

Изменения структуры поверхности стекла К–208 при облучении протонами средних энергий

И. П. Малашин*

*Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,
факультет фундаментальных наук, кафедра физики
Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
(Поступила в редакцию 06.06.2022; подписана в печать 09.06.2022)*

Методами атомно–силовой микроскопии исследовано влияние протонного облучения на процесс изменения структуры поверхности стекла К–208, обусловленный образованием микротрещин и газонаполненных пузырьков. В качестве экспериментальных образцов выбраны пластины из стекла К–208, которые используются для защиты фотоэлементов солнечных батарей космических аппаратов. В результате анализа экспериментальных данных, полученных методами атомно–силовой микроскопии, установлено, что на поверхности стекла К–208, облученного в вакууме (10^{-4} Па) протонами с энергией 20 и 30 кэВ при плотности потока $\varphi_p = 6.0 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ и флюенсе $\Phi_p = (10^{15} - 6.6 \times 10^{16}) \text{ см}^{-2}$ образуются газонаполненные пузырьки и микротрещины, характерные размеры которых растут с увеличением флюенса. Показано, что для тех же значений φ_p и Φ_p облучение стекла К–208 протонами с энергией 20 кэВ не приводит к образованию микротрещин.

PACS: 77.84 -s

УДК: 538.93; 53.05

Ключевые слова: протонное облучение, стекло К–208, уплотнение стекла, атомно–силовая микроскопия, газонаполненные пузырьки, микротрещина, структура поверхности, полевая миграция ионов.

ВВЕДЕНИЕ

Боросиликатные стекла находят широкое применение в различных областях техники. Часто изделия из таких стекол применяются в условиях, в которых на них воздействуют потоки заряженных частиц, например, в условиях космоса [1, 2]. Исследование радиационно–стимулированных процессов в стеклах представляет значительный интерес как с научной точки зрения, так и в связи с большим количеством прикладных задач требующих своего разрешения. В частности, взаимодействие горячей магнитосферной плазмы с диэлектрическими материалами внешних покрытий космических аппаратов сопровождается рядом сложных. Часто эти процессы являются взаимосвязанными и могут привести к изменению стехиометрии и разрушению микроструктуры разрушенным материалам [3–8]. Особенно значительным структурным изменениям подвергаются их приповерхностные слои, в которых образуются газонаполненные пузырьки и трещины [7–9]. Действие радиации приводит так же к деградации оптических свойств материалов [10–13]. К таким процессам относятся аккумуляция инжектированных в диэлектрик зарядов, обуславливающих электрические поля, которые приводят к возникновению электростатических разрядов (ЭСР) [14–19], являющихся источниками большой доли спутниковых аномалий [6]. Помимо этого, в случае стекла в полях, индуцированных накопленным зарядом, происходит миграция ионов щелочных металлов (Li, Na, K), которые добавляются

в стекло для придания ему необходимых свойств. Перераспределение таких ионов приводит к изменениям стехиометрии и структуры поверхности материала.

Поэтому исследования эволюции микроструктуры стекла при облучении являются особенно актуальными для прогнозирования изменения его характеристик после радиационных нагрузок, например, при эксплуатации стекла на поверхностях высокоорбитальных спутников, в термоядерных установках, ускорительной технике и т.д.

Стекла, используемые на внешних поверхностях высокоорбитальных спутников, взаимодействуют с окружающей космической плазмой, основными компонентами которой являются электроны и протоны [1, 2]. Если структурные изменения поверхности стекол в результате ЭСР и образования газонаполненных пузырьков под действием электронов широко исследовано [4, 5, 7, 9], то информация о результатах влияния протонного облучения на изменения морфологии облучаемой поверхности весьма ограничена.

1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве модельных образцов стекла в экспериментах использовались защитные покрытия солнечных батарей космических аппаратов на основе стекла К–208 имеющего следующий состав (мол. %): SiO_2 (69.49); CeO_2 (2.0); V_2O_5 (11.93); K_2O (6.25); Na_2O (10.33). Целью работы является исследование изменений морфологии стекла К–208 за счет формирования в приповерхностном слое газонаполненных пузырьков, содержащих молекулярный водород. Эти пузырьки образуются за счет выхода на облучаемую поверхность перколяционных каналов при облучении протонами

* ivan.p.malashin@gmail.com

с энергиями, характерными для горячей магнитосферной плазмы.

