

Лабораторное моделирование электризации полимеров потоками низкоэнергетических электронов

А. П. Тютнев, Г. А. Белик, А. Е. Абрамешин, В. С. Саенко

Изучена электризация полимерных образцов с заземленным металлическим слоем по двум основным схемам эксперимента. В первом варианте облучению низкоэнергетическими электронами с энергией 20 – 40 кэВ подвергается полимерная пленка в условиях, когда отсутствуют рядом расположенные заземленные металлические элементы. Показано, что развитие пробоя в двойном электрическом слое на открытой поверхности полимера невозможно. Во втором варианте, когда на открытой поверхности полимерной пленки находится заземленная металлическая маска в зоне облучения, разряды легко инициируются и представляют собой искровые скользящие разряды. Предложен возможный механизм их инициирования.

Ключевые слова: электризация, искровой скользящий разряд, полимерные образцы, облучение, электроны низких энергий.

Laboratory experiments have been made to study charging of polymer films equipped with the grounded metallized electrodes and an analysis of the two main experimental schemes has also been performed. The first scheme refers to a polymer film irradiated by low energy electrons under condition that there are no grounded metallic objects nearby. It has been demonstrated that electrostatic discharges are unlikely to develop in a double electrical layer on the open surface of the film. In the second scheme involving a grounded metallic masque placed on the open surface in the irradiation zone discharges do readily appear as the surface sparks. We propose a plausible initiation mechanism for these discharges.

Key words: charging, spark surface discharge, polymer films, irradiation, low energy electrons.

Введение

Интенсивное использование пучков низкоэнергетических электронов с энергией в интервале 20 – 50 кэВ с целью изучения объемного заряжения полимерных пленок и внутренних электрических полей в них началось с середины 1970-х годов, в основном трудами Гросса и сотр. [1 – 4]. Проведенные исследования позволили оценить радиационную электропроводность (РЭ) полимеров, а также поля в объеме полимера.

В начале 1980-х годов началось изучение условий возникновения электростатических разрядов (ЭСР) при облучении односторонне металлизированных полимерных пленок, облучаемых низкоэнергетическими электронами с энергией 20 – 30 кэВ со стороны открытой поверхности (тыльный электрод заземлялся) [5]. Выяснилось, что на космических аппаратах (КА) на геостационарной орбите происходит дифференциальная зарядка поверхности и

наблюдаются многочисленные разряды, приводящие к сбою аппаратуры, а в ряде случаев и выходу всего КА из строя. Причиной дифференциальной зарядки служат потоки электронов с энергией 1 – 100 кэВ, возникающие в момент магнитной суббури и достигающие значений порядка 1 нА/см² для электронов с энергией порядка 20 кэВ [6].

Основной задачей этих исследований стало выяснение причин возникновения ЭСР и зависимости энергии этих разрядов от условий облучения. Было установлено, что ЭСР могут быть двух типов: возникающие при объемном пробое (ОП) полимера на подложку (ЭСР-ОП) и при скользящем пробое (СП) вдоль открытой поверхности полимера на ближайший заземленный металлический объект (ЭСР-СП), будь это граница раздела полимера и металла или конструкция вакуумной камеры. Оба эти вида разрядов хорошо известны из физики электрического пробоя твердых, жидких или газообразных диэлектриков.

Однако в ходе упомянутых выше исследований с использованием электронных ускорителей была выдвинута гипотеза о существовании еще одного, достаточно специфического вида ЭСР, связанного с образованием двойного электрического слоя на облучаемой поверхности, получившего в литературе название радиационно-электрического пробоя (РЭП) [7–9]. Вопрос о его существовании даже по результатам изучения электризации односторонне металлизированных полимерных пленок не является решенным [10, 11]. Тем более вызывает сомнение возможность его реализации в натуральных условиях космического пространства.

Цель работы — проведение лабораторного моделирования и теоретического анализа природы РЭП.

