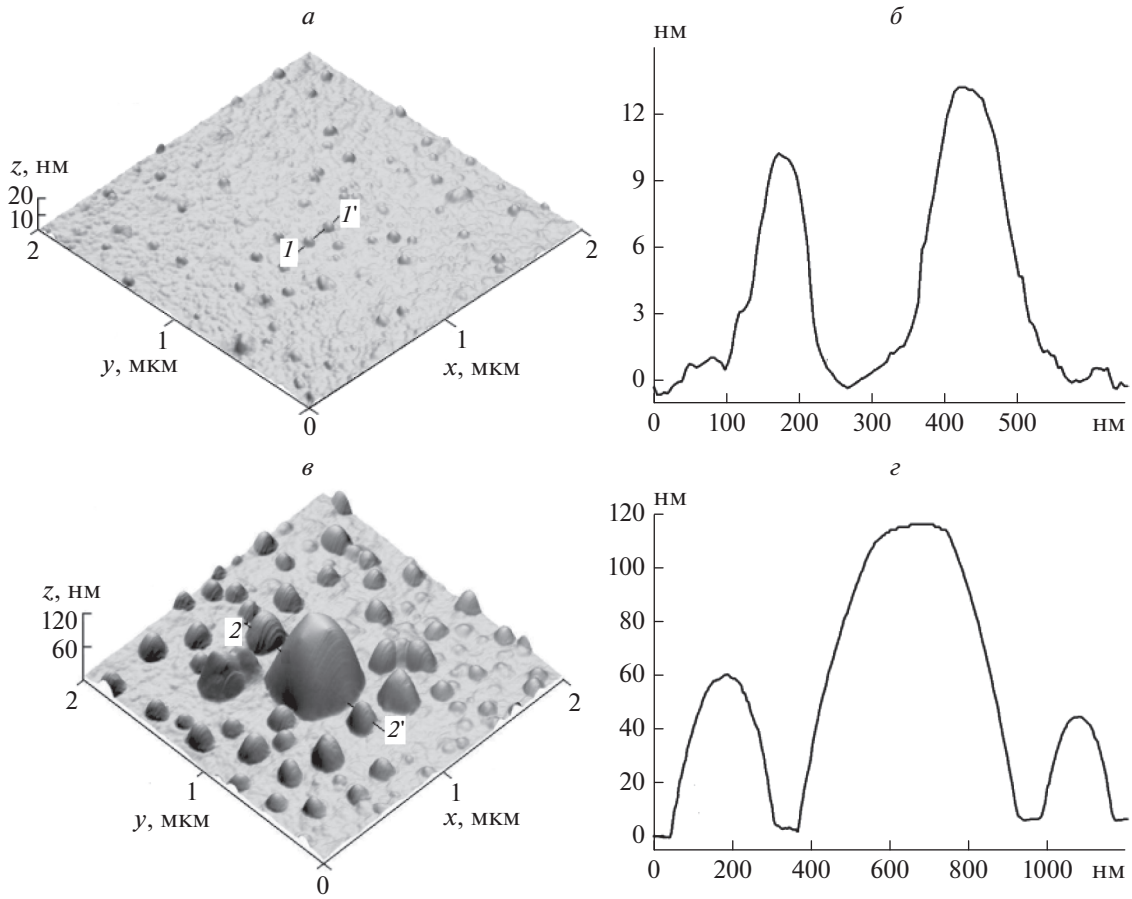

Рис. 2. АСМ-изображения фрагментов поверхностей облученных образцов: 3D-кадры 2 × 2 мкм (*а*, *в*); сечения кадров *а* и *в* вдоль линий *1–1'* и *2–2'* соответственно (*б*, *г*).

