

06

Низкотемпературная радиационная электропроводность полистирола под действием электронов низких энергий

© И.Р. Муллахметов, В.С. Саенко, А.П. Тютнев, Е.Д. Пожидаев

Учебно-исследовательская лаборатория функциональной безопасности космических аппаратов и систем, Московский институт электроники и математики им. А.Н. Тихонова, Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, 123458 Москва, Россия
e-mail: imullakhmetov@hse.ru

Поступило в Редакцию 19 августа 2022 г.

В окончательной редакции 2 ноября 2022 г.

Принято к публикации 2 ноября 2022 г.

Разработана методика и впервые получены достаточно полные данные по радиационной электропроводности полистирола при температуре 79 К при импульсном и непрерывном воздействии электронов с энергией 50 keV. Показано, что радиационная электропроводность полистирола при температуре 79 К, как и при комнатной температуре определяется суммой двух компонент: мгновенной и задержанной. Обе компоненты при 79 К имеют значительно меньшие величины, чем при 298 К. Полный сигнал падает в 40 раз, при этом задержанная компонента падает почти в 200 раз, и мгновенная становится преобладающей в сигнале радиационной электропроводности. Показано, что полистирол, способный противостоять возникновению электростатических разрядов при комнатной температуре, при 79 К переходит в разряд материалов, в которых разряды возможны.

Ключевые слова: электронное излучение, радиационная электропроводность, полистирол, низкие температуры, электризуемость.

DOI: 10.21883/JTF.2023.01.54072.207-22

Введение

К настоящему времени практически отсутствуют опубликованные в литературе результаты исследований радиационной электропроводности (РЭ) полимеров при низких температурах. Экспериментальные данные по низкотемпературной РЭ полимеров при воздействии 1 ms импульсов ускоренных электронов изложены в монографии [1]. Кроме того, опубликован ряд работ [2–5] по РЭ некоторых органических жидкостей (Черноголовка). К сожалению, систематические исследования РЭ полимеров космической техники при низких температурах не проводились. Однако такие данные очень важны при оценке электризуемости диэлектриков в околоземной космической плазме, а также в плазме других планет (например, Юпитера), обладающих собственной магнитосферой. Действительно, в работе [6] подробно рассмотрены оценочные методы определения максимального электрического поля при облучении полимерных пленок потоками электронов. Из цитируемой работы следует, что максимальное электрическое поле, которое может быть создано в полимерной пластине (или пленке) при электронном облучении прямо пропорционально плотности тока падающих на поверхность пластины электронов и обратно пропорционально проводимости материала этой пластины. Это обстоятельство приводит к заключению, что полимерный материал, признанный не электризующимся при комнатной температуре, становится вполне электризующимся при пониженной

температуре, когда его РЭ значительно (в полистироле (ПС) — в 40 раз) снижается. Предметом настоящей работы является методика исследования РЭ полимеров при низких температурах, экспериментальное изучение РЭ ПС и проведение оценочных расчетов максимальных электрических полей в этом материале при воздействии низкоэнергетического электронного излучения, что позволит определить возможность возникновения электростатических разрядов. ПС был выбран в качестве модельного полимера, свойства которого хорошо известны, для отработки методики низкотемпературных исследований, впоследствии планируется исследование полимеров космического применения.

1. Описание эксперимента

В качестве экспериментального оборудования для измерения РЭ полимеров при низких температурах используется доработанная установка ЭЛА-50/5 для электронно-лучевой сварки, позволяющая облучать исследуемый образец пучком электронов импульсно или непрерывно. Энергию электронов можно регулировать от 1 до 50 keV. Блок-схема измерительной низкотемпературной ячейки и измерительной системы установки представлена на рис. 1.

Исследуемый образец полимера с напыленными алюминиевыми электродами помещается в медную измерительную ячейку. Образец охлаждается посредством

