

УДК 538.9:53.043:537.5

ФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ГАЗОНАПОЛНЕННЫХ ПУЗЫРЬКОВ В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ СТЕКЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОННО-ПРОТОННОЙ ПЛАЗМЫ

© 2021 г. Р. Х. Хасаншин^{a, b, *}, Л. С. Новиков^{c, **}

^aАкционерное общество “Композит”, Королев, Московская область, 141070 Россия

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

^cМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, Москва, 119991 Россия

*e-mail: rhkhas@mail.ru

**e-mail novikov@sinp.msu.ru

Поступила в редакцию 18.12.2020 г.

После доработки 28.01.2021 г.

Принята к публикации 30.01.2021 г.

Методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) исследовано влияние электронно-протонного облучения на процесс изменения структуры поверхности стекла К-208, вызванное формированием газонаполненных пузырьков и их разрушением. Эти явления связаны с образованием атомов водорода Н в процессе рекомбинации протонов с электронами, инжектированными в стекло, и появившимися в нем в процессе ионизации. Миграция атомов водорода и их агрегация в Н-кластеры в окрестности дефектов структуры стекла приводит к образованию пузырьков молекулярного водорода Н₂. На стекло воздействовали электронами и протонами с энергиями 40 и 20 кэВ соответственно. Облучение проводилось в вакууме 10⁻⁴ Па. При фиксированном значении плотности потока протонов $\Phi_p = 5.5 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ плотность потока электронов Φ_e варьировалась в диапазоне (0–16.8) $\times 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Показано, что размеры пузырьков зависят от соотношения параметров Φ_e и Φ_p . Анализ экспериментальных данных позволяет предположить, что разрушение пузырька происходит при локальном уменьшении толщины его колпачка до 10–20 нм в результате разогрева и роста в нормальном к поверхности направлении под давлением накапливающегося газа. Установлено, что электростатические разряды, развивающиеся вдоль облучаемой поверхности стекла, стимулируют разрушение пузырьков.

Ключевые слова: электронно-протонное облучение, стекло К-208, атомно-силовая микроскопия, структура поверхности, газонаполненные пузырьки, рекомбинация, молекулярный водород, электростатические разряды.

DOI: 10.31857/S1028096021070086

ВВЕДЕНИЕ

Образование пузырьков, наполненных молекулярным водородом Н₂, впервые было обнаружено при протонном облучении металлов и изучается в течение несколько десятилетий. Полученные результаты исследований широко представлены в научно-технической литературе. Так, в работах [1–5] показано, что пузырьки, содержащие молекулы Н₂, образуются в результате миграции и агрегации атомов водорода, появляющихся при рекомбинации инжектированных протонов со свободными электронами металла.

К примеру, воздействие протонного излучения космического пространства на металличе-

ские поверхности спутника может привести к деградации их физических свойств из-за образования пузырьков Н₂. Тонкие металлические фольги используются, например, в экранно-вакуумной теплоизоляции спутников в качестве зеркальных покрытий оптических космических телескопов, в технологии изготовления солнечных парусов и т.д. В частности, в работе [5] показано, что под действием протонов солнечного ветра на металлической поверхности фольги солнечного паруса образуются пузырьки Н₂. Изменения термо-оптических свойств фольги очень важны для технологии движения солнечного паруса, поскольку его эффективность зависит от величины импульса, переданного от солнечных фотонов парусу.

Величина переданного импульса, в свою очередь, зависит от отражательной способности паруса. Следовательно, в процессе эксплуатации на двигательную способность паруса будет влиять растущее количество пузырьков H_2 на поверхности металлической фольги.

Стекла, используемые на внешних поверхностях спутников, тоже подвергаются воздействиям ионизирующих излучений радиационных поясов Земли и частиц магнитосферной плазмы [6–8]. Одной из нормируемых характеристик оптического стекла является содержание в нем пузырей. Наличие в стекле газонаполненных пузырьков может повлиять на его физико-механические и оптические свойства. Например, известно, что протонное облучение приводит к увеличению растягивающих поверхностных напряжений в приповерхностном слое стекла [9], локальные максимумы которых могут находиться в области формирования пузырьков, стимулирующих появление на поверхности стекла микротрещин [10].

Следует отметить, что образование кислородных пузырьков в щелочно-силикатных стеклах при облучении электронами подтверждено результатами многочисленных экспериментов, проведенных в разных лабораториях мира [11–17]. В частности, появление молекулярного кислорода O_2 в облученном электронами стекле подтверждалось посредством спектроскопии комбинационного рассеяния. А именно, в спектре комбинационного рассеяния наблюдалась полоса 1550 см^{-1} , соответствующая колебательным модам растяжения молекул O_2 [18]. Образование молекулярного кислорода, наблюдаемое в боросиликатных стеклах, содержащих щелочные металлы, при облучении ионами He [19], Ar [20], Kr [21] и Xe [22], как и в случае электронного облучения, объясняется миграцией ионов Li^+ , Na^+ и K^+ в поле инжектированного заряда. Их перераспределение в облучаемом стекле играет ключевую роль в перестройке микроструктуры стекла и высвобождении атомов нестикового кислорода.

