

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

*На правах рукописи*

Афанасьева Маргарита Александровна

**Метод создания безразрядных полупроводниковых приборов  
космической электроники в полимерных корпусах**

РЕЗЮМЕ ДИССЕРТАЦИИ  
на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор,  
лауреат Премии Правительства РФ  
в области науки и техники  
Саенко Владимир Степанович

Москва — 2020

### **Актуальность темы**

С развитием современной науки и техники, а также возникновением новых, более сложных, «космических», задач, появилась необходимость в использовании сложных электронных компонентов серийного производства в космических аппаратах, в том числе небольших. Существенное развитие в области разработки интегральных микросхем (ИМС), обладающих улучшенной конструкцией, повышенной надежностью и другими весомыми характеристиками привело к необходимости снижения массогабаритных показателей бортовой радиоэлектронной аппаратуры. В связи с этим произошла трансформация корпусов ИМС, на смену герметичным/керамическим пришли пластиковые материалы.

Безопасность и надежность герметичных/керамических корпусов для военного и аэрокосмического применения на долгие годы оставались наиболее приоритетным критерием их применения. Однако пластиковые корпуса значительно дешевле, более доступны и имеют большую механическую устойчивость. В то же время, отсутствие информации о длительных по времени исследованиях надежности их работы в космических условиях вызывает беспокойство относительно возможности их уверенного использования.

Во время эксплуатации на геостационарных и высокоэллиптических орбитах космические аппараты (КА) подвергаются воздействию электростатических разрядов (ЭСР) на своей поверхности. Возникновение последних обусловлено скоплением статических зарядов на диэлектрических материалах обшивки (в основном полимерных). Потoki электронов, возникающие как результат геомагнитных возмущений, существенно воздействуют на поверхность КА.

В результате многочисленных исследований установлено, что возникновение разрядов, являющихся следствием электризации КА, оказывают наиболее негативное влияние на работу КА. Как показывает статистика мониторинга и испытаний, более половины всех выходов из строя

КА связаны именно с возникновением ЭСР. Данное обстоятельство характерно как для КА, эксплуатируемых на геостационарной орбите, так и на высокоэллиптических орбитах, и в авроральных областях околоземного космического пространства.

Возникновение ЭСР обуславливается временем выравнивания потенциалов проводящих диэлектрических элементов КА. Здесь необходимо отметить, что элементами такой «пары» могут стать диэлектрическая подложка и проводники печатной платы. Радикальным способом устранения возможности возникновения ЭСР является грамотный подбор диэлектрических элементов КА, имеющих особые значения величины электропроводности.

Как наиболее эффективный путь снижения вероятности формирования ЭСР следует отметить решение проблемы путем применения на внешней поверхности КА таких полимерных материалов, которые бы обладали высокой радиационной электропроводностью (РЭ). Высокая РЭ полимера обеспечивает интенсивный сток чрезмерного количества носителей заряда из объема полимера на его поверхность, а также снижению величины электрического поля, возникающего в этом материале при его облучении. Благодаря этому свойству осуществляется выравнивание электрических потенциалов на поверхности полимерного материала и, соответственно, в его объеме, что существенно снижает вероятность возникновения ЭСР.

С начала XXI века ученые во всем мире активно занимаются работами по созданию подобных материалов, а также их вариаций. Необходимо заметить, что подобные исследования сопровождаются рядом трудностей, связанных с прогнозированием поведения РЭ исследуемого образца от ряда факторов, таких, как мощность дозы излучения, поглощенная доза, температура и пр. Таким образом, подробное предсказание поведения РЭ для конкретного испытуемого материала или его модификации с течением времени, с учетом трудности создания особых условий (внешних факторов) становится предметом самостоятельной научной работы.

Учитывая вышеизложенное, представляется крайне необходимым решить задачу по созданию и отработке методики прогнозирования РЭ полимеров как функции времени и внешних условий облучения при помощи компьютерного моделирования и последующего экспериментального подтверждения полученной модели, а также возможностью оценки эффективности применения предполагаемого к использованию на внешней поверхности КА полимерного материала на основе этой методики.

