

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

УДК 621.3.049.77:537.2

На правах рукописи

БОГАТКО
Иван Николаевич

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ
МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ СТАТИЧЕСКОГО
ЭЛЕКТРИЧЕСТВА ПО МЕТОДУ ВОЗДУШНОГО РАЗРЯДА**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание степени
магистра техники и технологии

по специальности 1-39 81 01 Компьютерные технологии
проектирования электронных систем

Научный руководитель
кандидат технических наук, доцент
АЛЕКСЕЕВ Виктор Федорович

Работа выполнена на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель: **Алексеев Виктор Федорович**,
кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Рецензент: **Бондарик Василий Михайлович**,
кандидат технических наук, доцент, декан факультета непрерывного и дистанционного обучения учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Защита диссертации состоится «21» января 2016 г. года в 15⁰⁰ часов на заседании Государственной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г.Минск, ул. П.Бровки, 6, 1 уч. корп., ауд. 415, тел.: 293-20-87, e-mail: kafpiks@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

ВВЕДЕНИЕ

Производство, транспортировка, хранение и использование радиоэлектронной аппаратуры и электронной техники неизменно связано с воздействием на нее и ее элементы дестабилизирующих влияний. Учитывая специфику работы микроконтроллеров, основанную на выполнении запрограммированных функций, особое внимание целесообразно уделять безопасности информационных ресурсов, а также защите сведений от их случайного или умышленного повреждения, искажения или удаления. Несмотря на современный уровень развития науки и техники достаточно сложно осуществить эффективную защиту микроконтроллеров от внешних воздействий, особенно от такого деструктивного фактора, как электростатический разряд.

На настоящий момент существует достаточно большое количество работ отечественных исследователей, рассматривающих влияние статического электричества в полупроводниковой промышленности, а также содержащих результаты исследований методов и средств защиты интегральных схем от электромагнитных помех и электростатических разрядов (Алексеев В.Ф., Горлов М.И., Каверзнев В.А., Кечиев Л.Н., Князев А.Д., Пискун Г.А.). Заслуживают внимания работы А. Amerasekera, О. Semenov и Steven H. Voldman и других зарубежных авторов.

В исследованиях, представленных в научно-технической литературе, приведены результаты, подтверждающие негативное воздействие разрядов статического электричества на изделия полупроводниковой промышленности. Однако вопросам моделирования показателей надежности с учетом воздействия деструктивных импульсов разрядного тока не уделяется должного внимания. Среди существующих моделей прогнозирования эксплуатационных характеристик интегральных микросхем и микроконтроллеров учет воздействия разряда статического электричества присутствует только для некоторых типов изделий электронной техники. В этой связи исследования по теме диссертации, направленные на разработку математических моделей расчета интенсивности отказов микроконтроллеров при воздействии импульсов разрядного тока, являются актуальными.

Выражаю благодарность за оказанную помощь в ходе подготовки диссертационной работы своему научному руководителю, кандидату технических наук, доценту кафедры ПИКС, Алексееву Виктору Федоровичу, а также за высококвалифицированные консультации по возникающим вопросам кандидату технических наук, доценту кафедры ПИКС, Пискуну Геннадию Адамовичу.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Большинство исследований по теме диссертации направлены на получение информации, подтверждающей возникновение катастрофических повреждений в микроконтроллере (МК), в то время как не учитываются такие важные параметры, как целостность программного обеспечения, время инсталляции и т.п. В связи с этим, прогнозирование работоспособности МК и интегральных схем (ИС) в условиях возможного воздействия электростатических разрядов (ЭСР) является актуальным.

Степень разработанности проблемы

В современных исследованиях, представленных в научно-технической литературе, приведены результаты, подтверждающие деструктивное влияние разрядов статического электричества на изделия полупроводниковой промышленности. Несмотря на это среди существующих методик и моделей прогнозирования работоспособности ИС и МК учет воздействия ЭСР либо отсутствует, либо не достаточно проработан. Это обусловлено сложностью изучения природы и механизмов возникновения ЭСР.

