

оценивается из результатов стандартных испытаний), и заряда, который будет сброшен за время проведения ускоренных ресурсных испытаний:

$$t_{\text{уск.}} \cdot \tau_{\text{уск.}} \cdot Q_{\text{разр.}}^{\text{уск.}} = t_{\text{нат.}} \cdot \tau_{\text{ст.}} \cdot Q_{\text{разр.}}^{\text{ст.}}$$

где $t_{\text{уск.}}$ – время проведения ускоренных испытаний;

$t_{\text{нат.}}$ – САС КА; $\tau_{\text{уск.}}$ – частота радиационно-стимулированных ЭСР, регистрируемая во время проведения ускоренных испытаний;

$\tau_{\text{ст.}}$ – частота радиационно-стимулированных ЭСР, регистрируемая во время проведения стандартных испытаний;

$Q_{\text{разр.}}^{\text{уск.}}$ – средний заряд, сбрасываемый при разряде во время проведения стандартных испытаний;

$Q_{\text{разр.}}^{\text{ст.}}$ – средний заряд, сбрасываемый при разряде во время проведения во время проведения стандартных испытаний

Список литературы

1. Летин В.А., Функционирование солнечных батарей в космической среде. В кн. Модель космоса. Научно-информационное издание, т. 2. – М.: КДУ, 2007. – С. 561–594.
2. Ягушкин Н.И. и др., Исследование радиационно-электрических процессов в диэлектриках при облучении электронами с энергиями до 100 кэВ. В кн. Модель космоса. Научно-информационное издание, т. 2. – М.: КДУ, 2007. – С. 343–360.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАДИАЦИОННОЙ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ ВЫСКООМНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Ю.А. Бежасев, В.М. Зыков, А.А. Лукащук (г. Томск, Россия)

В.В. Иванов, И.А. Максимов (г. Железногорск, Россия)

Представлены результаты лабораторных испытаний, полученные при облучении образцов высокоомной керамики пучком электронов с энергией $E_e=20\div 100$ кэВ и плотностью тока $J_e=1,0$ нА см⁻² при температуре от -90°C до $+90^\circ\text{C}$. Показано, что на процессы радиационной электризации существенным образом влияет геометрия облучения.

Исследования взаимодействия ионизирующих излучений с веществом в такой прикладной области, как разработка космических аппаратов (КА), является важным направлением в обеспечении стойкости КА к воздействию факторов космического пространства (ФКП). С воздействием заряженных частиц, главным образом электронов, на высокоомные конструкционные материалы связаны такие эффекты, как: радиационная электризация и разрядные явления; деградация оптических свойств радиационно-защитных покрытий и спад мощности фотоэлектрических преобразователей солнечных батарей; сбои в работе навигационной и телеметрической аппаратуры, приводящие к нарушению или потере связи с космическим аппаратом. Актуальность задачи повышается в связи со значительным увеличением сроков активного существования КА и применением новых, более чувствительных к радиационному воздействию материалов. Изучение в лабораторных условиях процессов радиационной объемной электризации высокоомных материалов при облучении заряженными частицами позволяет предвидеть возможные негативные явления во время эксплуатации КА в условиях воздейст-

вия ионизирующего излучения. На сегодняшний день как зарубежными, так и российскими исследователями выполнен большой объем работ, посвященных этой проблеме.

К сожалению, в большинстве работ неоправданно мало внимания уделяется описанию методики проведенных экспериментов. Так, например, из статьи [1] нельзя понять, какой была геометрия образца, а именно этот фактор, как нам представляется, играет существенную роль при изучении процессов радиационной электризации в лабораторных условиях, особенно в случае относительно небольших образцов.

Приведенные ниже результаты получены при проведении лабораторных испытаний на радиационную электризацию образцов разных типов высоковольтной керамики с содержанием нитрида бора (BN) более 90 %. Размер образцов: $\varnothing 25,0$, толщина 2,0 мм. Внешний вид образцов показан на рис. 1. Все образцы облучались пучком электронов с энергией $E_e = 20 \div 100$ кэВ и плотностью тока $J_e = 1,0$ нА·см⁻² при температуре от -90°C до $+90^\circ\text{C}$. При испытаниях использовались две схемы крепления образца. В первом случае они закреплялись в ячейке, разрез и внешний вид которой показан на рис. 2а. В другом случае керамика закреплялась на подложке-термостате, диаметр которой был меньше диаметра образца, термостойким компаундом (см. рис. 3а и 3б). Диаметр электронного пучка всегда был больше диаметра образца.

