

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАТРИЯ В ОБЛУЧЕННОМ ПРОТОНАМИ СЛОЕ ЗАЩИТНОГО СТЕКЛА СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

И.С. Кузнецов

kuznetsovis1@student.bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Для интерпретации экспериментальных результатов облучения стекла, содержащего оксиды натрия и калия, протонами с энергией 40 кэВ предлагается модель, описывающая процесс полевой миграции ионов натрия, который играет ключевую роль в перестройке микроструктуры стекла. С помощью просвечивающего/растрового электронного микроскопа (П/РЭМ) TITAN 80-300 проведены измерения концентрации натрия в приповерхностных слоях стекла, которые подвергались воздействию протонов. Результаты измерений и расчетов показали, что в результате миграции в поле инжектированного в стекло заряда ионы натрия мигрируют из зоны максимума распределения термализованных протонов к облучаемой поверхности стекла. Для рассмотрения процесса перераспределения ионов натрия в стекле предложено использовать математическую модель дрейфово-диффузионной задачи. Она решается в приповерхностной области облучаемого протонами стеклянного образца до момента установления равенства дрейфового и диффузионного потоков. Полученные результаты моделирования показывают, что равенство потоков в рассматриваемых условиях достигается через промежуток времени, равный приблизительно полутора часам. При этом равновесная концентрация ионов натрия у внешней поверхности облучаемого образца прямо пропорциональна индуцированному излучением электрическому полю внутри образца.

Ключевые слова: облучение, стекло К-208, инжектированный заряд, полевая миграция ионов, атомно-силовая микроскопия, газонаполненные пузырьки

Введение. Необходимость исследований взаимодействия заряженных частиц со стеклами обусловлена все более широким их применением в условиях больших дозовых нагрузок, что влечет за собой необходимость решения большого числа научных и прикладных задач. Такие задачи могут быть связаны либо с применением пучков заряженных частиц для модификации облученного слоя стекол [1, 2], либо с их использованием в условиях, в которых на них воздействуют заряженные частицы, например, на искусственных спутниках Земли (ИСЗ) [3, 4].

Радиационно-стимулированные повреждения могут изменить функциональные свойства стекла, например, привести к накоплению радиационных центров окраски [5–8] и к изменению плотности материала в облучаемом слое стекла [9–11]. Понимание радиационных эффектов, приводящих к мик-

роструктурной эволюции материала, имеет решающее значение для прогнозирования его характеристик после длительного облучения, что, например, очень актуально для материалов, используемых на внешних поверхностях ИСЗ. Так, покровные стекла солнечных батарей высокоорбитальных ИСЗ подвергаются воздействию горячей магнитосферной плазмы (ГМП), основными компонентами которой служат электроны и протоны средних энергий [3]. При определенных условиях действие ГМП на такие стекла приводит к электростатическим разрядам (ЭСР) [12–17], создающим электромагнитные помехи для работы бортовой аппаратуры, что приводит к деградации материала, выбросу в окружающее пространство плазменных струй и т. д.

Результаты многочисленных исследований показали, что облучение стекол сопровождаются сложными взаимосвязанными процессами: накопление объемного заряда, индуцирующего электрическое поле большой напряженности; дрейф и релаксация зарядов; полевая миграция входящих в состав стекла ионов щелочных металлов [18–20]; образование газонаполненных пузырей [21–24] и др.

Сравнительные исследования радиационных эффектов, вызванных воздействием отдельных компонент ГМП, могут дать полезную и более детальную информацию о механизмах, обуславливающих эффекты при их совместном воздействии. Исторически сложилось так, что в различных научных лабораториях мира процессы, протекающие при электронном облучении стекол, более широко изучены, чем процессы, сопровождающие протонное их облучение.

Цель данной работы состояла в том, чтобы исследовать перераспределение натрия в облучаемом протонами с энергией 40 кэВ приповерхностном слое стекла.

Для достижения поставленной цели образцы стекла К-208, используемого в качестве защитного покрытия солнечных батарей космических аппаратов, подвергали воздействию разных флюенсов протонного излучения и измеряли распределения концентрации натрия в облучаемом слое образцов. Для интерпретации полученных результатов предложена математическая модель и проведен сравнительный анализ полученных результатов.