Модельные образцы представляли собой стеклянные пластины, изготовленные вытягиванием через валки из расплава стекла К-208 с последующим отжигом и резкой на размеры $40 \times 40 \times 0.17$.

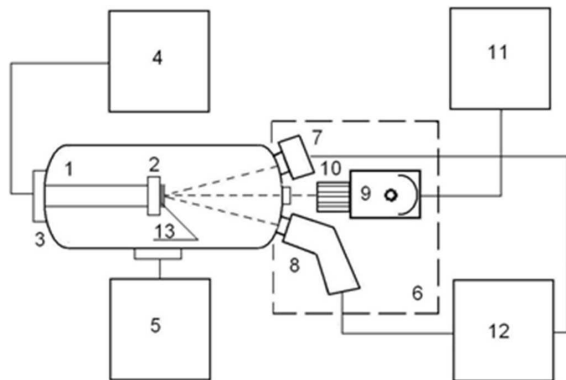


Рис. 1. Схема стенда «УВ-1/2»: 1 — вакуумная камера; 2 — измерительный столик; 3 — термостат; 4 — система вакуумной откачки и контроля вакуума; 5 — блок измерений; 6 — блок имитаторов космического пространства; 7 — электронный ускоритель; 8 — протонный ускоритель; 9 — имитатор концентрированного солнечного излучения; 10 — формирующее оптическое устройство; 11 — блок управления имитатором солнечного излучения; 12 — блок управления ускорителями; 13 — образец К-208

Образцы прикрепляли к полированной поверхности металлического термостатированного столика стенда «УВ-1/2» АО «Композит» (см. рис. 1) и облучали при следующих условиях:

- давление в вакуумной камере — 10^{-4} Па;
- энергия протонов E_p — 20–30 кэВ;
- плотность потока протонного пучка φ — $(1 - 6) \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$;
- флюенс протонов Φ_p — от 10^{14} до $5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$;
- температура охлаждаемого столика поддерживалась в диапазоне $20 \pm 1^\circ \text{C}$.

Поверхности образцов до и после облучения исследовали с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Перед началом экспериментов проводились расчеты методом Монте-Карло с применением пакета программ GEANT-4, часть результатов представлена на

рис. 2. Известно, что протоны с энергиями, выбранными для проведения экспериментов, при взаимодействии со стеклом расходуют энергию на ионизацию атомов и возбуждение электронной подсистемы, что ведет в конечном итоге к их термализации. После термализации они захватываются соответствующим ловушками. Глубина проникновения протонов с энергиями 20 и 30 кэВ при этом достигает около 380 и 450 нм соответственно. Стоит отметить большую неравномерность распределения по толщине облучаемого слоя стекла в указанном диапазоне энергий протонов, что влечет за собой неравномерное изменение сетки стекла. Такое распределение так же приводит к появлению в приповерхностном слое дополнительных механических напряжений, что обуславливает неравномерное изменение его плотности, которое приводит к появлению растягивающих напряжений.

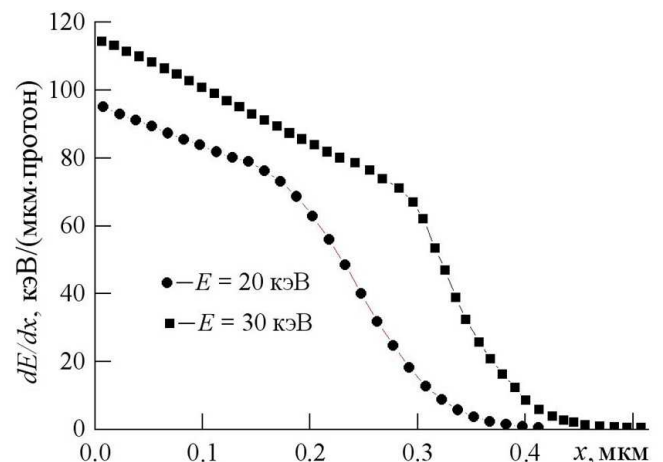


Рис. 2. Распределение поглощенной в образце энергии протонов

Выбор пластины стекла К-208 в качестве модельных образцов для исследования влияния облучения на изменение структуры поверхности стекла связан с тем, что в результате вытягивания из расплава стекло имеет гладкую поверхность. Так на рис. 3 представлено АСМ-изображение фрагмента исходного образца К-208 из которого следует, что шероховатость его поверхности составляет около 1 нм. Технология изготовления позволяет выбрать для экспериментов пластины, имеющие одинаковый химический состав, — пластины, полученные из одного расплава стекла.

