XXV межвузовская молодежная научная школа-конференция имени Б.С. Ишханова: Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине. Секция «Воздействие ионизирующих излучений на материалы и космическую технику»

Расчет поля инжектированных в стекло К-208 протонов

И. С. Кузнецов*
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет) факультет «Фундаментальные науки», кафедра физики Россия, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, с. 1
(Поступила в редакцию 07.04.2025; подписана в печать 14.04.2025)

Результаты АСМ-исследования поверхностей защитных стекол солнечных батарей космических аппаратов до и после воздействия протонов с энергиями 20 и 30 кэВ, характерными для горячей магнитосферной плазмы (ГМП), показали, что в приповерхностном слое стекла образуются газонаполненные пузырьки, а также микротрещины в случае, когда энергия протонов составляет 30 кэВ. Образование микротрещин стимулируется выходом на облучаемую поверхность перколяционных каналов ионов натрия вследствие полевой миграции ионов натрия в поле инжектированных в стекло протонов. В настоящей работе проведено моделирование прохождения протонного излучения сквозь стекло К-208 с энергиями 20 и 30 кэВ при помощи пакета Geant4. Установлено, что глубины, соответствующие пиковым концентрациям инжектированных в стекло К-208 протонов, составляют 190 и 270 нм соответственно, причем подавляющее количество протонов оседает в тонком слое около этих глубин. Для протонов с указанными энергиями в работе также представлены кривые энерговыделения, обусловленного в основном ионизационными потерями энергии протонов, которые снижаются вместе с энергией частиц. На основании данных по распределению термализованных протонов, полученных с помощью Geant4, рассчитывается электрическое поле внутри стекла в случаях, когда образец находится на диэлектрической подложке и на заземленной металлической подложке.

PACS: 61.80.-x УДК: 613.648.2
Ключевые слова: облучение, стекло К-208, инжектированный заряд, электрическое поле, полевая миграция ионов, атомно-силовая микроскопия, газонаполненные пузырьки.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях космического пространства на материалы внешних поверхностей высокоорбитальных космических аппаратов в основном воздействуют следующие повреждающие факторы: ультрафиолетовое излучение; потоки горячей магнитосферной плазмы (ГМП); частицы солнечных и галактических космических лучей [1, 2]. Основными компонентами ГМП являются электроны и протоны. Воздействие ГМП на диэлектрические материалы помимо радиационных повреждений приводит к накоплению инжектированного заряда. Поле, индуцированное таким зарядом, взаимодействует с окружающей плазмой, изменяя пространственно-энергетическое распределение составляющих ее частиц. Такое поле влияет также на процессы, протекающие в облучаемом материале. В частности в стекле К-208, которое используется в качестве защитного покрытия фотоэлементов солнечных батарей, в поле инжектированного заряда происходит перераспределение ионов натрия и калия [3–5]. Полевая миграция ионов Na^+ и K^+ влечет за собой перестройку микроструктуры стекла [6–9] и приводит к образованию перколяционных каналов. В стекле локальную нейтрализацию заряда вокруг ионов Na^+ и K^+ обеспечивают немостиковые атомы кислорода. После того как ионы щелочных металлов покидают места локализации, происходит высвобождение атомов немостикового кислорода, которые после некоторой миграции скапливаются в окрестности дефектов стекла и образуют пузырьки молекулярного кислорода [10–13].

Для прогнозирования изменения функциональных свойств материалов в условиях эксплуатации высокоорбитальных космических аппаратов следует более детально изучить процессы происходящих в материалах внешних покрытий под действием ГМП, а это в свою очередь требует подробно исследовать процессы, протекающие под действием отдельных ее компонентов. Если влияние электронного облучения стекол содержащих ионы щелочных металлов изучено достаточно подробно [14, 15], то результаты протонного облучения и их анализ требует дополнительных исследований. При наземных испытаниях материалов всегда остро стоит вопрос выбора эффективной энергии частиц при моделировании условия космоса.

