

УДК:537.9:539.1.043

СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТЕКЛА К-208 ПРИ ПРОТОННОМ ОБЛУЧЕНИИ РАЗНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

© 2024 г. Р. Х. Хасаншин^{a, b, *}, Л. С. Новиков^c

^aАкционерное общество “Композит”, Королев, 141070 Россия

^bМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005 Россия

^cНИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына,

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

*e-mail: rhkhas@mail.ru

Поступила в редакцию 10.01.2024 г.

После доработки 21.03.2024 г.

Принята к публикации 21.03.2024 г.

Исследованы изменения структуры поверхности стекла К-208, облученного в вакууме (10^{-4} Па) протонами с энергией 30 кэВ. Установлено, что характер изменений зависит от плотности потока протонов (ϕ). При $\phi < 2.0 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ изменения связаны, главным образом, с выходом на облучаемую поверхность перколяционных каналов натрия. Перколяционные каналы при протонном облучении стекла образуются в результате миграции ионов Na^+ в поле инжектированного в стекло заряда. С ростом ϕ выше указанного значения заметную роль начинает играть формирование на облучаемой поверхности газонаполненных пузырьков. Появление пузырьков обусловлено тем, что полевая миграция ионов Na^+ сопровождается высвобождением немостиковых атомов кислорода, обеспечивавших электрическую нейтральность в окрестности локализации этих ионов. При значениях $\phi > 2 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ газонаполненные пузырьки и микровыступы натрия образуются и растут парами. Авторы полагают, что в указанных условиях облучения ускоренная полевая миграция ионов натрия по перколяционному каналу обеспечивает в его окрестности интенсивное высвобождение атомов немостикового кислорода с последующей их миграцией и образованием газонаполненных пузырьков.

Ключевые слова: облучение, стекло, структура поверхности, полевая миграция, ионы щелочных металлов, перколяционные каналы, газонаполненные пузырьки, микровыступ, немостиковый кислород, стехиометрия.

DOI: 10.31857/S1028096024100041, **EDN:** SHOYNB

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследований взаимодействия разных видов ионизирующего излучения со стеклами различного состава обусловлена тем, что изделия из стекла часто применяют в условиях воздействия больших радиационных нагрузок: для захоронения ядерных отходов, в ускорительной технике, в условиях космического пространства и т.п. В частности, стекла, используемые на внешних поверхностях высокоорбитальных искусственных спутников, подвергаются воздействию горячей магнито-

сферной плазмы (ГМП), состоящей в основном из электронов и протонов с энергиями от 10^2 до 10^5 эВ [1–4].

Как правило, стекла являются высокоомными диэлектриками (с удельным сопротивлением более $10^{11} \text{ Ом}\cdot\text{см}$), имеющими сложный состав. Так, для придания силикатным стеклам заданных свойств и подавления кристаллизации в них добавляют оксиды щелочных металлов (Li_2O , Na_2O , K_2O), а для повышения радиационной стойкости — элементы переменной валентности, например, церий. Под действием горячей магни-

тосферной плазмы в стекле, помимо генерации радиационных дефектов [5–7], накапливаются инжектированные заряды, в поле которых происходит перераспределение ионов щелочных металлов (Li^+ , Na^+ , K^+). Последний процесс сопровождается высвобождением немостиковых атомов кислорода, обеспечивавших электрическую нейтральность в окрестности локализации этих ионов. Дальнейшая миграция и накопление атомов кислорода вблизи дефектов стекла приводит к образованию пузырьков O_2 и к изменению стехиометрии материала. Накопленные в стекле заряды индуцируют электрические поля с высокой напряженностью, что ведет к возникновению электростатических разрядов, сопровождающихся локальным разрушением приповерхностного слоя стекла, выбросами плазмы, генерацией электромагнитных импульсов и т.д. [8–12].

Исследование и понимание указанных процессов, приводящих к изменениям структуры и стехиометрии стекла, имеют решающее значение для прогнозирования поведения стекол в различных условиях, в частности, прогнозирования их стойкости к воздействию ионизирующих излучений космического пространства.

Если процессы, протекающие в стеклах различного состава под действием электронов, достаточно подробно изучены и широко представлены в научно-технической литературе [9–15], то информация об изменениях морфологии стекол в случае протонного облучения ограничена и имеет фрагментарный характер [16–22]. В частности, отсутствуют результаты исследований влияния плотности потока протонов на процессы, определяющие характер изменения структуры стекла.