Цель и задачи исследования

Цель диссертации состоит в разработке математических моделей расчета эксплуатационной интенсивности отказов микроконтроллеров с учетом степени интеграции в результате воздействия воздушного типа разрядов статического электричества.

Для выполнения поставленной цели в работе были сформулированы **следующие задачи:**

- провести систематизацию дефектов и механизмов повреждений полупроводниковых приборов, вызванных воздействием электростатического разряда;
- разработать и проанализировать математическую модель прогнозирования безотказной работы микроконтроллеров при воздействии разряда статического электричества;
- разработать численные модели расчета эксплуатационной интенсивности отказов интегральных схем иностранного производства с учетом воздействия на них статического электричества по методу воздушного разряда.

Объектом исследования являются микроконтроллеры и интегральные схемы иностранного производства.

Предметом работы являются методы и средства проведения испытаний полупроводниковых приборов с учетом воздействия разрядного импульса статического электричества, а также математические модели прогнозирования работоспособности микроконтроллеров и интегральных схем с учетом воздействия статического электричества по методу воздушного разряда.

Область исследования. Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-38 81 01 «Компьютерные технологии проектирования электронных систем».

Теоретическая и методологическая основа исследования

В основу работы легли работы белорусских и зарубежных ученых по изучению воздействия электростатического разряда на изделия полупроводниковой промышленности, а также анализ технических нормативных правовых актов по рассматриваемой тематике.

Обработка данных проводилась с использованием *MS Excel*.

Информационная база исследования сформирована на основе литературы, открытой информации, предоставляемой производителями микроконтроллеров, технических нормативно-правовых актов, сведений из ресурсов Интернет, а также материалов научных изданий, конференций и семинаров.

Научная новизна и значимость полученных результатов работы заключается в построении числовых моделей прогнозирования интенсивности отказов микроконтроллеров и интегральных схем с учетом воздействия на них разрядов статического электричества.

Основные положения, выносимые на защиту

Изучение влияния дестабилизирующих факторов на работоспособность изделий полупроводниковой промышленности.

Разработка модели прогнозирования интенсивности отказов микроконтроллеров при воздействии электростатического разряда.

Анализ и обоснование использования численных моделей расчета эксплуатационной интенсивности отказов интегральных схем иностранного производства различных групп, позволяющих учитывать воздействие разрядного напряжения статического электричества.

Теоретическая значимость: предложена подробная классификация дестабилизирующих факторов, воздействующих на электронные приборы. Выявлено место электромагнитных воздействий, в частности, ЭСР, в общей структуре факторов. Выполнен анализ численной модели расчета интенсивности отказов МК и ИС, учитывающей воздействие разряда статического электричества.

Практическая значимость диссертации состоит в том, что предложенные модели прогнозирования интенсивности отказов позволят учитывать воздействие электростатических разрядов на МК и ИС. Введение поправочного коэффициента увеличит точность прогнозируемых данных при воздействии статического электричества по методу воздушного разряда. Рассмотрен метод оценки численных значений коэффициентов модели, учитывающей влияние ЭСР.

Апробация и внедрение результатов исследования

Результаты проделанной работы были использованы при расчете интенсивности отказов микропроцессорных реле токовой защиты и автоматики ввода, входящих в состав электротехнического оборудования напряжением до 10 кВ.

Результаты работы по теме диссертации были представлены на Международной научно-практической конференции «Современные тенденции развития науки и производства» (г. Кемерово, Российская Федерация, 2014 г.), 51-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (г. Минск, Республика Беларусь, 2015 г.), 11-й Международной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций, РТ-2015» (г. Севастополь, Российская Федерация, 2015 г.) и конференции «Медэлектроника–2014. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии» (г. Минск, Республика Беларусь, 2014 г.)

Отдельные положения диссертации могут быть использованы при преподавании дисциплин «Физические основы проектирования радиоэлектронных средств» и «Надёжность технических систем».

Публикации

Основные положения диссертации и результаты исследования изложены в восьми опубликованных работах общим объемом 18 страниц.

Структура и объем работы

Работа состоит из введения, трёх глав и заключения, библиографического списка и приложений. Объем основного текста диссертации – 62 страницы. Работа содержит 27 таблиц, 21 рисунок. Библиографический список включает 82 наименования.

