

ных выше условиях начинает сказываться при фокусных расстояниях более 100 мм. Однако, и здесь не все однозначно. Излучатели (моноблоки) микрофокусных аппаратов имеют очень малые размеры и массу. Помимо возможности работы в стесненных условиях это позволяет сократить время установки моноблока в позицию для просвечивания.

Бесспорно преимущество микрофокусных аппаратов для контроля кольцевых сварных швов трубных досок. Сейчас контроль одного такого кольцевого шва производится последовательно за 4–6 экспозиций. Помимо затраты времени возникают трудности при «сшивании» снимков, чтобы определить, где именно находится дефект. Микрофокусные аппараты с вынесенным анодом и панорамным излучением (с осью излучения под 45° назад) позволяют делать снимок кольцевого шва за одну экспозицию. В наших экспериментах с трубными досками с трубами внутренним диаметром 10 мм уверенно определялась проволока эталона диаметром 0,08 мм, причем ограничение в диаметре определяемой проволочки вызваны не разрешающей способностью аппарата, а условием длительности экспозиции не более 60 секунд. Это потребовало применить несколько большее напряжение, чем необходимо для получения максимальной контрастной чувствительности. В тех же условиях, например, на фоне 10 мм титана выявлялись проволочки из титана диаметром 0,08 мм и более плотные проволочки из железа диаметром 0,05 мм.

Таким образом, во многих случаях радиографического контроля применение микрофокусных аппаратов более предпочтительно по сравнению с обычными аппаратами.

Список литературы

1. Соснин Ф.Р. Неразрушающий контроль: справочник: в 7 т. Т. 1: в 2 кн.: кн. 1: Визуальный и измерительный контроль. Кн. 2: Радиационный контроль / под общ. ред. В.В. Ключева.– М.: Машиностроение, 2003. – 560 с.: ил.
2. <http://www.tsnk-lab.ru/work/equipment/form/portable/rpnm>

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ УСКОРЕННЫХ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ К ФАКТОРАМ РАДИАЦИОННОЙ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

*Ю.А. Бежсаев, В.М. Зыков, А.А. Лукашук (г. Томск, Россия)
В.В. Иванов, И.А. Максимов (г. Железногорск, Россия)
Ю.Н. Полянсков (г. Краснодар, Россия)*

На основе результатов испытаний арсенид-галлиевых фотопреобразователей предложен новый подход к методике проведения лабораторных ускоренных ресурсных испытаний солнечных батарей космических аппаратов к факторам радиационной электризации.

Разработка космических аппаратов (КА) нового поколения, функционирующих на высоких орбитах, обладающих расширенными целевыми возможностями, с большей мощностью полезной нагрузки и сроками активного существования (САС) до 15-ти лет, предъявляет к современным солнечным батареям (БС) ряд требований, направленных на достижение максимальной эффективности БС при заданном ресурсе или максимального ресурса при определенном уровне эффективности БС.

Воздействие факторов космического пространства приводит к деградации БС. Значительный вклад в ухудшение характеристик БС вносят потоки заряженных частиц. Под действием радиации существенно изменяется как режим работы фотопреобразователей

(ФП), так и его выходные характеристики. Кроме этого, электроны средних энергий при взаимодействии с защитными стеклами БС образуют объемный заряд (ОЗ). Во время суббурь, при значительном увеличении плотности потока электронов, в диэлектрических конструкционных материалах, способных эффективно накапливать и долгое время удерживать инжектированный заряд (а именно к этому типу диэлектриков относятся и защитные стекла БС), могут происходить радиационно-стимулированные электростатические разряды (ЭСР) с амплитудой тока до сотен ампер и наносекундными передними фронтами, которые, во-первых, негативно воздействуют на нормальное функционирование БС и бортовой радиоэлектронной аппаратуры, и, во-вторых, являются одним из основных факторов, влияющих на деградацию выходной мощности БС. Правильно оценить степень влияния процессов радиационной электризации на ресурс БС и эффективность мер для ее уменьшения можно с помощью проведения наземных лабораторных испытаний [1].