Таким образом, для того, чтобы решить обозначенные задачи, необходимо последовательно выполнить ряд работ. На первом этапе необходимо выбрать диэлектрик, с пониженной электризуемостью, подходящий для исследований. Далее требуется осуществить моделирование, с использованием оптимального программного продукта, процесса изменения его характеристик по ходу течения эксперимента, после чего удостовериться в достигнутых результатах на практике. Создание методики определения возможности применения подобных диэлектриков в качестве материалов корпусов полупроводниковых приборов с целью обеспечения защиты КА помогут существенно повысить стойкость КА к влиянию факторов электризации. Таким образом становится возможным повысить активный срок службы КА, что, безусловно, представляет высокую ценность и задает актуальность темы данной работы.

**Целью исследования** является усиление стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры к влиянию эффектов электризации на основе разработки метода создания безразрядных полупроводниковых приборов космической электроники в полимерных корпусах и реализации на его основе инженерной методики выбора объемной проводимости диэлектрика корпуса для исключения физической возможности возникновения ЭСР типа "заряженный объем полимерного корпуса - кристалл полупроводникового прибора".

Для успешного достижения целевой задачи исследования на основе выполненного обзора и анализа опубликованных литературных данных поставлены нижеперечисленные **задачи** настоящего диссертационного исследования:

1. Осуществить аппроксимацию реального полупроводникового прибора к сферически симметричной форме и разработать физическую модель накопления объемного заряда в полимерном корпусе полупроводникового прибора при равномерной по объему инъекции электронов.

2. На основе аналитических выражений, полученных при решении системы уравнений физической модели, в ПО MatCad создать программу расчета максимального электрического поля в диэлектрике пластикового корпуса полупроводникового прибора (без усиления поля на неоднородностях).

3. Для адекватного расчета коэффициента усиления электрического поля на вершинах и ребрах кристалла прибора, имеющего форму параллелепипеда, выполнить экспериментальные исследования пробивной прочности воздуха при использовании верхнего электрода с различными радиусами кривизны (от 10 мм до 20 мкм). Полученную экспериментальную зависимость подтвердить теоретически и использовать в инженерной методике для расчета максимального электрического поля в реальной конструкции п/п прибора.

4. Разработать новый, применимый для конфигурации полупроводниковых приборов в пластиковых корпусах, критерий максимального электрического поля, при достижении которого возможно протекание ЭСР из объема полимера на кристалл полупроводникового прибора.

5. На основе выполненных исследований разработать инженерную методику выбора объемной проводимости диэлектрика корпуса для исключения физической возможности возникновения электростатических разрядов (ЭСР) типа "заряженный объем полимерного корпуса - кристалл

полупроводникового прибора" применимую для полупроводниковых приборов различных конструкций и размеров.

### **Степень проработанности темы исследования**

До настоящей работы при проектировании космических аппаратов использовались два критерия по величине электрического поля в объеме диэлектрического элемента. Первый критерий - ЭСР из объема диэлектрика возможен при величине электрического поля превышающей  $2 \cdot 10^7$  В/м. Вторым критерий (используется в основном для печатных плат бортовой электроники) - ЭСР возможен при накопленном суммарном флюенсе электронов  $2 \times 10^{10}$  эл./см<sup>2</sup> за 10 часов.

### **Методы исследования**

В диссертационной работе для решения поставленных задач использовались следующие теоретические, экспериментальные и расчетные методы исследования:

1. Метод физического моделирования. Данный метод позволил для условий, при которых в полимерный диэлектрический слой с конечной проводимостью происходит равномерная по объему инжекция высокоэнергетических электронов, в сферическом приближении получить аналитические выражения для максимального электрического поля.

2. Проведены экспериментальные исследования пробивной прочности воздуха для адекватного расчета коэффициента усиления электрического поля на вершинах и ребрах кристалла прибора, имеющего форму параллелепипеда. Исследования проводились с использованием верхних электродов с различными радиусами кривизны (от 10мм до 20 мкм). Полученная экспериментальная зависимость получила теоретическое подтверждение и использована в инженерной методике для расчета максимального электрического поля в реальной конструкции полупроводникового прибора.