Образование газонаполненных пузырьков при протонном облучении боросиликатного стекла, содержащего щелочные металлы, до настоящего времени остается дискуссионным. АСМ-исследования образцов стекла К-208, облученных протонами с энергиями 20–30 кэВ, показали, что на их поверхностях имеются элементы микроструктуры, по форме и размерам представляющие собой стеклянные колпачки газонаполненных пузырьков [23]. Однако однозначно подтвердить наличие в них молекулярного водорода не удалось. При этом в спектре комбинационного рас-

сеяния облученных образцов появилась полоса 1550 см^{-1} , указывающая на наличие в облученном слое стекла молекул O_2 . Но появление этой полосы могло быть также обусловлено молекулами, адсорбированными облученной поверхностью стекла, эффективная площадь которой увеличивается, а структура и состав изменяются.

Формирование газонаполненных пузырьков при электронно-протонном облучении, имитирующем воздействие магнитосферной плазмы или солнечного ветра на стекла, используемые на внешних поверхностях спутников, до настоящего времени исследовано недостаточно. В наших предыдущих работах основное внимание уделялось изучению условий возникновения электростатических разрядов [24] и изменений морфологии стекла под действием электронно-протонной плазмы [23].

Настоящая работа посвящена изучению условий формирования и разрушения пузырьков H_2 в приповерхностном слое стекла К-208 при совместном воздействии электронов и протонов с энергиями, характерными для горячей магнитосферной плазмы. Результаты исследований могут внести дополнительный вклад в понимание деградации свойств защитных стекол солнечных батарей и терморadiatorов в условиях эксплуатации высокоорбитальных спутников.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В экспериментах использовали пластины размером $40 \times 40 \times 0.17$ мм из стекла К-208, применяемые в качестве защитных покрытий солнечных батарей спутников. Основные аргументы в пользу выбора таких пластин в качестве модельных образцов для исследования влияния радиации на структуру поверхности стекла подробно изложены в работе [10]. Облучение проводилось в вакуумной камере испытательного стенда УВ-1/2 [24] АО “Композит” при давлении 10^{-4} Па. Для этого пластины прикрепляли медными зажимами к полированной поверхности металлического столика, термостатированного при температуре $20 \pm 1^\circ\text{C}$. Вся поверхность образца одновременно облучалась электронами и протонами с энергиями 40 и 20 кэВ соответственно. При фиксированном значении ϕ_p плотность потоков электронов ϕ_e варьировалась. Распределения плотностей потоков частиц по поверхности столика диаметром 200 мм контролировались 25 цилиндрами Фарадея. Неравномерность пучков частиц на поверхности образца не превышала 2%.

Исследования проводились на четырех группах образцов. В каждой группе было по 5 образцов. Параметры облучения образцов приведены в табл. 1.

Поверхности образцов до и после облучения исследовали с помощью атомно-силового микроскопа Solver P47–Multi–Technique SPM. При этом шероховатость поверхности исходных образцов составляла не более 1 нм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ионы H^+ намного меньше, чем ионы кремния, кислорода и других содержащихся в стекле элементов. Однако они могут вносить дополнительную деформацию в микроструктуру стекла после термализации в виде внедренных ионов, как и в случае протонного облучения металлов [25, 26], а также могут повлиять на изменение электронной структуры соседних атомов [27]. Совокупность эффектов, обусловленных внедрением в стекло ионов H^+ , приводит к увеличению энергии его микроструктуры. После рекомбинации протонов с электронами эта энергия может быть уменьшена в процессе миграции атомов H и их агрегации в H -кластеры в окрестностях дефектов структуры, а затем привести к образованию молекулярных пузырьков H_2 [27]. Водород не может агломерировать в H_2 -кластеры без присутствия дефектов, огромное количество которых находится в приповерхностном слое стекла.

Предположим, что формирование газонаполненных пузырьков при электронно-протонном облучении обусловлено образованием атомов H в процессе рекомбинации ($p^+ + e^- \rightarrow H$) термализо-

Таблица 1. Параметры облучения образцов

№ группы	$\Phi_p \times 10^{-10},$ $см^{-2} \cdot с^{-1}$	$\Phi_e \times 10^{-10},$ $см^{-2} \cdot с^{-1}$	$\Phi_p \times 10^{-15},$ $см^{-2}$	$\Phi_e \times 10^{-15},$ $см^{-2}$
1	5.6	0	1.2	0
2	5.6	5.6	1.2	1.2
3	5.6	11.2	1.2	2.4
4	5.6	16.8	1.2	3.6

ванных протонов с электронами, либо инжектированными в стекло, либо появившимися в нем в процессе ионизации. Миграция атомов водорода и их агрегация в окрестности дефектов структуры приводят к образованию пузырьков H_2 . При этом водород накапливается в пузырьках в тонком поверхностном слое стекла. Толщина этого слоя не превышает глубины проникновения протона R_p в стекло. Для протонов с энергией 20 кэВ эта величина, рассчитанная методом Монте-Карло, составляет около 0.4 мкм. Очевидно, что атомы водорода, которые не образуют гидроксильных групп, не захватываются дефектами и не составляют молекулы H_2 , мигрируют к поверхности стекла и покидают ее. В условиях эксперимента этому должна способствовать радиационно-стимулированная диффузия атомов водорода в облучаемом слое.