Методика эксперимента

Лабораторное моделирование электризации полимерных покрытий, используемых на внешней поверхности КА, проводили на электронно-лучевой установке ЭЛА-50/5. Покрытия облучали низкоэнергетическими электронами с энергией 10–50 кэВ при плотности потока 1–100 нА/см² в вакууме при комнатной температуре. Образцы представляли собой плоские пластины размером 150 × 150 мм. Центр образца облучали пучком электронов диаметром 40 мм. Более подробное описание установки и ее технические характеристики приведены в [5]. Исследованы образцы полимеров и композитных материалов на основе полимеров, полимерные покрытия на Al подложках, пленочные и тканые (в том числе с вплетенной металлизированной нитью) маты экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ), карбоновые проводящие конструкции с эпоксидным связующим.

Экспериментальные результаты

При облучении всех перечисленных образцов наблюдали ЭСР, которые были инициированы проводящей заземленной маской или проводящими нитями матов ЭВТИ. Несовершенство технологии изготовления карбоновых проводящих конструкций с эпоксидным связующим приводит к тому, что на их поверхности имеются наплывы эпоксидной смолы, лишённые наполнителя в виде проводящих карбоновых волокон. Именно на этих участках конструкций при облучении наблюдали ЭСР.

Для выявления механизма возникновения ЭСР использовали односторонне металлизированные пленки полиэтилентерефталата (ПЭТФ), причем слой

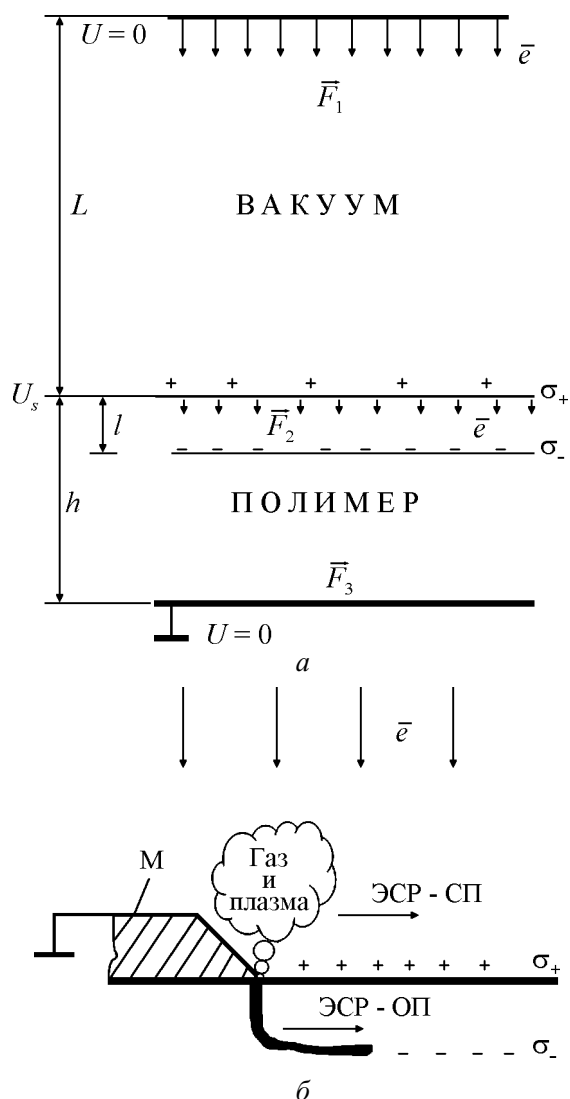


Рис. 1. Постановка лабораторного эксперимента по облучению полимеров низкоэнергетическими электронами: *a* — без заземленной маски, *б* — с заземленной маской для инициирования ЭСР.

металлизации заземлен, а облучали открытую поверхность образца. В первой серии экспериментов на облучаемой поверхности образцов отсутствовала заземленная металлическая маска, а расстояние от облучаемого образца до ближайшего заземленного объекта (исключая заземленный слой металлизации) было не более 150 мм. Облучалась центральная область образца (рис. 1*a*).

Вторая серия экспериментов состояла в использовании аналогичных образцов, на облучаемую поверхность которых помещали заземленную металлическую маску в виде кольца с внутренним диаметром 100 мм. Образец с маской располагался таким образом, чтобы пучок электронов диаметром

40 мм облучал не только открытую поверхность полимера, но и край металлической маски (рис. 1б).