Методика эксперимента. Образцы, представляющие собой пластины размерами 30×30×0,20 мм, были изготовлены из одной партии стекла К-208 во избежание различия в химическом составе. Пластины прикрепляли к полированной поверхности металлического столика, термостатированного при температуре 20 ± 1 °С, и облучали при давлении 10^{-4} Па в вакуумной камере испытательного стенда УВ-1/2 ОАО «Композит» протонами с энергией 40 кэВ. Исследуемое стекло К-208 имеет следующий 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 сверх 100 %.

Для проведения экспериментов образцы распределили на три группы. Образцы первой группы оставались в исходном состоянии, а пластины второй и третьей группы подвергались протонному облучению флюенсами $8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ и $5.0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ соответственно. Плотность потоков протонов составляла $5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Изменения состава облученного слоя стекла контролировали на специально изготовленных образцах в микроскопе П/РЭМ TITAN 80-300 (Thermo Fisher Scientific, США) с корректором сферической аберрации зонда в режимах светлого и темного поля.

Математическая модель. Предположив, что одной из основных причин структурных изменений стекла, наблюдаемых в экспериментах, является перераспределение в нем натрия, проведем численный анализ этого процесса в облучаемом протонами образце. Пространственно-временные распределения ионов, потенциала и напряженности электрического поля можно оценить, решив соответствующую краевую задачу для системы, объединяющей дрейфово-диффузионное уравнение, которое описывает изменение концентрации ионов Na^+ в стекле под действием индуцированного термализованными протонами поля, и уравнение Пуассона. При этом носителями положительного заряда являются инжектированные протоны и подвижные ионы Na^+ , а влиянием зарядов, связанным с немостиковыми атомами кислорода, в рамках данной модели можно пренебречь.

Толщина образцов ($L = 200 \text{ мкм}$) в 150 раз меньше остальных линейных размеров, поэтому для описания изменения в стекле концентраций ионов натрия $C(x, t)$ можно рассматривать одномерную краевую задачу, описываемую уравнениями полевой миграции. Таким образом, для анализа перераспределения ионов натрия в приповерхностном слое стекла (для расчетов принимали толщину $l = 400 \text{ нм}$) предлагается следующая математическая модель, объединяющая одномерную дрейфово-диффузионную задачу с краевыми условиями 3-го рода и уравнение Пуассона:

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x, t)}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial}{\partial x} [E(x)C(x, t)]. \quad (1)$$

Здесь D — коэффициент диффузии ионов натрия в стекле. Его значение в расчетах принимают равным $D = 10 \text{ нм}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; μ — подвижность ионов натрия, которая оценивается с помощью модифицированного соотношения

Нернста — Эйнштейна $\mu(x,t) = \frac{D(x,t)e}{HkT}$; H — постоянная Хавена (для стекла $H \approx 0,3$) [25]; $E(x)$ — напряженность индуцированного термализованными протонами электрического поля, которая получается при решении уравнения Пуассона

$$\frac{\partial^2 \varphi(x,t)}{\partial x^2} = -\frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} S_p(x,t), \quad (2)$$

где $S_p(x,t)$ — распределение термализованных протонов в стекле, которое рассчитывается методом Монте-Карло; $\varepsilon(x)$ — относительная диэлектрическая проницаемость стекла; ε_0 — электрическая постоянная.

Согласно [25], были выбраны следующие значения для подвижности и начальной концентрации: $\mu = 1,5 \cdot 10^3 \text{ нм}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, $C_0 = 9,5 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$.

Из вида уравнения (1) следует, что плотность потока ионов Na^+ через сечение, проведенное в точке x параллельно границе «образец — вакуум», в произвольный момент времени t состоит из двух компонент:

$$W(x,t) = W_D(x,t) + W_\mu(x,t), \quad (3)$$

где $W_D(x,t) = -D(x,t) \frac{\partial C(x,t)}{\partial x}$ — плотность диффузионного (градиентного) потока; $W_\mu(x,t) = \mu E(x,t) C(x,t)$ — плотность дрейфового потока.