На рис. 1 представлено АСМ-изображение фрагмента поверхности образца первой группы, на которой после протонного облучения появились элементы микроструктуры, похожие на газонаполненные пузырьки. Проведенный статистический анализ размеров этих элементов по-

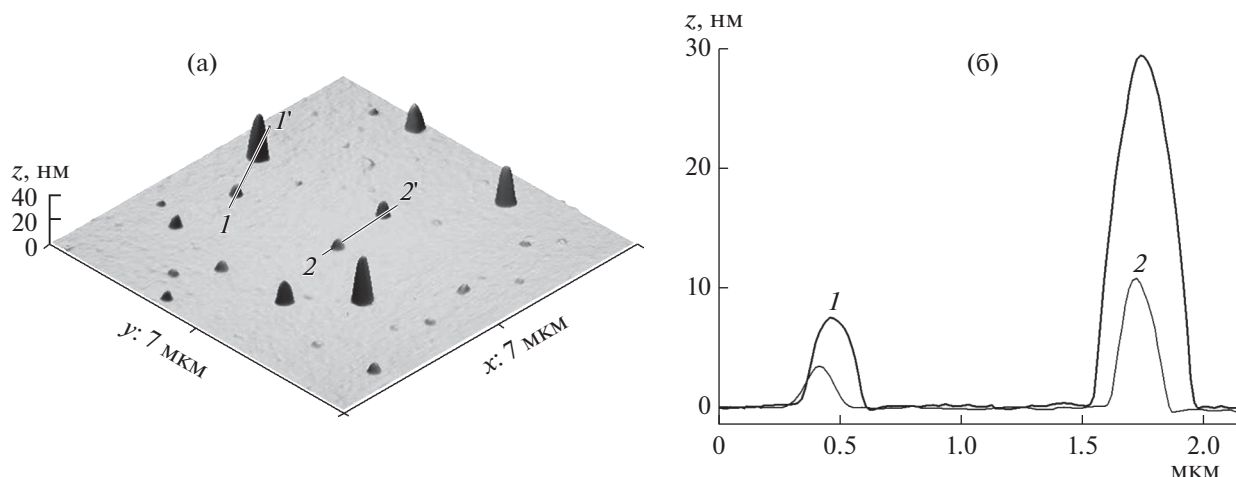


Рис. 1. АСМ-изображение фрагмента размером 7×7 мкм поверхности образца первой группы: а – 3D-изображение, б – сечения кадра вдоль линий 1–1' (1) и 2–2' (2).

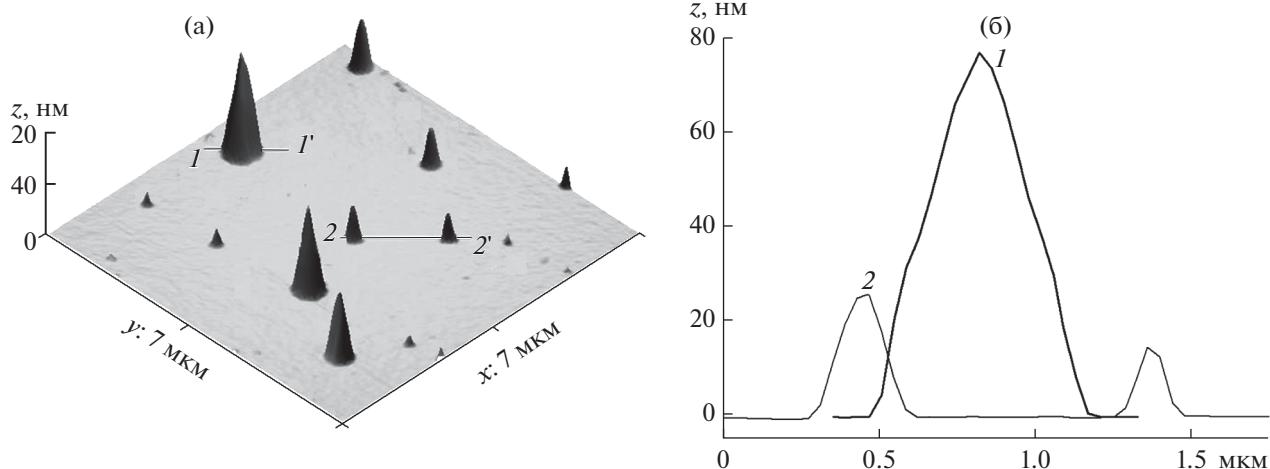


Рис. 2. АСМ-изображение фрагмента размером 7×7 мкм поверхности образца второй группы: а – 3D-изображение, б – сечения кадра вдоль линий 1–1' (1) и 2–2' (2).

казал, что их высота и диаметр основания составляют от нескольких до 30 нм и от 100 до 400 нм соответственно.