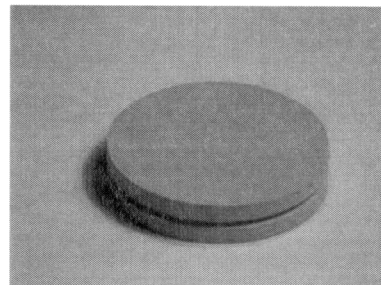


Рис. 1

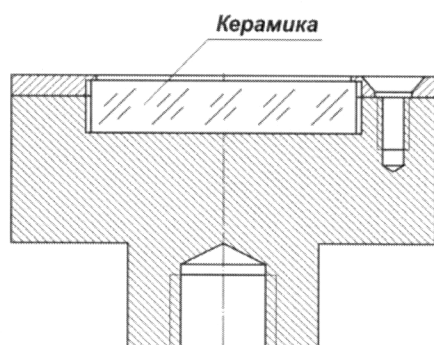


Рис. 2а

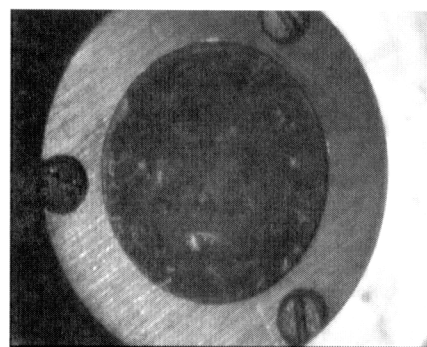


Рис. 2б

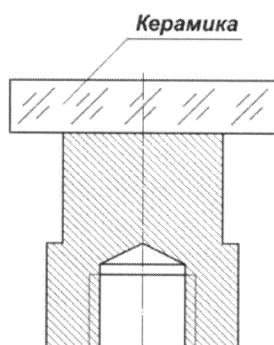


Рис. 3а

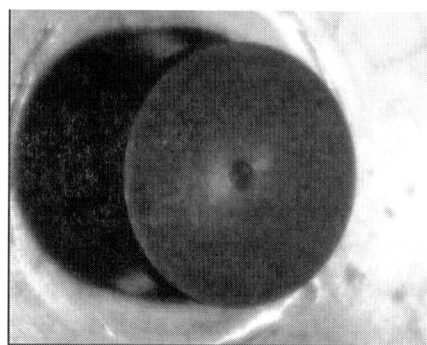


Рис. 3б

Хорошо известно [1–3], что в случае облучения диэлектрика «с открытой поверхностью» (т. е. без наличия на облучаемой поверхности электрода или проводящего покрытия) потенциал поверхности ($\varphi_{\text{пов.}}$) возрастает либо до наступления электрического разряда на поверхности образца со сбросом части накопленного заряда; либо до выхода потенциала на некоторое стационарное значение. Это наблюдается и в случае радиационной электризации высоковольтной керамики. На рис. 4а и 4б приведены характерные кинетики по-

тенциала поверхности при облучении образцов керамики, закрепленных на подложке способом, показанным на рис. 3, пучком электронов с энергией $E_e=100$ кэВ и $E_e=70$ кэВ соответственно и плотностью тока $J_e=10^{-9}$ А·см⁻².