* kis20f089@student.bmstu.ru

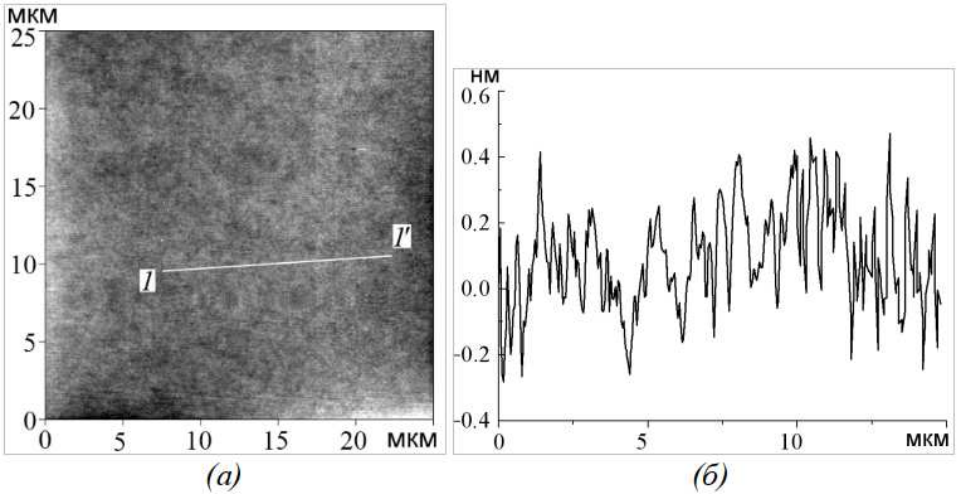

Рис. 1. АСМ-изображение исходного образца: *а* — 2D-изображение фрагмента поверхности; *б* — сечение фрагмента вдоль линии 1–1'

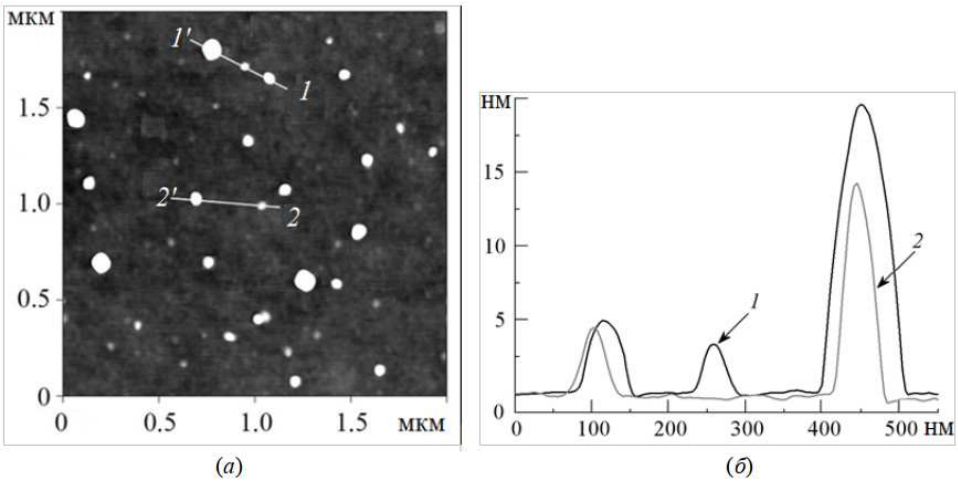

Рис. 2. АСМ-изображение образца облученного флюенсом 3.2×10^{15} см$^{-2}$ (E = 20 кэВ): *а* — 2D-изображение фрагмента поверхности; *б* — сечения фрагмента вдоль линий 1–1' (1), и 2–2' (2)