На образцы второй группы воздействовали электронно-протонной плазмой при $\phi_p = \phi_e$, что привело к увеличению размеров элементов микроструктуры, образовавшихся на поверхности образцов. На рис. 2 представлено АСМ-изображение фрагмента поверхности одного из образцов этой группы. Высота и диаметр основания отдельных элементов на поверхности образцов второй группы достигают 95 и 700 нм соответственно. Следует отметить сильную неравномерность в распределениях пузырьков по размерам и их количеству по облученной поверхности образцов при равномерном облучении всей их площади. Присутствие пузырьков больших размеров можно объяснить существованием крупных структурных дефектов в приповерхностном слое стекла.

Плотности потока протонов при облучении образцов всех групп совпадали с точностью до погрешности их измерения. Однако облучение образцов третьей и четвертой группы проводилось при значениях ϕ_e , соответственно, в два и в три раза превышающей значение этой величины для второй группы. Исследования поверхностей облученных образцов показали, что при совпадении времени облучения и количества инжектированных в стекло протонов, вместе с ростом значения ϕ_e на них появляются основания разрушенных пузырьков. Так, на рис. 3 представлены АСМ-изображения фрагментов поверхности образца из третьей группы, на которых имеются как целые пузырьки, так и основания разрушенных пузырьков.

При этом высота показанного на рис. 3а наибольшего пузырька составляет 140 нм, а диаметр его основания около 500 нм. Таким образом, высота этого пузырька больше, а диаметр основания меньше, чем у самого большого пузырька на поверхности образцов второй группы, на которых (к тому же) нет следов оснований разрушенных пузырьков. Принимая во внимание, что при внедрении протонов в стекло количество образующихся в единицу времени атомов водорода пропорционально концентрации в нем электронов, разницу в изменениях структуры поверхностей образцов второй и третьей групп можно связать с тем, что с увеличением значения ϕ_e возрастает вероятность рекомбинации термализованных в стекле протонов.

Анализ и статистическая обработка АСМ-изображений поверхностей облученных стекол позволяет предположить, что диаметры оснований разрушенных пузырьков на образцах третьей группы составляют около 1 мкм. При этом среди разрушенных пузырьков могли быть “двукамерные” (рис. 4), образовавшиеся в результате объединения двух пузырьков.

В наших экспериментах выявлено, что при фиксированном значении ϕ_p с увеличением значения ϕ_e наблюдается тенденция возрастания отношения высоты к диаметру основания пузырьков, обусловленная увеличением скорости рекомбинации в стекле протонов. Для объяснения на рис. 5 приведены графики распределений термализованных в стекле электронов $C_e(x)$ и протонов $C_p(x)$ при $\phi_e = 2\phi_p$. Распределения электронов представлены на четырех фиксированных мо-