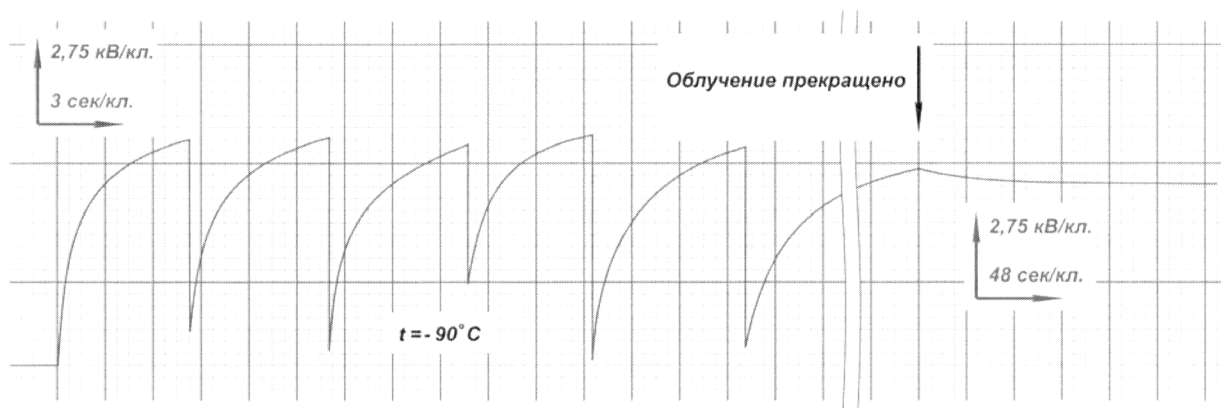


Рис. 4а

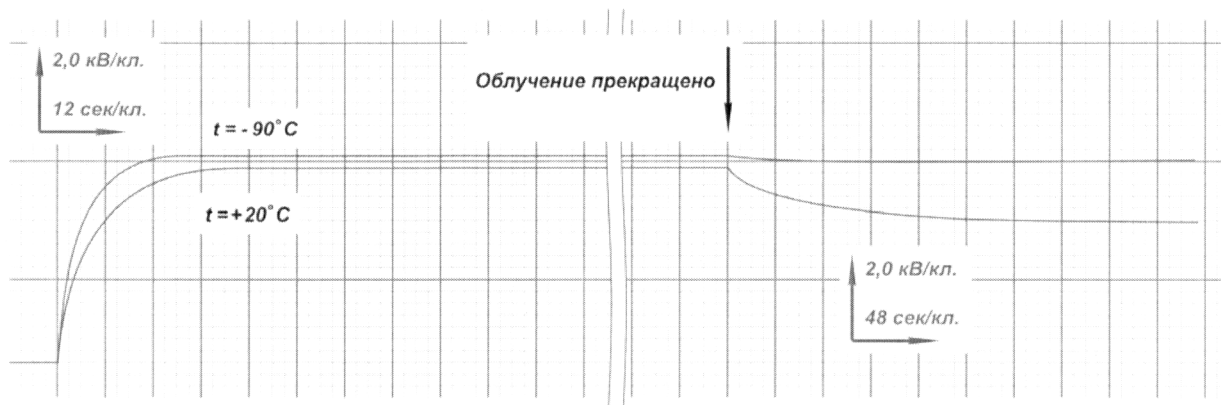


Рис. 4б

В свою очередь, разряд на заряжаемом образце может происходить либо путем сквозного электрического пробоя на заземленную подложку (т. н. задний электрод) в случае достаточно тонких материалов; либо по поверхности, со сбросом накопленного заряда на ближайшую заземленную поверхность (как правило, охранное кольцо или систему крепления образца, см. рис. 5а и 5б); либо с выбросом части заряда через облучаемую поверхность образца.

Установление стационарного, равновесного потенциала также может определяться различными причинами. В случае достаточно тонких материалов может наступить равновесие между током падающих электронов и током утечки заряда через образец. Если потенциал поверхности становится сравнимым с ускоряющим напряжением моделирующей электронной пушки, то эффективная энергия падающих на образец ускоренных электронов может снизиться до значения, при котором значение коэффициента вторичной электронной эмиссии (ВЭЭ) для данного материала станет равным единице ($\sigma_{ВВЭ}=1$), т. е. наступит равновесие между током падающего на образец пучка, и током электронов ВЭЭ, выходящих с поверхности образца. И, наконец, есть еще одна особенность взаимодействия электронов пучка с внешним электростатическим полем, которое формируется над поверхностью образца в процессе его зарядки, которая также может способствовать установлению равновесного потенциала, и которая обязательно должна учитываться при рассмотрении результатов лабораторных экспериментов.