Проанализированы дефекты полупроводниковых приборов при воздействии разрядных импульсов статического электричества, выявлены основные причины их возникновения. Установлены взаимосвязи возникновения дефектов с причинами со стороны изготовителя и пользователя (рисунок 2) [3].

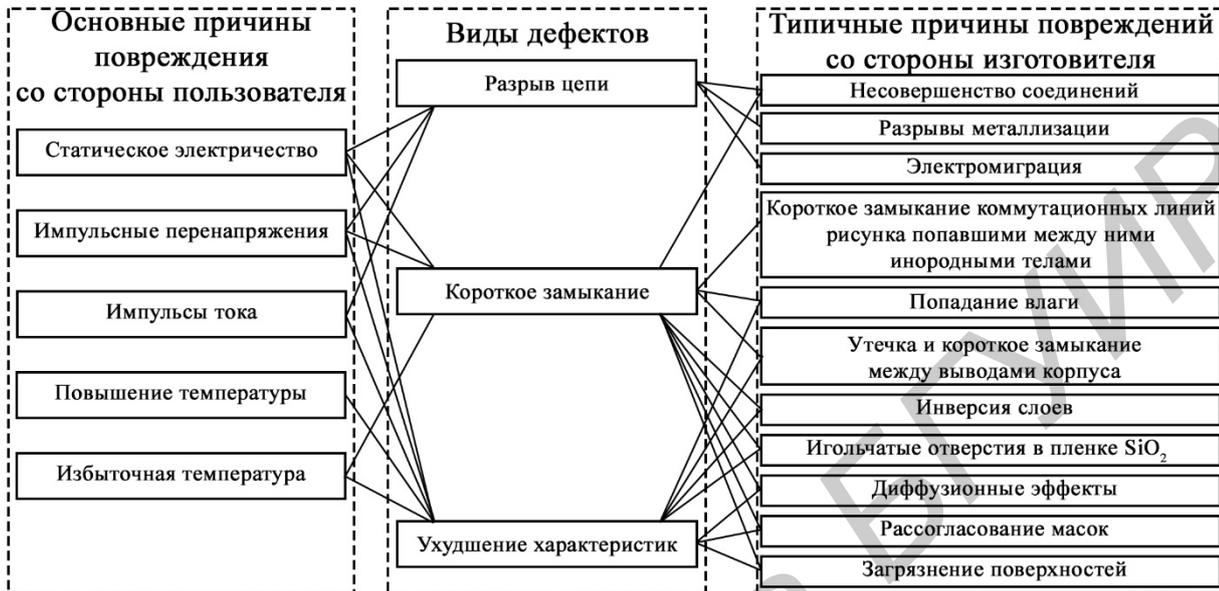


Рисунок 2. – Дефекты полупроводниковых приборов и причины их появления [3]

Выполнена систематизация известных механизмов повреждений полупроводниковых приборов, вызванных воздействием ЭСР (рисунок 3) [4].