Обсуждение результатов

Обсудим сначала первую серию экспериментов (рис. 1а). Плоский слой полимера металлизирован с тыльной стороны, его размер в плоскости $X - Y$ неограничен. Электроны пучка движутся в положительном направлении оси Z . Плоскость нулевого потенциала расположена на расстоянии $L = 50$ см от свободной поверхности полимерного слоя (что соответствует расположению выходного окна электронной пушки относительно испытуемого образца). Энергия электронов $E_e = 20$ кэВ, а плотность потока $j_b = 10^{-8}$ А/см².

Равновесный потенциал поверхности составит величину, близкую к $\tilde{U}_s = -15$ кВ. Это означает, что на каждый падающий электрон с облучаемой в вакууме открытой поверхности пленки ПЭТФ толщиной $h = 200$ мкм испускается один электрон вторичной электронной эмиссии (ВЭЭ) [5]. Анализ процессов заряжения полимера проведем лишь полуквантитативно, принимая, что электроны с определенной энергией имеют строго фиксированный пробег (приближение “пробег – энергия”), мощность дозы в облучаемой области однородна, темновая проводимость полимера пренебрежимо мала, а рассматриваемая задача может считаться одномерной.

В начальный период облучения имеет место линейное во времени накопление отрицательного объемного заряда на длине экстраполированного пробега падающих электронов $l \approx 6,5$ мкм (потенциал открытой поверхности еще близок к нулю и не оказывает влияния на энергию электронов пучка). Одновременно на самой этой поверхности происходит накопление положительного объемного заряда (также линейно во времени) за счет выхода из нее электронов вторичной электронной эмиссии. Скорость накопления положительного заряда заметно ниже, чем отрицательного (коэффициент ВЭЭ $\delta \approx 0,13$ [5]), так что $\sigma_- = j_b t$, а $\sigma_+ = \delta j_b t$ (обе величины взяты по их арифметическому значению). Рассчитаем электрические поля и потенциалы над слоем полимера и внутри его (за плоскостями нулевого потенциала поле равно нулю).

Рассматриваемая задача легко решается в квазистационарном приближении. В промежутке между срезом ускорителя и облучаемой поверхностью слоя действует однородное электрическое поле F_1 , тормозящее электроны пучка вследствие преобладающего накопления внутри полимера

отрицательного заряда (если за положительное направление выбрать направление движения электронов, то это поле будет положительным). В облучаемой области оно не меняет знака и сильно возрастает по абсолютной величине, так что ток радиационной электропроводности поставляет электроны из облучаемого объема на его поверхность, частично компенсируя их уход с нее в результате ВЭЭ. В необлучаемой области поле F_3 снова отрицательно.

В общем случае на начальном этапе облучения справедливы следующие точные результаты (ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость полимера, а ϵ_0 — электрическая постоянная):

$$F_1 = \frac{(h/L)(\sigma_- - \sigma_+) - \sigma_- l/L}{\epsilon \epsilon_0 (1 + h/\epsilon L)}, \quad (1)$$

$$F_2 = \frac{\sigma_+ + \sigma_- (h-l)/\epsilon L}{\epsilon \epsilon_0 (1 + h/\epsilon L)}, \quad (2)$$

$$F_3 = \frac{(\sigma_+ - \sigma_-) - \sigma_- l/\epsilon L}{\epsilon \epsilon_0 (1 + h/\epsilon L)}. \quad (3)$$

Потенциал открытой поверхности

$$U_s = -F_1 L = F_3 (h-l) + F_2 l. \quad (4)$$

Сделаем подстановки параметров в эти формулы для $t = 1$ с ($\epsilon = 3,2$). Найдем, что $F_3 = -3,1 \cdot 10^4$ В/см, $F_2 = 4,6 \cdot 10^3$ В/см, $F_1 = 11$ В/см и поверхностный потенциал $U_s = -550$ В. Видно, что он еще значительно меньше потенциала остановки пучка (-20 кВ).