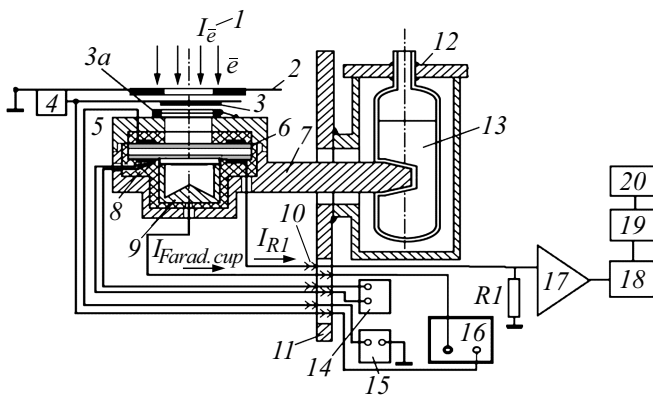


Рис. 1. Блок-схема низкотемпературной ячейки и измерительной системы установки для измерения РЭ полимеров при низких температурах: 1 — поток электронов, режим импульсный или непрерывный; 2 — коллиматор; 3 — заслонка для прерывания потока электронов и его измерения; 3а — покрытая с двух сторон алюминием сменная пленка ПЭТФ в обойме служит для обеспечения теплового режима, толщина пленки 5 μm ; 4 — электромеханическая система управления заслонкой; 5 — медный корпус измерительной ячейки с тоководом постоянного напряжения к образцу 6; 7 — медный охлаждающий стержень; 8 — медь-константановая термопара; 9 — цилиндр Фарадея для контроля тока пучка при длительных измерениях; 10 — вакуумный токовод; 11 — открывающаяся крышка вакуумной камеры; 12 — корпус сосуда Дьюара; 13 — жидкий азот; 14 — измеритель ЭДС термопары; 15 — источник высокого напряжения, подключенный к верхнему электроду образца; 16 — двухлучевой осциллограф Tektronix 3012B; R1 — блок резисторов от 100 Ω до 200 k Ω ; 17 — дифференциальный усилитель с блоком питания и коэффициентом усиления от 0.1 до 100; 18 — 14-битный АЦП L-CARD 14-440; 19 — персональный компьютер со специальным ПО для регистрации проведенных измерений; 20 — принтер для печати оформленных графиков изменения РЭ во времени. Тепловая защита ячейки с образцом, выполненная из материала экранно-вакуумной теплоизоляции космических аппаратов, условно не показана.

теплопередачи по медному стержню, который соединяет измерительную ячейку и сосуд Дьюара, в котором находится жидкий азот. Измерительная ячейка вместе с теплопроводящим стержнем защищена от внешних тепловых потоков экранно-вакуумной теплоизоляцией, которая применяется для обеспечения теплового режима космических аппаратов. Над образцом установлена обойма со сменной пленкой полиэтилентерефталата (ПЭТФ) толщиной 5 μm с напыленными на обе ее стороны слоями алюминия толщиной 100 nm для уменьшения нагрева измеряемого образца излучением от термокатода электронно-лучевой пушки. Нами было экспериментально определено, что такая пленка ПЭТФ уменьшает мощность дозы электронного излучения в измеряемом образце в 1.35 раза, что учитывалось при обработке экспериментальных данных.

Измерительная ячейка снабжена медь-константановой термопарой для контроля температуры образца. Ско-

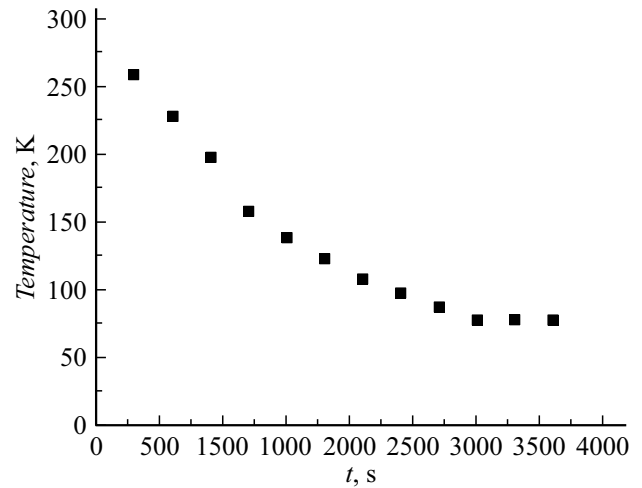


Рис. 2. Снижение температуры образца от времени после заполнения сосуда Дьюара жидким азотом.

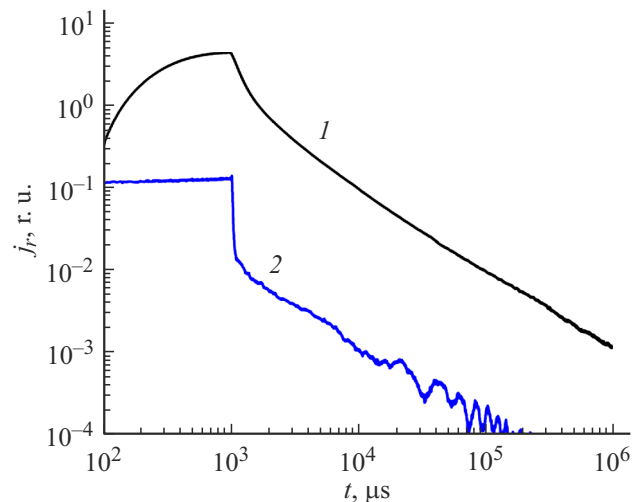


Рис. 3. Сигнал радиационного тока через образец ПС при облучении 1 ms импульсом при температуре 298 (1) и 79 К (2).

рость снижения температуры измеряемого образца представлена на рис. 2. Как видно из рисунка, температура измеряемого образца достигает установившегося значения 78 К за 50 min. Эксперименты по измерению РЭ проводились по истечению часа после заливки жидкого азота в сосуд Дьюара.

На рис. 3 показаны РЭ ПС при импульсном облучении длительностью 1 ms при 79 и 298 К. Видно значительное уменьшение (в 40 раз) общего сигнала радиационного тока через образец ПС при понижении температуры.

2. Моделирование РЭ

Для теоретического описания и моделирования РЭ применялась модель Роуза-Фаулера-Вайсберга

(РФВ) [1]:

$$\begin{cases} \frac{dN(t)}{dt} = g_0 - k_r N_0(t) N(t), \\ \frac{\partial \rho(E, t)}{\partial t} = k_c N_0(t) \left[\frac{M_0}{E_1} \exp\left(-\frac{E}{E_1}\right) - \rho(E, t) \right] - \\ - \nu_0 \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \rho(E, t), \\ N(t) = N_0(t) + \int_0^\infty \rho(E, t) dE, \end{cases}$$

$$\gamma_r = e\mu_0 N_0(t),$$

где $N(t)$ — полная концентрация основных носителей заряда (в случае ПС — дырки); g_0 — скорость объемной генерации носителей заряда; k_r — коэффициент объемной рекомбинации носителей заряда; k_c — константа скорости захвата носителей заряда на ловушки; M_0 — суммарная концентрация исходных ловушек, экспоненциально распределенных по энергии; $\rho(E, t)$ — энергетическая плотность распределения захваченных носителей заряда; ν_0 — частотный фактор термического освобождения захваченных электронов из ловушек; E_1 — параметр экспоненциального распределения ловушек по энергии; γ_r — РЭ полимера; e — элементарный заряд; μ_0 — подвижность носителя заряда.

Ранее в работе [7] мы установили, что при комнатной температуре для ПС справедливы следующие параметры для модели РФВ: дисперсионный параметр $\alpha = kT/E_1 = 0.35$, частотный фактор $\nu_0 = 8 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$. Дисперсионный параметр для требуемой температуры можно получить с помощью соотношения $\alpha(79 \text{ К}) = \alpha(298 \text{ К}) \cdot 79/298 \approx 0.09$. Частотный фактор был получен методом подбора по результатам численного расчета ($4 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$). Остальные параметры модели РФВ не зависят от температуры.

Значение j_r приводится к значению РЭ согласно методике, описанной в [8]:

$$\gamma_r(t) = \frac{j_r(t)}{F_0},$$

где $\gamma_r(t)$ — РЭ, равная сумме задержанной и мгновенной компонент; j_r — плотность тока, получаемая из эксперимента, F_0 — напряженность поля в облучаемом образце.

На рис. 4 изображены кривые РЭ при облучении 1 ms импульсом, полученные экспериментально и с помощью моделирования с соответствующими параметрами. На рис. 5 представлены кривые РЭ при непрерывном облучении.

Как видно из рис. 4 и 5, модель РФВ адекватно описывает РЭ при низких температурах, что дает возможность ее применения в расчетах для исследования возможности электростатических разрядов (ЭСР) в полимерах космического применения по методике, изложенной в [9].

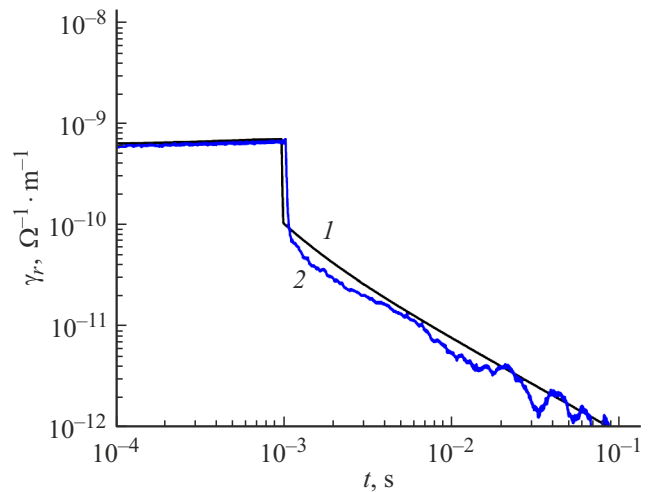


Рис. 4. РЭ ПС при облучении 1 ms импульсом при 79 К при моделировании (1) по модели Роуза–Фаулера–Вайсберга и в результате измерения (2). Мощность дозы электронного излучения — $1.3 \cdot 10^5 \text{ Gy/s}$.

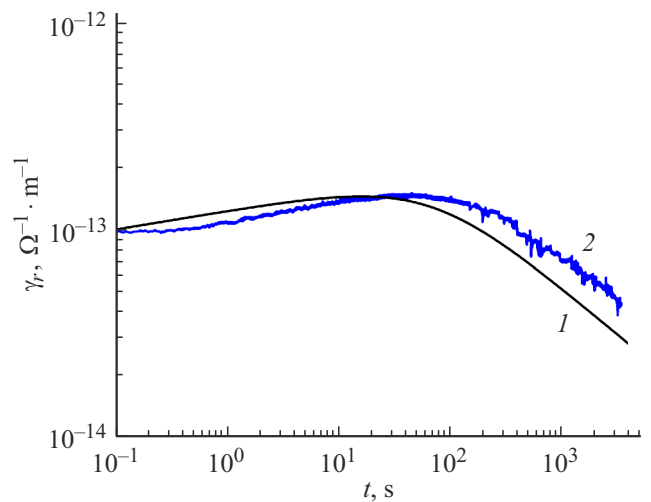


Рис. 5. Сравнение расчетного (1) и экспериментального (2) изменений РЭ ПС для непрерывного облучения при 79 К. Мощность дозы электронного излучения — 13 Gy/s .

3. Возможность возникновения ЭСР

Как установлено нашими экспериментами, РЭ ПС при температуре 79 К значительно ниже, чем при комнатной температуре. Кроме того, известно, что суммарный накопленный диэлектрическим материалом заряд тем меньше, чем выше радиационная электропроводность этого диэлектрика, за счет меньшего времени релаксации внедренного заряда. Исходя из этого, можно сделать вывод, что при низких температурах вероятность накопления критической концентрации заряда в диэлектрике выше, что может привести к электростатическим разрядам. Оценим эту возможность.

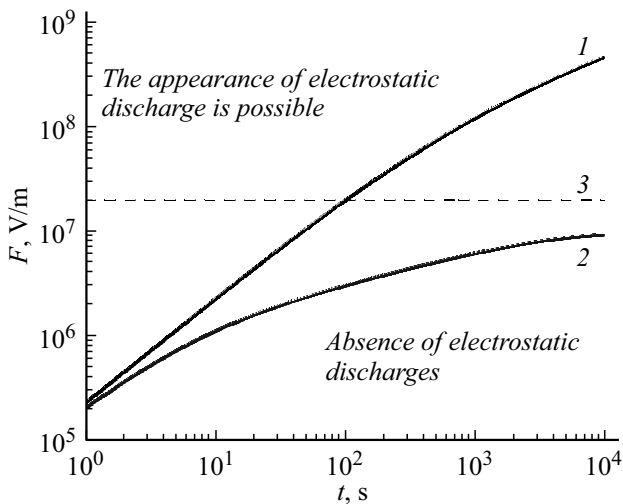


Рис. 6. Расчетные значения напряженности поля в ПС от времени облучения при 79 (1) и 298 К (2). Штриховой линией (3) показан уровень напряженности поля, при котором происходят электростатические разряды. Плотность тока пучка $i_0 = 10^{-5} \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$.

Для этого воспользуемся дифференциальным уравнением зависимости напряженности электрического поля в облучаемой части диэлектрика от времени, возникающей в результате радиационной электризации (см. [9]):

$$\frac{dF}{dt} = \frac{h-R}{h\varepsilon\varepsilon_0} \{i_0 - [F(t)(\gamma_D + \gamma_R(t))]\},$$

где F — напряженность электрического поля в облучаемой части полимера, $[\text{V}\cdot\text{m}^{-1}]$; t — время облучения, [s]; i_0 — плотность потока электронов, падающих на поверхность пленки, $[\text{A}\cdot\text{m}^{-2}]$; $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$ — электрическая постоянная; ε — относительная диэлектрическая постоянная полимера; γ_D — величина темной проводимости полимера; γ_R — радиационная проводимость полимера (в ее облучаемой части); R — максимальный пробег электрона; h — толщина полимера. Численные расчеты изменения напряженности поля во времени проведены с помощью программы Mathcad.

Учитывая, что темновая проводимость при комнатной температуре на несколько порядков меньше радиационной (порядка $10^{-16} \text{ }\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$) и активационно зависит от температуры, слагаемым темновой проводимости можно пренебречь (принять равным нулю).