3. Программные методы. Создана программа расчета максимального электрического поля в диэлектрике пластикового корпуса полупроводникового прибора (без усиления поля на неоднородностях). Данная программа написана посредством ПО Mathcad на основе аналитических выражений, полученных при решении системы уравнений физической модели. Полученный таким образом расчетный метод стал основой инженерной методики выбора объемной проводимости диэлектрика корпуса для исключения физической возможности возникновения ЭСР типа "заряженный объем полимерного корпуса - кристалл полупроводникового прибора".

### **Личный вклад автора в разработку проблемы**

В диссертационной работе автору принадлежит основная идея работы, которая заключается в создании сферической модели чипа и получении аналитического решения этой задачи. Итогом расчета является максимальная величина электрического поля, которое будет создано равномерным по объему электронным излучением – на первом этапе. Проведение автором экспериментально-расчетных работ для определения коэффициента усиления поля на ребрах и вершинах кристалла чипа. На основе этих работ, выполненных автором диссертации, реализована инженерная методика для определения величины электрической проводимости пластика корпуса чипа, при которой исключается физическая возможность возникновения электростатических разрядов (ЭСР) типа «объем пластика полимерного корпуса – кристалл чипа».

На основе выполненных исследований автором диссертации сформулировано и обосновано третье критериальное число, которое определяется максимально возможным электрическим полем на границе раздела пластик корпуса – чип. При превышении этого поля возможен ЭСР. Это третье критериальное число обсуждалось на международной конференции SCTC-2018 в Японии (Кобе) и, по всей вероятности, войдет в

справочные материалы, предназначенные создателям электроники для космической техники.

В рамках диссертационного исследования автором получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Расчет электрических полей в диэлектриках радиотехнических изделий космических аппаратов» № 2017614168.

Автором диссертации проведен анализ полученных результатов, сформулированы выводы по диссертационной работе.

### **Основные результаты исследования:**

1. Выполнен критический обзор и анализ опубликованных литературных данных по проблеме электризации космических аппаратов. Выявлены основные факторы, приводящие к возникновению ЭСР как при внешней, так и при внутренней электризации КА. Рассмотрены принимаемые меры по исключению возможности возникновения ЭСР на КА. Сделан вывод о недостаточности мероприятий по защите КА от поражающих факторов внутренней электризации и поставлена цель и задача настоящего исследования.

2. Выполнена аппроксимация реального полупроводникового прибора к сферически симметричной форме и разработана физическая модель накопления объемного заряда в полимерном корпусе п/п прибора при равномерной по объему инжекции электронов.

3. На основе аналитических выражений, полученных при решении системы уравнений физической модели, в ПО MatCad создана программа расчета максимального электрического поля в диэлектрике пластикового корпуса п/п прибора (без усиления поля на неоднородностях).

4. Для адекватного расчета коэффициента усиления электрического поля на вершинах и ребрах кристалла прибора имеющего форму параллелепипеда в ходе выполнения диссертационной работы были выполнены экспериментальные исследования пробивной прочности воздуха при



использовании верхнего электрода с различными радиусами кривизны (от 10мм до 20 мкм). Полученная экспериментальная зависимость получила теоретическое подтверждение и использована в инженерной методике для расчета максимального электрического поля в реальной конструкции п/п прибора.

5. В настоящей работе предложен, прошел апробацию на международной конференции (Кобе, Япония) и изложен в журнале IEEE Transactions on Plasma Science третий критерий, определяющий возможность протекания ЭСР из объема полимерного диэлектрика в кристалл п/п прибора при максимальном электрическом поле  $2 \cdot 10^6$  В/м.

6. На основе выполненных исследований разработана инженерная методика выбора объемной проводимости диэлектрика корпуса для исключения физической возможности возникновения электростатических разрядов (ЭСР) типа "заряженный объем полимерного корпуса - кристалл полупроводникового прибора", применяемая для полупроводниковых приборов различных конструкций и размеров.