В настоящей работе моделируется процесс облучения пластин стекла К-208 протонами с энергиями, характерными для ГМП, а именно 20 и 30 кэВ, при помощи пакета Geant4, использующего для вычислений метод Монте-Карло. Для указанных энергий протонного излучения определяются глубины прохождения, строится график концентрации инжектированных протонов в образце, приводятся кривые энерговыделения. После этого с учетом характера оседания протонов в стекле К-208 рассчитывается электрическое поле инжектированных протонов внутри образца для двух случаев: когда исследуемый образец находится на диэлектрической подложке и на заземленной металлической подложке.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для сравнительного анализа изменений морфологии поверхностей образцов стекол на рис. 1 приводится АСМ-изображение исходного образца. Из рис. 1 видно, что шероховатость поверхности К-208 не превышает (см. рис. 1, *б*) 1 нм. Исследуемые пластины получают вытягиванием через валки из расплава стекла К-208, далее нарезают по размерам и отжигают. Такие пластины удобно использовать в качестве модельного стекла для исследования радиационно-стимулированных изменений структуры поверхности.

На рис. 2 и 3 представлены АСМ-изображения образцов облученных протонами с энергиями 20 и 30 кэВ соответственно. Изображение рис. 2 демонстрирует появление газонаполненных пузырьков в приповерхностном слое облученного образца.

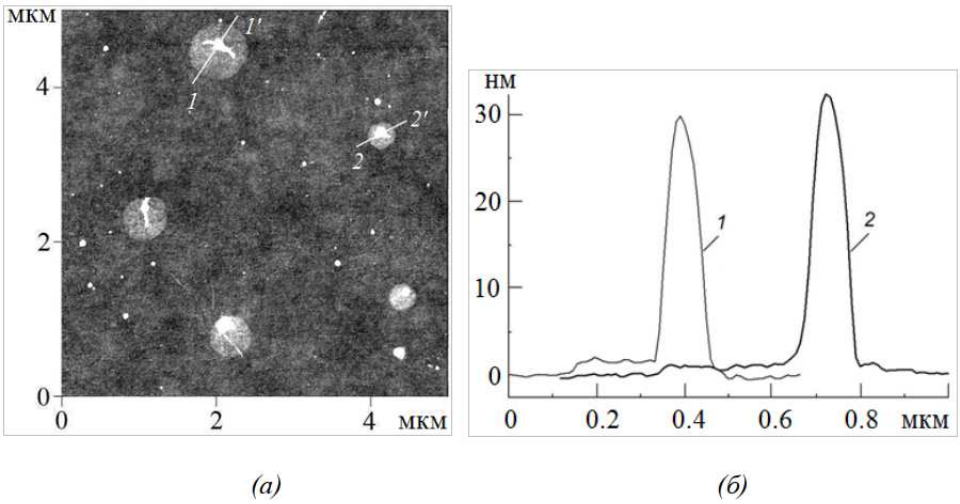

Рис. 3. АСМ-изображение образца облученного флюенсом 3.2×10^{15} см$^{-2}$ ($E = 30$ кэВ): *а* — 2D-изображение фрагмента поверхности; *б* — сечения фрагмента вдоль линий 1–1' (1), и 2–2' (2)

При облучении протонами с энергией 30 кэВ на поверхности образца помимо пузырьков молекулярного водорода образуются микротрещины и микровыступы, обусловленные выходом перколяционных каналов натрия на облучаемую поверхность. Часто выход перколяционных каналов на облучаемую поверхность стимулирует образование микротрещин. Так, на рис. 3 показано, что в центре микротрещин имеются микровыступы, образованные при перколяции ионов натрия в поле инжектированного заряда.