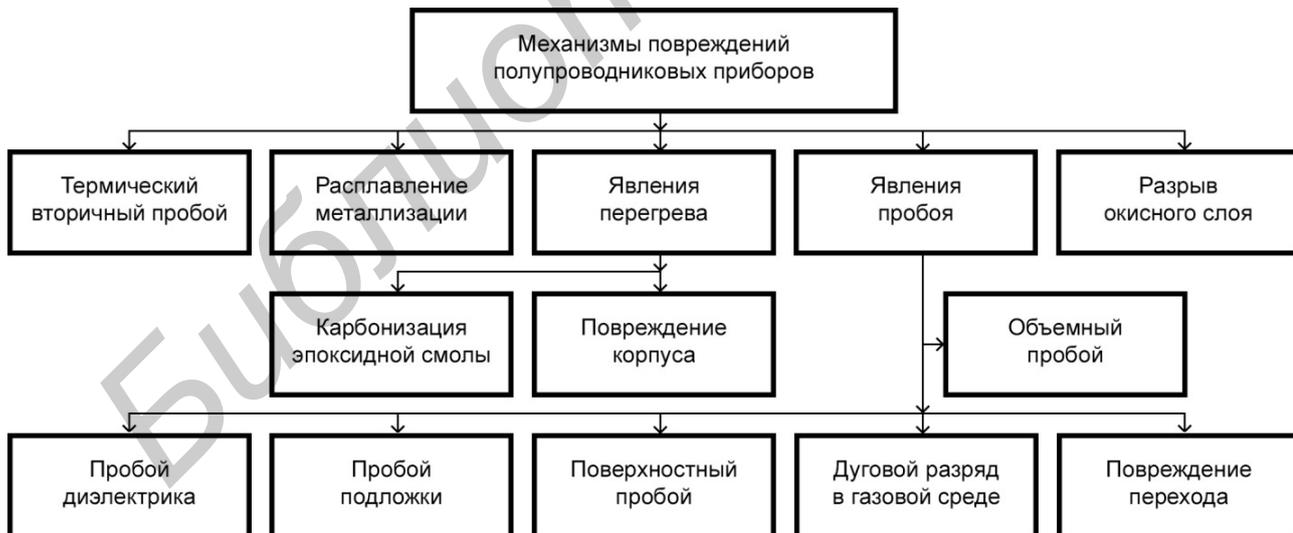


Рисунок 3. – Классификация механизмов повреждений полупроводниковых приборов после воздействия разрядов статического электричества [4]

Рассмотрены типы отказов и проводимых тестирований микроконтроллеров на воздействие разрядов статического электричества (параметрическое и функцио-

нальное). Проанализированы основные требования к проведению испытаний с учетом анализа электрических и функциональных характеристик. Описаны базовые модели («модель тела человека», «машинная модель», «модель заряженного прибора»), используемые при анализе электрических характеристик, на основе которых построены генераторы заряда оборудования, имитирующего воздействие ЭСР.

Во второй главе как один из результатов изучения природы возникновения статического электричества были выявлены такие базовые показатели, характеризующие разряды статического электричества, как тип разряда – контактный и воздушный – и механизм влияния – прямой и косвенный.

Изучена представленная в справочниках и учебных пособиях по прогнозированию надежности электронного оборудования модель расчета интенсивности отказов $\lambda_{ЭСР}$, обусловленных стойкостью интегральных микросхем к воздействию разряда статического электричества, которая используется для прогнозирования работоспособности КМОП СБИС, входящих в состав современной радиоэлектронной аппаратуры.

Используемая на практике модель не может быть применена при расчете интенсивности отказов в условиях воздействия воздушного ЭСР из-за его затухания при распространении в газовой среде. Выражение для расчета было преобразовано путем ввода поправочного коэффициента $K_{ЭСР}$, учитывающего метод воздействия разряда (контактный или воздушный):

$$\lambda_{ЭСР} = \frac{-\ln[1 - 0,00057 \exp(-0,0002K_{ЭСР}U_{ЭСР})]}{0,00876} \times 10^{-6}, 1/\text{ч}.$$

Рассматриваемая математическая модель позволяет учитывать воздействия разрядов статического электричества независимо от типа. Основываясь на специфике проведения испытаний микроконтроллеров на устойчивость к воздействию электростатических разрядов, а также на особенностях воздействия (контактный или воздушный), были рассмотрены следующие поправочные коэффициенты: для контактного разряда $K_{ЭСР} = 1$; для воздушного разряда $K_{ЭСР} = 0,75$ при $U_{ЭСР} = 8$ кВ и $K_{ЭСР} = 0,5$ при $U_{ЭСР} = 15$ кВ.

Установлено, что введение поправочного коэффициента в модель позволяет увеличить точность расчета эксплуатационной интенсивности отказов λ_3 МК при воздействии электростатических разрядов воздушного типа. Так при импульсе разрядного тока напряжением 8 кВ для микроконтроллеров типа Attiny 2313/V точность расчета эксплуатационной интенсивности отказов выше на $0,6 \times 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$, для МК типа AT89C51RC – выше на $0,7 \times 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$, а при напряжении 15 кВ для обоих типов точности увеличивается на $1 \times 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$.