В настоящей работе представлены экспериментальные результаты, полученные при исследованиях методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) покровных стекол (ПС) солнечных батарей после протонного облучения с разной плотностью потока.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Облучение покровных стекол размерами $40 \times 40 \times 0.17$ мм, прикрепленных к полированной поверхности металлического термостатированного столика, проводили в автоматизированном стенде “УВ-1/2” (АО “Композит”) при следующих условиях: давление в вакуумной камере — 10^{-4} Па; энергия протонов — 30 кэВ; плотность потока протонов ϕ — от 5.0×10^9 до 1.0×10^{12} $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; флуенс протонов Φ — от 5.0×10^{14} до 2.5×10^{16} см^{-2} ; температура столика — $20 \pm 1^\circ\text{C}$.

Стекло К-208, из которого были изготовлены покровные стекла, имеет следующий состав (в моль. %): 69.49 SiO_2 ; 11.93 B_2O_3 ; 4.00 Al_2O_3 ; 4.25 K_2O ; 10.33 Na_2O ; 2.00 CeO_2 . Распределение величины ϕ по поверхности столика с образцом контролировали 25 цилиндрами Фарадея.

Поверхность образцов до и после облучения исследовали с помощью атомно-силового микроскопа Solver P47–Multi–Technique SPM. Для изучения топологии поверхности образцов использовали полуконтактный атомно-силовой режим, который при высокой точности измерений не разрушает поверхность. Для определения изменения состава облученного слоя стекла специально изготовленные образцы исследованы в просвечивающем/растровом электронном микроскопе TITAN 80–300 (Thermo Fisher Scientific, США) с корректором сферической аберрации зонда в режимах светлого и темного поля. Изменения оптических свойств образцов покровных стекол контролировали с помощью двухлучевого спектрометра.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При эксплуатации покровные стекла испытывают большие радиационные нагрузки, особенно в период геомагнитных бурь. Результаты расчетов, проведенных на этапе подготовки к экспериментам, показали, что исследуемые покровные стекла служат надежной защитой фотоэлементов солнечных батарей спутников от электронов и протонов с энергиями менее 150 кэВ и 4.5 МэВ соответственно. При испытаниях материалов на стойкость к воздействию горячей магнитосферной плазмы в лабораторных установках эффективная энергия протонного компонента плазмы составляет 30 кэВ, а глубина проникновения таких частиц в стекло К-208 менее 0.5 мкм.

Удобство использования покровных стекол в качестве модельных образцов для исследования радиационно-стимулированных изменений структуры стекла обусловлено гладкостью их поверхностей и тем, что технология их изготовления позволяет взять для экспериментов образцы одинакового состава, полученные из одного куска стекла. На рис. 1 приведено АСМ-изображение фрагмента поверхности исходного образца, из которого видно, что шероховатость его поверхности не превышает 1 нм.

Измерения состава облученного слоя покровных стекол подтвердили предложенную в работе [22] трактовку изменений морфологии поверхности покровных стекол, облученных протонами, которая сводилась к следующему: при протонном