Известно, что непрерывность в сетке стекла К-208 нарушается из-за наличия в его структуре концевых группировок $\equiv \text{SiO}^- \dots \text{Na}^+ (\text{K}^+)$ с атомами немостикового кислорода в середине. В процессе облучения в стекле происходит перераспределение натрия, полевая миграция ионов (Na^+) которого играет ключевую роль в перестройке микроструктуры стекла и высвобождении атомов немостикового кислорода.

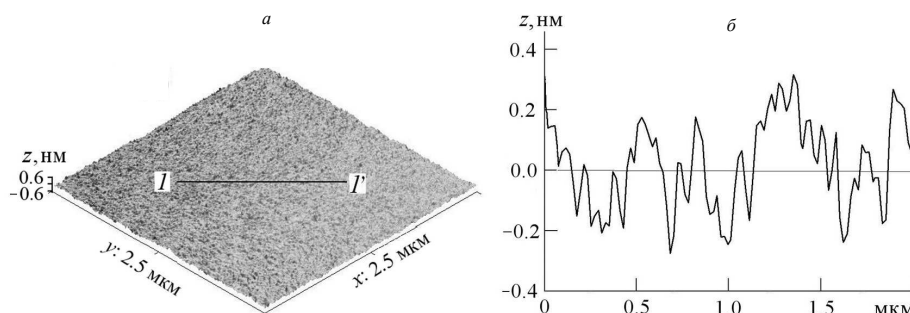


Рис. 3. АСМ-изображение исходного образца К-208: а — 3D-изображение фрагмента поверхности; б — сечение фрагмента вдоль линии $I-I'$

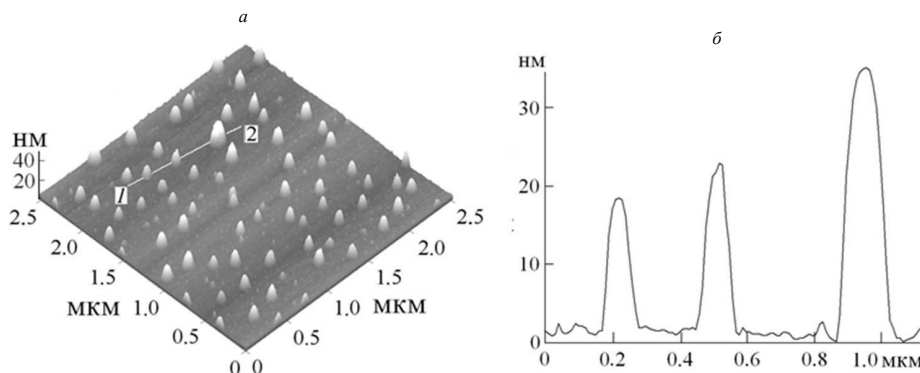


Рис. 4. АСМ-изображения облученного фрагмента образца: а — 3D-изображения; б — сечение фрагмента вдоль линий 1–2 ($\varphi_p = 6.0 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$, $\Phi_p = 1.6 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$, $E_p = 20 \text{ кэВ}$)

При этом подвижность ионов водорода, согласно данным работ [20, 21], на три порядка ниже, чем ионов натрия, что в частности объясняется тем, что ионы водорода встраиваются в микроструктуру стекла [22, 23] или захватываются ловушками. В поле накопленного в стекле положительного заряда ионы Na^+ мигрируют из области локализации протонов по направлению к облучаемой поверхности и к металлическому столику, на котором, к тому же, индуцируется отрицательный заряд.

Анализ результатов исследований показал, что изменения морфологии стекла К-208 при протонном облучении с энергией частиц до 20 кэВ обусловлены в основном образованием газонаполненных пузырьков.

После облучения протонами с энергиями $E_p = 30 \text{ кэВ}$ при плотности потока частиц $\varphi_p = 6.0 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ и флюенсе $\Phi_p = 1.7 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ на облученной поверхности стекла методами атомно-силовой микроскопии обнаружено образование микротрещин (см. рис. 5). Неравномерное распределение поглощенной энергии излучения и радиационно-стимулированные процессы перестройки микрострук-

туры в облучаемом слое стекла обуславливают неравномерное изменение его плотности, что приводит к появлению растягивающих боковых напряжений.

