

УДК 004.942

С.Р. Тумковский, д-р техн. наук, профессор, e-mail: STumkovskiy@hse.ru,

И.Р. Муллахметов, аспирант, e-mail: imullakhmetov@hse.ru,

Е.Д. Пожидаев, д-р техн. наук, профессор, e-mail: EPozhidaev@hse.ru,

В.С. Саенко, д-р техн. наук, профессор, e-mail: VSaenko@hse.ru,

Национальный исследовательский университет «Высшая школа
экономики»

Идентификация модели радиационной проводимости полимерных материалов

Разработана методика идентификации модели радиационной проводимости полимерных материалов корпусов микросхем микроэлектронной аппаратуры (МЭА). На основе разработанной методики проведено компьютерное моделирование радиационного заряжения полимерных корпусов микроэлектронной аппаратуры, обладающих повышенной проводимостью. Результаты исследований направлены на разработку композитных полимерных материалов для корпусов микроэлектронной аппаратуры с проводимостью, обеспечивающей отсутствие электростатических разрядов и позволяющих существенно увеличить сроки активного существования космических аппаратов.

***Ключевые слова** – идентификация, математическое и компьютерное моделирование, радиационное заряжение, радиационная проводимость, электростатические разряды, космические аппараты, микроэлектронная аппаратура.*

Введение

В настоящее время применение полимерных композиционных материалов для корпусирования МЭА является перспективным направлением герметизации микросхем, использующихся в космической технике. Это позволяет: уменьшить масса-габаритно характеристики интегральных микросхем в 2,5÷3 раза, обеспечить хороший теплоотвод, повысить технологичность производства

интегральных схем, снизить себестоимость производимых интегральных микросхем.

В то же время МЭА космических аппаратов (КА), функционирующих на околоземных орбитах, подвергается интенсивному воздействию электронов и ионов космической плазмы [1,2]. В результате в корпусах МЭА, выполненных из композитных диэлектриков, происходит радиационное заряджение, накапливается электрический заряд, и могут возникать электростатические разряды (ЭСР), которые приводят к отказам и тем самым влияют на надежность функционирования КА [3-5].

Существующие методы защиты микроэлектронной аппаратуры от воздействия ЭСР подробно изложены в [6,7]. В отличие от них для МЭА, находящейся внутри КА, авторами предложено использовать композитные полимерные материалы корпусов с повышенной проводимостью [8,9], получаемых путем добавления в полимерные корпуса МЭА проводящего материала (нанотрубок, графитированной сажи, металлического порошка и т.д.). Увеличение проводимости материала корпуса, приводит к усилению стока накапливаемого заряда, вследствие чего разрядов не происходит.

Принято считать [10], что при радиационном заряджении диэлектриков, находящихся под воздействием космической плазмы, электростатические разряды возникают, когда напряженность электрического поля в них достигает критической величины, равной $2 \cdot 10^7$ В/м. С учетом этого фактора моделирование кинетики заряджения позволит установить минимально допустимую проводимость корпуса микроэлектронной аппаратуры, обеспечивающую отсутствие электростатических разрядов. Однако, если для чистых диэлектриков с удельной объемной проводимостью порядка 10^{-16} – 10^{18} Ом⁻¹·м⁻¹ имеется целый ряд работ по кинетике накопления заряда и соответствующие физико-математические модели заряджения [11,12], то для полимерных композитов такие работы за исключением нескольких [13,14] практически отсутствуют.

В [13] рассматривается модель, учитывающая только темновую проводимость композитного диэлектрика. В ней показано, что удельная объемная

проводимость $10^{-10} \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$ обеспечивает отсутствие ЭСР. Однако, в [14] показано, что наличие радиационной проводимости может существенно увеличивать проводимость материала корпуса МЭА, и это необходимо учитывать при расчетах напряженности электрического поля в полимере в процессе заряжения.

Для расчетов процесса заряжения полимера и изменения напряженности электрического поля в нем можно использовать модель радиационной проводимости Роуза – Фаулера - Вайсберга [15]. Однако при этом возникает необходимость решения сложной системы интегро-дифференциальных уравнений, что не всегда оправдано, поэтому для построения модели авторами решена задача идентификации модели конкретного полимерного материала в виде аналитической функции кинетики заряжения на основе экспериментальной кривой зависимости радиационной проводимости от времени.

