

УДК 538.9

А.Д. Жадов, Е.Д. Пожидаев, В.С. Саенко

Аномальное повышение проводимости полиимидных подложек гибких печатных плат при высоких поглощенных дозах радиации

Выполнены экспериментальные исследования электропроводности плёнок полиимида, используемых в качестве подложек гибких печатных плат космического применения, при их облучении электронами в вакууме до высоких поглощённых доз (> 1 МГр). Показано, что электропроводность полиимида при облучении значительно возрастает и при высоких поглощённых дозах может превысить предел, допускаемый ГОСТом на минимальное сопротивление между печатными проводниками. Этот эффект не проявляется на околоземных орбитах, но может сыграть отрицательную роль при использовании таких печатных плат, например, в космическом аппарате, планируемом к запуску в 2026 году к Юпитеру, на орбите которого радиация превышает околоземную в сотни раз. Предложена модель роста проводимости и на основе этой модели определён критерий и разработана инженерная методика прогнозирования долговечности полиимидных подложек гибких печатных плат космического применения по электрофизическим параметрам при высоких уровнях радиации.

Ключевые слова: бортовая радиоэлектронная аппаратура, гибкие печатные платы, подложки из полиимида, космические аппараты, высокие уровни радиации, аномальное повышение проводимости.

Введение

Хорошо известно негативное воздействие электростатических разрядов (ЭСР) на радиоэлектронную аппаратуру как наземного исполнения [1–2], так и на бортовую радиоэлектронную аппаратуру (БРЭА) космических аппаратов (КА) [3]. Причём для БРЭА КА такое воздействие часто оказывается фатальным. Для защиты БРЭА КА от ЭСР применяются материалы с повышенной темновой или радиационной электропроводностью, что позволяет стекать накопленным зарядам и исключать возможность возникновения ЭСР. В справочнике НАСА 4002А печатные платы БРЭА КА идентифицируются как наиболее опасные источники ЭСР, поэтому для околоземных космических аппаратов начали применять гибкие печатные платы (ГПП) [4] из полиимида – материала увеличивающего свою проводимость под действием радиации в вакууме. Это свойство полиимида исключает возможность возникновения ЭСР, кроме того, применение ГПП позволяет значительно снизить массогабаритные показатели БРЭА. Сравнение массогабаритных показателей ПП [5–6] и ГПП [4] показывает перспективность применения ГПП. Однако, для межпланетных миссий возможно ограничение применения ГПП, связанное с аномальным увеличением проводимости между проводниками печатной платы при высоких поглощённых дозах, что может привести к отказу электроники. Разработке рекомендаций по применению полиимидов в качестве подложек ГПП для межпланетных миссий КА посвящена настоящая работа.

Постановка задачи

Для описания происходящих процессов, рассмотрим кривую РЭ для отечественного полиимида ПМ-1 (рис. 1), полученную экспериментально [7–9]. На этой кривой можно выделить три области.

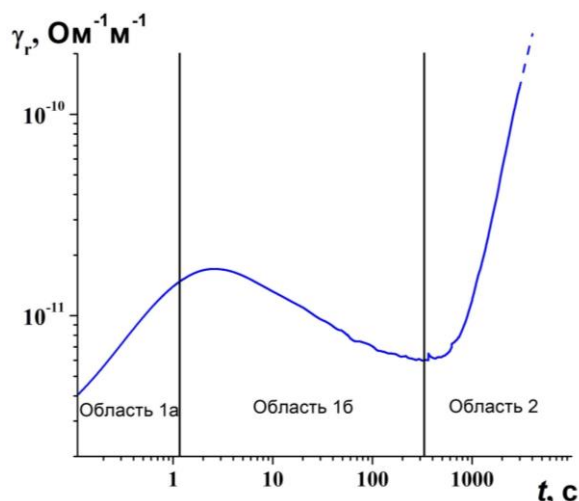


Рис. 1. Экспериментальная зависимость радиационной электропроводности от времени для ПМ-1

Первая временная область (а и б на рис. 1) описывается в рамках модифицированной модели Роуза-Файлера-Вайсберга с биэкспоненциальным распределением ловушек по ширине запрещенной зоны [7–9]. Однако, наибольший интерес для прогнозирования космических миссий представляет вторая временная область, и необходимо для этой временной области разработать модель роста электропроводности при воздействии облучения, в том числе для времён облучения, превышающих экспериментальные, а также разработать инженерную методику, позволяющую количественно оценить рост проводимости между проводниками ГПП при высоких поглощённых дозах облучения и дать рекомендации по применению полиимида в качестве подложек таких плат для данной миссии.