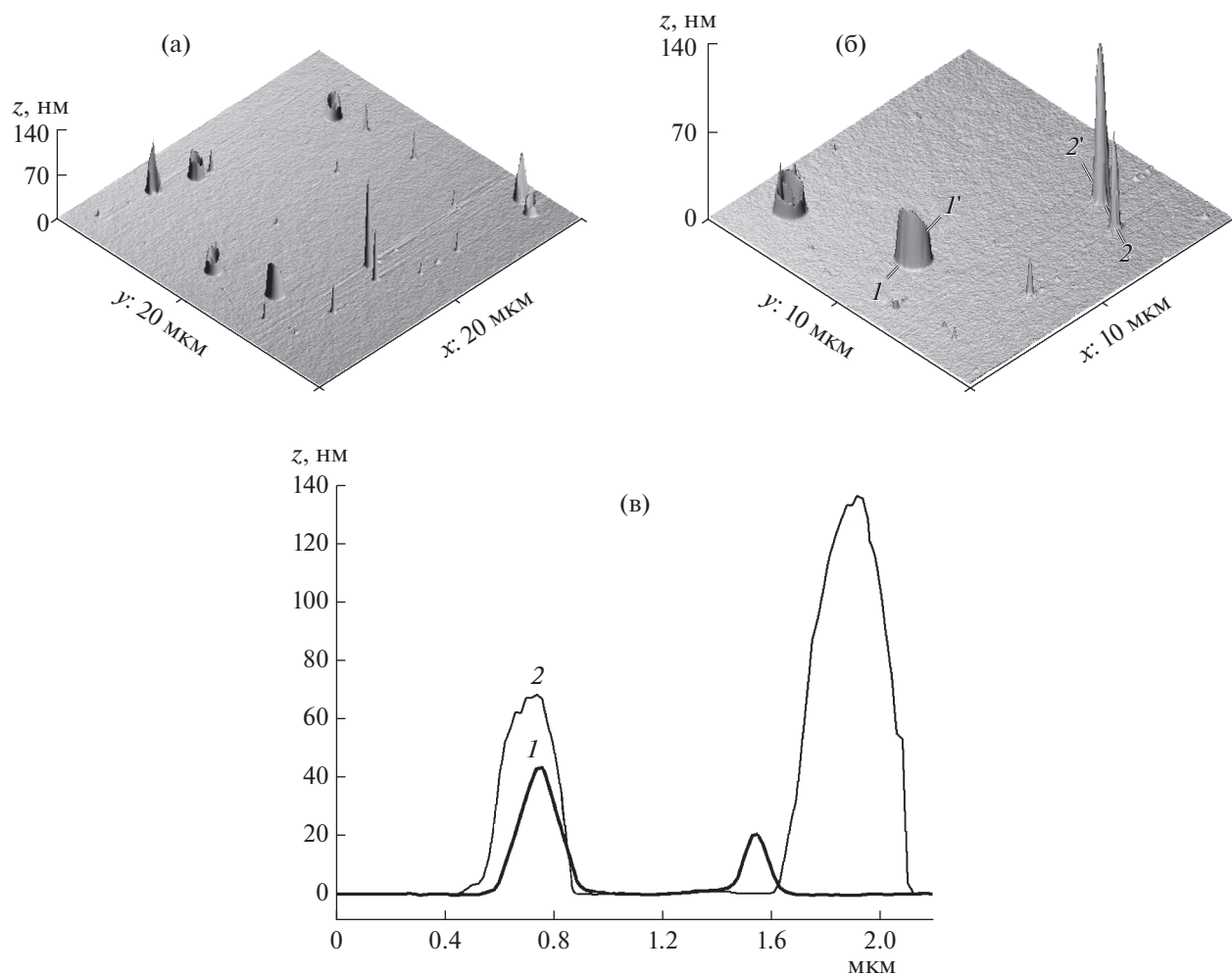


Рис. 3. АСМ-изображения фрагментов поверхности образца третьей группы: а и б – 3D-изображения фрагментов размером 20×20 и 10×10 мкм, в – сечения кадра б вдоль линий 1–1' (1) и 2–2' (2).

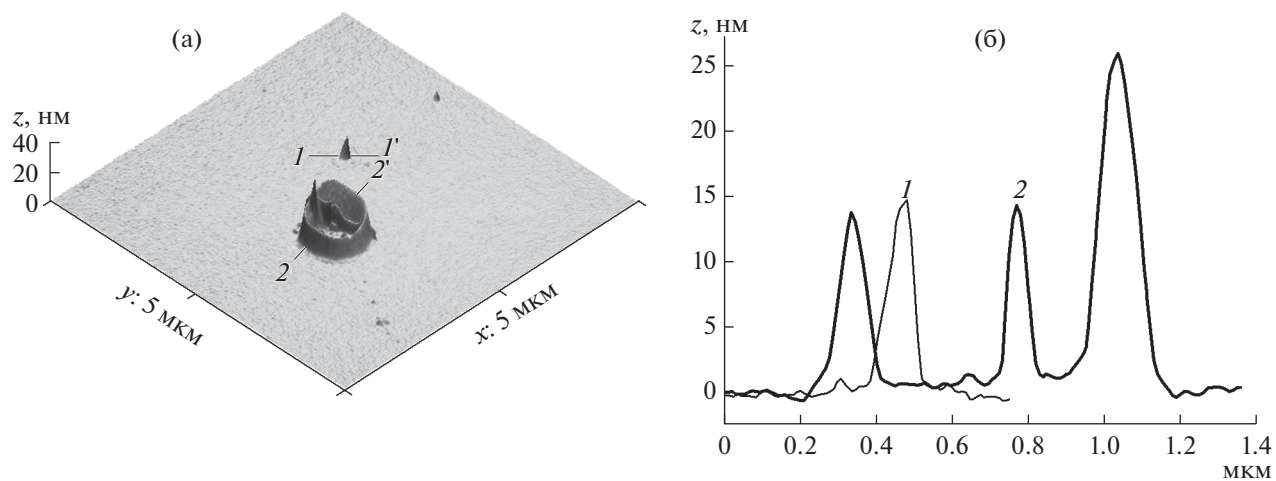


Рис. 4. АСМ-изображение фрагмента поверхности размером 5×5 мкм образца третьей группы с основанием разрушенного пузырька: а – 3D-изображение, б – сечения фрагмента вдоль линий 1–1' (1) и 2–2' (2).

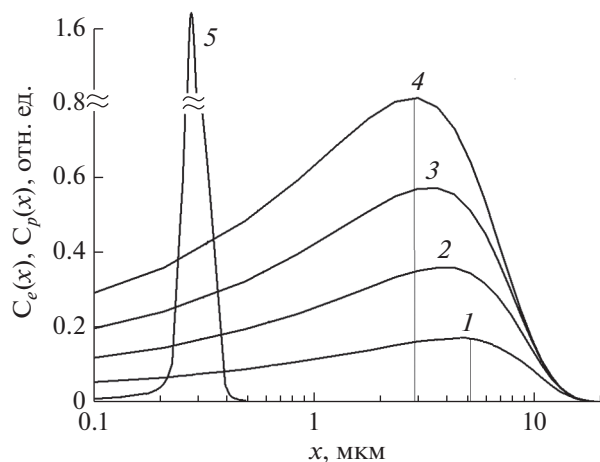


Рис. 5. Распределения инжектированных в стекло электронов (1–4) и протонов (5).

ментах времени облучения ($t_1 < t_2 < t_3 < t_4$), а распределение протонов – на момент времени t_1 . При $\phi_e > \phi_p$ результирующее электрическое поле над облучаемой поверхностью образца будет определяться полем накопленных в стекле электронов. Следовательно (как и в случае электронного облучения), это поле тормозит бомбардирующие образец электроны. В результате максимум распределения термализованных электронов смещается в сторону облучаемой поверхности, т.е. к области накопления инжектированных протонов. В этой же области увеличивается концентрация электронов, появившихся в процессе ионизации.

Совокупность перечисленных факторов приводит к росту вероятности рекомбинации протонов. В единицу времени образуется большее количество атомов Н, что приводит к более быстрому росту пузырьков. При этом расширение основания пузырька происходит медленнее, чем рост в высоту (в вакуум). Последнее может быть связано с тем, что тепловой контакт колпачка пузырька со стеклом ограничивается наличием газовой прослойки. Поэтому при облучении колпачок разогревается, его пластичность увеличивается, он растет под давлением накопленного газа, толщина его стенок уменьшается, и в результате происходит хрупкое разрушение колпачка пузырька.

Таблица 2. Максимальные размеры пузырьков

№ группы	h , нм	D , нм	Отношение $h : D$
1	30	470	0.06
2	95	700	0.136
3	140	500	0.28
4	196	400	0.49

Необходимо отметить, что на исследованных образцах в отличие от флекинга, наблюдаемого на металлах, нижняя часть разрушенных колпачков сохраняется и возвышается над поверхностью стекла до 40 нм. Анализ АСМ-изображений разрушенных колпачков показал, что их толщина у основания на образцах третьей и четвертой групп составляет около 200 и 100 нм соответственно, а в местах разрушения – от 10 до 20 нм. Таким образом, в процессе роста пузырька его колпачок вытягивается вверх, что и приводит к уменьшению его толщины и разрушению.

С дальнейшим увеличением плотности потока облучения до $\phi_e \approx 1.65 \times 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ в экспериментах стали наблюдаться электростатические разряды, образующие на поверхности стекла разрядные каналы глубиной до 1 нм (рис. 6). При этом на расстоянии более 1 мкм от разрядного канала на образцах обнаружены пузырьки высотой 120–180 нм и с диаметрами основания от 400–500 нм. А все пузырьки с диаметром основания выше 300 нм в области, охваченной разрядом, разрушены.

Анализ поверхностей образцов четвертой группы позволяет предположить, что электростатические разряды, протекающие в непосредственной близости от газонаполненных пузырьков, могут спровоцировать их разрушение. При этом диаметры оснований пузырьков, разрушенных на расстоянии не более 1 мкм от разрядных каналов, не превышают 400 нм. Таким образом, тенденция к увеличению отношения высоты пузырька к диаметру основания с ростом ϕ_e сохраняется и подтверждается при анализе образцов четвертой группы (рис. 6в). В табл. 2 приведены высоты h и диаметры оснований D пузырьков максимальных размеров, обнаруженных на исследованных образцах каждой группы.

Из представленных в табл. 2 данных следует, что вместе со значением величины ϕ_e растет и отношение $h : D$, поэтому колпачок пузырька под давлением накапливающегося газа вытягивается вверх, его стенка становится тоньше, что и приводит к разрушению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе пластины из стекла К-208 подвергались протонному и электронно-протонному воздействию. При АСМ-исследованиях установлены некоторые закономерности образования в приповерхностном облученном слое стекла газонаполненных пузырьков и их разрушения. Полученные результаты позволяют предположить, что

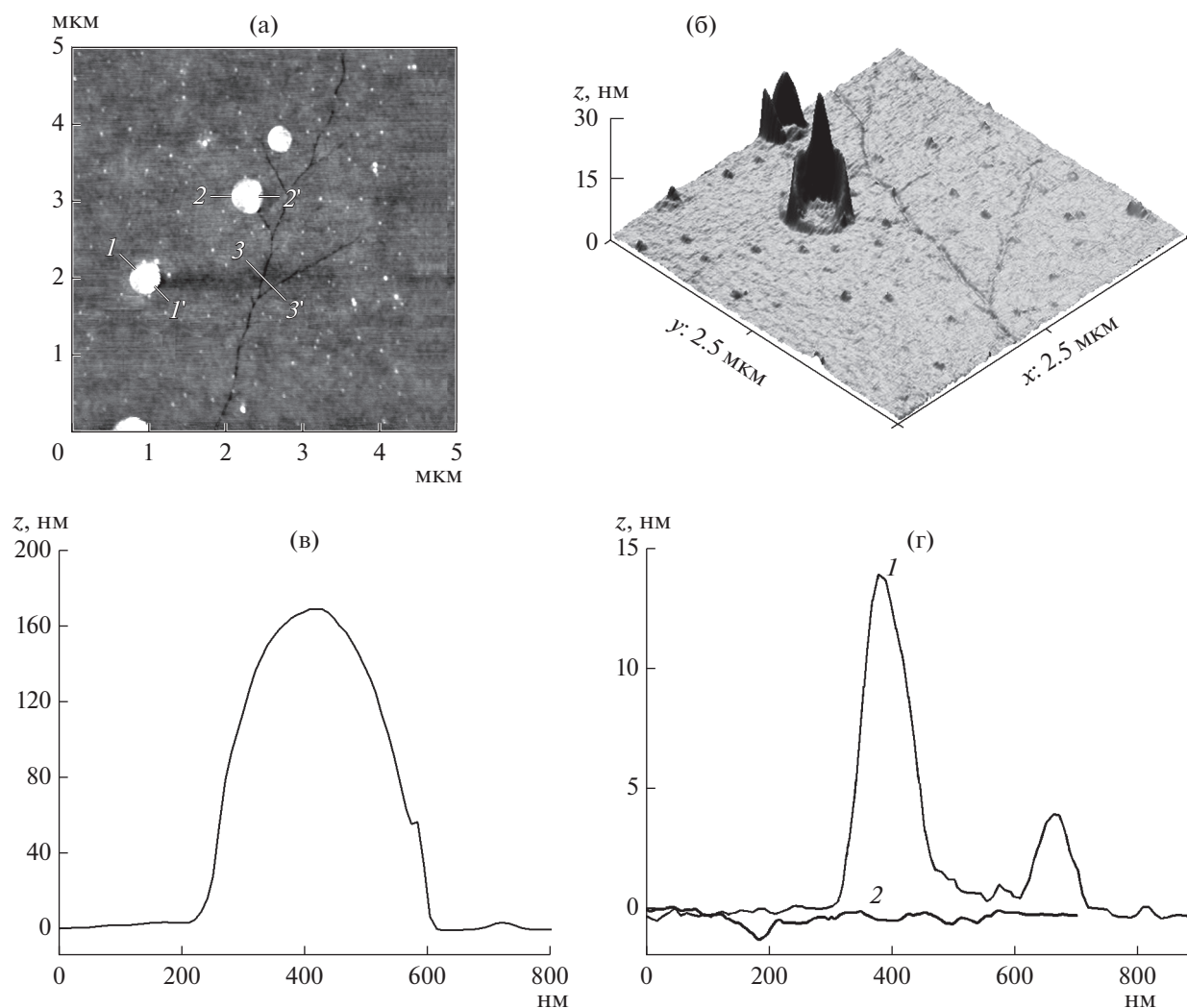


Рис. 6. АСМ-изображение фрагмента поверхности образца четвертой группы с основаниями разрушенных пузырьков: а и б – 2D- и 3D-изображения фрагментов 5×5 и 2.5×2.5 мкм соответственно, в и г – сечения фрагмента вдоль линий 1–1', 2–2' (1) и 3–3' (2).

пузырьки содержат водород, атомы которого появляются в результате рекомбинации протона с электронами, инжектированными в стекло, или появившимися в нем в процессе ионизации. Установлено, что с увеличением плотности потока электронов в единицу времени образуется большее количество атомов Н, что приводит к более быстрому росту пузырьков в нормальном направлении к облучаемой поверхности. При этом тепловой контакт колпачка пузырька со стеклом ограничивается наличием газовой прослойки. Поэтому при облучении колпачок разогревается, в результате роста под давлением накапливающегося газа толщина его стенок уменьшается, и происходит разрушение. Результаты экспериментов позволяют также предположить, что электростатические разряды, протекающие в непосред-

ственной близости от газонаполненных пузырьков, способствуют их разрушению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Daniels R.D. // J. Appl. Phys. 1971. V. 42. P. 417.
2. Condon J.B., Schober T. // J. Nucl. Mater. 1993. V. 207. P. 1.
3. Milcius D., Pranevicius L.L., Templier C. // J. Alloy. Compd. 2005. V. 398. P. 203.
4. Xie D.G., Wang Z.J., Sun J., Li J., Ma E., Shan Z.W. // Nat. Mater. 2015. V. 14. P. 899.
5. Sznajder M., Geppert U. // In: Macdonald M. (eds.) Advances in Solar Sailing. 2014. P. 559. Springer. Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-34907-2_35
6. Ferguson D.C., Wimberly S.C. The Best GEO Daytime Spacecraft Charging Index. // Proceed. 51st AIAA Aerospace Sci. Mtg. January, 2013. Grapevine, Texas.