Модель радиационного заряжения полимерного корпуса МЭА

Как уже отмечалось, для ЭСР, возникающих при воздействии космической плазмы, обычно принимается, что они появляются при достижении напряженностью электрического поля в диэлектрике критического значения, составляющего $2\cdot 10^7 \text{ В}\cdot\text{м}^{-1}$ [10]. Поэтому в качестве модели будем использовать дифференциальное уравнение зависимости напряженности электрического поля внутри полимера от времени воздействия на него электронов плазмы (времени радиационного облучения):

$$\frac{dE}{dt} = \frac{h-R}{h\cdot\varepsilon_0\cdot\varepsilon} \left\{ i_0 - [E_1(t)\cdot(\gamma_D + \gamma_R(t))] \right\}, \quad (1)$$

где E – напряженность электрического поля в облучаемой части полимера, $\text{В}\cdot\text{м}^{-1}$; t - время облучения, i_0 – плотность потока электронов, падающих на поверхность пленки, $\text{А}\cdot\text{м}^{-2}$; $\varepsilon_0 = 8,85\cdot 10^{-12} \text{ Ф}\cdot\text{м}^{-1}$ - электрическая постоянная; ε - относительная диэлектрическая постоянная полимерного электрика; γ_D - величина темной проводимости полимера; $\gamma_R(t)$ - радиационная проводимость полимера (в облучаемой её части); R - максимальный пробег электрона; h - толщина полимера.

Идентификация модели радиационной проводимости полимерного корпуса от времени облучения

Таким образом, для решения дифференциального уравнения зависимости напряженности электрического поля от времени воздействия электронов плазмы на полимер необходимо иметь модель радиационной проводимости полимерного корпуса от времени облучения.

Получение этой модели сформулируем как задачу идентификации на основе априорной информации о полимере и данных экспериментальных изменений его радиационной проводимости во времени.

В основе методов идентификации лежит идея мысленного эксперимента с «черным ящиком», сформулированная Н. Винером. В теоретическом случае «черный ящик» представляет собой некоторый объект, о структуре и внутренних параметрах которого исследователю ничего неизвестно. В нашем случае таким объектом является исследуемый полимер, входным воздействием поток электронов i_0 , а выходной характеристикой зависимость радиационной проводимости полимера от времени $\gamma_R^3(t)$ (рис. 1).

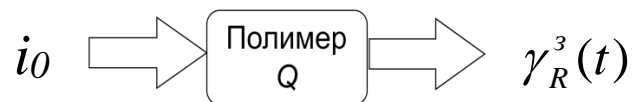


Рис. 1. Схема модели полимера в виде «черного ящика»

Поэтому задача идентификации формулируется следующим образом. Пусть в результате эксперимента для заданного полимера проведено измерение зависимости радиационной проводимости $\gamma_R^3(t)$ от времени в заданном диапазоне времени и при заданной энергии электронного пучка i_0 . Требуется определить структуру (оператор) модели и его параметры.

Для успешного решения задач этого класса необходимо следовать следующим требованиям [16]:

1. Интервал времени, на котором задается выходная характеристика $\gamma_R^3(t)$, должен гарантировать информативность исходного массива данных;

2. Получение оператора $\gamma_R^p(Q)$ должно осуществляться на основе априорной информации об исследуемом полимере, в соответствии с характером изменения $\gamma_R^3(t)$, а число искомых параметров Q выражения $\gamma_R^p(Q)$ должно выбираться из принципа минимальной достаточности.

После получения оператора модели задача идентификации сводится к поиску таких значений вектора параметров Q , при которых целевая функция минимальна. То есть задача идентификации сводится к решению задачи минимизации функции многих переменных.

В подавляющем большинстве случаев в качестве целевой выбирается среднеквадратичная функция:

$$F(Q) = \sum_{i=1}^N \left(\gamma_{Ri}^3 - \gamma_{Ri}^p(Q) \right)^2 \Rightarrow \min,$$

где γ_{Ri}^3 - значения заданных характеристик объекта;

$\gamma_{Ri}^p(Q)$ - значения характеристик объекта, рассчитанных по математической модели;

Q - вектор идентифицируемых параметров математической модели.

Подробное описание методов минимизации функций многих переменных можно найти в [19]. Выбор наиболее эффективного метода для минимизации функции многих переменных отдельная сложная задача, требующая исследований целевой функции. Опуская изложение этих исследований, в нашем случае, минимизацию суммы квадратов отклонений произведём по алгоритму Левенберга – Марквардта [20].

При корпусировании МЭА применяются сложные полимерные композитные материалы. Однако, механизм радиационного заряжения различных полимеров один и тот же, поэтому для построения модели в работе использованы несколько модельных материалов, обладающих различными свойствами.