Далее приведём краткое описание физической модели роста электропроводности полиимида при облучении. Эта модель базируется на исследовании прыжкового транспорта носителей заряда в полимерах со специальными низкомолекулярными добавками [10], где был зафиксирован значительный рост подвижности дырок (и, соответственно, проводимости) при увеличении концентрации допанта (добавки), представляющего собой низкомолекулярные соединения, служащие прыжковыми центрами. По нашим представлениям, при облучении полиимида в вакууме в нём образуются свободные макрорадикалы, которые одновременно обладают как сродством к электрону близким к 1 эВ, так и потенциалом ионизации порядка 7 эВ. Такие параметры свободных макрорадикалов позволяют им выступать в роли прыжковых центров, которые в значительной степени контролируют транспорт носителей заряда. В процессе облучения увеличивается концентрация макрорадикалов, являющихся прыжковыми центрами, и, соответственно, растёт электропроводность ПИ.

Для описания кинетики нарастания РЭ во второй временной области на основе экспериментальных исследований была предложена физическая модель РЭ ПИ при его облучении электронами в вакууме. Результатом предложенной модели служит полученная зависимость (1) электропроводности полиимида от поглощенной дозы электронного излучения:

$$\gamma = 10^{-23.25} \cdot D^{2.32}, \quad (1)$$

где: γ – электропроводность полиимида; D – поглощенная доза электронного излучения.

Таким образом, используя экспериментальные данные второй временной области, можно провести аппроксимацию участка аномального возрастания электропроводности и получить зависимость проводимости γ полиимида от поглощенной дозы облучения D (рис. 2).

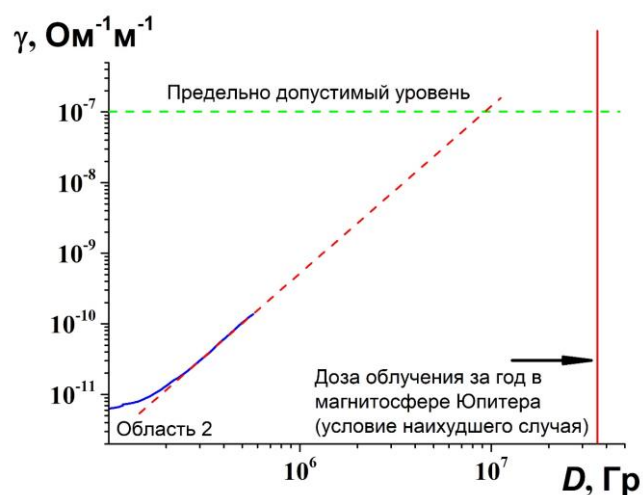


Рис. 2. Зависимость электропроводности γ от дозы облучения D для второй временной области

Затем необходимо определить критерий, на основе которого создать методику прогнозирования долговечности подложек из полиимида в заданной точке орбиты с определенной величиной мощности поглощенной дозы. В соответствии с ГОСТ 23752-79 на печатные платы величина сопротивления между двумя проводниками печатной платы не может быть меньше 1 МОм. С учетом коэффициента запаса равного 10 эта величина повышается до 10 МОм. Для формулировки критерия долговечности ГПП было принято, что максимальная площадь пересечения печатных проводников не превышает 1 см^2 , а толщина подложки составляет 25 мкм. Критерий регламентирует максимальную величину проводимости полиимидной подложки ГПП таким образом, чтобы при наборе максимальной дозы сопротивление между проводниками не было меньше 10 МОм. В соответствии с критерием была разработана инженерная методика прогнозирования долговечности ПИ подложек ГПП, общая схема которой выглядит, как показано на рис. 3. На 1 этапе определяется мощность поглощенной дозы в заданной области рабочей орбиты КА. Выполнение второго этапа позволяет определить суммарную поглощенную дозу за время пребывания КА в этой области орбиты. На третьем этапе на основе модели роста РЭ во 2-й временной области рассчитывается проводимость полиимидной подложки в конце срока нахождения в заданной области. На следующем этапе проводится определение сопротивления между проводниками ГПП. Затем производится сравнение полученного значения сопротивления между проводниками с минимально допустимой величиной этого сопротивления, чтобы сделать обоснованный вывод о возможности применения подложки из полиимида для БРЭА КА данной миссии.