Мощность дозы в облучаемой области $R = 160$ Гр/с и для радиационной электропроводности γ_r ПЭТФ в слабых полях к 1-ой секунде облучения ($K_r \approx 1,3 \cdot 10^{-16}$ Ф см⁻¹ Гр⁻¹ и рис. 2 [12]) получим значение $\gamma_r = K_r R = 2,0 \cdot 10^{-14}$ Ом⁻¹ см⁻¹ (радиационно-индуцированный ток находится в районе максимума кинетической кривой). Здесь K_r — радиационная электропроводность диэлектрика, приведенная к единице мощности дозы. Отсюда следует, что ток натекания электронов на открытую поверхность за счет РЭ по облучаемому слою не превышает $9,2 \cdot 10^{-11}$ А/см² (скорость удаления электронов из поверхностного слоя за счет ВЭЭ равна $\delta j_b = 1,3 \cdot 10^{-9}$ А/см² и почти в 14 раз больше).

При дальнейшем облучении все поля, как и поверхностный потенциал, растут по абсолютной величине, пока не устанавливается стационарный режим облучения. Рассмотрим этот вопрос более подробно. Для установившегося поверхностного потенциала $\tilde{U}_s = -15$ кВ электроны пучка достигают поверхности с энергией $\tilde{E}_e = 5$ кэВ, пробег которых сокращается до 0,9 мкм, а мощность дозы в облу-

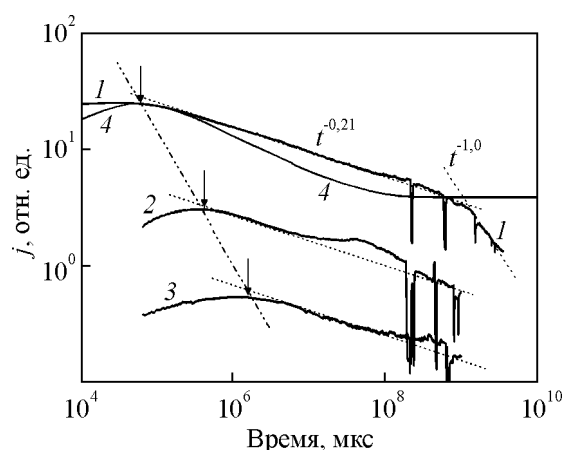


Рис. 2. Кривые переходного тока в ПЭТФ. Мощность дозы 740 (1, 4), 74 (2) и 7,4 Гр/с (3). Стрелками на кривых 2 и 3 обозначены времена достижения максимума тока (0,34 и 3,2 с, соответственно). Кривая 4 [12].

чаемой области возрастает почти в 2 раза. В стационарном режиме вторично-эмиссионный ток в точности уравнивается током натекания электронов на открытую поверхность за счет РЭ в облучаемом слое. При длительном облучении РЭ определенно пройдет через максимум при $t \approx 0,5 - 2$ с, но эффект сильного поля частично скомпенсирует падение РЭ. Примем, что при временах облучения порядка нескольких минут K_r увеличится в 2 раза (рис. 2). В этих условиях поле в облучаемой области F_2 окажется близким к значению $3,6 \cdot 10^5$ В/см при падении напряжения на слое 32 В. Поле в необлучаемой области составит $F_3 \approx -15$ кВ/200 мкм ($7,5 \cdot 10^5$ В/см). Оба поля достаточно велики, но в геометрии открытой поверхности не должны привести к пробое (для этого необходимы поля в 6–8 раз большие) [1]. ЭСР при первом варианте облучения действительно не наблюдали.

Таким образом, при облучении толстых односторонне металлизированных пленок полимеров достигимо стационарное состояние, устанавливающееся исключительно за счет ВЭЭ, усиленной электрическим полем. Наличие РЭ в облучаемой области исключает пробой, так как случайная флуктуация поля в сторону увеличения приведет к сверхлинейному возрастанию РЭ и убыли положительного заряда на поверхности (отрицательная обратная связь).

Вторая схема облучения (рис. 1б) предполагает наличие заземленного металлического предмета (кольца) в непосредственном контакте с открытой диэлектрической поверхностью, подвергающейся воздействию электронного пучка. Весь прежний ход рассуждений сохраняет свою силу для большей части

поверхности, удаленной более чем на 30–50 см от края маски.