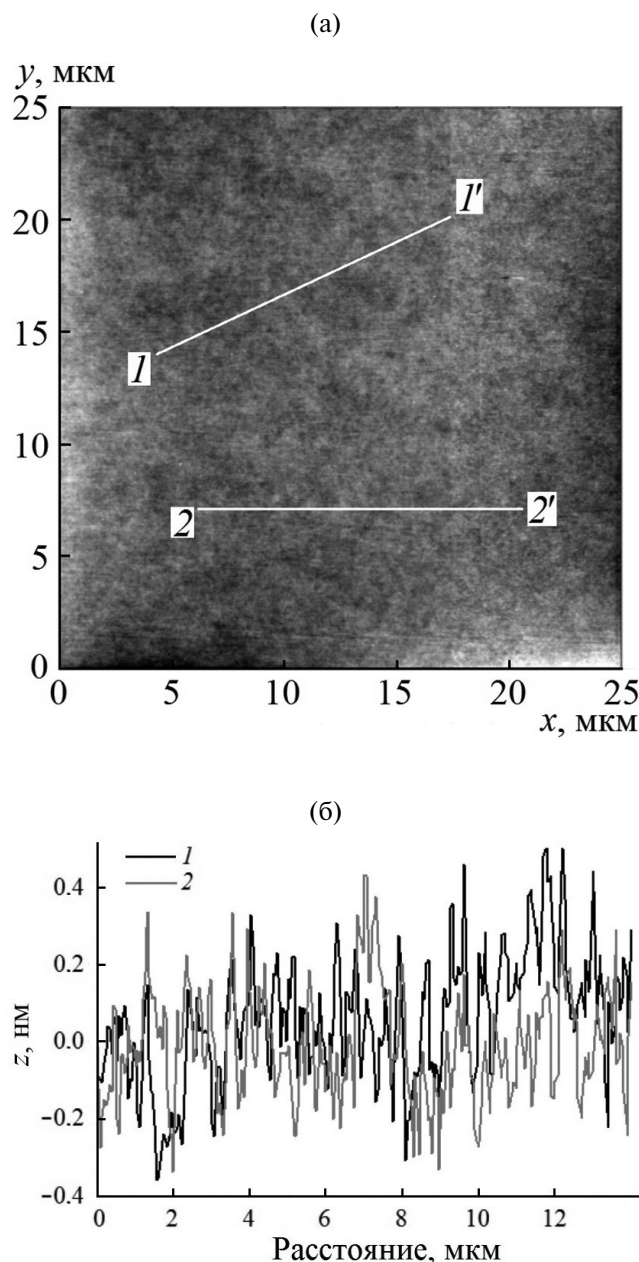


Рис. 1. АСМ-изображение фрагмента 25×25 мкм поверхности необлученного образца (а); сечения вдоль линий $1-1'$ (1), $2-2'$ (2) (б).

облучении в пластине стекла К-208 происходит перераспределение ионов щелочных металлов, самым подвижным из которых является Na^+ . В поле инжектированного заряда миграция Na^+ протекает, в основном, по перколяционным каналам с их выходом на облучаемую поверхность. Новые АСМ-исследования покровных стекол показали, что вид процессов, определяющих изменение структуры их поверхности, зависит от интенсивности облучения. Так, при значениях $\phi < 2.0 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и $\phi > 7.5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ наблю-

даемые изменения морфологии облучаемой поверхности, представленные на рис. 2, можно объяснить выходом на нее перколяционных каналов Na .

Это предположение подтвердилось при исследовании состава приповерхностного слоя образцов, облученных при разном флуенсе частиц. Часть полученных результатов представлена на рис. 3. Из этого рисунка следует, что в приповерхностном слое стекла концентрация натрия $C_{\text{Na}}(x)$ растет с увеличением Φ .

При росте плотности потока протонов все более заметную роль в изменении структуры поверхности образцов начинает играть формирование газонаполненных пузырьков. При $\phi \geq 2 \times$

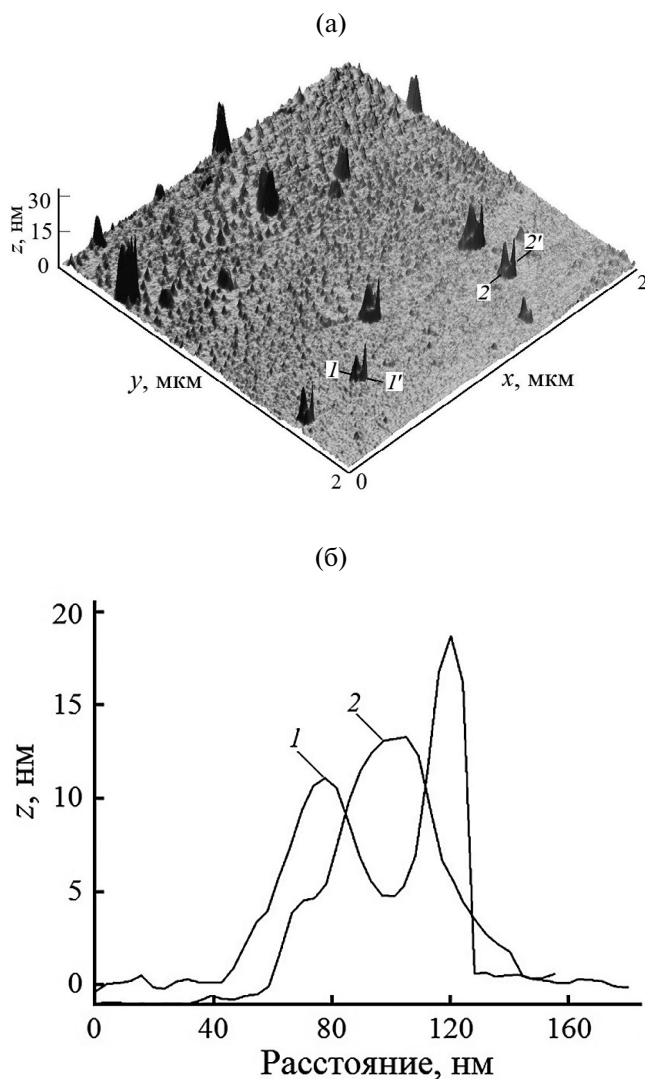


Рис. 2. Трехмерное АСМ-изображение фрагмента 2×2 мкм поверхности облученного покровного стекла (а); сечение вдоль линий $1-1'$ (1), $2-2'$ (2) при $\phi = 1.5 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, $\Phi = 5.0 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (б).