Рис. 3. Критерий и инженерная методика прогнозирования долговечности подложек ГПП при повышенных уровнях радиации

Заключение

Выполнены экспериментальные исследования электропроводности плёнок полиимида, используемых в качестве подложек гибких печатных плат космического применения, при их облучении электронами в вакууме до высоких поглощённых доз (порядка 1 МГр). Показано, что электропроводность полиимида при облучении значительно возрастает и при высоких поглощённых дозах может превысить предел, допускаемый ГОСТом на минимальное сопротивление между печатными проводниками. Этот эффект может сыграть отрицательную роль при использовании таких печатных плат, например, в космическом аппарате, планируемом к запуску в 2026 году к Юпитеру, на орбите которого радиация превышает околоземную в сотни раз. Предложена модель роста проводимости и на основе этой модели, определён критерий и разработана инженерная методика прогнозирования долговечности полиимидных подложек гибких печатных плат космического применения по электрофизическим параметрам при высоких уровнях радиации.

Список литературы

1. Paulmier T., Dirassen B., Belhaj M., Inguibert V., Payan D., Balcon N., Experimental test facilities for representative characterization of space used materials, in Proc. 14th ESA/ESTEC SCTC, Noordwijk, The Netherlands, Apr. 2016, pp. 4–8.
2. Кечиев Л.Н., Пожидаев Е.Д. Защита электронных средств от воздействия статического электричества. – М.: Изд дом Технологии, 2005. – 352 с.
3. Тютнев А.П., Саенко В.С., Пожидаев Е.Д., Костюков Н.С. Диэлектрики и радиация. В 6 кн. Кн.5: Диэлектрические свойства полимеров в полях ионизирующих излучений. Кн.5 –М.: Наука, 2005. – 456 стр.
4. Fjelstad J. Flexible Circuit Technology 4th Edition, IConnect007, 2011, 613 p.
5. Кечиев Л.Н. Практическое руководство по конструированию многослойных печатных плат. – М.: Грифон, 2021. – 418 с.
6. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. – М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. – 618 с.
7. Tyutnev A.P., Saenko V.S., Zhadov A.D., Pozhidaev E.D., Time-Resolved Radiation-Induced Conductivity of Polymers Using the Multiple Trapping Formalism. *Polymers* 2019, 11, 2061 p.
8. Tyutnev, A.P., Saenko, V.S., Zhadov, A.D., Abrameshin, D.A. Theoretical Analysis of the Radiation-Induced Conductivity in Polymers Exposed to Pulsed and Continuous Electron Beams. *Polymers* 2020, 12, 628 p.
9. Tyutnev A.P., Saenko V. S, Zhadov A.D; Pozhidaev E.D. Radiation-Induced Conductivity in Kapton-Like Polymers Featuring Conductivity Rising With an Accumulating Dose. *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 47, no. 8, pp. 3739–3745, Aug. 2019.
10. Tyutnev A.P., Ikhsanov R.S., Saenko V.S. et al. The universal nature of dispersive transport in molecularly doped polymers. *Polym. Sci. Ser. A* 53, 183–190 (2011).

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»; Российская Федерация, Москва, 101000, Мясницкая улица, 20.

Авторы

Жадов Алексей Дмитриевич, аспирант МИЭМ НИУ ВШЭ; Российская Федерация, Москва, 123458, Таллинская улица, 34. azhadov@hse.ru

Пожидаев Евгений Димитриевич, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ, лауреат Премий Правительства РФ, заместитель руководителя департамента электронной инженерии МИЭМ НИУ ВШЭ; Российская Федерация, Москва, 123458, Таллинская улица, 34. epozhidaev@hse.ru

Саенко Владимир Степанович, доктор технических наук, профессор, лауреат Премии Правительства РФ в области науки и техники, профессор-исследователь МИЭМ НИУ ВШЭ; Российская Федерация, Москва, 123458, Таллинская улица, 34. vsenko@hse.ru

Zhadov A.D., Pozhidaev E.D., Saenko V.S.

Abnormal Increase in the Conductivity of Polyimide Substrates Used for Flexible Printed Circuit Boards at High Accumulated Radiation Doses

Abstract. Experimental studies of the electrical conductivity of polyimide films used as substrates for flexible printed circuit boards for spacecraft applications have been irradiated with electrons in vacuum to high accumulated doses (>1 MGy). It has been shown that the electrical conductivity of polyimide under irradiation increases significantly and at high accumulated doses can exceed the limit specified by GOST for the minimum resistance between printed conductors. This effect does not manifest itself in near-Earth orbits but can play a negative role when using such printed circuit boards, for example, in a spacecraft planned to launch in 2026 to Jupiter, in whose orbit the radiation exceeds the near-Earth by hundreds of times. A model of conductivity growth is proposed, and based on this model, a criterion is defined, and an engineering technique is developed for predicting the durability of polyimide substrates of flexible printed circuit boards for spacecraft applications based on electrophysical parameters at high radiation levels.

Key words: On-board electronic equipment, flexible printed circuit boards, polyimide substrates, spacecrafts, high levels of radiation

References

1. Paulmier T., Dirassen B., Belhaj M., Inguibert V., Payan D., Balcon N., Experimental test facilities for representative characterization of space used materials, in Proc. 14th ESA/ESTEC SCTC, Noordwijk, The Netherlands, Apr. 2016, pp. 4–8.
2. Kechiev L.N., Pozhidaev E.D. Zashchita elektronnykh sredstv ot vozdeistviia staticheskogo elektrichstva [Protection of electronic devices from static electricity]. Moscow, 2005, 352 p. (In Russian)
3. Tyutnev A.P., Saenko V.S., Pozhidaev E.D., Kostiuikov N.S. Dielektriki i radiatsiia. V 6 kn. Kn.5: Dielektricheskie svoistva polimerov v poliakh ioniziruiushchikh izluchenii [Dielectrics and radiation. In 6 b. B. 5: Dielectric properties of polymers in the fields of ionizing radiation.]. 2005, 456 p. (In Russian)
4. Fjelstad J. Flexible Circuit Technology 4th Edition, IConnect007, 2011, 613 p.
5. Kechiev L.N. Prakticheskoe rukovodstvo po konstruirovaniiu mnogosloinykh pechatnykh plat [Practical guide to the design of multilayer printed circuit boards]. Moscow, 2021, 418 p. (In Russian)
6. Kechiev L.N. Proektirovanie pechatnykh plat dlia tsifrovoy bystrodeistvuiushchei apparatury [Design of printed circuit boards for digital high-speed equipment]. Moscow, 2007, 618 p. (In Russian)
7. Tyutnev A.P., Saenko V.S., Zhadov A.D., Pozhidaev E.D., Time-Resolved Radiation-Induced Conductivity of Polymers Using the Multiple Trapping Formalism. *Polymers* 2019, 11, 2061 p.
8. Tyutnev, A.P., Saenko, V.S., Zhadov, A.D., Abrameshin, D.A. Theoretical Analysis of the Radiation-Induced Conductivity in Polymers Exposed to Pulsed and Continuous Electron Beams. *Polymers* 2020, 12, 628 p.
9. Tyutnev A.P., Saenko V. S, Zhadov A.D; Pozhidaev E.D. Radiation-Induced Conductivity in Kapton-Like Polymers Featuring Conductivity Rising With an Accumulating Dose. *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 47, no. 8, pp. 3739-3745, Aug. 2019.
10. Tyutnev A.P., Ikhsanov R.S., Saenko V.S. et al. The universal nature of dispersive transport in molecularly doped polymers. *Polym. Sci. Ser. A* 53, pp. 183–190, 2011.