**Научная новизна** результатов работы состоит в следующем:

1. Предложена физическая модель накопления объемного заряда в полимерном корпусе полупроводникового прибора при равномерной по объему инжекции электронов для случая сферически симметричной формы кристалла и корпуса. Данная модель отличается дополнительным включением результатов экспериментального исследования пробивной прочности воздуха при использовании верхних электродов с различными радиусами кривизны (от 10мм до 20 мкм), необходимых для адекватного расчета коэффициента усиления электрического поля на вершинах и ребрах кристалла прибора, имеющего форму параллелепипеда.

2. В настоящей работе впервые предложен, прошел апробацию на ведущей (15 Spacecraft Charging Technology Conference, 2018 год)

международной конференции по электризации КА (Кобе, Япония) и изложен в статье в журнале IEEE Transactions on Plasma Science новый критерий величины электрического поля в объеме полимерного диэлектрика, при достижении которого возникает электростатический разряд из объема этого диэлектрика в кристалл полупроводникового прибора:  $2 \times 10^6$  В/м.

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

1. Физическая модель накопления объемного заряда в полимерном корпусе п/п прибора при равномерной по объему инъекции электронов для случая сферически симметричной формы кристалла и корпуса.

2. Новый критерий, определяющий возможность протекания ЭСР из объема полимерного диэлектрика в кристалл п/п прибора при максимальном электрическом поле  $2 \cdot 10^6$  В/м предназначенный для использования при проектировании бортовой аппаратуры космических аппаратов.

3. Инженерная методика выбора объемной проводимости диэлектрика корпуса для исключения физической возможности возникновения электростатических разрядов (ЭСР) типа "заряженный объем полимерного корпуса - кристалл полупроводникового прибора" применяемая для полупроводниковых приборов различных конструкций и размеров.

Достоверность полученных результатов в диссертационном исследовании подтверждается:

- численным моделированием на современных электродинамических пакетах расчета;
- полученные результаты соответствуют фундаментальным физическим принципам;
- проведением экспериментальных исследований.

### **Апробация работы**

Результаты работы были представлены на следующих всероссийских и международных конференциях:

1. XI Международная научно-практическая конференция "Инновационные, информационные и коммуникационные технологии" (ИНФО-2020), "Радиационная электризация: действительная угроза надежности космических аппаратов", г. Сочи, 1-10 октября 2014 г.
2. "Межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е.В. Арменского", "Методы защиты технических средств от электростатических разрядов", г. Москва, 2016г.
3. III Всероссийская научно-техническая конференция "Технологии, измерения и испытания в области электромагнитной совместимости", "Меры борьбы с поражающими факторами электризации космических аппаратов на околоземных орбитах", г. Москва, 18-20 апреля 2016 г.
4. XIII Международная научно-практическая конференция "Инновационные, информационные и коммуникационные технологии" (ИНФО-2016), "Электростатическое поведение материалов в заряжающей космической среде", г. Сочи, 1-10 октября 2016 г.
5. IV Всероссийская научно-техническая конференция "Технологии, измерения и испытания в области электромагнитной совместимости", "Повышение устойчивости к возникновению ЭСР радиотехнических элементов космических аппаратов, содержащих диэлектрики", г. Москва, 28-29 марта 2017 г.
6. "Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT-2018)", "The increased resistance of the spacecraft electronic elements containing dielectrics to the emergence of ESD", г. Москва, 14-16 March 2018.
7. V Всероссийская научно-техническая конференция "Технологии, измерения и испытания в области электромагнитной совместимости", "Моделирование заряжения электронами пластмассовых корпусов полупроводниковых приборов в процессе внутренней электризации КА", г. Москва, 28-29 марта 2018 ,.
8. XX Межвузовская научная школа молодых специалистов

“Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине”, Название доклада: “Моделирование возникновения электростатических разрядов в пластмассовых корпусах полупроводниковых приборов космических аппаратов”, г. Москва, 25-26 ноября 2019 г.

9. The 15th Spacecraft Charging Technology Conference, “Spacecraft Inner Charging Simulation of the Electronics Devices Plastic Cases”, Kobe, Japan, 25-29 June 2018.

10. “2019 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED)”, Название доклада: “Experimental determination of the electric field gain coefficient on the top of the spherical electrode on air”, Prague, Czech Republic, 24-26 апреля 2019 г.