В качестве дополнительных условий, выделяющих единственное решение системы уравнений (1), (2), рассматривали разные соотношения, в том числе начальное и граничные условия следующего вида:

$$C(x,t)|_{t=0} = C_0; \quad (4)$$

$$W(x,t)|_{x=0} = \left[D \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} - \mu E(x) C(x,t) \right]_{x=0} = 0; \quad (5)$$

$$W(x,t)|_{x=l} = \left[D \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} - \mu E(x) C(x,t) \right]_{x=l} = 0; \quad (6)$$

$$\varphi(x,t)|_{t=0} = 0; \quad (7)$$

$$\varphi(x,t)|_{x=h} = 0; \quad (8)$$

$$\varphi(x,t)|_{x=0} = \varphi^*(t). \quad (9)$$

Начальное условие для потенциала в (7) следуют из того, что до начала облучения образец не заряжен, а заряды ионов Na^+ компенсированы зарядами ионов O^- . Граничные условия для электростатического потенциала в (8) и (9) определяются тем, что стекло для облучения прикреплено к заземленному металлическому столику, т. е. $\varphi(x, t)|_{x=h} = 0$, а потенциал облучаемой поверхности рассчитывается интегральным методом зеркального отображения.

Дифференциальная задача (1)–(4) аппроксимировалась неявной разностной схемой, заданной на сетке $x = x_0, x_1, \dots, x_M, M = l/h; t = t_0, t_1, \dots, t_N, N = T/\tau$ с шагами h, τ по пространственной координате и времени соответственно:

$$\frac{C_m^{n+1} - C_m^n}{h} = D \frac{C_{m+1}^{n+1} - 2C_m^{n+1} + C_{m-1}^{n+1}}{h^2} - \mu \frac{1}{h} (a_{m+1} C_{m+1}^{n+1} - a_m C_m^{n+1}); \quad (10)$$

$$C_0^{n+1} = C_0^n; \quad D \frac{C_1^{n+1} - C_0^{n+1}}{h} - \mu E_0 C_0^{n+1} = 0; \quad D \frac{C_M^{n+1} - C_{M-1}^{n+1}}{h} - \mu E_M C_M^{n+1} = 0, \quad (11)$$

где $a_m = \frac{1}{2}(E_m + E_{m-1})$.

Результаты. Отметим, что в зависимости от взаимной направленности диффузионного и дрейфового потока возможны следующие процессы миграции ионов:

1) если дрейфовая и градиентная компоненты будут направлены в одну сторону, имеет место ускоренная диффузия ($W_D, W_\mu > 0$);

2) если дрейфовая компонента равна нулю, имеет место чистая диффузия ($W_\mu = 0$);

3) если дрейфовая и градиентная компоненты разнонаправлены, то может наблюдаться замедленная диффузия (дрейфовая компонента по абсолютной величине будет меньше градиентной, $W_\mu < 0, |W_\mu| < |W_D|$), «застывание профиля» (дрейфовая компонента по абсолютной величине будет равна градиентной, поток будет равен нулю, $W_\mu < 0, |W_\mu| = |W_D|$) или восходящая диффузия (дрейфовая компонента по абсолютной величине будет больше градиентной, направление потока совпадает с направлением дрейфа, $W_\mu < 0, |W_\mu| > |W_D|$).

Напряженность индуцированного электрического поля в приповерхностном слое получена при решениях уравнения Пуассона для двух случаев, когда пластина стекла лежит на металлической или диэлектрической подложке. Результаты расчетов показали, что в зависимости от того, на какой

подложке при облучении лежит образец, поле внутри стеклянной пластины будет разным.

Для начала обратимся к случаю металлической подложки. Одно из численных решений задачи (1)–(9), представляющее пространственно-временное распределение Na^+ в облучаемом протонами слое стекла (рис. 1), получено при $D = 10 \text{ нм}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и значении напряженности электрического поля в приповерхностном слое $E \approx 1,52 \cdot 10^{-3} \text{ В} \cdot \text{нм}^{-1}$. Для простоты восприятия результатов начальная концентрация натрия на этом графике нормирована на единицу. Из представленного на рис. 1 распределения видно, что в облучаемых приповерхностных слоях стекла происходит увеличение концентрации натрия.