Отметим, что в случаях воздействия протонов с энергиями до 20 кэВ микротрещины на стекле не наблюдались. Однако газонаполненные пузырьки, размеры которых возрастали вместе со значением Φ_p в приповерхностном слое стекла, обнаружены после облучения протонами как с $E_p = 20 \text{ кэВ}$, так и с $E_p = 30 \text{ кэВ}$. При этом размеры пузырьков отличаются не более чем на 10%.

После облучения протонами с $E_p = 30 \text{ кэВ}$ при значениях $\varphi_p = 6.0 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ и $\Phi_p = 1.2 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ на поверхности стекла образовались микровыступы, появление которых можно предварительно интерпретировать как выход на поверхность стекла перколяционных каналов. Для однозначной трактовки происхождения таких микровыступов необходимо провести дополнительные исследования.

Результаты исследований показали, что структура поверхности облученных протонами стекол изменяется за счет образования газонаполненных пузырьков и вы-

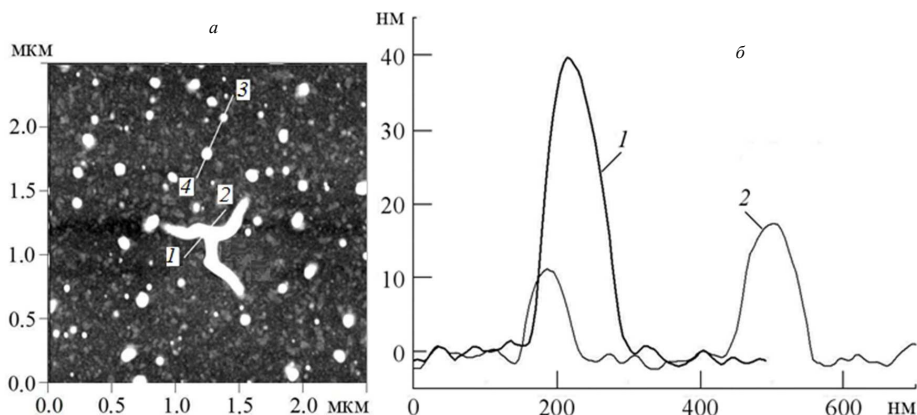


Рис. 5. АСМ-изображения облученного фрагмента образца К-208: а – 3D-изображения; б – сечение фрагмента вдоль линий 1–2 (линия 1) и 3–4 (линия 2) соответственно. ($\varphi_p = 6.0 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$, $\Phi_p = 1.6 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$, $E_p = 30 \text{ кэВ}$)

хода на облучаемую поверхность перколяционных каналов натрия. Последнее связано с тем, что в стекле формируется область положительного объемного заряда, в поле которого происходит миграция ионов натрия к облучаемой поверхности.

Проведенный в настоящей работе сравнительный анализ экспериментальных данных представленных в виде АСМ-изображений исходных образцов К-208 и образцов, облученных разными плотностями потоков протонов с энергиями $E_p = 20 \text{ кэВ}$ и с $E_p = 30 \text{ кэВ}$, выявил существенную разницу в характере структурных изменений поверхностей. В частности при $E_p = 30 \text{ кэВ}$ протонное облучение привело к появлению на стекле микротрещин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного анализа экспериментальных данных показали, что изменения структуры по-

верхности защитного стекла солнечных батарей при протонном облучении с плотностью потока частиц $6 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ и варьировании флюенса облучения в диапазоне от 5×10^{14} до $3 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ обусловлены:

1. работой сил механических напряжений, появляющихся в связи с неравномерным распределением по толщине стекла поглощенной энергии излучения;
2. образованием газонаполненных пузырьков, размеры которых возрастают вместе с флюенсом облучения;
3. появлением в облучаемом слое стекла микротрещин под действием протонов с энергией 30 кэВ (при 20 кэВ трещины в экспериментах не наблюдались);
4. образованием на облучаемой поверхности микровыступов для интерпретации которых необходимо провести дополнительные исследования.