Эксперимент по измерению их радиационной проводимости проводился на установке [17], имитирующей радиационное заряжение полимерных образцов под воздействием потока электронов из космической плазмы при комнатной температуре в вакууме $2 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. Блок-схема установки и методика измерений подробно описаны в [18], а в качестве модельных были выбраны

полиэтилен низкой плотности, полиэтилентерефталат и полиимид, из которых два последних широко применяются в космической технике.

Результаты эксперимента для полиэтилена низкой плотности толщиной 20 мкм, энергии электронного пучка 50 кэВ и плотности потока электронного облучения $i_0 = 3.18 \cdot 10^{-5} \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$ представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Полиэтилен низкой плотности									
t, с	0	7	14	20	33	46	54	63	72
74	127	155	208	235	268	290	370	398	452
508	642	698	860	1075	1300	1700	2000	2300	3000
$Y^3(t)$	0	2.517	2.652	2.699	2.718	2.710	2.705	2.686	2.653
2.643	2.552	2.483	2.384	2.335	2.276	2.214	2.128	2.066	1.965
1.904	1.845	1.758	1.672	1.443	1.289	1.156	1.052	0.9079	0.814

Результаты эксперимента для полиэтилентерефталата толщиной 20 мкм, энергии электронного пучка 50 кэВ и плотности потока электронного облучения $i_0 = 3.18 \cdot 10^{-4} \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$ представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Полиэтилентерефталат									
t, с	0	0.1	0.4	0.751	0.836	0.921	1	2	4
6	8	10	20	40	80	120	230	400	600
904	1290								
$Y^3(t)$	0	22.3	44.35	42.28	41.72	41.21	40.75	37.40	34.18
30.65	27.57	24.55	16.79	11.28	7.44	5.926	4.428	3.759	3.377
3.106	2.979								

Результаты эксперимента для полиимида толщиной 20 мкм, энергии электронного пучка 50 кэВ и плотности потока электронного облучения $i_0 = 3.18 \cdot 10^{-4} \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$ представлены в таблице 3.

Таблица 3.

Полиимид									
t, с	0	0.01	0.03	0.045	0.1	0.4	1	3	10
30	100	200	300	500	750	1000	1250	1500	1750
2000	2250	2500	2750	3000	3250	3500			
$Y^3(t)$	0	5.57	12.3	15.92	24.4	27.9	29.8	26.9	26.1
24.4	20.1	21.3	23.6	24	27.2	31.8	37.3	43.1	48.4

51.4	57.6	62.6	64.6	68.5	73.7	77.4			
------	------	------	------	------	------	------	--	--	--

В таблице 4 представлены структуры и параметры идентифицированных моделей полиэтилена низкой плотности, полиэтилентерефталата и полиимида, а на рис. 2 показаны экспериментальные и расчетные кривые радиационной проводимости вышеперечисленных полимеров от времени облучения.

Таблица 4.

Полиэтилен низкой плотности				
Модель:	$\gamma_R^p(t) = q_1 + q_2 \cdot \exp(-t / q_3) - q_4 \cdot \exp(-t / q_5)$			
0.703	-2.76	2.87	2.06	1.04e+03
Полиэтилентерефталат				
Модель	$\gamma_R^p(t) = q_1 + q_2 \cdot \exp(-t / q_3) - q_4 \cdot \exp(-t / q_5)$			
q_1	q_2	q_3	q_4	q_5
4.3	35.3	21.4	-39.6	1e-05
Полиимид				
Модель	$\gamma_R^p(t) = q_1 + q_2 t$			
18.4	0.0168	-	-	-

Отметим, что для большинства полимеров эти кривые имеют вид, как на рис. 2а и 2б. Лишь в случае полиамидов и полимеров, допированных некоторыми низкомолекулярными соединениями, имеющими систему сопряженных связей, радиационная проводимость имеет вид возрастающей от времени прямой. Это связано с образованием новых прыжковых центров зарядовых носителей при облучении.