Проследим динамику ионов натрия в образце. Дрейфовый и диффузионный потоки в точках, находящихся на различных расстояниях от облучаемой поверхности образца, прикрепленного к металлической подложке, изображены на рис. 2. Отметим следующую особенность: дрейфовый поток возникает уже в начальный момент времени, в то время как диффузионный запаздывает относительно него и возникает только в последующие моменты времени, когда возникает градиент концентрации. В любой из точек, где отслеживаются потоки W_μ и W_D , поток, возникающий в результате воздействия на ионы натрия индуцированного поля термализованных протонов, до момента «застывания» профиля концентрации превышает поток диффузионный. То есть в соответствии с классификацией, приведенной выше, наблюдается «восходящая диффузия». Причем, как и следует из полученного профиля концентрации (см. рис. 1), по мере приближения к облучаемой границе стекла значение дрейфового потока увеличивается.

Поскольку ионы натрия дрейфуют в сторону границы образца, в приграничной области (толщиной приблизительно 100 нм) наблюдается большой градиент концентрации, что, в свою очередь, приводит к большому диффузионному потоку. Однако он никогда не превышает дрейфовую компоненту. Кроме того, в точке с координатой $x_{100} = 100 \text{ нм}$ наблюдается максимальное значение дрейфового потока в момент времени $t = 0,2 \text{ ч}$. Ионы натрия под воздействием индуцированного протонами поля мигрировали в приграничную область, увеличивая тем самым значение концентрации в данной точке, но после определенного момента времени большая часть ионов из правой области уже мигрировала и концентрация в x_{100} начинала снижаться, что и обеспечило выраженный максимум дрейфа. При этом градиентный поток в x_{100} экстремумов не имеет.

Другая картина наблюдается правее x_{100} . Поток ионов, вызванный электрическим полем, здесь монотонно уменьшается. В то же время для данной

области характерны максимумы диффузионных потоков. Фактически это означает, что в определенный момент времени в точках $x_{200} = 200$ нм и $x_{300} = 300$ нм смешанная производная $\partial^2 C / \partial x \partial t = 0$. Как видно на рис. 2, данный максимум «движется» со временем в сторону облучаемой поверхности образца и постепенно сглаживается (рост градиентного потока в окрестности максимума становится менее резким). Так что, например, в x_{100} максимум диффузии уже не наблюдается.

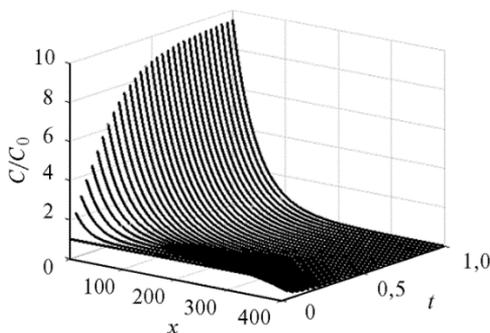


Рис. 1. Пространственно-временное распределение концентрации ионов натрия в стекле в случае нахождения на металлической подложке

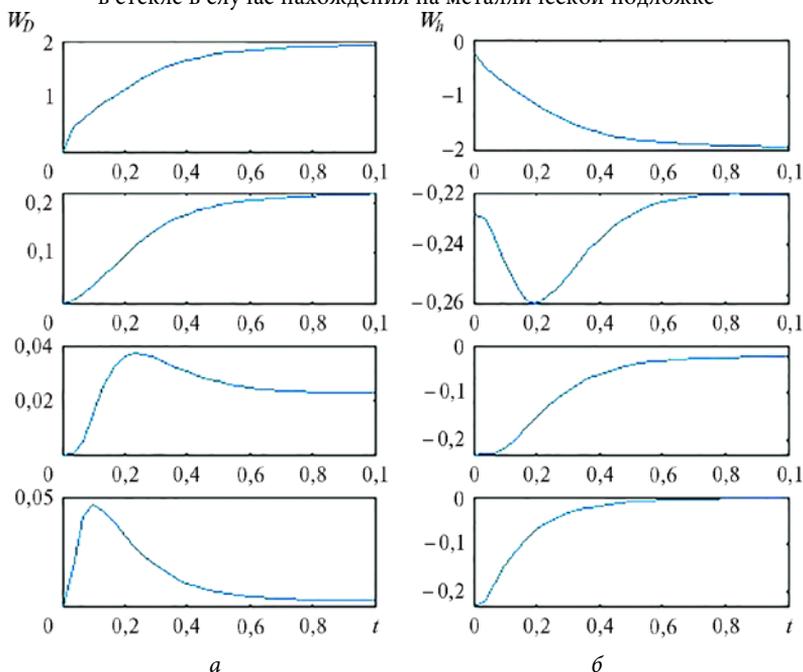


Рис. 2. Зависимость диффузионного (а) и дрейфового (б) потоков ионов натрия ($\text{нм}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) от времени (ч) для фиксированных значений $x = 5, 100; 200; 300$ нм соответственно (металлическая подложка)