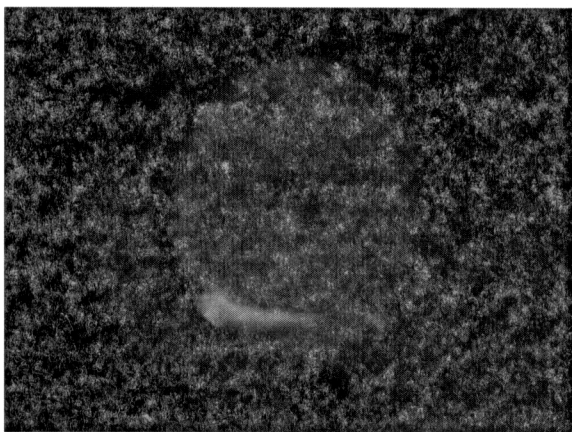


Рис. 5а

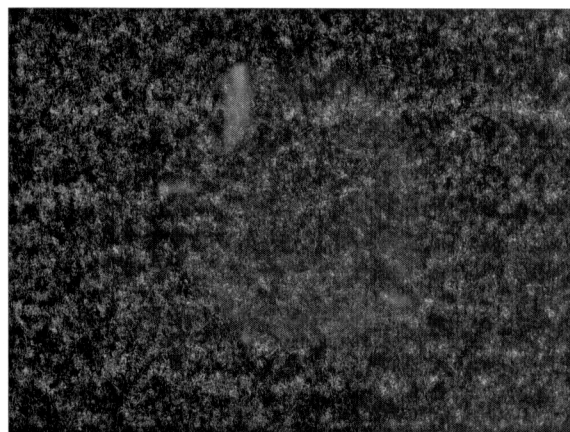


Рис. 5б

Измерения потенциала поверхности в процессе испытаний проводятся, как правило, с помощью т. н. датчиков внешнего поля (ДВП), один из которых описан в [3]. Такие датчики позволяют проводить бесконтактные измерения интегрального потенциала заряжаемой поверхности. Однако из результатов экспериментов и компьютерного моделирования известно, что электростатическое поле над облучаемой диэлектрической поверхностью распределено неравномерно. В простейшем случае, когда образец, имеет форму диска, окруженного заземленной подложкой, поле над образцом имеет вид, показанный на рис. 6. Поэтому, кроме значительного уменьшения энергии электронов, достигающих поверхности образца, изменяется и угловое распределение частиц в пучке, а именно: происходит его «расталкивание» к краям мишени. Это явление хорошо иллюстрирует кинограмма (см. рис. 7) процесса облучения образца керамики при температуре -90°C (при такой температуре поверхность керамики заметно флюоресцирует даже при небольших плотностях тока электронов). Если на первом фрейме (кадре), через 21,2 сек после начала облучения центр керамики еще светится, то уже через 1,6 сек пучок попадает практически лишь на края образца. В следующий момент (Frame 571) происходит электрический пробой по поверхности, который начинается у края заземленной ячейки, но затем развивается по большей части образца. При этом сбрасывается значительная часть накопленного заряда. Ускоренные электроны начинают попадать на поверхность керамики, освобожденную от заряда, вызывая ее свечение. Затем процесс зарядки вновь продолжается до тех пор, пока потенциальный рельеф поверхности не восстановится до прежнего состояния и электроны пучка снова будут «вытеснены» к краю образца.

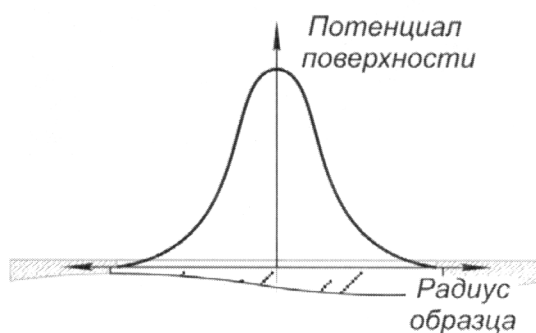
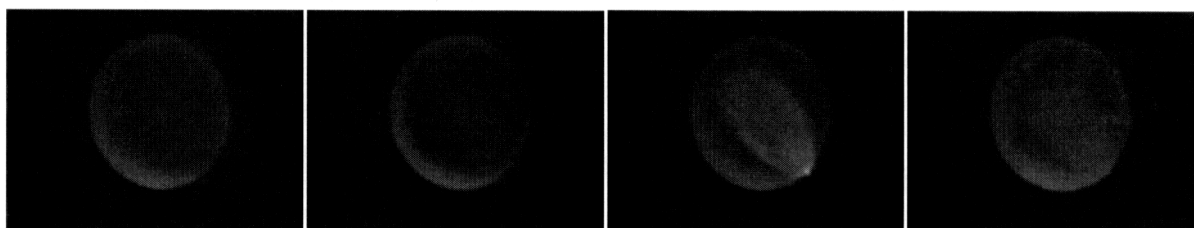


Рис. 6



Frame 530 0:00:21.20 Frame 570 0:00:22.80 Frame 571 0:00:23.20 Frame 572 0:00:23.60

Рис. 7

В случае крепления образцов способом, показанном на рис. 3, распределение внешнего электростатического поля заряжаемого диэлектрика, а, следовательно, и процессы взаимодействия с ним электронов пучка приобретает более сложный вид, но «расталкивание» пучка также имеет место, что хорошо видно на рис. 8 (вид образца керамики, через 6 сек облучения при следующих условиях: $E_e=70$ кэВ, $J_e=5\cdot 10^{-9}$ А·см⁻², $t_{обр.}=-90^\circ$ С):

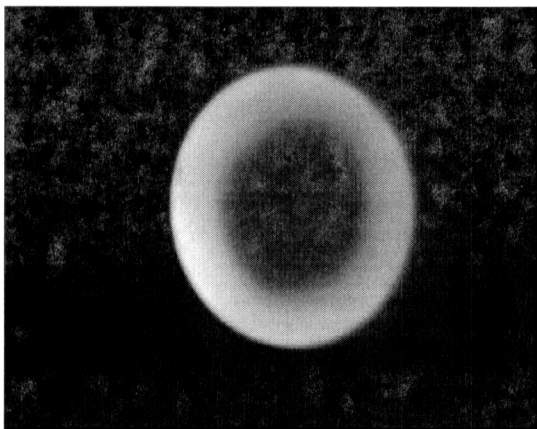


Рис. 8

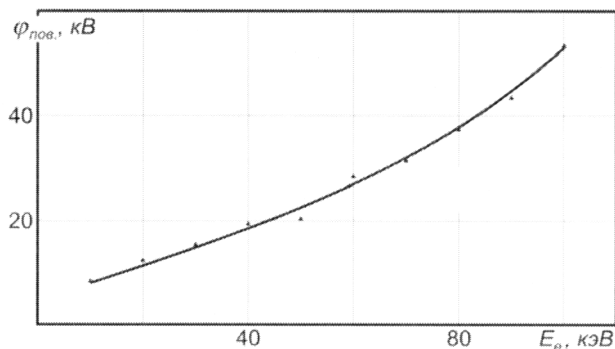


Рис. 9

Именно «расталкивание» пучка и определяет величину стационарного потенциала при облучении таких материалов, как высоковольтная керамика, которые, с одной стороны, имеют достаточно большую толщину и высокое удельное объемное сопротивление, чтобы радиационный заряд мог стечь через необлучаемую область, а с другой обладают высокой электрической прочностью, для того, чтобы мог произойти поверхностный или объемный пробой. При этом зависимость равновесного потенциала поверхности от энергии падающего электронного пучка в диапазоне энергий электронов 20÷100 кэВ имеет вид нелинейно возрастающей кривой (см. рис. 9), в отличие от кривой с максимумом, приведенной в [1], причем ограничение потенциала при $E_e \geq 90$ кэВ и $t_{обр.} = -90^\circ$ С вызвано разрядами на образцах (см. рис. 4а). Такими же свойствами должны обладать и другие конструкционные материалы с высокими удельным сопротивлением и электрической прочностью, например, тефлон или стекло, при условии, что их толщина превышает глубину пробега электронов моделирующего пучка.

Второй вывод, который можно сделать из приведенных выше результатов, заключается в том, что поскольку величина равновесного потенциала заряжаемого диэлектрика может превышать 90 кВ, представляется сомнительным тезис о принципиальной важности использования в лабораторных экспериментах источника электронов со спектральным распределением [2].

Список литературы

1. Ягушкин Н.И. и др., Исследование радиационно-электрических процессов в диэлектриках при облучении электронами с энергиями до 100 кэВ. В кн. Модель космоса. Научно-информационное издание, т. 2. – М.: КДУ, 2007. – С. 343–360.
2. Тютнев А.П., Саенко В.С., исследование радиационной проводимости жиэлектриков. В кн. Модель космоса. Научно-информационное издание, т. 2. – М.: КДУ, 2007. – С. 377–394.
3. Акишин А.И., Новиков Л.С. и др., Объемная электризация диэлектрических материалов космических аппаратов. В кн. Модель космоса. Научно-информационное издание, т. 2. – М.: КДУ, 2007. – С. 377–394.