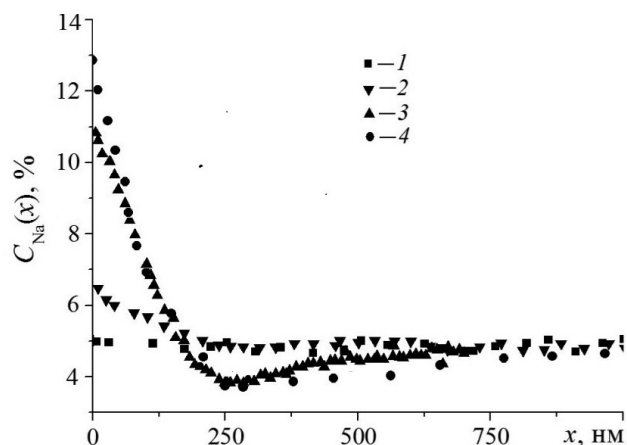


Рис. 3. Распределение $C_{Na}(x)$ по толщине приповерхностного слоя покровных стекол, облученных при $\Phi = (2.0 \pm 1) \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и флуенсе: 0 (1); 2.5×10^{14} (2); 9.0×10^{14} (3); $1.8 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (4).

$\times 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ экспериментально выявлена следующая закономерность, которая пока не поддается однозначной интерпретации: газонаполненные пузырьки и натриевые микровыступы формируются на облучаемой поверхности стекла парами. На рис. 4 показаны АСМ-изображения покровного стекла, облученного при $\Phi = 2.5 \times 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и флуенсе $5.2 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Для определения размеров микровыступов и пузырьков проведены соответствующие сечения трехмерного изображения фрагмента поверхности образца (рис. 4а). Линия 1 на рис. 4б соответствует сечению натриевого микровыступа вдоль линии 1–1', а линии 2 и 3 на этом рисунке представляют собой сечения вдоль линий 2–2' и 3–3' газонаполненных пузырьков, показанных на рис. 4а. Область поверхности $5 \times 5 \text{ мкм}$ на рис. 4в приведена для демонстрации неравномерности распределения парных образований по равномерно облучаемой поверхности стекла.

На образцах покровных стекол, облученных при той же плотности потока, но меньшем флуенсе, была зарегистрирована более ранняя стадия образования пар указанных структурных дефектов. Так, на рис. 5 представлено АСМ-изображение образца после облучения при флуенсе $9.0 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$.

Формирование и рост пар из газонаполненных пузырьков и натриевых микровыступов можно объяснить тем, что в условиях проведения эксперимента интенсивная миграция ионов натрия по перколяционным каналам обеспечивает в их окрестностях более интенсивное высвобождение атомов нестехиометрического кислорода. Последующая миграция и агрегация

