

Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики»

*На правах рукописи*

Жадов Алексей Дмитриевич

**Исследование долговечности полиимидных подложек гибких  
печатных плат РЭА космического применения**

РЕЗЮМЕ ДИССЕРТАЦИИ

на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук

Тютнев Андрей Павлович

Москва - 2021

## **Актуальность темы исследования**

Одной из самых важных проблем для длительной эксплуатации космических аппаратов (КА) на протяжении долгих лет является явление электризации и сопутствующие ему электростатические разряды (ЭСР), которые являются наиболее частой причиной сбоев и отказов бортовой электроники. В процессе эксплуатации КА подвержен воздействию потокам ионов и электронов космической плазмы, вследствие чего происходит накопление заряда на поверхности или внутри КА, то есть возникает электрический потенциал. Наиболее опасными зонами вблизи Земли являются высокоэллиптические и геостационарные (ГСО) орбиты, характерные интенсивным движением частиц с высокими энергиями. Ситуация осложняется ещё и стремительным развитием электронных компонентов, которые становятся всё более сложными и функциональными, что делает их более уязвимыми к воздействиям внешней среды, в частности к ЭСР.

Несмотря на несколько десятилетий изучения феномена электризации и сопутствующих явлений, наличия множества различных подходов и технологий, ЭСР до сих пор является основной причиной отказов высокоорбитальных КА.

Это также связано с тем, что современные КА имеют сложную неоднородную конструкцию и большое количество различных диэлектрических материалов на внешней поверхности. Соответственно, между отдельными участками непроводящей поверхности возникает разность потенциалов, другими словами, происходит дифференциальное заряджение КА. Так как потенциалы выравниваются недостаточно быстро, это приводит к разряду.

Одним из вариантов решения проблемы электризации КА является использование особых диэлектрических материалов, изготовленных из

специальных полимеров. Особенность этих полимеров заключается в их повышенной радиационной электропроводности (РЭ), которая контролирует накопление объемных зарядов в полимере. Чем выше РЭ, тем меньше накопленный заряд, а значит ниже вероятность возникновения ЭСР. Однако, наличие этого свойства не должно влиять на другие диэлектрические характеристики, так, чтобы не нарушалась работоспособность электронных компонентов КА.

В качестве полимеров для этой задачи были выбраны полиимиды, как наиболее перспективные для применения в космической отрасли. Это обусловлено, например, высокой радиационной стойкостью полиимида и рабочей температурой, достигающей 420 К. Кроме того, в рассматриваемых полиимидах (в частности, Kapton® или Kapton-H® корпорации DuPont или его отечественный аналог ПМ1) РЭ возрастает с набором поглощенной дозы ионизирующего излучения и сохраняется в вакууме на значительном уровне длительное время. Это резко отличает полиимид от других полимеров, РЭ которых снижается с набором поглощенной дозы ионизирующей радиации.

Использовать и прогнозировать эти полиимиды в данной работе предполагается для гибких печатных плат (ПП), то есть систем межсоединений, являющихся в настоящее время наиболее актуальными и востребованными.

Таким образом, настоящая диссертация, посвященная разработке методики прогнозирования долговечности полиимидных подложек гибких ПП для околоземных высокоорбитальных КА и межпланетных миссий в солнечной системе, несомненно, является актуальной.

**Объект исследования** – гибкие печатные платы космического применения.

**Предмет исследования** – прогнозирование долговечности полиимидных подложек гибких ПП для высокоорбитальных КА и межпланетных миссий в солнечной системе.

**Цель исследования и научная задача** заключается в исследовании долговечности полиимидных подложек гибких печатных плат радиоэлектронной аппаратуры космического применения и разработке методики прогнозирования длительности их эксплуатации для околоземных высокоорбитальных космических аппаратов и межпланетных миссий.