Как видно из результатов моделирования, время, через которое потоки, вызванные градиентом концентрации ионов натрия (диффузионный поток) и полем, индуцированным зарядом инжектированных протонов (дрейфовый поток), уравниваются друг друга, т. е. происходит «застывание профиля» концентрации, составляет немногим менее 1 ч. Причем, что вполне ожидаемо, по мере приближения к внешней границе время установления профиля концентрации увеличивается. У облучаемой поверхности стекла устанавливается концентрация ионов натрия $C_{\text{мет}} \approx 9,2C_0$.

Аналогично был выполнен расчет и для случая, когда образец находился на диэлектрической подложке. В таком случае $E \approx 7,5 \cdot 10^{-4} \text{ В} \cdot \text{нм}^{-1}$. График распределения концентрации ионов натрия приведен на рис. 3. Диффузионный и дрейфовый потоки представлены на рис. 4. Из полученных результатов видно, что на протяжении всего времени решения в каждой точке рассматриваемого стеклянного образца до установления «застывшего» профиля концентрации ионов натрия дрейфовая компонента потока превосходит диффузионную, т. е. также имеет место режим «восходящей диффузии». При этом значения двух компонент потоков в непосредственной близости к облучаемой поверхности $x_5 = 5 \text{ нм}$ меньше, чем в той же координате для случая металлической подложки. Видно также и то, что изменение поведения дрейфового потока смещается дальше от границы по сравнению с предыдущим случаем.

Таким образом, если для стекла на металлической подложке дрейфовая компонента в окрестности x_{100} имела экстремум по времени $\partial W_{\mu} / \partial t$, то в данном случае здесь дрейфовый поток продолжает возрастать вплоть до равновесного значения. Максимум градиентного потока для случая диэлектрической подложки теперь наблюдается лишь в точке x_{300} , т. е. он исчезает дальше от границы по сравнению с предыдущим случаем. Все эти отличия от полевой миграции ионов натрия в стекле на металлической подложке объясняются почти вдвое меньшим значением напряженности электрического поля индуцированных термализованных протонов. На рис. 3 можно увидеть, что «застывание» профиля концентрации ионов натрия в образце устанавливается через время, равное приблизительно 1,2 ч после начала воздействия на них электрического поля. Концентрация у внешней границы стекла при этом $C_{\text{диэл}} \approx 4,5C_0$.

Результаты и выводы. Таким образом, был промоделирован процесс перераспределения ионов натрия в приповерхностном слое ($l = 400 \text{ нм}$) стеклянной пластины, находящейся под воздействием потока протонов, внедренный

заряд которых индуцирует электрическое поле внутри образца. В результате наблюдается преобладающий над диффузионным противоположно направленный к нему дрейфовый поток, который приводит к значительному увеличению концентрации ионов натрия у облучаемой поверхности.

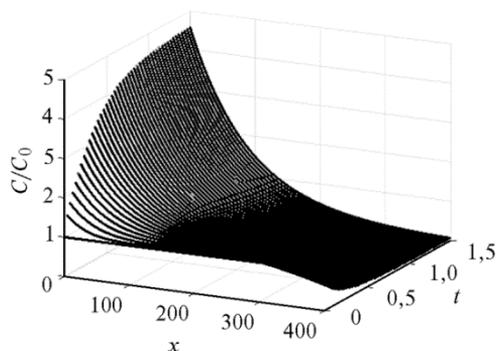


Рис. 3. Концентрация ионов натрия в стекле в зависимости от координаты и времени в случае нахождения на диэлектрической подложке