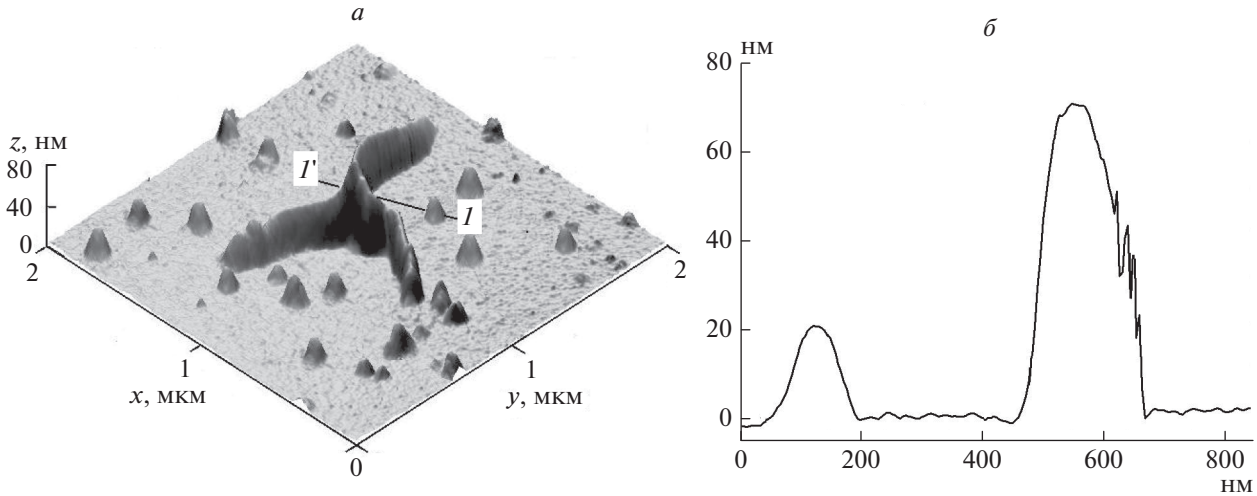

Рис. 3. АСМ-изображение фрагмента поверхности облученного образца: 3D-кадр 2 × 2 мкм (*а*); сечение кадра *а* вдоль линии *1–1'* ($\Phi_р = 4.6 \cdot 10^{15}$ см$^{-2}$) (*б*).