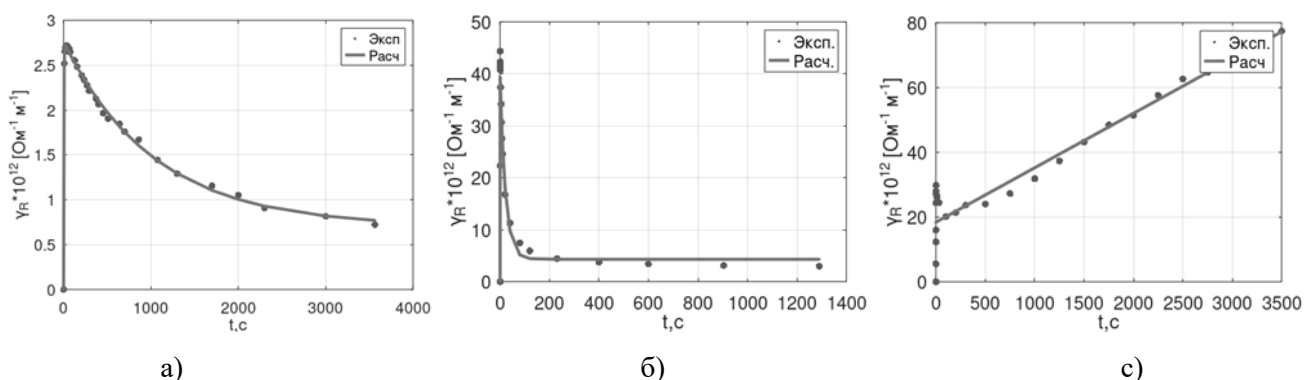


Рис. 2. Экспериментальная и расчетная зависимости радиационной проводимости а) полиэтилена низкой плотности, б) полиэтилентерефталата, в) полиимида от времени облучения: ● экспериментальная; — расчетная.

Как видно из рисунка 2 идентифицируемые модели дают хорошее совпадение для всех исследуемых модельных полимеров за исключением начального участка у полиэтилентерефталата и полиимида, однако исследования показали, что начальный участок кривой радиационной проводимости практически не влияет на кинетику заряжения.

Как уже отмечалось экспериментальные и расчетные характеристики радиационной проводимости получены для при определенном значении i_0 . В то же время принято считать, что спокойной геомагнитной обстановке соответствует плотность потока электронного облучения $i_0 = 10^{-7} \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$, а геомагнитной суббуре - $10^{-5} \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$.

Для получения общего выражения зависимости радиационной проводимости от времени облучения при переменной плотности электронного потока воспользуемся подходом, изложенным в работе [12]:

$$\gamma_R = A_m \cdot i_0^\Delta \cdot y(t). \quad (3)$$

A_m - постоянная,

i_0 - плотность потока электронов,

Δ - постоянный параметр, определяемый природой полимера. В частности, для полиэтилена низкой плотности $\Delta = 0.67$, для полиэтилентерефталата и для полиимида $\Delta = 1$.

Таким образом, выражение (3) позволяет рассчитывать радиационную проводимость во времени для различных плотностей потока электронов, воздействующих на разные полимеры. Это представляется существенным при анализе заряжения в условиях суббури, когда плотность потока электронов из космической плазмы может существенно возрасти по сравнению со спокойной геомагнитной обстановкой.

Подстановка полученного выражения (3) в дифференциальное уравнение (1) и его численное интегрирование позволяет моделировать заряжение различных полимеров и полимерных композитных корпусов МЭА при различных величинах плотности потока электронов.

В качестве примера рассмотрим моделирование радиационного заряжения полиэтилена низкой плотности (ПЭНП) в условиях спокойной геомагнитной обстановки и в условиях суббури.

На рис. 3 приведены результаты компьютерного моделирования кинетики заряжения ПЭНП, имеющего удельную объемную темновую проводимость $\gamma_D = 10^{-15} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, для случая когда пробег электрона равен половине толщины полимера ($R = 0.5h$). Плотность потока электронов составляет $10^{-7} \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$, что соответствует спокойной геомагнитной обстановке.