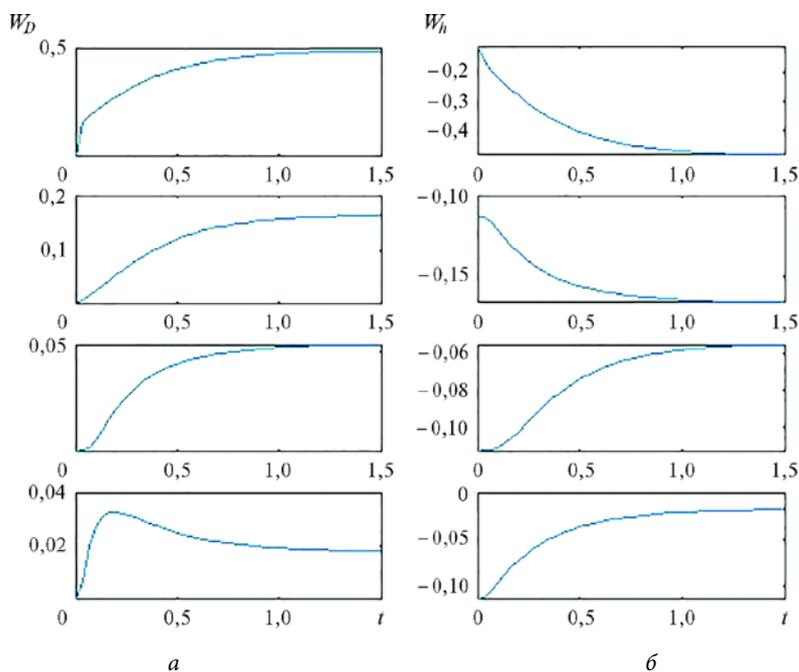


Рис. 4. Зависимость диффузионного (а) и дрейфового (б) потоков ионов натрия ($\text{нм}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) от времени (ч) для координат $x = 5, 100, 200, 300$ нм соответственно (диэлектрическая подложка)

При одинаковом количестве внедренного заряда напряженность индуцированного поля различна для случаев, когда стекло лежит на металлической и на диэлектрической подложке. В первом случае напряженность практически в 2 раза превосходит таковую во втором. Соответственно, концентрация ионов натрия у внешней границы образца по результатам вычислений также различается почти в 2 раза для случаев металлической и диэлектрической подложек. Чем меньше значение электрического поля, тем существеннее становится влияние диффузионного потока и, хотя дрейф по-прежнему сильнее, чем диффузионный процесс, для «застывания» профиля требуется уже больше времени: 1,5 ч для случая диэлектрической подложки против 1 ч для металлической.

Для сравнения с результатом численного моделирования на рис. 5 представлены экспериментальные результаты, полученные с помощью П/РЭМ ТИТАН 80–300 при исследовании исходных и облученных образцов. Измерения концентрации натрия проведены в приповерхностных слоях стекла, которые подвергались воздействию протонов.

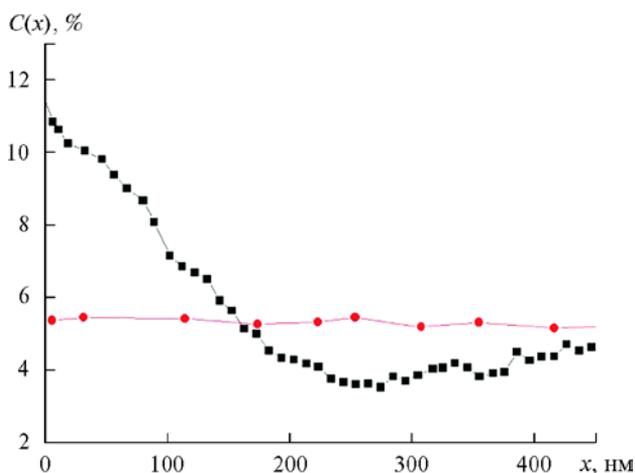


Рис. 5. Профили концентрации натрия в исходном стекле (—●—) и облученном протонами (—■—)

Из сравнительного анализа результатов расчета и эксперимента следует, что математическая модель достаточно корректно описывает процесс полевой миграции ионов натрия в боросиликатном стекле К-208. Для более точного математического описания исследуемого процесса необходимы дополнительные исследования с целью определения параметров модели и в особенности коэффициента диффузии натрия в стекле.