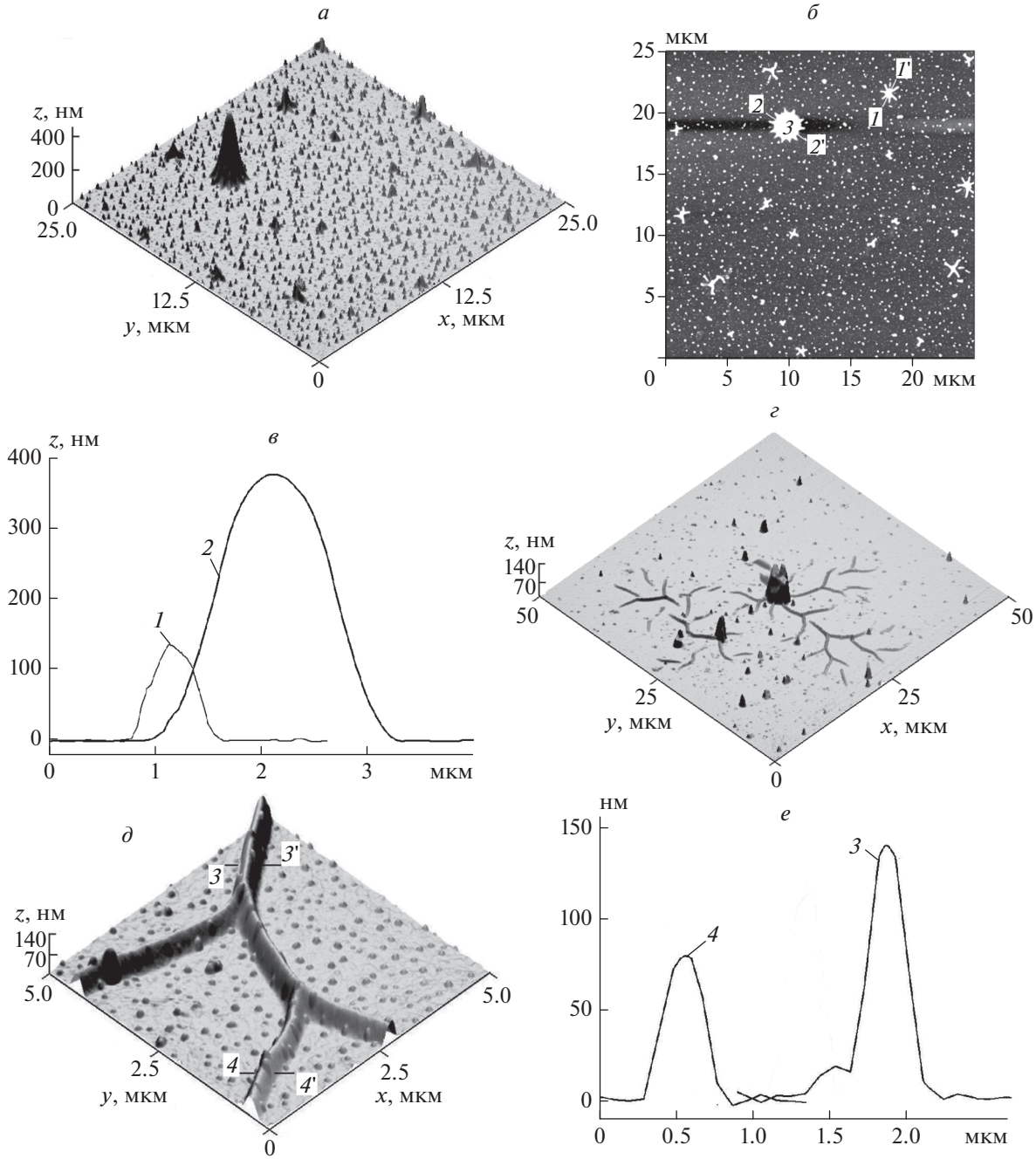

Рис. 4. АСМ-изображения фрагментов поверхностей облученных образцов: *а* и *б* – 3D и 2D-кадры 25 × 25 мкм (*а*, *б*), сечения кадра *б* вдоль линий *1–1'* (1) и *2–2'* (2) соответственно ($\Phi_p = 6.7 \cdot 10^{15}$ см$^{-2}$) (*в*); 3D-кадры 25 × 25 и 5 × 5 мкм ($\Phi_p = 1.6 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$) (*г*, *д*); сечения кадра *д* вдоль линий *3–3'* (3) и *4–4'* (4) соответственно (*е*).

мимо микротрещин при облучении в местах выхода на поверхность перколяционных каналов натрия (на рис. 4*б* одно из мест выхода канала помечено “3”) имеются микровыступы. АСМ-исследования показали, что при $\Phi_p > 1.5 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$ место выхода такого каналов на поверхность может стать центром разрастания трещин (рис. 4*г*, 4*д* и 4*е*). При этом размеры трещин достигают десятков мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен анализ результатов АСМ-исследования поверхности пластин стекла облученных протонами с энергией 30 кэВ при варьировании

плотности потока и флюенса частиц соответственно в диапазонах $2.0 \cdot 10^{10}$–$1.0 \cdot 10^{11}$ см$^{-2} \cdot$ с$^{-1}$ и $1.0 \cdot 10^{14}$–$3.0 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$.

При $\varphi_p > 9 \cdot 10^{10}$ см$^{-2} \cdot$ с$^{-1}$ и $\Phi_p > 8 \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$ в изменение морфологии поверхности основной вклад вносит формирование пузырьков H_2, размеры которых возрастают вместе с флюенсом облучения.

При $\varphi_p = 4.5 \cdot 10^{10}$ см$^{-2} \cdot$ с$^{-1}$, начиная со значения $\Phi_p = 2.0 \cdot 10^{15}$ см$^{-2}$, облучение привело к формированию на образцах микротрещин, которые преимущественно и определяют масштабы структурных изменений поверхности стекла. Микротрещины разрастаются с увеличением дозы облучения.

На образцах, облученных при $\varphi_p = 4.5 \cdot 10^{10}$ см$^{-2} \cdot$ с$^{-1}$ и $\Phi_p > 6.5 \cdot 10^{15}$ см$^{-2}$, в местах выхода перколяционных каналов натрия образуются микровыступы высотой в сотни нм, а при $\Phi_p > 1.5 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$ место выхода такого канала на поверхность может стать центром разрастания трещины с линейными размерами в несколько десятков мкм.