Для достижения этой цели были сформулированы и поставлены задачи:

1. Выполнить критический обзор и анализ литературных данных по применению полиимида в качестве материала гибких печатных плат космического назначения. Выявить основную технологию изготовления таких плат;
2. Разработать оригинальную методику исследования электропроводности полиимида под действием электронного излучения в вакууме в малосигнальном приближении для широкого временного диапазона (от 20 мкс до 30 с);
3. По классической и разработанной методике провести комплексное изучение радиационной электропроводности с учётом особенностей её роста со временем облучения, определяющих долговечность гибких печатных плат на основе полиимида;
4. Создать физическую полуэмпирическую модель кинетики электропроводности полиимида при его облучении электронами в вакууме, корректно описывающую экспериментальные данные;
5. Создать физическую полуэмпирическую модель роста электропроводности полиимида при его облучении электронами в вакууме;
6. Определить критерий и на основе созданных моделей разработать инженерную методику прогнозирования долговечности полиимидных

подложек гибких печатных плат космического применения в натуральных условиях эксплуатации, в том числе для межпланетных миссий.

### **Научная новизна**

1. Разработана оригинальная методика исследования электропроводности полиимида под действием электронного излучения в вакууме в малосигнальном приближении для широкого временного диапазона (от 20 мкс до 30 с). Методика отличается от известных применением комбинации импульсных и непрерывного воздействий электронного излучения для достижения требуемой величины отклика и отсутствия рекомбинации носителей заряда в образце полиимида.
2. Создана физическая полуэмпирическая модель кинетики электропроводности полиимида при его облучении электронами в вакууме, отличающаяся от известных двухэкспоненциальным распределением ловушек по ширине запрещенной зоны.
3. Создана физическая полуэмпирическая модель роста РЭ кинетики электропроводности полиимида при его облучении электронами в вакууме в диапазоне поглощенных доз (1-30) МГр. Модель объясняет рост РЭ полиимида увеличением концентрации прыжковых центров, создающихся в процессе его облучения.

**Практическая значимость работы** заключается в разработке инженерной методики прогнозирования долговечности полиимидных подложек гибких печатных плат космического применения в натуральных условиях эксплуатации для высокоорбитальных космических аппаратов и межпланетных миссий в солнечной системе. Разработанная методика прогнозирования базируется на созданных физических моделях кинетики и роста электропроводности полиимида при его облучении электронами в вакууме.

### **Методы исследования**

В работе использовались экспериментальные методы импульсного и стационарного радиолиза, основой для которых послужил источник низкоэнергетических электронов с компьютерной регистрацией радиационных токов при исследовании РЭ. Для проведения расчетов по созданной физической полуэмпирической модели проводилось моделирование на современных пакетах расчета MatLab MathCad. Результаты моделирования соответствуют полученным экспериментальным результатам и фундаментальным физическим принципам.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Оригинальная методика исследования электропроводности полиимида под действием электронного излучения в вакууме в малосигнальном приближении для широкого временного диапазона (от 20 мкс до 30 с).
2. Результаты комплексного изучения радиационной электропроводности полиимида различных производителей с учетом особенностей её роста со временем облучения, определяющих долговечность гибких печатных плат на основе полиимида. Время эксперимента составляло 3600 секунд при мощности дозы электронного излучения 190 Гр/с.
3. Физическая полуэмпирическая модель кинетики электропроводности полиимида с двухэкспоненциальным распределением ловушек по ширине запрещенной зоны при его облучении электронами в вакууме.
4. Физическая полуэмпирическая модель роста электропроводности полиимида при его облучении электронами в вакууме в диапазоне поглощенных доз (1-30) МГр.
5. Инженерная методика прогнозирования долговечности полиимидных подложек гибких печатных плат космического применения в натуральных условиях эксплуатации для высокоорбитальных космических аппаратов и межпланетных миссий в солнечной системе.

#### **Соответствие паспорту специальности**

Цель исследования и научная задача заключаются в исследовании долговечности полиимидных подложек гибких печатных плат радиоэлектронной аппаратуры космического применения и разработке методики прогнозирования длительности их эксплуатации для высокоорбитальных космических аппаратов и вносит вклад в следующие области исследований специальности «Электроника, радиотехника и телекоммуникации», перечисленные в паспорте этой специальности НИУ ВШЭ «Инженерные науки и прикладная математика»: исследование новых процессов и явлений, позволяющих повысить эффективность радиотехнических, электронных и телекоммуникационных устройств и систем.