Литература

- [1] Podsvirov O.A., Ignatiev A.I., Nashchekin A.V. et al. Modification of Ag containing photo-thermo-refractive glasses induced by electron beam irradiation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2010, vol. 268, Section B, no. 19, pp. 3103–3106. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2010.05.061>
- [2] Sidorov A.I., Nashchekin A.V., Nevedomsky V.N. et al. Self-assembling of silver nanoparticles in glasses under electron beam irradiation. *International Journal of Nanoscience*, 2011, vol. 10, no. 6, pp. 1265–1268. <https://doi.org/10.1142/S0219581X11008411>
- [3] Ferguson D.C., Wimberly S.C. The Best GEO Daytime Spacecraft Charging Index. *Proceed. 50th AIAA Aerospace Sci. Mtg.*, 2013 January, art. AIAA 2013-0810. <https://doi.org/10.2514/6.2013-810>
- [4] Masui H., Toyoda K., Cho M. Electrostatic Discharge Plasma Propagation Speed on Solar Panel in Simulated Geosynchronous Environment. *IEEE Transaction on Plasma Science*, 2008, vol. 36, pp. 2387–2394. <https://doi.org/10.1109/TPS.2008.2003191>
- [5] Сергеев П.М. и др. Наведенное электронным пучком поглощение в кварцевых стеклах. *Оптический журнал*, 2004, В.71, № 6, с. 93–97.
- [6] Глебов Л.Б., Докучаев В.Г., Петровский Г.Т. Исследования спектров поглощения γ -окрашенных силикатных стекол высокой частоты с переменным содержанием Fe^{3+} . *Физика и химия стекла*, 1985, т. 11, № 1, с. 79–96.
- [7] Глебов Л.Б., Докучаев В.Г., Петров М.А., Петровский Г.Т. Спектры поглощения центров окраски щелочносиликатных стекол. *Физика и химия стекла*, 1990, т. 16, № 1, с. 39–47.
- [8] Арбузов В.И., Толстой М.Н., Элертс М.А. Абсолютные характеристики центров окраски в стекле $Na_2O \cdot 3SiO_2$. *Изв. АН СССР. Серия физическая*, 1986, т. 50, № 3, с. 126–131.
- [9] Norris C.B., Eernisse E.P. Ionization dilatation effects in fused silica from 2 to 18 Kev electron-irradiation. *Journal of Applied Physics*, 1974, vol. 45, iss. 9, pp. 3876–3882. <https://doi.org/10.1063/1.1663878>
- [10] Primak W., Kampwirt R. Radiation compaction of vitreous silica. *Journal of Applied Physics*, 1968, vol. 39, iss. 12, pp. 5651–5657. <https://doi.org/10.1063/1.1656029>
- [11] Gavenda T., Gedeon O., Jurek K. Volume changes in glass induced by an electron beam. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2014, vol. 322, pp. 7–12. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2013.12.017>
- [12] Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С., Коровин С.Б. Особенности структурных изменений поверхности стекла К-208 при электронно-протонном облучении. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, 2017, № 9, с. 28–34. <https://doi.org/10.7868/S0207352817090049>