Для однозначной привязка найденных типов морфологических элементов к известным процессам требуются дополнительные исследований элементного состава и структуры этих элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Messenger S.R., Wong F., Hoang B. et al.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2014. V. 61. P. 3348.
2. *Ferguson D.C., Wimberly S.C.* // Proc. 50th AIAA Aerospace Sci. Meeting. (Nashville, 2013). Art. No. AIAA 2013-0810.
3. *Toyoda K., Okumura T., Hosoda S., Cho M.* // J. Spac. Rockets. 2005. V. 42. P. 947.
4. *Сергеев П.М., Зворыкин В.Д., Сергеев А.П. и др.* // Опт. журн. 2004. Т. 71. № 6. С. 93; *Sergeev P.B., Zvorykin V.D., Sergeev A.P. et al.* // J. Opt. Technol. 2004. V. 71. No. 6. P. 415.
5. *Арбузов В.И., Сучков Ф.В.* // Опт. журн. 2001. Т. 68. № 6. С. 85; *Arbuzov V.I., Suchkov F.V.* // J. Opt. Technol. 2001. V. 68. No. 6. P. 447.
6. *Гусев А.П., Забелин И.А.* // Опт. журн. 2001. Т. 68. № 6. С. 79; *Gusev A.P., Zabelin I.A.* // J. Opt. Technol. 2001. V. 68. No. 6. P. 442.
7. *Wang Q., Geng H., Sun Ch. et al.* // J. Appl. Phys. 2016. V. 119. Art. No. 023103.
8. *Jurek K., Gedeon O., Hulinsky V.* // Mikrochim. Acta. 1998. V. 15. P. 269.
9. *Gedeon O., Hulinsky V., Jurek K.* // Mikrochim. Acta. 2000. V. 132. P. 505.
10. *Khasanshin R.H., Novikov L.S.* // Adv. Space Res. 2016. V. 57. P. 2187.
11. *Ковивчак В.С., Панова Т.В.* // Поверхн. Рентген., синхротрон., нейтрон. исслед. 2017. № 8. С. 59; *Kovivchak V.S., Panova T.V.* // J. Surf. Invest. X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2017. V. 11. No. 4. P. 840.
12. *Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С.* // Поверхн. Рентген., синхротрон., нейтрон. исслед. 2018. № 11 С. 48; *Khasanshin R.H., Novikov L.S.* // J. Surf. Invest. X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2018. V. 12. No. 6. P. 1088.
13. *Gavenda T., Gedeon O., Jurek K.* // Nucl. Instrum. Meth. 2014. V. 322. P. 7.
14. *Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С., Коровин С.Б.* // Поверхн. Рентген., синхротрон., нейтрон. исслед. 2017. № 9. С. 28; *Khasanshin R.H., Novikov L.S. Korovin S.B.* // J. Surf. Invest. X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2017. V. 11. No. 5. P. 917.
15. *Ollier N., Rizza G., Boizot B., Petite G.* // J. Appl. Phys. 2006. V. 99. No. 7. Art. No. 073511.
16. *Boizot B., Petite G., Ghaleb D. et al.* // J. Non-Cryst. Solids. 1999. V. 243. P. 268.
17. *Hirokazu Masui, Kazuhiro Toyoda, Mengu Cho* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2008. V. 36. P. 2387.
18. *Cho M., Kawakita S., Nakamura M. et al.* // J. Space. Rockets. 2005. V. 42. No. 4. P. 740.
19. *Ferguson D.C., Katz I.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2015. V. 43. No. 9. P. 3021.
20. *Abbas A., Serruys Y., Ghaleb D. et al.* // Nucl. Instrum. Meth. B. 2000. V. 166–167. P. 445.
21. *Zhang G.F., Wang T.S., Yang K.J. et al.* // Nucl. Instrum. Meth. B. 2013. V. 316. P. 218.
22. *Chen L., Zhang D.F., Lv P. et al.* // J. Non-Cryst. Solids. 2016. V. 448. P. 6.
23. *Chen L., Wang T.S., Yang K.J. et al.* // Nucl. Instr. Meth. B. 2013. V. 307. P. 566.
24. *Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С.* // Поверхн. Рентген., синхротрон., нейтрон. исслед. 2014. № 7 С. 83; *Khasanshin R.H., Novikov L.S.* // J. Surf. Invest. X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2014. V. 8. No. 4. P. 698.

Analysis of the results of irradiation of K-208 glass plates with 30 keV protons

R. H. Khasanshin[a, b, *], D. A. Primenko[b]

[a] *JSC "Kompozit", Korolev, 141070 Russia*

[b] *Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005 Russia*

**e-mail: rhkhas@mail.ru*

The modification of the surface morphology of K-208 glass under the action of 30 keV protons was studied by atomic force microscopy. It is shown that, depending on the flux density and proton fluence, the change in the structure of the irradiated surface is determined mainly by either the formation of H_2 bubbles or the formation of microcracks and the emergence of sodium percolation channels on the glass surface.