Третья глава посвящена разработке моделей прогнозирования эксплуатационной интенсивности отказов интегральных микросхем иностранного производства разных групп с учетом воздействия на них электростатического разряда.

В результате исследований рассматриваемой во второй главе модели расчета $\lambda_{ЭСР}$, учитывающей влияние разрядных импульсов статического электричества, было сделано предположение о возможности ее использования как составляющей в математических моделях прогнозирования интенсивности отказов ИМС других типов. Данное предположение основано на сильной корреляции напряжения $U_{ЭСР}$ и чувствительности ИМС к воздействию электрических перегрузок.

Результат внедрения в распространенные модели расчета $\lambda_{Э}$ различных типов ИМС иностранного производства слагаемого $\lambda_{ЭСР}$, полученного с использованием усредненных значений порогового напряжения, интенсивности отказов ($U_{50ГН}$ и $\Lambda_{ЭСР}$) и учитывающего коэффициент $K_{ЭСР}$, позволяет повысить точность вычислений от 0,01 до 8 % в сравнении со стандартными моделями (рисунок 5).

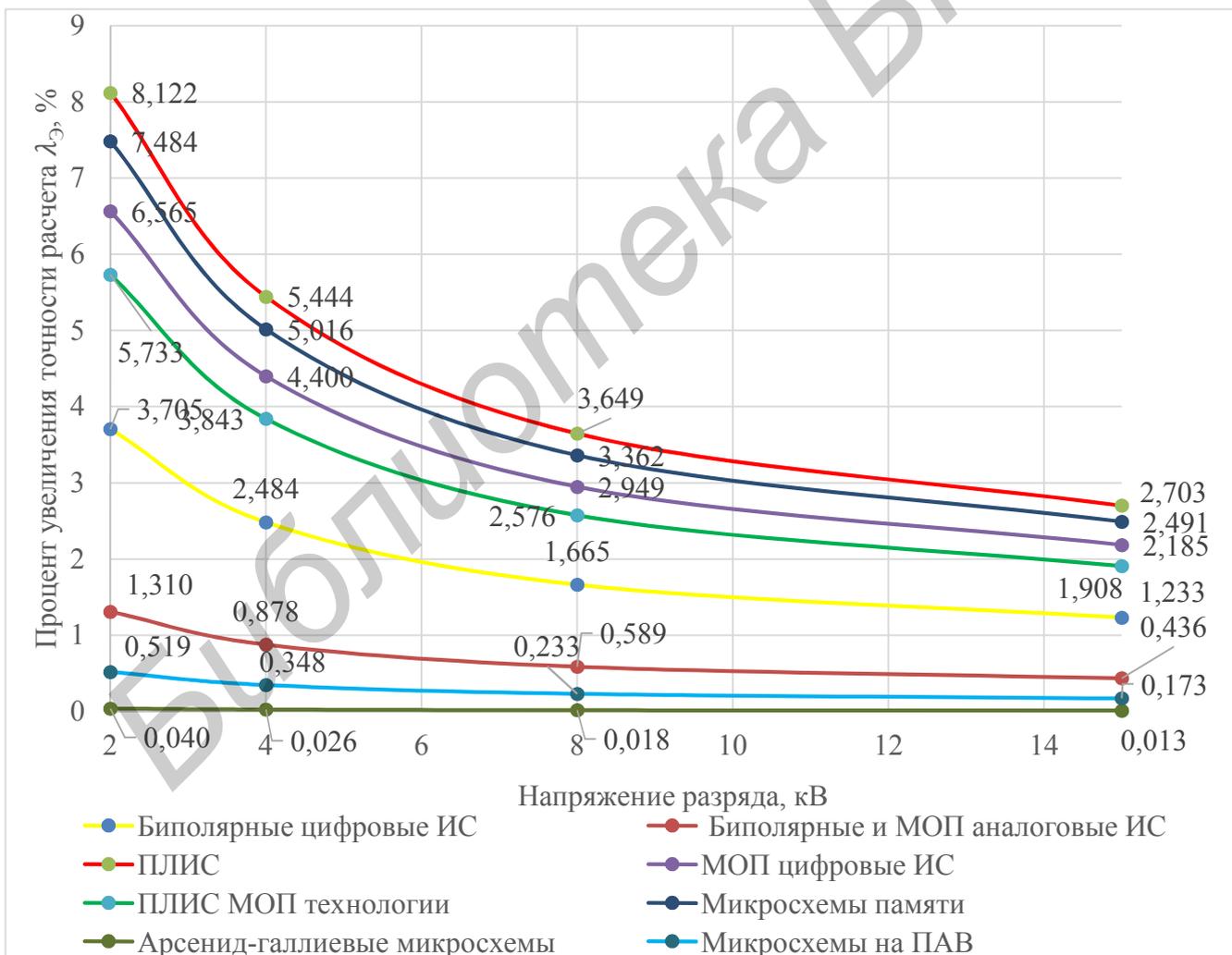


Рисунок 0.1. – Диаграмма сравнения точности вычисления значений $\lambda_{Э}$ различных групп ИМС, полученных по моделям, учитывающим статическое электричество для воздушного разряда

Установлено необходимое условие для включения слагаемого $\lambda_{ЭСР}$ в принятые модели: величина порогового напряжения U_{TH} должна быть меньше либо равна значения напряжения разряда статического электричества $U_{ЭСР}$, что равносильно соизмеримости вероятности отказа ИМС из-за воздействия ЭСР с вероятностью отказа из-за иных факторов.

В **приложении** представлены справочные данные для расчета интенсивности отказов, приведены слайды презентации на защиту магистерской диссертации и акты внедрения в производственный и учебный процессы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При работе над магистерской диссертацией были тщательно рассмотрены, изучены и проанализированы современные тенденции в исследовании воздействий ЭСР на изделия полупроводниковой промышленности.