Формирование микротрещин на облучаемой поверхности стекла обусловлено механическими напряжениями, появляющимися из-за изменения плотности облучаемого слоя стекла [16] и неравномерности распределения выделенной протонами энергии по его толщине. В работе [17] показано, что облучение пластин стекла К-208 протонами с энергией $E_p = 30$ кэВ при плотности потока частиц $\phi_p = 4.5 \times 10^{10}$ см$^{-2}$с$^{-1}$ и изменении значений флюенса в диапазоне $\Phi_p = 1.1 \times 10^{15} - 6.6 \times 10^{15}$ см$^{-2}$ приводит к появлению на поверхности образцов газонаполненных пузырьков и микротрещин, линейные размеры которых растут с увеличением флюенса. При облучении аналогичных образцов протонами с $E_p = 20$ кэВ при прочих равных условиях облучения образования микротрещин не наблюдалось.

Для определения влияния поля инжектированного в стекло заряда на наблюдаемые процессы облучение пластин стекла К-208 проводилось как на металлической, так и на стеклянной подложке толщиной 35 мм. Предполагалось, что поле наведенного на металлической подложке заряда должно экранировать поле термализованных в стекле протонов, которое в свою очередь определяет интенсивность перераспределения в образце ионов натрия.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ПРОТОНОВ СКВОЗЬ СТЕКЛО К-208

Защитное стекло солнечных батарей К-208 имеет следующий химический состав (мол. %): SiO_2 (69.49); B_2O_3 (11.93); Al_2O_3 (4.00); K_2O (4.25); Na_2O (10.33); CeO_2 (2.00). Характерные размеры пластины такого стекла составляют $30 \times 30 \times 0.16$ мм. Воздействие протонного излучения с энергиями 20 и 30 кэВ на образец с такими характеристиками моделировалось в программе Geant4, вычисления в которой производятся на основе метода Монте–Карло и формул квантовой теории поля.

По результатам прохождения 10^8 протонов (плотность потока протонов на геостационарной составляет около 10^8 см$^{-2}$с$^{-1}$ [1]) сквозь стекло были построены распределения концентрации инжектированных протонов по толщине образца. Кроме того, были построены также кривые энерговыделения в пересчете на 1 протон. На рис. 4, *а*, *б* представлены график концентрации в относительных единицах и график энергопотери в пересчете на протон (кэВ мкм$^{-1}$ протон$^{-1}$) для протонов с энергией 20 кэВ, а на рис. 5, *а*, *б* — для протонов с энергией 30 кэВ.

Из представленных графиков можно видеть, что глубины проникновения для протонов с энергиями 20 и 30 кэВ составляют примерно 350 и 500 нм соответственно. А пиковые значения концентрации термализованных протонов приходятся на глубины 190 и 270 нм. При этом основная масса протонов собирается в достаточно тонком слое около глубины, соответствующей пиковой концентрации инжектированных протонов.

Линейные потери энергии низкоэнергетическими протонами максимальны в самом начале движения сквозь стекло К-208, а по мере движения падают, что связано с уменьшением энергии протонов. В случае стекла К-208 тормозная способность имеет максимум

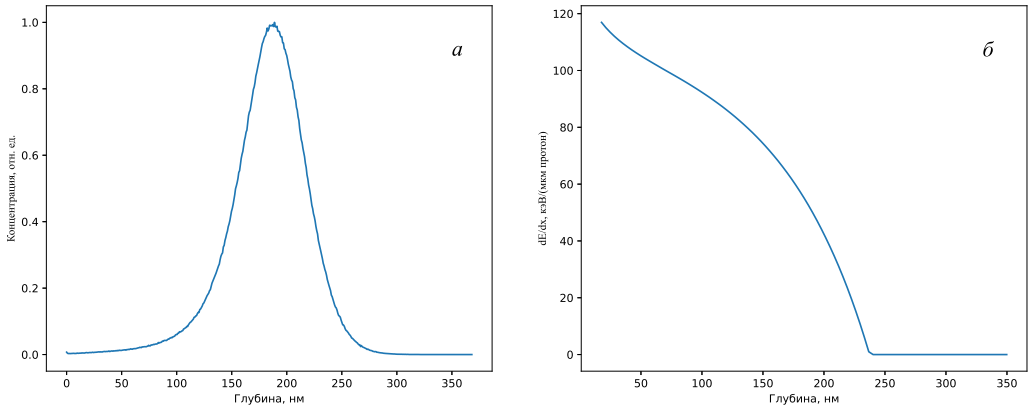

Рис. 4. Графики для протонов с энергией 20 кэВ: *а* — график концентрации, пик концентрации наблюдается на глубине 190 нм; *б* — график энерговыделения