### **Апробация работы**

Результаты работы были представлены на следующих всероссийских и международных конференциях:

1. «Analysis of signal integrity in a microstrip transmission line on a substrate of the nanoconducting dielectric», 2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT), 14-16 марта 2018 г., Москва.
2. «Radiation-induced Conductivity in Kapton-like Polymers Featuring Conductivity Rising with Accumulating Dose», The 15th Spacecraft Charging Technology Conference, 25-29 июня 2018 г., Кобе, Япония.
3. «Сравнительные исследования радиационной электропроводности отечественного полиимида ПМ1 и Каптона», XX Межвузовская научная школа молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине», 25-26 ноября 2019 г., Москва.
4. «Теоретический анализ радиационной электропроводности в полимерах», XXI Межвузовская научная школа молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине», 23-24 ноября 2020 г., Москва.

**Личный вклад автора** состоит в формулировке и постановке задач исследования и их решении, подготовке, реализации, расчёту и анализу экспериментальных и теоретических данных, модификация и использование программного кода для проведения всевозможных расчётов, подготовка и визуализация графического материала, подготовка текста статей и представление результатов исследований в российских и международных изданиях и конференциях.

**Достоверность полученных результатов** в диссертационном исследовании подтверждается:

- численным моделированием на современных пакетах расчета MatLab, MathCad;
- соответствием полученных результатов фундаментальным физическим принципам;
- соответствие экспериментальных результатов и расчетов по предложенным физическим полуэмпирическим моделям.

### **Степень разработанности проблемы**

В настоящее время кинетика переноса носителей заряда при использовании импульсного и непрерывного облучения не может быть описана стандартными моделями множественного захвата для полиимидов и некоторых других полимеров, особенно характерный резкий рост электропроводности при высоких дозах облучения.

### **Список опубликованных статей по теме диссертации.**

Основные положения по теме диссертации изложены в статьях [1-5], проиндексированных в Scopus, при этом журнал [2] находится в квантиле Q2, [3-4] – в квантиле Q1, [5] – в квантиле Q3.



1. A. D. Zhadov. Analysis of signal integrity in a microstrip transmission line on a substrate of the nanoconducting dielectric. 2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT), Moscow, Russia, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/MWENT.2018.8337214.
2. A. Tyutnev, V. Saenko, A. Zhadov and E. Pozhidaev. 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, doi: 10.1109/TPS.2019.2901000.
3. 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.
4. 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.
5. Tyutnev, A.P., Saenko, V.S., Zhadov, A.D. et al. Electron Transport in Polyethyleneterephthalate. Polym. Sci. Ser. A 62, 300–306 (2020).

### **Заключение**

- Разработана оригинальная методика исследования электропроводности полиимида под действием электронного излучения в вакууме в малосигнальном приближении для широкого временного диапазона (от 20 мкс до 30 с). Методика отличается от известных применением комбинации импульсных и непрерывных воздействий электронного излучения для достижения требуемой величины отклика и отсутствия рекомбинации носителей заряда в образце полиимида.
- По разработанной методике проведено комплексное изучение радиационной электропроводности полиимида различных производителей с учётом особенностей её роста со временем облучения, определяющих долговечность гибких печатных плат на

основе полиимида. Время эксперимента составляло 3600 секунд при мощности дозы электронного излучения 190 Гр/с.

- Создана физическая полуэмпирическая модель кинетики электропроводности полиимида при его облучении электронами в вакууме, отличающаяся от известных двухэкспоненциальным распределением ловушек по ширине запрещенной зоны.
- Создана физическая полуэмпирическая модель роста электропроводности полиимида при его облучении электронами в вакууме в диапазоне поглощенных доз (1-30) МГр.
- Определен критерий и разработана инженерная методика прогнозирования долговечности полиимидных подложек гибких печатных плат космического применения в натуральных условиях эксплуатации. В качестве критерия определена величина допустимого сопротивления  $10^7$  Ом для плёнки полиимида толщиной 25 мкм с площадью  $10^{-4}$  м<sup>2</sup>. Эта величина имеет коэффициент запаса 10 по отношению к величине  $10^6$  Ом, определяемой ГОСТ 23752-79 на печатные платы.