На первом этапе выполнения данной работы был проведен обзор научной литературы и анализ явлений, воздействующих на радиоэлектронную аппаратуру и изделия полупроводниковой промышленности, с точки зрения природы их возникновения. При рассмотрении данного вопроса была составлена классификация дестабилизирующих факторов и выявлено место разряда статического электричества в общей структуре воздействующих на микроконтроллеры и интегральные схемы явлений. Также выполнена систематизация механизмов повреждений элементов структуры и конструкции полупроводниковых изделий, вызванных воздействием ЭСР, что позволило выявить наиболее распространенные механизмы отказов. Проведенный анализ принципов и средств проведения испытаний МК на устойчивость к воздействию ЭСР показал, что параметры воздействующего разряда варьируются в широком диапазоне напряжений, однако закономерности их развития идентичны.

На втором этапе выполнения диссертационной работы выполненный анализ воздействия разрядов статического электричества на микроконтроллеры позволил выявить принципиальные отличия между двумя типами ЭСР – контактным и воздушным. С учетом данных различий описана модель прогнозирования интенсивности отказов микроконтроллеров. При этом введение коэффициента в модель расчета интенсивности отказов $\lambda_{ЭСР}$, зависящей от чувствительности к ЭСР, позволило увеличить точность вычисления при напряжении 15 кВ на $1 \times 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$.

На третьем этапе выполнения работы было выявлено, что отказы, вызванные воздействием ЭСР, не связаны с внутренними механизмами отказов интегральных схем. Также было проанализировано математическое выражение для получения значений $\lambda_{ЭСР}$ и рассмотрен метод оценки численных значений коэффициентов данной формулы, который может быть использован для уточнения этих значений.

в тех случаях, когда представляется возможным оценить вероятность возникновения разряда статического электричества.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Альхимович, А.И. Влияние температуры и влажности окружающей среды на работоспособность полупроводниковых приборов в условиях воздействия электростатических разрядов / А.И. Альхимович, И.Н. Богатко, Е.А. Мурзо // Современные тенденции развития науки и производства: сб. материалов Международной научно-практической конференции ООО «ЗапСибНЦ» в 4-х томах, Том 3 (Кемерово, Россия, 23–24 октября 2014 г.) ООО «ЗапСибНЦ» – Кемерово, 2014. – С. 10–13.