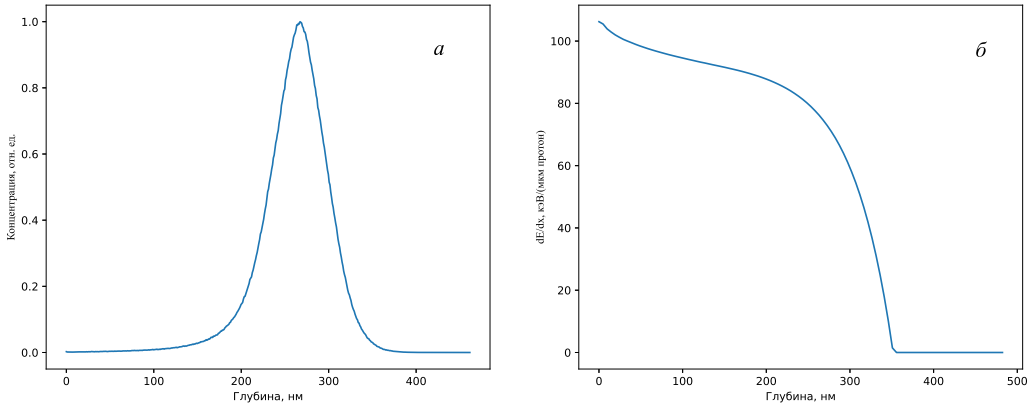

Рис. 5. Графики для протонов с энергией 30 кэВ: *а* — график концентрации, пик концентрации наблюдается на глубине 270 нм; *б* — график энерговыделения

при значении энергии протонов около 100 кэВ. Известно, что при взаимодействии протонов указанных значений энергии с веществом основным каналом энергетических потерь является ионизационное торможение, что и подтвердили расчеты в Geant4. Следовательно, процесс термализации протонов хорошо описывается формулой Бете-Блоха.

3. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ИНЖЕКТИРОВАННЫХ В СТЕКЛО ПРОТОНОВ

В данном разделе вычисляется электрическое поле инжектированных в стекло K-208 протонов в двух возможных случаях — при нахождении образца на диэлектрической подложке и на заземленной металлической подложке. Основное отличие этих двух случаев заключается в том, что на металлической заземленной подложке при облучении образца протонами возникает отрицательный поверхностный электрический заряд, который вносит свой вклад в результирующее поле внутри стекла.

Начнем с наиболее простой ситуации, когда образец располагается на диэлектрической подложке. Тогда электрическое поле внутри стекла создается только термализованными протонами. Как было отмечено в предыдущем разделе, основная часть протонов с начальными энергиями 20 и 30 кэВ оседает в тонком слое около глубины, соответствующей пиковому значению концентрации. В таком случае в нашей задаче мы можем моделировать электрическое поле инжектированных протонов как поле квадратной пластины с размерами 30×30 мм. Пусть имеется флюенс (количество протонов на единицу площади) равномерно распределенного по площади стекла протонного излучения Φ, установившийся за некоторое время Δt. Так что поверхностная плотность заряда модельной «пластины»

$$\sigma = e\Phi, \tag{1}$$

где e — элементарный электрический заряд.

Расположим систему координат в центре пластины. Оси Ox и Oy образуют плоскость, параллельную этой пластине, а ось Oz перпендикулярна ей. С учетом (1), $dq = e\Phi dxdy$. Половину стороны квадрата обозначим

a. В произвольной точке с координатой $\mathbf{r} = (x, y, z)$ проекция электрического поля на перпендикулярное к пластине направление может быть рассчитана следующим образом:

$$E_z(z) = \pm ek\Phi|z| \int\limits_{-a}^{a} dy' \int\limits_{-a}^{a} \frac{dx'}{\left[(x'-x)^2 + (y'-y)^2 + z^2\right]^{\frac{3}{2}}}, \tag{2}$$

где знак перед интегралом зависит от направления вектора электрической напряженности относительно оси Oz, k — электрическая постоянная.

В общем случае этот интеграл необходимо рассчитывать численно, но в частном случае, когда мы рассматриваем электрическое поле на оси пластины, то есть $\mathbf{r}_0 = (0, 0, z)$, возможно нахождение интеграла аналитически, если перейти к полярным координатам. Для этого разобьем квадратную пластину на 8 равных частей, образованных линиями, проходящими через центр квадрата. Возьмем интеграл (2) по одной из 8 частей, перейдя к полярным координатам. Пределы интегрирования по радиальной переменной $\varphi \in [0, \pi/4]$, а по радиальной переменной $r \in [0, a/\cos\varphi]$. Поэтому получаем

$$E_z(z) = \pm 8ek\Phi|z| \int\limits_{0}^{\pi/4} d\varphi \int\limits_{0}^{a/\cos\varphi} \frac{rdr}{\left[r^2 + z^2\right]^{\frac{3}{2}}}.$$

В итоге приходим к аналитическому выражению для напряженности электрического поля на оси пластины:

$$E_z(z) = \pm 2ek\Phi\left(\pi - 4\arcsin\frac{|z|}{\sqrt{2(z^2+a^2)}}\right). \tag{3}$$

Оно имеет следующие асимптотики. Предел при $z \to 0$

$$\lim_{z\to 0} E_z = \pm 2\pi ek\Phi = \pm\frac{\sigma}{2\varepsilon\varepsilon_0}, \tag{4}$$

что является значением напряженности электрического поля, создаваемого бесконечной заряженной пластиной. При условии, что расстояние до пластины много меньше, чем размеры пластины $z \ll a$ напряженность поля в первом приближении является линейной:

$$E_z(z) \approx \pm 2ek\Phi\left(\pi - \frac{\sqrt{8}}{a}|z|\right). \tag{5}$$

На бесконечности напряженность стремится к нулю, так как

$$\lim_{z\to\infty} \arcsin\frac{z}{\sqrt{2(z^2+a^2)}} = \frac{\pi}{4}.$$

Пусть происходит облучение стекла К-208 протонами с энергией 30 кэВ. Глубина, соответствующая максимальной концентрации, $d = 270$ нм. Тогда при глубинах $z > d$ (в данном случае $z = 0$ соответствует облучаемой поверхности, и ось Oz направлена вглубь стекла) проекция напряженности электрического поля в безразмерных единицах внутри стекла, то есть на глубинах, меньших 160 мкм, изображена на рис. 6, *а*. Так как толщина стекла мала, поле подчиняется линейному закону (5). Слева от d поле будет примерно соответствовать полю бесконечной заряженной пластины (4) с отрицательным знаком.

В случае, когда образец лежит на металлической заземленной пластине, эта пластина приобретает отрицательный заряд и вносит свой вклад в значение электрического поля в стекле. Будем рассчитывать поле в этом случае с помощью метода зеркальных изображений. Пусть глубина, соответствующая пику концентрации протонов, d, а толщина образца H. Тогда поле, создаваемое металлической подложкой, в рамках метода зеркальных изображений такое же, какое создавалось бы отрицательно заряженной пластиной с поверхностной плотностью заряда $\sigma_- = -e\Phi$, располагающейся на расстоянии $2(H - d)$ от глубины пиковой концентрации d, то есть в точке с координатой $z_2 = 2H - d$.

На глубинах $d < z < z_2$ поле металлической подложки (E_z^-) имеет положительную проекцию на ось z и усиливает поле инжектированных протонов (E_z^+). С учетом найденного выражения (3) на оси результирующее поле будет

$$E_z = E_z^+ + E_z^- = 2ek\Phi\left[2\pi - 4\left(\arcsin\frac{|z-d|}{\sqrt{2((z-d)^2+a^2)}} + \arcsin\frac{|z-z_2|}{\sqrt{2((z-z_2)^2+a^2)}}\right)\right].$$

График проекции поля (в безразмерных величинах) справа от глубины d представлен на рис. 6 *б*. Фактически, можно сказать, что плоскость, соответствующая глубине пиковой концентрации термализованных протонов, и металлическая пластина образуют конденсатор с примерно равными плотностями заряда, и электрическое поле на оси такого «конденсатора» практически однородное (с точностью до 6 знака).

Проекция же электрического поля на ось Oz на глубинах $z < d$ складывается из отрицательной проекции поля инжектированных протонов и положительной проекции поля металлической подложки:

$$E_z = E_z^+ + E_z^- = 8ek\Phi\left(\arcsin\frac{|z-z_2|}{\sqrt{2((z-z_2)^2+a^2)}} - \arcsin\frac{|z-d|}{\sqrt{2((z-d)^2+a^2)}}\right).$$

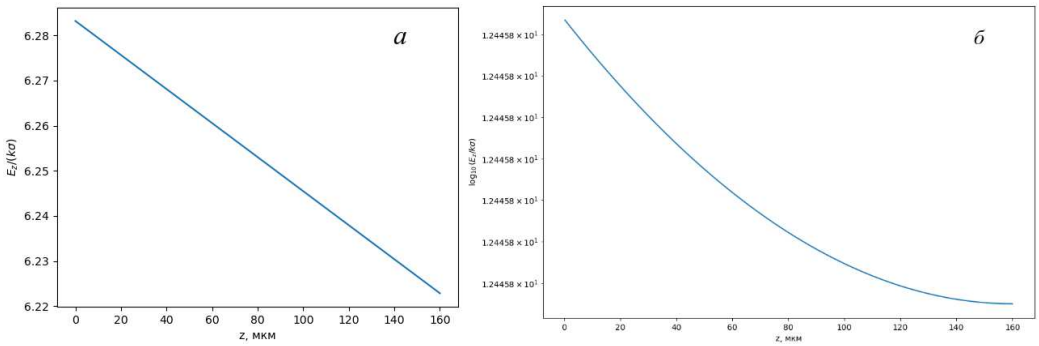

Рис. 6. Проекция напряженности электрического поля в безразмерных единицах справа от глубины проникновения инжектированных протонов с энергией 30 кэВ в стекле толщиной 160 мкм в зависимости от глубины z. *а* — проекция напряженности в случае диэлектрической подложки; *б* — проекция напряженности в случае металлической подложки

Электрическое поле между облучаемой поверхностью стекла и глубиной проникновения протонов в стекло К-208, как следует из расчетов, является постоянным по величине.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе был промоделирован процесс облучения протонами с энергиями 20 и 30 кэВ пластин стекла К-208, используемых в качестве защитного покрытия солнечных батарей. Показано, что при этом на глубинах 190 и 270 нм, соответственно, формируется узкий пик концентрации термализованных протонов. Ввиду этого обстоятельства электрическое поле внутри стеклянного образца можно оценить, используя модель однородно заряженной квадратной пластины. Для проекции напряженности электрического поля на оси образца в таком случае возможно аналитическое решение. Далее рассмотрены два возможных экспериментальных случая — нахождение образца на диэлектрической и на заземленной металлической подложке. В последнем случае расчет используется методом зеркальных изображений. При толщине стекла 160 мкм электрическое поле между плоскостью, соответствующей глубине проникновения, и между металлической заземленной пластиной является практически однородным, а вне этой области стекла поле наведенного на металлической подложке заряда экранирует поле термализованных в стекле протонов.

[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. **271**. 188 (2013).

[2] Model of Space Environment, ed. by *L.S. Novikov*. Iss. 8, in 2 volumes. M.: Moscow State University Publishing House. 2007.

[3] *Ollier N., Charpentier T., Boizot B., Petite G.* // J. Phys. Condens. Matter. **16**. 7625 (2004).

[4] *Boizot B., Petite G., Ghaleb D., Calas G.* // J. Non-Cryst. Solids. **283**. 179 (2001).

[5] *Boizot B., Petite G., Ghaleb D.* et al. // Nucl. Instr. Meth. B. **166-167**. 500 (2000).

[6] *Sergeev,P.M.* et. al. // Optich. Jurn. **71**, № 6. 93 (2004).

[7] *Glebov L.B., Dokuchaev V.G., Petrovsky G.T.* // Fiz. i khim. stekl. **11**, № 1. 79 (1985).

[8] *Glebov L.B., Dokuchaev V.G., Petrov M.A., Petrovsky G.T.* // Fiz. i khim. stekl. 1990. **16**, N 1. 39

[9] *Arbuzov V.I., Tolstoy M.N., Elerts M.A.* // Izv. AN SSSR. Ser. Fiz. **50**, N 3. 126 (1986).

[10] *Abbas A., Serruys Y., Ghaleb D.* et al. // Nucl. Instr. Meth. B. **166–167**. 445 (2000).

[11] *Zhang G.F., Wang T.S., Yang K.J.* et al. // Nucl. Instr. Meth. B. **316**. 218 (2013).

[12] *Chen L., Zhang D.F., Lv P.* et al. // Journal of Non–Crystalline Solids. **448**. 6 (2016).

[13] *Chen L., Wang T.S., Yang K.J.* et al. // Nucl. Instr. Meth. B **307**. 566 (2013).

[14] *Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С., Гаценко Л.С., Волкова Я.Б.* // Перспективные материалы. № 1, 22 (2015).

[15] *Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С., Коровин С.Б.* // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. № 10. 14 (2016).

[16] *Tadea Gavenda, Ondrej Gedeon, Karel Jurek.* // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. **322** 7 (2014).

[17] *Хасаншин Р. Х., Новиков Л.С., Применко Д.А.* // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. №‘9. 47 (2020).

The effect of proton radiation on K-208 glass

I. S. Kuznetsov

Bauman Moscow State Technical University (National Research University),
Faculty of Fundamental Sciences, Department of Physics
Moscow, 105005, Russia
E-mail: kis20f089@student.bmstu.ru

As a result of the experimental study of the effect of protons with energies of 20 and 30 keV, typical for hot magnetospheric plasma (HMP), on the protective glass for K-208 solar batteries, carried out using an atomic force microscope, it was found that gas-filled bubbles and microcracks are formed in the glass in the case when the proton energy is 30 keV. The initial hypothesis is that the specified structural changes occur due to the field migration of sodium ions in the field of protons injected into the glass. In this paper, the passage of proton radiation with energies of 20 and 30 keV is simulated using the Geant4 package. It was found that the depths corresponding to the peak concentrations of protons injected into the K-208 glass are 240 and 350 nm, respectively, and the overwhelming majority of protons settle in a thin layer near these depths. The paper also presents the energy release curves for protons with the specified energies. It has been established that the main mechanism of energy loss by protons is ionization braking, which occurs intensively from the very beginning of proton movement through glass. Based on the results obtained using Geant4, the electric field inside the glass is calculated in cases where the sample is on a dielectric substrate and on a grounded metal substrate.

PACS: 61.80.-x.
Keywords: irradiation, K-208 glass, injected charge, electric field, field migration of ions, atomic force microscopy, gas-filled bubbles.
Received 07 April 2025.

Сведения об авторе

Кузнецов Иван Сергеевич — студент кафедры ФН-4 «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана;
e-mail: kis20f089@student.bmstu.ru.