Существующие методики проведения ускоренных ресурсных испытаний основаны на утверждении, что частота следования пробоев возрастает пропорционально плотности тока пучка, и это обстоятельство можно использовать для постановки ресурсных испытаний диэлектрических конструкционных материалов, учитывающих деградацию оптических свойств за счет образования пробойных каналов, поскольку увеличение плотности тока пучка по сравнению с величиной, соответствующей натурным условиям, практически не влияет на параметры отдельного токового импульса [2]. Поэтому, если $\tau_{см.}$ – частота радиационно-стимулированных разрядов при проведении стандартных испытаний, которые проводятся в условиях близким к натурным (энергия электронов, плотность тока, температура образца, наличие или отсутствие освещения), то по степени разрушения диэлектрика за время облучения $t_{уск.}$ можно сделать оценку негативных факторов радиационной электризации за время орбитального полета КА. При этом:

$$t_{уск.} = t_{нат.} \frac{\tau_{см.}}{\tau_{уск.}},$$

где $t_{нат.}$ – САС КА

$\tau_{уск.}$ – частота радиационно-стимулированных ЭСР, регистрируемая во время проведения ускоренных испытаний.

Но экспериментальные исследования, проведенные для ряда образцов БС, заставляют несколько уточнить такой подход.

Приведенные ниже результаты получены в ходе проведения ресурсных испытаний перспективных БС с арсенид-галлиевыми (GaAs) ФП на устойчивость к действию факторов радиационной электризации. Образцы БС состояли из двух GaAs ФП размером 40×80 мм, покрытых защитным стеклом К-208 толщиной 120 мкм и размещенных на алюминиевой сотовой панели размером ≈125×125 мм, толщиной 20 мм. На рис. 1 показан внешний вид образца БС, установленного в вакуумной камере испытательного стенда «Прогноз» НИИ ИН (Россия, г. Томск). Образцы облучались пучком моноэнергетических электронов при следующих условиях: энергия электронов $E_e=70$ кэВ, плотность тока электронов $J_e=1,0\div50,0$ нА·см⁻², диаметр пучка $D_{пучка}=150$ мм, температура образца $t_{обр.}=+20^\circ$ С. В ходе экспериментов измерялись кинетика потенциала поверхности образца и пара-

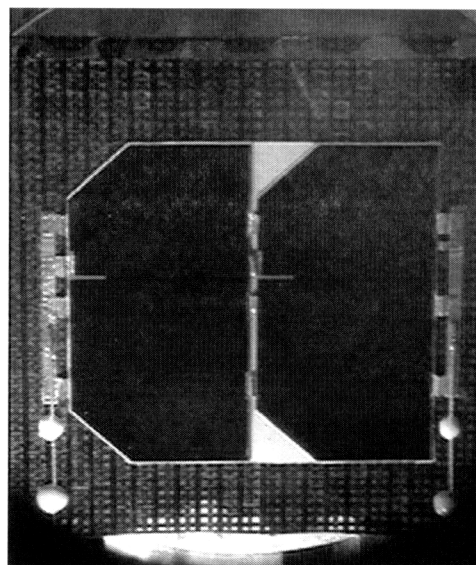


Рис. 1

метры разрядных импульсов в цепи электродов ФП, которые были заземлены через входное сопротивление измерительного тракта $R_{изм.}=50$ Ом. Измерения параметров разрядных импульсов проводились с помощью цифрового осциллографа TDS2022.

На рис. 2 показано типичная кинетика потенциала поверхности облучаемого образца БС: плавное нарастание потенциала до некоторой величины, при которой происходит радиационно-стимулированный ЭСР (предпробойный потенциал). На рис. 3 приведена зависимость среднего предпробойного потенциала и частоты следования разрядных импульсов от плотности тока пучка. На рис. 4 дана зависимость от плотности тока пучка средней амплитуды (усреднение проводилось по 128-ми импульсам) и средней длительности переднего фронта разрядных импульсов. На рис. 5 показано, как зависит от плотности тока пучка величина сбрасываемого при радиационно-стимулированном ЭСР среднего заряда, оцененного по величине уменьшения потенциала поверхности при разряде и рассчитанного по импульсу тока в цепи электродов ФП.