2. Мурзо, Е. А. Особенности проектирования электронных устройств с учётом защиты от перенапряжения и электромагнитных помех / Е.А. Мурзо, А.Г. Амельчиц, И.Н. Богатко // 51-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов по направлению 1: Компьютерное проектирование и технология производства электронных средств: материалы конф. (Минск, Беларусь, 13–17 апреля 2015 г.) / Минск: БГУИР, 2015. – С. 240–241.

3. Богатко, И. Н. Виды повреждений полупроводниковых изделий и их элементов при воздействии электростатических разрядов / И.Н. Богатко // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. Сборник научных трудов по материалам международной заочной научн.-практической конф. №7 часть 1 (Воронеж, Россия, 9–12 ноября 2015 г.) / ФГБОУ ВО «ВГЛТУ», Воронеж. 2015. –С. 157–158.

4. Богатко, И. Н. Систематизация механизмов повреждений полупроводниковых приборов, вызванных воздействием электростатических разрядов / И.Н. Богатко, Г.А. Пискун, А.Д. Элькинд // 51-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов по направлению 1: Компьютерное проектирование и технология производства электронных средств: материалы конф. (Минск, Беларусь, 13–17 апреля 2015 г.) / Минск: БГУИР, 2015. – С. 160–161.

5. Богатко, И. Н. Численная модель расчета эксплуатационной интенсивности отказов микроконтроллеров после воздействия разрядов статического электричества / И.Н. Богатко, Г.А. Пискун, А.Д. Элькинд // 51-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов по направлению 1: Компьютерное проектирование и технология производства электронных средств: материалы конф. (Минск, Беларусь, 13–17 апреля 2015 г.) / Минск: БГУИР, 2015. – С. 162.

6. Элькинд, А. Д. Моделирование встроенных средств защиты от электростатического разряда / А.Д. Элькинд, Е.А. Мурзо, И.Н. Богатко // 51-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов по направлению 1: Компьютерное

проектирование и технология производства электронных средств: материалы конф. (Минск, Беларусь, 13–17 апреля 2015 г.) / Минск: БГУИР, 2015. – С. 295–296.

7. Элькинд, А. Д. Модели электростатического разряда / А.Д. Элькинд, А.Г. Амельчиц, И.Н. Богатко // 51-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов по направлению 1: Компьютерное проектирование и технология производства электронных средств: материалы конф. (Минск, Беларусь, 13–17 апреля 2015 г.) / Минск: БГУИР, 2015. – С. 297–298.

8. Алексеев, В.Ф. Применение метода конечных элементов для моделирования электростатического разряда при испытаниях средств медицинской электроники/ В.Ф. Алексеев, А.В. Бужинский, Г.А. Пискун, И.Н. Богатко // Медэлектроника–2014. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии. Сборник научных статей (Минск, Беларусь, 10–11 декабря 2014 г.) / Минск : БГУИР, 2014. – С. 166–168.

Библиотека БГУИР

РЭЗІЮМЭ

Багатка Іван Мікалаевіч

Ключавыя словы: электростатычны разрад, мікракантролер, матэматычная мадэль.

Мэта работы: распрацоўка матэматычных мадэляў разліку эксплуатацыйнай інтэнсіўнасці адмоваў мікракантролераў з улікам ступені інтэграцыі ў выніку ўздзеяння паветранага тыпу разрадаў статычнай электрычнасці.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: ажыццёўлены аналіз і выканана класіфікацыя дэстабілізуючых фактараў, якія ўздзейнічаюць на паўправадніковыя прыборы, па такіх прыкметах як: прырода ўзнікнення, ступень выпадковасці, ступень залежнасці ад дзеянняў чалавека і месца ўзнікнення дэстабілізуючага фактара адносна выраба.