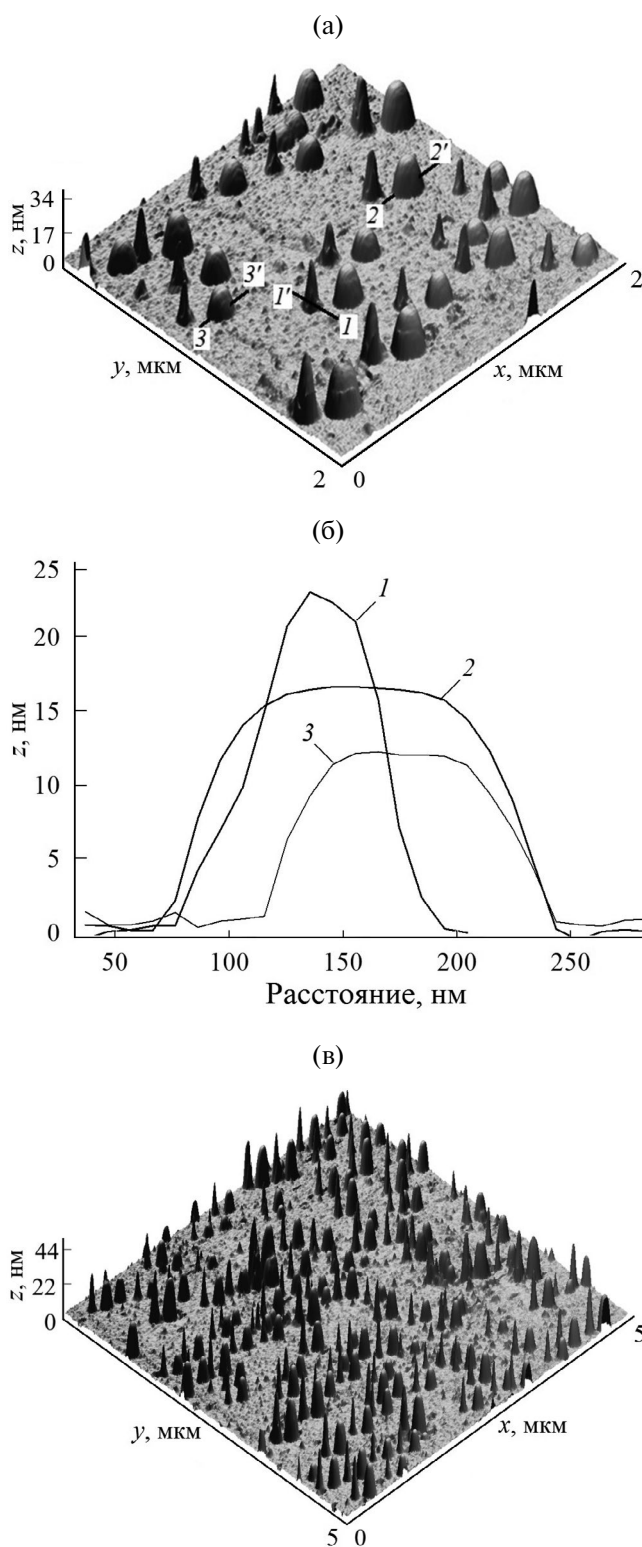


Рис. 4. Трехмерные АСМ-изображения фрагмента облученного образца 2×2 (а) и $5 \times 5 \text{ мкм}$ (в); сечения вдоль линий 1–1' (1), 2–2' (2), 3–3' (3) (б).

ция атомов кислорода в окрестностях дефектов стекла приводит к формированию пузырьков O_2 . Изменение стехиометрии стекла также могло

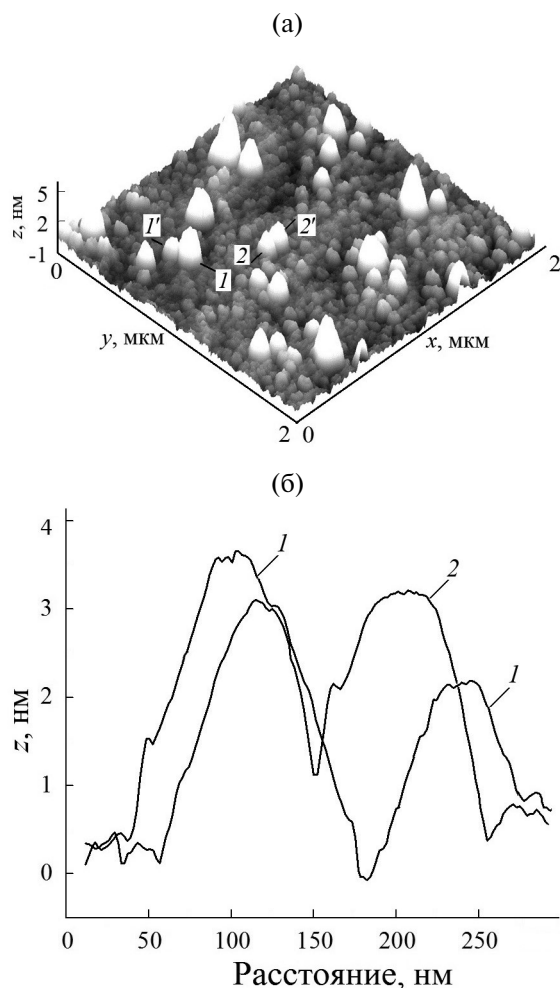


Рис. 5. Трехмерные АСМ-изображения фрагмента облученного образца 2×2 мкм (а); сечения вдоль линий 1–1' (1), 2–2' (2) (б).

способствовать снижению газовой проницаемости стекла в окрестностях каналов, т.е. образованию пузырьков. Образование молекулярного кислорода в облученном стекле подтверждено посредством спектроскопии комбинационного рассеяния. А именно, в спектре комбинационного рассеяния наблюдали полосу 1550 см^{-1} , соответствующую колебательным модам растяжения молекул O_2 [23]. Образование молекулярного кислорода в боросиликатных стеклах, содержащих щелочные металлы, при облучении ионами He [24], Ar [25], Kr [26] и Xe [27], как и в случае электронного облучения, объясняется миграцией ионов Li^+ , Na^+ и K^+ в поле инжектированного заряда.

В наших предыдущих работах [22, 28] появление пузырьков H_2 наблюдали при протонном и электронно-протонном облучении стекла К-208 при энергии протонов 20 кэВ и значениях $\phi \leq 5.5 \times 10^{10}\text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$. Следует отметить, что газона-

полненные пузырьки были достаточно равномерно распределены по поверхности стекла.