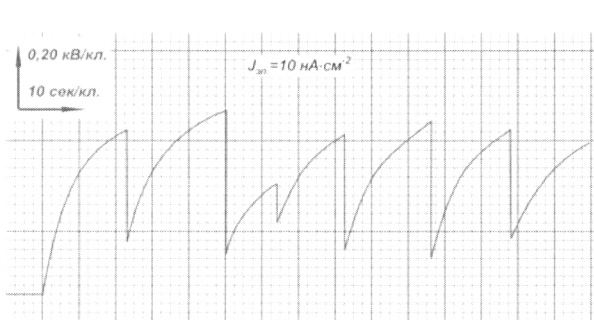


Рис. 2

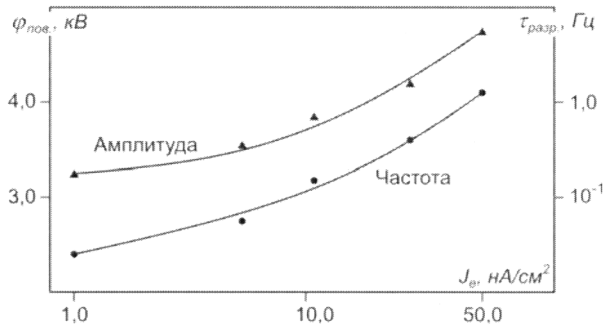


Рис. 3

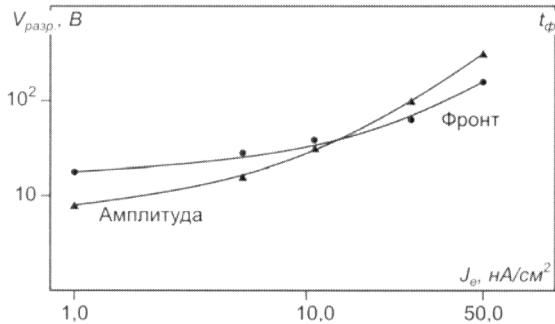


Рис. 4

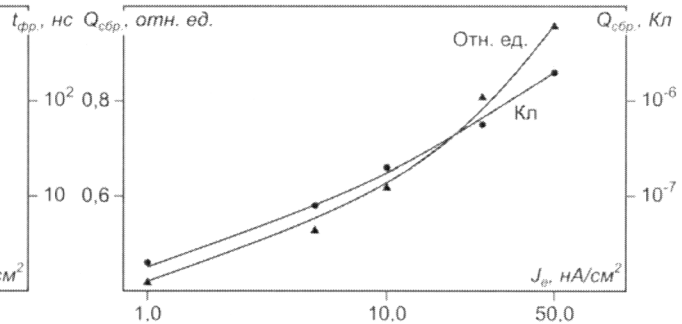


Рис. 5

При увеличении плотности тока электронного пучка предпробойный потенциал поверхности БС увеличивается незначительно, поскольку он определяется электрической прочностью защитного стекла; изменение частоты разрядов и амплитуды разрядного импульса близко к линейному; но вот величина сброшенного при пробое заряда, а, следовательно, и выделившейся при этом энергии, имеет уже степенную зависимость от плотности тока.

Это нетрудно объяснить, если сравнить осциллограммы импульсов разрядного тока в цепи электродов ФП, приведенных на рис. 6а, 6б и в для $J_e=1,0$; $10,0$ и $50,0$ нА·см⁻² соответственно. Хорошо видно, что по мере увеличения плотности тока пучка растет длительность разрядного импульса, точнее, один импульс начинает накладываться на другой. Видимо, пробой защитного стекла в одном месте вызывает еще несколько разрядов на поверхности БС. Это же подтверждается данными видеорегистрации процесса облучения. На рис. 6г приведен фрейм (кадр) видеозаписи облучения образца БС при $J_e=50,0$ нА·см⁻². На нем хорошо видно, что разряды практически одно-

временно начинаются и развиваются в нескольких точках. К сожалению, имеющихся экспериментальных данных пока недостаточно, чтобы дать объяснение этому процессу.