Результаты оценки напряженности электрического поля в условиях протекания магнитосферной суббури ($i_0 = 10^{-5} \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$), когда радиационная электризация наиболее интенсивна, представлены для $R = 0.5h$ (максимальный пробег электронов равен половине толщины образца ПС) на рис. 6.

Заметим, что в результате проведения натурных испытаний на спутнике SCATHA, запущенном NASA для изучения радиационной электризации, было установлено,

что ЭСР возникают, когда электрическое поле в объеме диэлектрика достигает $2 \cdot 10^7 \text{ V/m}$. Эта величина фигурирует в справочнике NASA, как критериальная [10], и именно она берется нами как начало разряда.

Как видно из рис. 6, электризуемость ПС при низких температурах существенно увеличивается: при 79 К должны наблюдаться электростатические разряды в отличие от комнатной температуры, что подчеркивает важность данных исследований для материалов, используемых в космической технике.

Заключение

Исследована радиационная электропроводность полистирола в импульсном (1 ms) и непрерывном режиме облучения при температуре 79 К. Показано, что при снижении температуры до указанной величины РЭ по-прежнему, как и при комнатной температуре, состоит из двух компонент: мгновенной и задержанной. Наибольшее влияние снижение температуры оказывает на задержанную компоненту. Эта компонента, будучи измеренной через $100 \mu\text{s}$ после окончания импульса излучения, спадает почти в 100 раз. В то же время общий сигнал РЭ как при импульсном, так и при непрерывном воздействии падает в 40 раз. Известно [11], что для вычисления РЭ полимеров принято использовать выражение $\gamma_r = AR^\Delta$, где R — доза облучения, A — экспериментально определяемый коэффициент РЭ (индивидуален для каждого полимера, как и показатель степени $0.5 \leq \Delta \leq 1.0$). В работе установлено, что A снижается в 40 раз, а показатель степени Δ возрастает от значения 0.75 при комнатной температуре до предельной величины 1.0 при 79 К. Вольт-амперная характеристика радиационного тока в диапазоне электрических полей ($5 \cdot 10^6 - 5 \cdot 10^7 \text{ V/m}$) сохраняет свою сверхлинейность, которая имеет место при комнатной температуре и подчиняется выражению $i_r = E^\delta$, где $\delta = 1.6$.

Для теоретического описания и моделирования РЭ при 79 К нами использовалась модель РФВ, как и в случае ее удачного применения для описания РЭ ПС при комнатной температуре [7]. Судя по приведенным в работе данным, использование этой модели вполне оправдано и для случая пониженной температуры.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Программе фундаментальных исследований НИУ ВШЭ за ее поддержку.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А.П. Тютнев, В.С. Саенко, Е.Д. Пожидаев, Н.С. Костюков. *Диэлектрические свойства полимеров в полях ионизирующих излучений* (Наука, М., 2005), с. 453.
- [2] А.В. Толмачев. Автореф. канд. дисс. физ.-мат. наук (Черноголовка, ИХФ АН СССР, 1984)
- [3] А.В. Толмачев, Л.В. Лукин, Б.С. Яковлев. *Хим. физика*, **4**, 557 (1985).
- [4] Б.С. Яковлев, Е.Л. Франкевич. *Журн. физ. хим.*, **40** (6), 1327 (1966).
- [5] Б.С. Яковлев, Г.Ф. Новиков. *Успехи химии*, **63** (5), 402 (1994).
- [6] М.И. Панасюк, Л.С. Новиков. *Модель космоса. Физические условия в космическом пространстве* (КДУ, М., 2007), т. 1.
- [7] A.P. Tyutnev, V.S. Saenko, I.R. Mullakhmetov, I.I. Agarov. *J. Appl. Phys.*, **129**, 175107 (2021). DOI: 10.1063/5.0048649
- [8] A. Tyutnev, V. Saenko, A. Zhadov, E. Pozhidaev. *Polymers*, **11**, 2061 (2019). DOI: 10.3390/polym11122061
- [9] С.Р. Тумковский, И.Р. Муллахметов, Е.Д. Пожидаев, В.С. Саенко. *Информационные технологии*, **28** (5), 233 (2022). DOI: it_28_233-239
- [10] *NASA-Technical Handbook: Mitigating in-Space Charging Effects — A Guideline*, document Rec. NASA-HDBK-4002B, Jul. 2022
- [11] S.G. Boev, V.A. Paderin, A.P. Tyutnev. *J. Electrostatics*, **34** (1), 27 (1995). DOI: 10.1016/0304-3886(94)00025-R