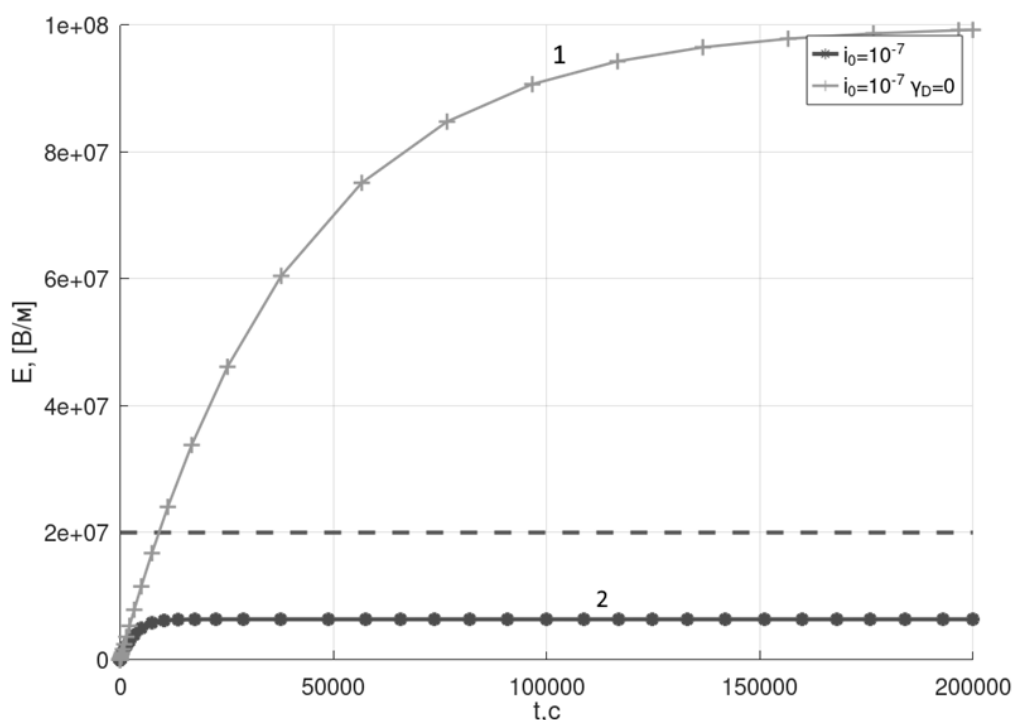


Рис.3. Изменение напряженности электрического поля ПЭНП с $\gamma_D = 10^{-15} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ от времени облучения электронами с плотностью потока $10^{-7} \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$ пленки: 1 - без учета РП; 2 - с учетом РП. Пунктирная линия показывает уровень критической напряженности поля, при которой возникает ЭСР.

Кривая 1 показывает, как изменяется напряженность электрического поля со временем облучения в отсутствие радиационной проводимости (РП). Пунктиром на рисунке нанесен уровень критической напряженности поля, при которой должен иметь место разряд. Видно, что при учете только темновой проводимости должен был бы происходить электростатический разряд, и это обусловлено её незначительной величиной. Но наличие радиационной проводимости приводит к

резкому снижению напряженности электрического поля (кривая 2), и ЭСР возникать не будет. Таким образом, радиационная проводимость полиэтилена низкой плотности в условиях спокойной геомагнитной обстановки обеспечивает отсутствие разрядов.

В тоже время в условиях суббури, когда плотность потока электронов возрастает до $10^{-5} \text{ А}\cdot\text{м}^{-2}$, как показывает рис. 5, радиационная проводимость полиэтилена низкой плотности с $\gamma_R = 10^{-15} \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$ уже не будет в достаточной мере снижать величину напряженности поля, и это приводит к возникновению ЭСР.

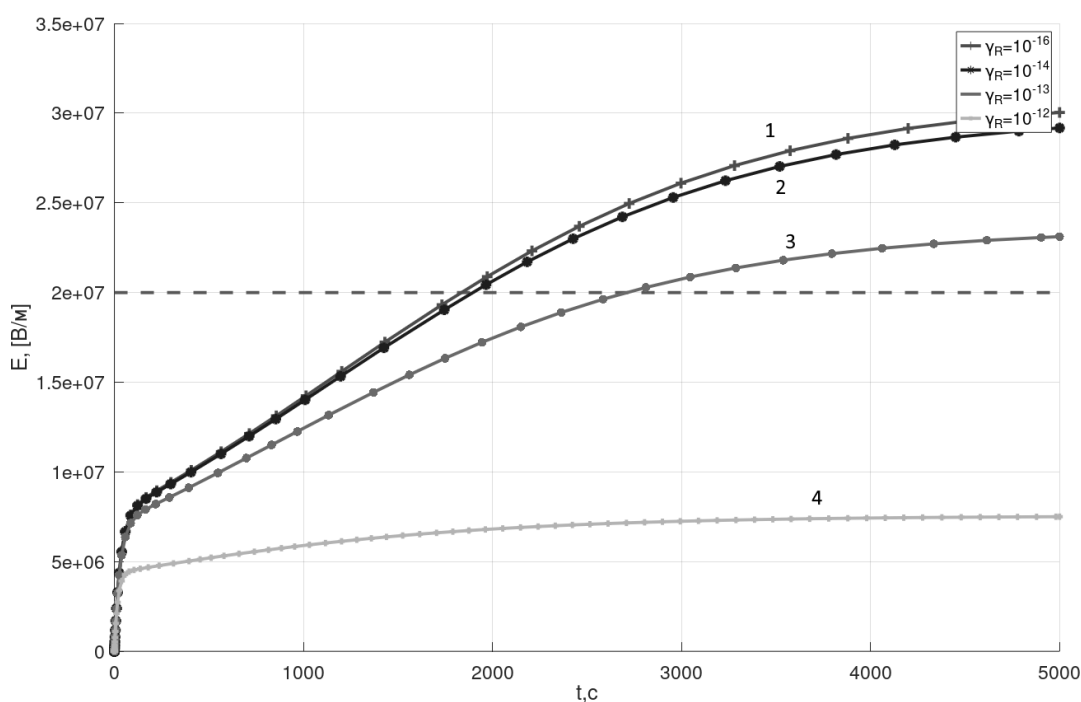


Рис. 5 Зависимость напряженности электрического поля в облучаемой части пленки ПЭНП от времени облучения при плотности потока электронов $i_0 = 10^{-5} \text{ А}\cdot\text{м}^{-2}$: 1 - $\gamma_D = 10^{-16} \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$; 2 - $\gamma_D = 10^{-14} \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$; 3 - $\gamma_D = 10^{-13} \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$; 4 - $\gamma_D = 10^{-12} \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$. Пунктирная линия показывает уровень критической напряженности поля, при которой возникает ЭСР

Для того, чтобы в этих условиях исключить ЭСР, как показывает рис. 5, необходимо, чтобы полимер имел удельную объемную темновую проводимость по крайней мере $\gamma_D = 10^{-12} \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$. Этого можно добиться, используя композит ПЭНП с определенной концентрацией проводящего наполнителя. В этом случае напряженность электрического поля будет всегда ниже критической $2 \cdot 10^7 \text{ В/м}$, обуславливающей возникновение ЭСР.

Заключение

Разработана методика идентификации модели радиационной проводимости полимерных материалов корпусов микроэлектронной аппаратуры. На основе априорной информации о свойствах полимерных материалов и с учетом характера измеряемых характеристик получены операторы моделей радиационной проводимости полиэтилена низкой плотности, полиэтилентерефталата и полиимида.

С использованием среднеквадратичного критерия решена задача параметрической идентификации моделей указанных полимеров, в результате которой получены адекватные модели их радиационной проводимости позволяющие решать задачу их кинетики заряжения при различных плотностях потока электронов.

На примере полиэтилена низкой плотности приведены результаты моделирования его радиационного заряжения и показано, что в условиях спокойной геомагнитной обстановки радиационная проводимость обеспечивает отсутствие ЭСР, а в условиях геомагнитной суббури, когда плотность потока электронов возрастает на два порядка радиационная проводимость не обеспечивает достаточный сток заряда, возникают ЭСР, и для их устранения необходимо в ПЭНП вводить проводящий наполнитель, создающий удельную объемную темновую проводимость не ниже, чем $\gamma_D = 10^{-12} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

Список литературы

1. **DeForest S.E.** Spacecraft charging at synchronous orbit. J. Geophys. Res. 1972. Vol. 77. No. 4. P. 651–659.
2. **Frederickson A.R.** (1974) Radiation Induced Electrical Current and Voltage in Dielectric Structures. AFRL-TR-74 – 0583, 41 p.
3. **Frederickson A.** Electric Discharge Pulses in Irradiated Solid Dielectrics in Space // IEEE Transactions on Electrical Insulation. 1983. Vol. EI-18. No. 3. P. 337–349.
4. **Акишин А.И.** Электроразрядные сбои в космических аппаратах в зоне космических излучений // Перспективные материалы. 2010. № 2. С. 27–32.

5. **Catani J.-P., Payan D.** Electrostatic behavior of materials in a charging space environment // Proc. 9th Int. Symp. On Materials in a Space Environment. Noordwijk: ESA Publ. Division, 2003. P. 3–16.
6. **Pike C.P., Bunn M.H.** A Correlation Study Relating Spacecraft Anomalies to Environmental Data // Spacecraft Charging by Magnetospheric Plasmas. : American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1976. P. 45–60.
7. **C. K. Purvis, H. B. Garrett, A. C. Whittlesey, and N. J. Stevens,** Design Guidelines for Assessing and Controlling Spacecraft Charging Effects, NASA Technical Paper 2361, National Aeronautics and Space Administration, September 1984.
8. **V. Saenko, A. Tyutnev, A. Abrameshin, G. Belik.** Computer Simulations and Experimental Verification of the Nanoconductivity Concept for the Spacecraft Electronics // 14th Spacecraft Charging Technology Conference, 04-08 April 2016, ESA-ESTEC, Noordwijk.
9. **Пожидаев Е.Д. Саенко В.С., Смирнов И. А., Бабкин Г.В., Тютнев А.П.** Повышение стойкости космических аппаратов к воздействию поражающих факторов электризации // Космонавтика и ракетостроение. 2003. № 1 (30). С. 32–35.
10. NASA – HDBK – 4002A. Mitigating In-Space Charging Effects-A Guideline: NASA, 2011.
11. **Садовничий Д.Н., Тютнев А.П., Хатипов С.А., Саенко В.С., Пожидаев Е.Д.** Накопление объемных зарядов при облучении эпоксидного компаунда электронами в вакууме // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 2003. Т. 45. № 2. С. 230–236.
12. **Boev S.O., Paderin V.A., Tyutnev A.P.** Reversal of the current in irradiated dielectrics. Journal of Electrostatics. 1995. Vol. 34. P. 27-35.
13. **Абрамешин А.Е., Азаров М.Д., Пожидаева А.Е.** Компьютерное моделирование радиационного заряжения слабопроводящих диэлектриков // Системный администратор. 2015. №4. С. 91–95.
14. **Korkinets V., Abrameshin A.E., Pozhidaev E.D.** Model of radiation electrization of low-pressure polyethylene films with controlled conductivity, in: 2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). Proceedings. M.: IEEE, 2018. Ch. 7. P. 1-5.
15. **Tyutnev, A.P.; Ikhsanov, R.Sh.; Saenko, V.S.; Pozhidaev, E.D.** Theoretical Analysis of the Rose–Fowler–Vaisberg Model. Polymer Sci. A 2006, Vol. 48, Pp. 2015-2022.
16. **Д. Гроп** Методы идентификации систем: Пер. с англ. – М. Мир, 1978. – 302 с.

17. **A.P.Tyutnev, G.A. Belik, A.E. Abrameshin, V.S. Saenko.** Laboratory Simulation of Charging of Polymers by Beams of Low-Energy Electrons // Inorganic Materials: Applied Research. 2013. Vol. 4. No. 2. Pp. 98-102.
18. **Tyutnev A., Saenko V., Zhadov, A., Pozhidaev E.** Time-resolved radiation-induced conductivity of polyimide and its description using the multiple trapping formalism. *Polymers*. 2019, 11, 2061.
19. **Б. Банди** Методы оптимизации. Вводный курс: Пер. с англ. - М. Радио и связь, 1988. – 128 с.
20. **Marquardt D.** An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters// *SIAM J. Appl. Math.* – 1963.– Vol. 11. – p. 431–441.

Tumkovskiy S.R. Professor, e-mail: STumkovskiy@hse.ru
Mullakhmetov I.R. Aspirant, e-mail: imullakhmetov@hse.ru
Pozhidaev E.D. Professor, e-mail: EPozhidaev@hse.ru
Saenko V.S. Professor, e-mail: Vsaenko@hse.ru,
National Research University Higher School of Economic,

Identification of the model of radiation conductivity of polymeric materials

A technique for identifying a model of radiation conductivity of polymeric materials for chip packages of microelectronic equipment has been developed. On the basis of the developed technique, computer simulation of radiation charging of polymer cases of microelectronic equipment with increased conductivity was carried out. The research results are aimed at the development of composite polymeric materials for chip packages of microelectronic equipment with conductivity that ensures the absence of electrostatic discharges and makes it possible to significantly increase the life of spacecraft.

Keywords: identification, mathematical and computer modeling, radiation charging, radiation conductivity, electrostatic discharges, space vehicles, microelectronic equipment.

References

1. **DeForest S.E.** Spacecraft charging at synchronous orbit. *J. Geophys. Res.* 1972. Vol. 77. No. 4. Pp. 651–659.
2. **Frederickson A.R.** (1974) Radiation Induced Electrical Current and Voltage in Dielectric Structures. AFRL-TR-74 – 0583, 41 p.

3. **Frederickson A.** Electric Discharge Pulses in Irradiated Solid Dielectrics in Space // IEEE Transactions on Electrical Insulation. 1983. Vol. EI-18. No. 3. Pp. 337–349.
4. **Akishin A.I.** Elektrorazryadnye sboi v kosmicheskikh apparatah v zone kosmicheskikh izluchenij [Spacecraft electrical discharge failures in in the space radiation zone] // Perspektivnye materialy. 2010. № 2. Pp. 27–32. (In Russian)
5. **Catani J.-P.,** Payan D. Electrostatic behavior of materials in a charging space environment // Proc. 9th Int. Symp. On Materials in a Space Environment. Noordwijk: ESA Publ. Division, 2003. Pp. 3–16.
6. **Pike C.P., Bunn M.H.** A Correlation Study Relating Spacecraft Anomalies to Environmental Data // Spacecraft Charging by Magnetospheric Plasmas. : American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1976. Pp. 45–60.
7. **C. K. Purvis, H. B. Garrett, A. C. Whittlesey, and N. J. Stevens,** Design Guidelines for Assessing and Controlling Spacecraft Charging Effects, NASA Technical Paper 2361, National Aeronautics and Space Administration, September 1984.
8. **V. Saenko, A. Tyutnev, A. Abrameshin, G. Belik.** Computer Simulations and Experimental Verification of the Nanoconductivity Concept for the Spacecraft Electronics // 14th Spacecraft Charging Technology Conference, 04-08 April 2016, ESA-ESTEC, Noordwijk.
9. **Pozhidaev, E.D., Saenko, V.S., Smirnov I.A., Babkin G.V., Tyutnev, A.P.** Povyshenie stojkosti kosmicheskikh apparatov k vozdejstviyu porazhayushchih faktorov elektrizacii [Improving the stability of the spacecraft to the impact of factors affecting the electrification] // Kosmonavtika i raketostroenie [Space and rocket science]. 2003. № 1 (30). Pp. 32–35. (In Russian)
10. NASA – HDBK – 4002A. Mitigating In-Space Charging Effects-A Guideline: NASA, 2011.
11. **Sadovnichij D.N., Tyutnev, A.P., Khatipov S.A., Saenko, V.S., Pozhidaev E.D.** Nakoplenie ob"emnyh zaryadov pri obluchenii epoksidnogo kompaunda elektronami v vakuume [Accumulation of bulk charges during irradiation of

- epoxy compound with electrons in vacuum] // *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya [High-molecular compound]. Series A.* 2003. T. 45. № 2. S. 230–236. (In Russian)
12. **Boev S.O., Paderin V.A., Tyutnev A.P.** Reversal of the current in irradiated dielectrics. *Journal of Electrostatics.* 1995. Vol. 34. P. 27-35.
 13. **Abrameshin A. E., Azarov M.D., Pozhidaeva A.E.** Komputernoe modelirovanie radiatsionnogo zariazheniya slaboprovodiaschikh dielektrikov [Computer simulation of radiation charging of low-conducting dielectrics] // *Sistemnyi administrator. [System administrator].* 2015. № 4. Pp. 91–95. (In Russian)
 14. **Korkinets V., Abrameshin A.E., Pozhidaev E.D.** Model of radiation electrization of low-pressure polyethylene films with controlled conductivity, in: 2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). *Proceedings. M.: IEEE, 2018. Ch. 7. P. 1-5.*
 15. **Tyutnev, A.P.; Ikhsanov, R.Sh.; Saenko, V.S.; Pozhidaev, E.D.** Theoretical Analysis of the Rose–Fowler–Vaisberg Model. *Polymer Sci. A* 2006, 48, 2015-2022.
 16. **D. Grop** *Metody identifikatsii sistem: Per. s angl. – M. Mir, 1978. – 302 s.*
 17. **A.P.Tyutnev, G.A. Belik, A.E. Abrameshin, V.S. Saenko.** Laboratory Simulation of Charging of Polymers by Beams of Low-Energy Electrons // *Inorganic Materials: Applied Research.* 2013. Vol. 4. No. 2. P. 98-102
 18. **Tyutnev A., Saenko V., Zhadov, A., Pozhidaev E.** Time-resolved radiation-induced conductivity of polyimide and its description using the multiple trapping formalism. *Polymers.* 2019, 11, 2061.
 19. **B. Bandi** *Metody optimizatsii. Vvodnyy kurs: Per. s angl. - M. Radio i svyaz', 1988. – 128 s.*
 20. **Marquardt D.** An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters// *SIAM J. Appl. Math.* – 1963.– Vol. 11. – p. 431–441.