[1] Ferguson D. C., Wimberly S.C. The Best GEO Daytime Spacecraft Charging Index. Proceed. 50th AIAA Aerospace Sci. Mtg. January, 2013. Nashville, Tennessee. AIAA 2013-0810. doi: 10.2514/6.2013-810.
 [2] Модель космоса. Научно-информационное издание. Под ред. Л.С. Новикова. 2. 2007.
 [3] Wang Q., Geng H., Sun Ch., Li X. et al. // J. Appl. Phys. 2016. 119. Art. No 023103.
 [4] Jurek K., Gedeon O., Hulinsky V. // Mikrochimica Acta. 1998. 15. P. 269.
 [5] Gedeon O., Hulinsky V., Jurek K., // Mikrochimica Acta. 2000. 132. P. 505.
 [6] Khasanshin R.H., Novikov L.S.// Advances in Space Research (includes Cospar Information Bulletin), 2016. 57. P. 2187.

[7] Ковивчак В.С., Панова Т.В.// Поверхность. Рентген., синхрон. и нейтрон. исслед. 2017. № 8. С. 59.
 [8] Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2020. № 9. С. 47.
 [9] Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2021. № 7. С. 30.
 [10] Xinjie F. U., Lixin S. O., Jiacheng L. I. // Journal of Rare Earths. 2014. 32, N 11. P. 1037.
 [11] Сергеев П.М., Зворыкин В.Д., Сергеев А.П. и др. // Опт. журнал. 2004. 71, № 6. С. 93.
 [12] Арбузов В.И., Сучков Ф.В. // Опт. журнал. 2001. 68, № 6. С. 85.
 [13] Гусев А.П., Забелин И.А. // Опт. журнал. 2001. 68, № 6. С. 79.
 [14] Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С., Коровин С.Б. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2015. № 1

- C. 88.
- [15] Hirokazu M., Kazuhiro T., Mengu C. // IEEE Transaction on Plasma Science. 2008. **36**. P. 2387.
- [16] Koons C., Mazur J. E., Selesnick R. S., et al. // The impact of the space environment on space systems. Proceedings of the 6th Spacecraft Charging Conference. November 2-6, 1998. AFRL Science Center, Hanscom AFB, MA, USA., P. 7.
- [17] Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С., Гаценко Л.С., Волкова Я.Б. // Перспективные материалы. 2015. № 1. С. 22.
- [18] Cho M., Kawakita S., Nakamura M., et al. // J. Space. Rockets. 2005. **42**, N 4. P. 740.
- [19] Ferguson, D.C., Katz I. // IEEE Trans. on Plasma Sci. 2015. **43**, N 9. P. 3021.
- [20] Kudlinski A., Quiquempois Y., Martinelli G. // Opt. Expr. 2005. **13**, N 20. P. 8015.
- [21] Robert H. Doremus. // Appl. Phys. Letter. 2005. **87**, N 23. P. 232904-2.
- [22] Skuja L., Kajihara K., Hirano M., Saitoh A., Hosono H. // J. Non-cryst. Sol. 2006. **352**. P. 2297.
- [23] Skuja L., Kajihara K., Hirano M., Hosono H. // Nuclear Instr. and Meth. in Phys. Res. B. 2008. **266**. P. 2971.

Changes in the surface structure of K-208 glass under medium-energy proton irradiation

I. P. Malashin

*Bauman Moscow State Technical University, Department of Fundamental Sciences, Department of Physics
E-mail: ivan.p.malashin@gmail.com*

The effect of proton irradiation on the process of changes in the surface structure of K-208 glass caused by the formation of microcracks and gas-filled bubbles was studied using atomic force microscopy methods. The K-208 glass plates, which are used to protect solar cells of spacecrafts, were chosen as experimental samples. As a result of the analysis of experimental data obtained by atomic force microscopy, it was found that on the surface of K-208 glass irradiated in vacuum (10^{-4} Pa) by protons with an energy of 20 and 30 keV at a flux density of $\varphi_p = 6.0 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ and fluences $\Phi_p = (10^{15} - 6.6 \times 10^{16}) \text{ cm}^{-2}$ gas-filled bubbles and microcracks are formed, the characteristic sizes of which grow with increasing fluence. It was shown that for the same values of φ_p and Φ_p irradiation of K-208 glass with protons with energy of 20-keV does not lead to the formation of microcracks.

PACS: 77.84.-s.

Keywords: proton irradiation, K-208 glass, gas-filled bubble, microcrack, compression of glass, atomic force microscopy, surface structure, ion field migration.

Received 06 June 2022.

Сведения об авторах

Малашин Иван Павлович — студент; e-mail: ivan.p.malashin@gmail.com.