- AIAA 2013-0810.
<https://doi.org/10.2514/6.2013-810>
7. *Messenger S.R., Wong F., Hoang B., Cress C.D., Walters R.J., Kleuver C.A., Jones G.* // IEEE Transaction on Nuclear Science. 2014. V. 61. № 6. P. 3348.
<https://doi.org/10.1109/TNS.2014.2364894>
 8. *Kazuhiro Toyoda, Teppei Okumura, Satoshi Hosoda, Mengu Cho.* // J. Spacecraft and Rockets. 2005. V. 42. № 5. P. 947.
<https://doi.org/10.2514/1.11602>
 9. *Ковивчак В.С., Панова Т.В.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2017. № 8. С. 59.
<https://doi.org/10.7868/S020735281708008X>
 10. *Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С., Применко Д.А.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2020. № 9. С. 47.
<https://doi.org/10.31857/S1028096020090113>
 11. *Ollier N., Boizot B., Reynard B., Ghaleb D., Petite G.* // J. Nuclear Materials. 2005. V. 340. P. 209.
 12. *Boizot B., Petite G., Ghaleb D., Reynard B., Calas G.* // J. Non-Cryst. Solids. 1999. V. 243. P. 268.
 13. *Boizot B., Petite G., Ghaleb D., Pellerin N., Fayon F., Reynard B., Calas G.* // Nucl. Instr. Meth. B. 2000. V. 166. P. 500.
[https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(99\)00787-9](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(99)00787-9)
 14. *Boizot B., Petite G., Ghaleb D., Calas G.* // J. Non-Cryst. Solids. 2001. V. 283. P. 179.
[https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(01\)00338-6](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(01)00338-6)
 15. *Sun K., Wang L.M., Ewing R.C., Weber W.J.* // Philos. Mag. 2005. V. 85. P. 597.
<https://doi.org/10.1080/02678370412331320080>
 16. *Chen L., Wang T.S., Zhang G.F., Yang K.J., Peng H.B., Zhang L.M.* // Chin. Phys. B. 2013. V. 22. P. 126101.
 17. *Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С.* // Перспективные материалы. 2020. № 11. С. 5.
<https://doi.org/10.30791/1028-978X-2020-11-5-14>
 18. *Colthup N.B., Daly L.H., Wiberley S.E.* Introduction to Infrared and Raman Spectroscopy / Colthup N.B., Daly L.H., Wiberley S.E. 3rd edition. I.: Academic Press, 1990. 547 p.
<https://doi.org/10.1016/C2009-0-21628-X>
 19. *Abbas A., Serruys Y., Ghaleb D. et al.* // Nucl. Instr. Meth. B. 2000. V. 166–167. P. 445.
[https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(99\)00695-3](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(99)00695-3)
 20. *Zhang G.F., Wang T.S., Yang K.J. et al.* // Nucl. Instr. Meth. B. 2013. V. 316. P. 218.
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2013.09.020>
 21. *Chen L., Zhang D.F., Lv P. et al.* // J. Non-Crystalline Solids. 2016. V. 448. P. 6.
<https://doi.org/10.1016/j.jnocrystol.2016.06.029>
 22. *Chen L., Wang T.S., Yang K.J. et al.* // Nucl. Instr. Meth. B. 2013. V. 307. P. 566.
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2013.01.089>
 23. *Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2018. № 11. С. 48.
<https://doi.org/10.1134/S0207352818110136>
 24. *Khasanshin R.H., Novikov L.S.* // IEEE Transactions on Plasma Science. 2019. V. 47. № 8. P. 3796.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2019.2916210>
 25. *Metzger H., Peisl J., Williams J.* // J. Physics F: Metal Physics. 1976. V. 6. № 12. P. 313.
<https://doi.org/10.1088/0305-4608/6/12/006>
 26. *Thomas G.J., Drotning W.D.* // Metallurgical Transactions A. 1983. V. 14. № 8. P. 1545.
<https://doi.org/10.1007/BF02654380>
 27. *Ren X., Chu W., Li J., Su J., Qiao L.* // Materials Chemistry and Physics. 2008. V. 107. № 2–3. P. 231.
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2007.07.004>

Formation and Destruction of Gas-Filled Bubbles in the Surface Layer of Glass under the Action of Electron-Proton Plasma

R. Kh. Khasanshin^{1, 2, *}, L. S. Novikov^{3, **}

¹JSC “Kompozit”, 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

**e-mail: novikov@sinp.msu.ru

The influence of electron-proton irradiation on the process of changing the surface structure of K-208 glass caused by the formation of gas-filled bubbles and their destruction has been studied by atomic force microscopy (AFM). These phenomena are associated with the formation of hydrogen atoms H in the process of recombination of protons with electrons injected into the glass and appeared in it during ionization. The migration of hydrogen atoms and their aggregation into H-clusters in the vicinity of glass structure defects leads to the formation of molecular hydrogen (H₂) bubbles. The glass was exposed to electrons and protons with energies of 40 and 20 keV, respectively. Irradiation was carried out in a vacuum of 10⁻⁴ Pa. At a fixed value of the proton flux density $\varphi_p = 5.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, the electron flux density φ_e varied in the range $(0-16.8) \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. It is shown that the size of the bubbles depends on the ratio of the parameters φ_e and φ_p . Analysis of the experimental data suggests that the destruction of a bubble occurs with a local decrease in the thickness of its cap to 10–20 nm, as a result of heating and growth in the direction normal to the surface under the pressure of the accumulating gas. It was also found that electrostatic discharges developing along the irradiated glass surface stimulate the destruction of bubbles.

Keywords: electron-proton irradiation, K-208 glass, molecular hydrogen, gas-filled bubbles, atomic force microscopy, surface structure, recombination, molecular hydrogen, electrostatic discharge.