Вблизи маски М распределение поля резко изменяется. Слой положительного заряда находится в прямом контакте с маской. Превалирующий отрицательный заряд находится не ближе 5 мкм от нее. Ввиду малого радиуса закругления края маски в непосредственной близости от нее имеет место локальное увеличение поля от 20 до 100 раз, причем на маске наводятся отрицательные заряды, индуцированные положительными зарядами на поверхности полимера. Это поле вблизи маски направлено вдоль поверхности. Создаются идеальные условия для инициирования искрового разряда за счет автоэлектронной эмиссии из маски, выступающей в роли катода. Происходит выброс испаренного металла и полимера в вакуум, ионизация испарившихся молекул ускоренными в этом поле эмитированными электронами и образуется плазма со средним потенциалом близким к нулю. Она начнет расширяться, разряжая положительный заряд и образуя каналы на поверхности полимера. Скорость распространения разрядного фронта вдоль поверхности полимера достигает 20 км/с [13].

Как только произойдет поверхностный пробой, сразу же пробьется и тонкий (5 мкм) слой полимера (главный канал перпендикулярен поверхности) и начнется развитие пробоя в плоскости отрицательного заряда, сопровождающийся образованием фигур Лихтенберга.

Понятно, что для начала скользящего искрового пробоя маски на диэлектрик необходимо меньшее значения поверхностного потенциала, чем при его сквозном пробое на подложку, и, по всей видимости, именно он доставляет наибольшую опасность на борту КА с точки зрения возникновения электростатических разрядов. В проведенных нами экспериментах наблюдались электростатические разряды именно этого типа.

В ряде случаев, напыляя проводящий слой на поверхность диэлектрического материала и соединяя его с корпусом (подложкой) гальванически (сопротивление не больше 1 МОм), удается устранить ЭСР вообще [5]. Очевидно, что в этом случае картина заряжения принципиально отличается от облучения диэлектрика с открытой поверхностью, так как теперь существует прямой путь для сброса заряда на заземленный (соединенный с корпусом объекта) облучаемый электрод за счет радиационной электропроводности диэлектрика. Еще более радикальный метод борьбы с электризацией полимерных покрытий на КА заключается в применении материалов с умеренно низким объемным сопротивлением

$\sim 10^9$ Ом·м [5]. Это позволяет снизить потенциал открытой поверхности до безопасных значений. Действительно, при плотности потока 1 нА/см^2 (что характерно для наиболее сильных магнитных суббурь на геостационарной орбите) поверхностный потенциал составит не более 100 В и пробой окажется полностью исключенным.

Аналогично, использование металлотканых ЭВТИ с размером сетки металлических нитей порядка 0,5 см (для стороны квадрата) с пониженной плотностью ($0,4 \text{ г/см}^3$) уже сейчас решает проблему их электризации на геостационарной орбите [10].

Выводы

1. Инициирование ЭСР в образцах внешних покрытий КА при их облучении потоками низкоэнергетических электронов с энергией 10 – 50 кэВ при плотности потока $1 - 100 \text{ нА/см}^2$ происходит только в местах стыка диэлектрического материала и заземленного проводящего объекта. ЭСР представляют собой искровые скользящие разряды. Их наблюдают при облучении металло-тканых ЭВТИ и карбоновых проводящих конструкций с эпоксидным связующим (в последнем случае, в местах напыла эпоксидной смолы, лишенной наполнителя в виде проводящих карбоновых волокон).

2. При облучении образцов полимеров и композитных материалов на их основе, а также полимерных покрытий на Al подложках ЭСР наблюдали только в том случае, если в зоне облучения находилась специально помещенная на их поверхность заземленная металлическая маска. Без нее разрядов не наблюдали, хотя были все условия для развития РЭП в двойном электрическом слое на открытой поверхности.

3. Предложен возможный механизм искрового скользящего разряда и предложена полуквантитативная модель, качественно объясняющая экспериментально наблюдаемые результаты.

Работа выполнена при поддержке Программы “Научный фонд НИУ ВШЭ” в рамках конкурса “Софинансирование грантов РГНФ и РФФИ” в 2012 году (проект № 12-09-0101).