- [13] Ferguson D.C., Katz I. The Worst-Case GEO Environment and the Frequency of Arcs in GEO. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2015, vol. 43, no. 9, pp. 3021–3026.
- [14] Gedeon O., Zemek J., Jurek K. Changes in alkali-silicate glasses induced with electron irradiation. *J. Non-Crystalline Solids*, 2008, vol. 354, iss. 12–13, pp. 1169–1171. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2006.12.125>
- [15] Cho M., Kawakita S., Nakamura M. et al. Number of Arcs Estimated on Solar Array of a Geostationary Satellite. *J. Space. Rockets*, 2005, vol. 42, no. 4, pp. 740–748. <https://doi.org/10.2514/1.6694>
- [16] Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С., Гаценко Л.С., Волкова Я.Б. Электроразрядные процессы при облучении стекол К-208 и СМГ электронами с энергией в диапазоне от 10 до 40 кэВ. *Перспективные материалы*, 2015, № 1, с. 22–30.
- [17] Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С., Коровин С.Б. Влияние давления остаточной атмосферы на развитие электростатических разрядов на поверхности защитных стекол солнечных батарей. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, 2016, № 10, с. 14–24. <https://doi.org/10.7868/S0207352816100103>
- [18] Ollier N., Charpentier T., Boizot B., Petite G. A structural approach by MAS NMR spectroscopy of mechanisms occurring under β -irradiation in mixed alkali aluminoborosilicate glasses. *J. Phys. Condens. Matter.*, 2004, vol. 16, pp. 7625–7635. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/16/43/006>
- [19] Boizot B., Petite G., Ghaleb D., Calas G. Dose, dose rate and irradiation temperature effects in β -irradiated simplified nuclear waste glasses by EPR spectroscopy. *J. Non-Cryst. Solids.*, 2001, vol. 283, pp. 179–185. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(01\)00338-6](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(01)00338-6)
- [20] Boizot B., Petite G., Ghaleb D. et al. Migration and segregation of sodium under β -irradiation in nuclear glasses. *Nucl. Instr. Meth. B*, 2000, vol. 166–167, pp. 500–504. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(99\)00787-9](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(99)00787-9)
- [21] Abbas A., Serruys Y., Ghaleb D. et al. Evolution of nuclear glass structure under α -irradiation. *Nucl. Instr. Meth. B*, 2000, vol. 166–167, pp. 445–450. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(99\)00695-3](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(99)00695-3)
- [22] Zhang G.F., Wang T.S., Yang K.J. et al. Raman spectra and nano-indentation of Ar-irradiated borosilicate glass. *Nucl. Instr. Meth. B*, 2013, vol. 316, pp. 218–221. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2013.09.020>
- [23] Chen L., Zhang D.F., Lv P. et al. Evolutions of molecular oxygen formation and sodium migration in Xe ion irradiated borosilicate glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2016, vol. 448, pp. 6–10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2016.06.029>
- [24] Chen L., Wang T.S., Yang K.J. et al. Raman study of Kr ion irradiated sodium aluminoborosilicate glass. *Nucl. Instr. Meth. B*, 2013, vol. 307, pp. 566–569. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2013.01.089>

- [25] Kudlinski A., Quiquempois Y., Martinelli G. Modeling of the $\chi(2)$ susceptibility time-evolution in thermally poled fused glass. *Optics Express*, 2005, vol. 13, no. 20, pp. 8015–8024. <https://doi.org/10.1364/OPEX.13.008015>

Поступила в редакцию 10.06.2024

Кузнецов Иван Сергеевич — студент кафедры «Физика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Хасаншин Рашид Хусаинович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Физика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация. E-mail: rhkhas@mail.ru

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Кузнецов И.С. Моделирование перераспределения натрия в облученном протонами слое защитного стекла солнечных батарей космических аппаратов. *Политехнический молодежный журнал*, 2024, № 05 (94).

URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/phys/tec/999.html>

SIMULATING SODIUM REDISTRIBUTION IN THE PROTON-IRRADIATED PROTECTIVE GLASS LAYER OF THE SPACECRAFT SOLAR PANELS

I.S. Kuznetsov

kuznetsovis1@student.bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

The paper proposes a model that describes the sodium ions field migration process, which plays a key role in the glass microstructure reorganization, to interpret experimental results of irradiating glass containing the sodium and potassium oxides with the 40 keV protons. The TITAN 80-300 transmission/scanning electron microscope (T/SEM) was used to measure sodium concentration in the near-surface glass layers to protons. Results of measurements and computation show that, migration into the field of a charge injected into the glass results in the sodium ions migration from the zone of the thermalized protons maximum distribution to the irradiated glass surface. To consider the process of the sodium ion redistribution in glass, the paper proposes to use a mathematical model of the drift-diffusion problem. It is solved in the near-surface region of a glass sample irradiated with the protons until the drift and diffusion flows are equalized. The obtained simulation results demonstrate that the flows equality under the considered conditions is achieved after a time interval of approximately 1.5 hours. In this case, the sodium ions equilibrium concentration at the outer surface of the irradiated sample is directly proportional to the radiation-induced electric field inside the sample.

Keywords: irradiation, K-208 glass, injected charge, ion field migration, atomic force microscopy, gas-filled bubbles

Received 10.06.2024

Kuznetsov I.S. — Student, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific Advisor — Khasanshin R.Kh., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation. E-mail: rhkhas@mail.ru

Please cite this article in English as:

Kuznetsov I.S. Simulating sodium redistribution in the proton-irradiated protective glass layer of the spacecraft solar panels. *Politekhnikheskiy molodezhnyy zhurnal*, 2024, no. 05 (94). (In Russ.). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/phys/tec/999.html>