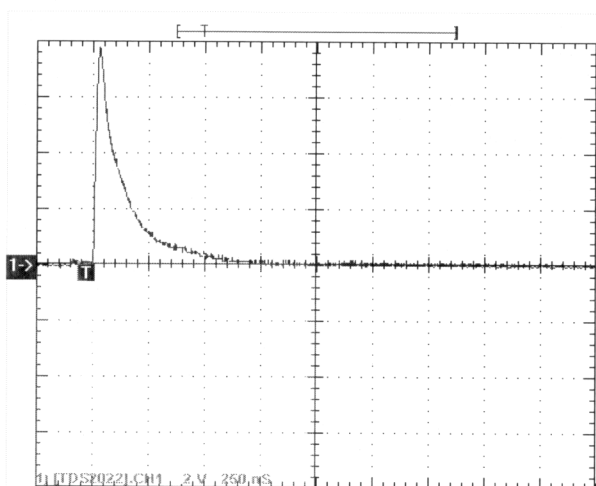


Рис. 6а

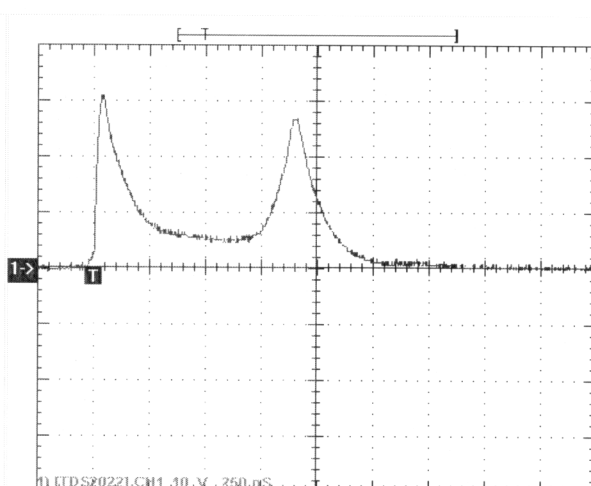


Рис. 6б

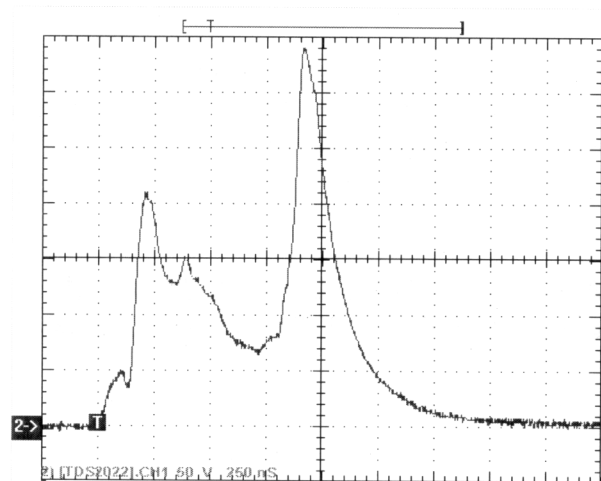


Рис. 6в



Рис. 6г

Зато хорошо известно, что чем больше энергии выделяется при радиационно-стимулированном разряде, тем большие повреждения будут нанесены БС. И за счет разрушения защитного стекла образующимися каналами пробоя (в том числе и сквозными), и из-за ухудшения оптических свойств покрытия за счет оседания на его поверхности продуктов плазменных сгустков, выброшенных при разрядах, и, наконец, локальными повреждениями *p-n* перехода [1].

Поэтому, если время набора флюенса электронов, соответствующего времени активного существования КА на орбите, снижается путем увеличения плотности тока электронов пропорционально уменьшению времени облучения при ускоренных испытаниях по сравнению с САС, то критерием ограничения плотности тока является максимальное приближение амплитуды, длительности и энергии разрядных импульсов во время ускоренных испытаний к соответствующим величинам при стандартных испытаниях. Если же это сложно осуществить (например, из-за большого САС или недостатка времени для проведения наземных испытаний), то необходимо ориентироваться на равенство заряда, который ориентировочно может быть сброшен при радиационно-стимулированных ЭСР в натуральных условиях за время пребывания КА на орбите (он

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 ВЫСОКООМНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Ю.А. Бежсаяев, 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° С до $+90^\circ$ С. 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-