Литература

1. Gross B., Dow J., Nablo S.V. Charge buildup in electron-irradiated dielectrics. J. Appl. Phys., 1973, v. 44, no. 6, p. 2459 – 2463.
2. Gross B., Sessler G.M., West J.E. Charge dynamics for electron-irradiated polymer-foil electrets. J. Appl. Phys., 1974, v. 45, no. 7, p. 2841 – 2851.
3. Тютнев А.П., Ванников А.В., Мингалеев Г.С., Саенко В.С. Электрические явления при облучении полимеров. М.: Энергоатомиздат, 1985, 176 с.
4. Боев С.Г., Ушаков В.Я. Радиационное накопление заряда в твердых диэлектриках и методы его диагностики. М.: Энергоатомиздат, 1991, 240 с.
5. Тютнев А.П., Саенко В.С., Пожидаев, Костюков Н.С. Диэлектрические свойства полимеров в полях ионизирующих излучений. М.: Наука, 2005, 453 с.
6. Милеев В.Н., Новиков Л.С. Физико-математическая модель электризации ИСЗ на геостационарной и высокоэллиптических орбитах. В кн.: Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. Вып. 86. М.: Наука. 1989, с. 64 – 98.
7. Meulenber A Evidence for a new discharge mechanism for dielectrics in a plasma In: Spacecraft charging by magnetospheric plasmas. Ed. A. Roggen. Progress in Astronautics and Aeronautics. 1976, v. 47, p. 237.
8. Ягушкин Н.И., Графодатский О.С., Исляев Ш.Н., Сергеев А.И., Смекалин Л.Ф. Радиационно-электрические явления в диэлектрических материалах космических аппаратов при электризации. В кн.: Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. Вып. 86. М.: Наука. 1989. с. 131 – 168.
9. Ягушкин Н.И., Сергеев А.И., Гостищев Э.А. Исследование радиационно-электрических процессов в диэлектриках при облучении электронами с энергией до 100 кэВ. В кн.: Модель космоса. Т. 2. Под ред. проф. Л.С. Новикова. М.: КДУ. 2007. с. 343 – 360.
10. Tyutnev A.P., Tarasov V.N., Karpechin A.I., Saenko V.S., Khodnenko V.P., Pozhidaev E.D., Babkin G.V. Electron charging of metallized fabrics for spacecraft thermal blankets Proc. 6th Int. Symp. on Materials in a Space Environment. ESTEC. Noordwijk. 1994, p. 341 – 348.
11. Tyutnev A.P., Khodnenko V.P., Sadovnichii D.N., Yushkov E.S., Novikov L.S. The nature of electrostatic discharges as studied during preflight laboratory testing of Electro spacecraft Proc. 7th Int. Symp. on Materials in a Space Environment. ESTEC. Toulouse. 1997, p. 101 – 106.
12. Тютнев А.П., Саенко В.С., Смирнов И.А., Пожидаев Е.Д. Радиационная электропроводность полимеров при длительном облучении. Химия высоких энергий, 2006, т. 40, № 5, с. 364 – 375.
13. Антонов В.М., Пономаренко А.Г., Графодатский О.С., Исляев Ш.Н. Исследование электризации моделей космических аппаратов в лабораторных условиях В кн.: Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике солнца. Вып. 86. М.: Наука, 1989. с. 45 – 63.

Статья поступила в редакцию 25.01.2012 г.

Тютнев Андрей Павлович — Московский институт электроники и математики НИУ ВШЭ (г. Москва), доктор физико-математических наук, профессор. Специалист в области электризации космических аппаратов E-mail: artyutnev@yandex.ru.

Белик Глеб Андреевич — Московский институт электроники и математики НИУ ВШЭ (г. Москва), аспирант. Специализируется в области электризации космических аппаратов. E-mail jstonline@yandex.ru.

Абрамешин Андрей Евгеньевич — Московский институт электроники и математики НИУ ВШЭ (г. Москва), докторант. Специалист в области электризации космических аппаратов. E-mail: roz@miem.edu.ru.

Саенко Владимир Степанович — Московский институт электроники и математики НИУ ВШЭ (г. Москва), доктор технических наук, профессор. Специалист в области электризации космических аппаратов. E-mail: vsaenko@inbox.ru.