Прааналізавана лікавая мадэль разліку інтэнсіўнасці адмоваў мікракантролераў, якая ўключае папраўчы каэфіцыент, які ўлічвае тып ўздзеяння (кантактны або паветраны) і напружанне разраду статычнай электрычнасці (для кантактнага разраду папраўчы каэфіцыент роўны 1; для паветранага разраду роўны 0,75 пры напрузе разраду 8 кВ і 0,5 пры напрузе 15 кВ), якая дазваляе павысіць дакладнасць вылічэнняў да 50% у параўнанні з вядомымі мадэлямі ацэнкі надзейнасці КМОП СВІС.

Устаноўлена неабходная ўмова для ўключэння ў мадэлі разліку эксплуатацыйнай інтэнсіўнасці адмоваў іншых груп інтэгральных мікрасхем: велічыня паровага напружання U_{TH} павінна быць менш або роўная значэння напружання разраду статычнага электрычнасці $U_{ЭСР}$, што раўнасільна сувымернасці верагоднасці адмовы ІМС з-за ўздзеяння ЭСР з верагоднасцю адмовы з-за іншых фактараў.

Ступень выкарыстання: вынікі ўкаранёны на ТДА «КС электра» і на кафедры ПІКС ў навучальны працэс.

Вобласць ужывання: паўправадніковая прамысловасць, электронныя сродкі.

РЕЗЮМЕ

Богатко Иван Николаевич

Ключевые слова: электростатический разряд, микроконтроллер, математическая модель.

Цель работы: разработка математических моделей расчета эксплуатационной интенсивности отказов микроконтроллеров с учетом степени интеграции в результате воздействия воздушного типа разрядов статического электричества.

Полученные результаты и их новизна: осуществлен анализ и выполнена классификация дестабилизирующих факторов, воздействующих на полупроводниковые приборы, по таким признакам как: природа возникновения, степень случайности, степень зависимости от действий человека и место возникновения дестабилизирующего фактора относительно изделия.

Проанализирована численная модель расчета интенсивности отказов микроконтроллеров, включающая поправочный коэффициент, учитывающий тип воздействия (контактный или воздушный) и напряжение разряда статического электричества (для контактного разряда поправочный коэффициент равен 1; для воздушного разряда равен 0,75 при напряжении разряда 8 кВ и 0,5 при напряжении 15 кВ), позволяющая повысить точность вычислений до 50 % по сравнению с известными моделями оценки надежности КМОП СБИС.

Установлено необходимое условие для включения в модели расчета эксплуатационной интенсивности отказов других групп интегральных микросхем: величина порогового напряжения U_{TH} должна быть меньше либо равна значения напряжения разряда статического электричества $U_{ЭСР}$, что равносильно соизмеримости вероятности отказа ИМС из-за воздействия ЭСР с вероятностью отказа из-за иных факторов.

Степень использования: результаты внедрены на ОДО «КС электро» и на кафедре ПИКС в учебный процесс

Область применения: полупроводниковая промышленность, электронные средства.

SUMMARY

Bogatko Ivan Nikolaevich

Keywords: electrostatic discharge, a microcontroller, a mathematical model.

The object of study: development of mathematical models for calculating operational failure rate of microcontrollers based on the degree of integration as a result of exposure to air such as static electricity.

The results and novelty: The analysis and classification performed destabilizing factors affecting the semiconductors, on grounds such as: the nature of occurrence, the randomness, the extent depending on the actions of the person and the place of occurrence of the destabilizing factor with respect to the product.

Analyzed numerical model for calculating the failure rates of microcontrollers, including a correction factor that takes into account the type of exposure (contact or air) and voltage of electrostatic discharge (contact discharge for a correction factor equal to 1, for air discharge is 0.75 at the discharge voltage of 8 kV and 0.5 at a voltage of 15 kV), can improve the accuracy of calculations up to 50% compared with the known models of CMOS VLSI reliability evaluation.

A necessary condition for inclusion in the model for calculating operational failure rate of other groups of integrated circuits: the value of the threshold voltage U_{TH} must be less than or equal to the voltage static electricity U_{ESR} , which is equivalent to the commensurability of the probability of failure of IC due to the effects of ESD with a probability of failure due to other factors.

Degree of use: results are implemented in the ODO "KS Electric" and the Department of PICS in the educational process.

Sphere of application: semiconductor industry, electronic means.