Образование парных дефектов, обнаруженных в последних экспериментах, происходило при $\phi > 2 \times 10^{11}\text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$, что, по-видимому, создает более интенсивную “радиационную тряску”, обеспечивающую выход из стекла более подвижных, по сравнению с атомами кислорода, атомов водорода. Действительно, при взаимодействии со стеклом основная часть энергии протонов в результате столкновительной и электронной релаксации перераспределяется между атомами облучаемого слоя. Функция распределения атомов по энергии колебаний отклоняется от термодинамически равновесного состояния, что стимулирует миграционные процессы примесных атомов. Однако для однозначной трактовки результатов, представленных в настоящей работе необходимы дополнительные исследования.

Измерения оптических свойств образцов покровных стекол, на тыльную (не подвергнутую облучению) поверхность которых методом магнетронного напыления был нанесен отражающий слой алюминия толщиной около 100 нм, показали, что протонное облучение, вызывающее описанные выше структурные изменения облучаемой поверхности, не приводит к значительной деградации оптических свойств стекла. В качестве примера на рис. 6 представлены спектральные коэффициенты отражения, исходного и облученного протонами (при $\phi = 2.5 \times 10^{11}\text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$, $\Phi = 5.4 \times 10^{15}\text{ см}^{-2}$) образца. Из этого рисунка видно, что основные изменения в спектре происходят в диапазоне длин волн 200–500 нм и не превышают 6%.

Известно, что в результате воздействия ионизирующего излучения в стекле образуется электронно-дырочная плазма. Захват электронов и дырок соответствующими ловушками приводит к появлению в нем центров окраски и, как следствие, к росту оптической плотности стекла. Для обеспечения радиационно-оптической стойкости в стекло К-208 добавляют церий, являющийся конкурентом существующих в стекле центров захвата электронов и ионов. Присутствие церия обеспечивает сдвиг радиационно-стимулированных изменений спектра стекла К-208 в коротковолновую область.

Необходимо отметить, что в диапазоне длин волн излучения 200–340 нм коэффициент отражения образца с алюминиевым покрытием растет вместе с флуенсом протонов. Это объясняется увеличением показателя преломления стекла в облучаемом слое.

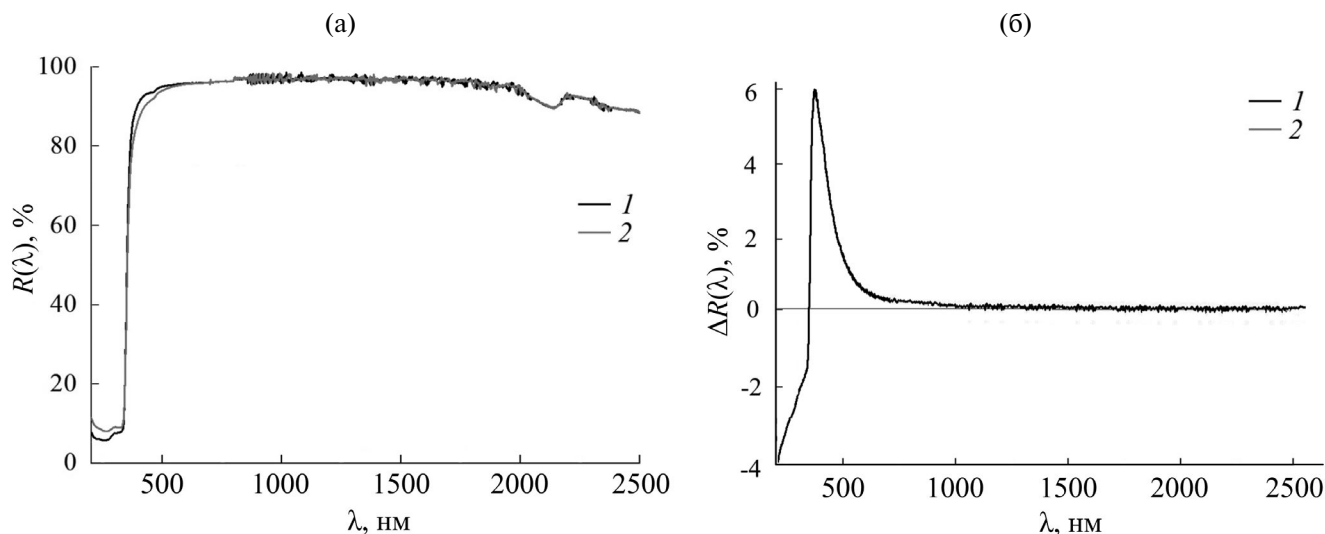


Рис. 6. Спектральные коэффициенты отражения покровных стекол с алюминиевым покрытием до (1) и после (2) облучения (а); б — разница спектров исходного и облученного покровных стекол (б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ АСМ-изображений поверхностей образцов стекла К-208, облученных в вакууме 10^{-4} Па протонами с энергией 30 кэВ при изменении плотности потока от 5×10^9 до 10^{12} $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ позволяют сделать следующие выводы:

Изменения структуры поверхности стекла при $\phi < 2 \times 10^{10}$ $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и $\Phi > 7.5 \times 10^{14}$ см^{-2} происходят в основном за счет выхода на поверхность перколяционных каналов натрия, которые образуются в результате миграции Na^+ в поле инжектированного в стекло заряда.

При значениях $\phi > 2 \times 10^{10}$ $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ изменения морфологии стекла обусловлены образованием как перколяционных каналов натрия, так и газонаполненных пузырьков, а также действием сил механических напряжений, появляющихся в связи с неравномерным распределением по толщине облучаемого слоя поглощенной энергии и имплантированных протонов.

При значениях $\phi > 2 \times 10^{11}$ $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ газонаполненные пузырьки и микровыступы натрия образуются и растут парами. Авторы полагают, что в указанных условиях облучения ускоренная полевая миграция ионов натрия по перколяционному каналу обеспечивает в его окрестности интенсивное высвобождение атомов немостикового кислорода с последующей их миграцией и образованием газонаполненных пузырьков. Изменение стехиометрии стекла также может способствовать снижению газовой проницаемости стекла в окрестностях каналов, т.е. образованию пузырьков. Для однозначной трактовки данного результата необходимы дополнительные исследования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Messenger S.R., Wong F., Hoang B., Cress C.D., Walters R.J., Kleuver C.A., Jones G. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2014. V. 61. № 6. P. 3348. <https://www.doi.org/10.1109/TNS.2014.2364894>.
2. Toyoda K., Okumura T., Hosoda S., Cho M. // J. Spacecraft Rockets. 2005. V. 42. № 5. P. 947. <https://www.doi.org/10.2514/1.116022>
3. Ferguson D.C., Wimberly S.C. The Best GEO Daytime Spacecraft Charging Index. // Proc. 50th AIAA Aerospace Sci. Mtg. January, 2013. P. AIAA 2013-0810. <https://www.doi.org/10.2514/6.2013-810>
4. Модель космоса. Научно-информационное издание. Т. 2. / Ред. Новикова Л.С. М.: КДУ, 2007, 1144 с.
5. Xinjie F., Lixin S., Jiacheng L. // J. Rare Earths. 2014. V. 32. P. 1037. [https://www.doi.org/10.1016/S1002-0721\(14\)60180-0](https://www.doi.org/10.1016/S1002-0721(14)60180-0)
6. Kadono K., Itakura N., Akai T., Yamashita M., Yazawa T. // J. Phys.: Condensed Matter. 2010. V. 22. P. 045901. <https://www.doi.org/10.1088/0953-8984/22/4/045901>
7. Kreidl N., Hensler J. // J. Am. Ceramic Soc. 2006. V. 38. P. 423. <https://www.doi.org/10.1111/j.1151-2916.1955.tb14568.x>
8. Gedeon O., Hulinsky V., Jurek K. // Mikrochimica Acta. 2000. V. 132. № 2–4. P. 505. <https://doi.org/10.1007/s006040050050>
9. Khasanshin R.H., Novikov L.S. // Adv. Space Res. 2016. V. 57. P. 2187. <https://www.doi.org/10.1016/j.asr.2016.02.023>

10. Khasanshin H.R., Novikov S.L. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2019. V.47, No 8. P. 3796–3800. <https://www.doi.org/10.1109/TPS.2019.2916210>
11. Gavenda T., Gedeon O., Jurek K. // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. B. 2014 V. 322. P. 7. <https://www.doi.org/10.1016/j.nimb.2013.12.017>
12. Hanna R., Paulmier T., Belhaj M., Molinie P., Dirassen B., Payan D., Balcon N. // J. Appl. Phys. D. 2011. V. 44 P. 445402. <https://www.doi.org/10.1088/0022-3727/44/44/445402>
13. Guerch K., Paulmier T., Guillemet-Fritsch S., Lenormand P. // Nucl. Instrum. Methods B. 2015. V. 349. P. 147. <https://www.doi.org/10.1016/j.nimb.2015.02.046>
14. Ковивчак В.С., Панова Т.В. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2017. № 8. С. 59. <https://www.doi.org/10.7868/S020735281708008X>
15. Fakhfakh S., Jbara O., Belhaj M., Rondot S. // J. Appl. Phys. 2008. V. 104. P. 093704. <https://www.doi.org/10.1063/1.3006012>
16. Ковивчак В.С., Попов В.Е., Панова Т.К., Бурлаков Р.Б. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2003. № 4. С. 38.
17. Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С., Коровин С.Б. // Поверхность. Рентген., синхротрон. и нейтрон. исслед. 2017. № 9. С. 28. <https://www.doi.org/10.7868/S0207352817090049>
18. Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С. // Поверхность. Рентген., синхротрон. и нейтрон. исслед., 2018. № 11. С. 48. <https://www.doi.org/10.1134/S0207352818110136>
19. Čermák J., Mihaj L., Sporea D., Galagan Y., Fait J., Artemenko A., Štenclov P., Rezek B., Straticiu M., Burducea I. // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2018. V. 186. P. 284. <https://www.doi.org/10.1016/j.solmat.2018.06.046>
20. Zhang Z., Yang W. // Opt. Mater. Express. 2017. V. 7. P. 3979. <https://www.doi.org/10.1364/OME.7.003979>
21. Jensen T., Lawn B.R., Dalglish R.L., Kelly J.C. // Radiation Effects: Incorporating Plasma Science and Plasma Technology. 1976. V. 28. Iss. 3–4. P. 245. <https://www.doi.org/10.1080/00337577608237446>
22. Хасаншин Р.Х., Применко Д.А. // Изв. РАН. Серия физическая. 2022. Т. 86. № 5. С. 633. <https://www.doi.org/10.31857/S036767652205009X>
23. Colthup N.B., Daly L.H., Wiberley S.E. Introduction to Infrared and Raman Spectroscopy. 3^d ed. L.: Academic Press, 1990. 547 p.
24. Abbas A., Serruys Y., Ghaleb D., Delaye J., Boizot B., Reynard B., Calas G. // Nucl. Instrum. Methods B. 2000. V. 166–167. P. 445. [https://www.doi.org/10.1016/S0168-583X\(99\)00695-3](https://www.doi.org/10.1016/S0168-583X(99)00695-3)
25. Zhang G.F., Wang T.S., Yang K.J., Chen L., Zhang L.M., Peng H.B., Yuan W., Tian F. // Nucl. Instrum. Methods B. 2013. V. 316. P. 218. <https://www.doi.org/10.1016/j.nimb.2013.09.020>
26. Chen L., Zhang D.F., Lv P., Zhang J., Du X., Yuan W., Nan Sh. Zhu Z., Wang T.S. // J. Non-Crystalline Solids. 2016. V. 448. P. 6. <https://www.doi.org/10.1016/j.jnocrsol.2016.06.029>
27. Chen L., Wang T.S., Yang K.J., Peng H.B., Zhang G.F., Zhang L.M., Jiang H., Wang Q. // Nucl. Instrum. Methods B. 2013. V. 307. P. 566. <https://www.doi.org/10.1016/j.nimb.2013.01.089>
28. Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С. // Поверхность. Рентген., синхротрон. и нейтрон. исслед. 2021. № 7. С. 30. <https://www.doi.org/10.31857/S1028096021070086>

Structural Changes of the K-208 Glass Surface after Proton Irradiation of Different Intensity

R. H. Khasanshin^{1,2,*}, L. S. Novikov³

¹Joint Stock Company “Composite”, Korolev, Moscow region, 141070 Russia

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005 Russia

³Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow, 119991 Russia

*e-mail: rhkhas@mail.ru

Changes in the structure of the surface of K-208 glass irradiated in vacuum (10^{-4} Pa) by protons with energies of 30 keV have been studied. It has been established that the nature of the changes depends on the proton flux density (ϕ_p). At $\phi_p < 3.0 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, the changes are mainly associated with the emergence of percolation channels on the irradiated surface. Percolation channels during proton irradiation of glass are formed as a result of migration of Na^+ ions in the field of the charge injected into the glass. As ϕ_p increases, the formation of gas-filled bubbles begins to play a significant role. The appearance of bubbles is due to the fact that the field migration of Na^+ ions is accompanied by the release of non-bridge oxygen atoms, which provided electrical neutrality in the vicinity of the localization of these ions. At values of $\phi > 2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, gas-filled bubbles and sodium microarrays form and grow in pairs. The authors believe that under these irradiation conditions, accelerated field migration of sodium ions through the percolation channel ensures intensive release of non-bridge oxygen atoms in its vicinity, followed by their migration and the formation of gas-filled bubbles.

Keywords: irradiation, irradiation, glass, surface structure, field migration, alkali metal ions, percolation channels, gas-filled bubbles, micro-step, non-bridge oxygen, stoichiometry.