**Список опубликованных статей, где отражены основные результаты диссертации.**

Основные положения диссертации представлены в работах, опубликованных автором в ведущих рецензируемых научных журналах.

Публикации в журналах/изданиях, индексируемых в базах Web of Science и Scopus:

1. Afanasyeva M. “Experimental Determination of the Electric Field Gain Coefficient on the Top of the Spherical Electrode on Air”, in: “2019 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED)”. IEEE, 2019».

2. Afanasyeva M. “The increased resistance of the spacecraft electronic elements containing dielectrics to the emergence of ESD”, in: “2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)”. Proceedings. M.: IEEE, 2018».

3. A.P. Tyutnev, V.S. Saenko, Aleshkevich A., M. A. Afanasyeva. “The Nature of Plateau on Time-of-Flight Curves in Molecularly Doped Polymers” // Polymer Science - Series A. 2017. Vol. 59. No. 4. P. 575-578. doi».

4. «V.S. Saenko, A.P. Tyutnev, M.A. Afanasyeva, A.E. Abrameshin. Spacecraft Internal Charging Simulation of the Electronics Device Plastic Cases // IEEE Transactions on Plasma Science. 2019. Vol. 47. No. 8. P. 3648-3652. doi».

Прочие публикации:

5. Р.Ш. Ихсанов, М. А. Афанасьева, В. С. Саенко, А.П. Тютнев “Экспериментальные и теоретические исследования радиационно-индуцированной проводимости полимеров, используемых в электровакуумной термоизоляции космических аппаратов” // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2016. Т. 2. С. 26-31.

6. Афанасьева М. А. “Polyimides for the protection of spacecraft equipment” // В кн.: “Innovative Information Technologies: Materials of the International scientific–practical conference. Part 2” / Ed. by S. U. Uvaysov. Part 2. М.: HSE, 2014. С. 417-420.

7. Афанасьева М. А. “Polyimides in the spacecraft equipment” // В кн.: “Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов НИУ ВШЭ. Материалы конференции” / Под общ. ред.: А. Н. Тихонов, В. Н. Азаров, У. В. Аристова, М. В. Карасев, В. П. Кулагин, Ю. Л. Леохин, Б. Г. Львов, Н. С. Титкова. М.: МИЭМ НИУ ВШЭ, 2014. С. 209-210.

### **Содержание и структура работы**

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав и заключения.

**В первой главе** приводится обзор и критический анализ опубликованных результатов исследования и работ по электризации околоземных высокоорбитальных космических аппаратов. В данном обзоре рассмотрены основные причины возникновения электростатических разрядов в зависимости от местонахождения космического аппарата, а также характера электризации. Представлены основные критерии возникновения электростатических разрядов, а также методы борьбы с поражающими факторами внешней и внутренней электризации.

**Во второй главе** представлена разработанная в рамках диссертационного исследования физическая модель накопления объемных зарядов в пластиковых корпусах электронных компонентов. Решение задачи по разработке физической модели состояло из двух последовательных этапов. Первый этап заключается в аппроксимации конструкции чипа к сферической форме с целью получения простого аналитического решения для величины электрического поля, возникающего при облучении чипа изотропным потоком электронов. На втором этапе осуществлена формулировка, последующая запись и решение дифференциального уравнения в частных производных.

**В третьей главе** приведены результаты проведенного в рамках диссертационного исследования экспериментального определения коэффициента усиления электрического поля, возникающего в объеме полимерного материала, при наличии неоднородностей в виде вершин и ребер кристалла чипа. Также глава содержит расчет электрических полей в диэлектриках радиотехнических изделий КА, положенный в основу разработанной в рамках настоящей диссертационной работы «Программы для расчета электрических полей в диэлектриках радиотехнических изделий КА».

**В четвертой главе** представлен разработанный по результатам исследований диссертационной работы новый критерий величины электрического поля, при котором возможен ЭСР в объеме диэлектрика КА при наличии в нем неоднородностей. Также приведена инженерная методика выбора объемной проводимости диэлектрика, разработанная на основе проведенного моделирования и его экспериментального подтверждения.

**В заключении** диссертации изложены итоги выполненного исследования, рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы.