

ТЕХНІЧНІ НАУКИ

ИСПЫТАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ПО МОДЕЛЯМ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

Алексеев Виктор Федорович

кандидат технических наук, доцент Белорусского государственного
университета информатики и радиоэлектроники

Scopus ID: 15057628300, ORCID ID: 0000-0001-7056-6817

Пискун Геннадий Адамович

кандидат технических наук, доцент Белорусского государственного
университета информатики и радиоэлектроники

Панасюк Никита Александрович

магистрант Белорусского государственного университета информатики
и радиоэлектроники

Вследствие большого практического значения проблемы защиты электронных средств от воздействия электростатического разряда (ЭСР), достаточно остро встала проблема проведения испытаний устройств и компонентов на устойчивость к такому воздействию. Это в свою очередь породило большое количество физических стендовых моделей воздействия ЭСР. В настоящее время наиболее распространены следующие виды моделей воздействия ЭСР [1, 2].

Модель человеческого тела (МЧТ, *Human Body Model – HBM*) имитирует разряд, возникающий при касании рукой электронного устройства.

Процедура испытания состоит в том, что на резистор номиналом 1 МОм и

конденсатор емкостью 100 пФ либо 200 пФ (это зависит от конкретного стандарта на модель) подается высокое напряжение. После того как конденсатор полностью зарядится, цепь переключается, и он оказывается в одной цепи с резистором и тестируемым устройством, на который поступает накопленный заряд. Разряд проходит через одну из двух оценочных нагрузок: нагрузочный провод и резистор номиналом 500 Ом. Величина высоковольтного напряжения варьируется в зависимости от требований в диапазоне от 0,5 до 15 кВ.

На

рис.1, 2 представлена схема установки, реализующей МЧТ [1–3].

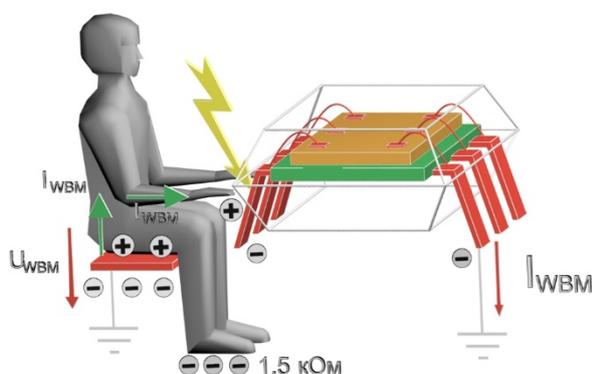


Рис. 1. Воздействие электростатического разряда по МЧТ

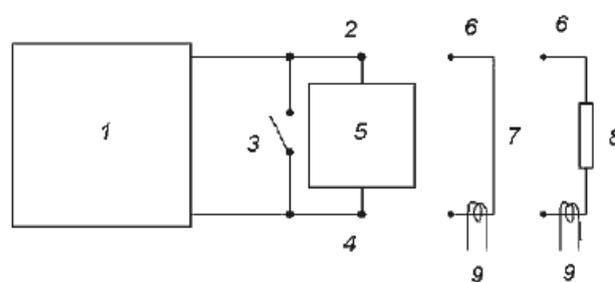


Рис. 2. Схема генератора импульсов по МЧТ

Типичным отказом при тестировании микросхем при помощи МЧТ, как правило, является разрушение *p-n*-перехода, проникновение металла, расплавление металлических слоев, образование выступов на контактных площадках и разрушение оксидного слоя затвора. Некоторые часто встречаемые механизмы повреждений микросхем представлены на рис. 3, 4.

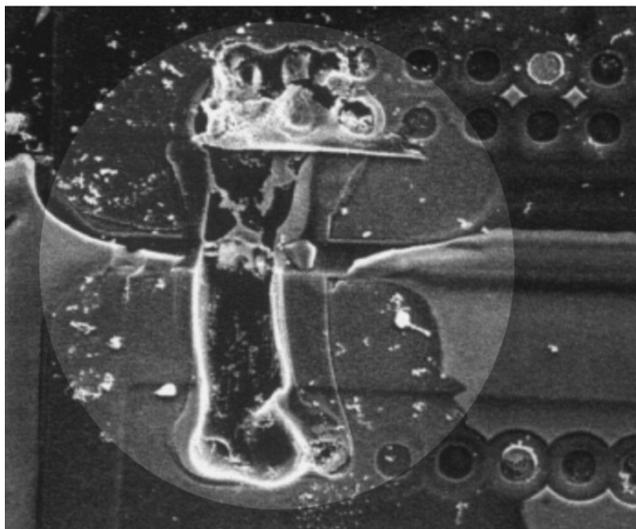


Рис. 3. Расплавление металлизированных дорожек в структуре кристалла микроконтроллера

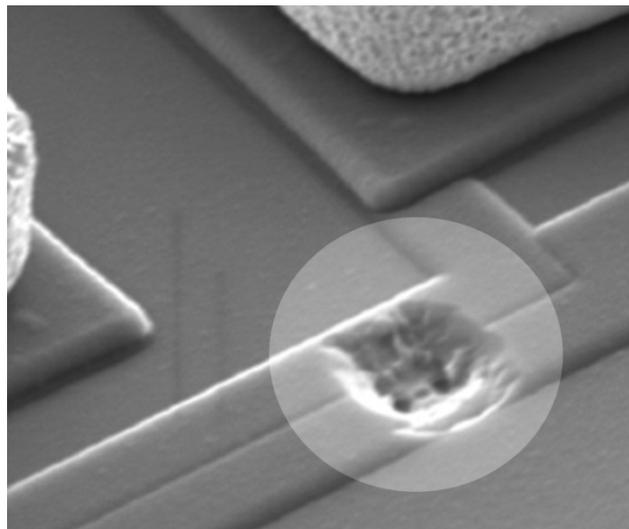


Рис. 4. Объемный пробой в структуре микроконтроллера

В модели механического устройства (ММУ, *Machine Model – MM*) ЭСР возникает в результате различных механических воздействий, такая ситуация характерна, например, для процессов производства интегральных микросхем: корпуса и механизмы технологического оборудования содержат большое количество металлических и пластиковых поверхностей, при соприкосновении которых может происходить накопление статического заряда [1, 2, 4]. Отличительной особенностью ММУ, по сравнению с МТЧ, является то, что электростатическим зарядом обладает не человек, а другое заряженное устройство или машина. Заряд, накопленный на металлических частях подложки и корпуса, протекает через подложку и вызывает отказы *p-n*-переходов, диэлектрических слоев и элементов, являющихся частью разряженного участка (рис. 5, 6) [1].

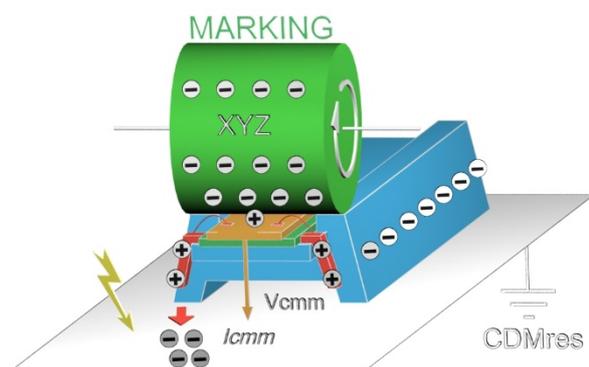


Рис. 5. Воздействие ЭСР на микроконтроллер по ММУ

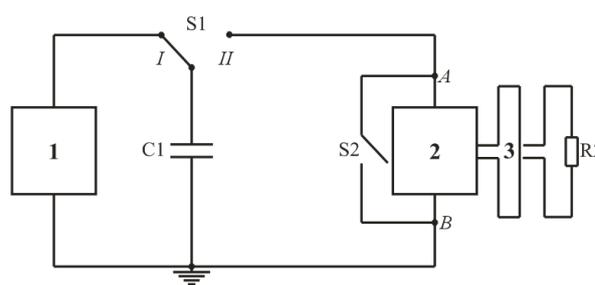


Рис. 6. Схема установки имитации ЭСР по ММУ

Процедура испытаний по ММУ сходна с процедурой для МЧТ и заключается в том, что на резистор, последовательно соединенный с конденсатором емкостью 200 пФ, подается напряжение. После того как конденсатор полностью зарядится, он последовательно подключается к дросселю с индуктивностью 0,5 мкГн (в этом заключается основное отличие от схемы реализации МЧТ) и испытываемому устройству. Как правило, величина подаваемого на конденсатор напряжения находится в диапазоне от 50 до 400 В.

ММУ позволяет испытать устройства на защиту от такого вида разряда, в результате которого могут расплавиться металлические слои, разрушиться *p-n*-переход и повредиться оксидный слой затвора транзистора.

Разрушение может произойти даже в тех случаях когда емкость прибора в ММУ ниже, чем в МЧТ. Разрядный импульс происходит настолько быстро, что выделяемая плотность потока мощности превышает порог разрушения.

Случай, подобный ММУ, также на практике возникает, например, при лакировке непроводящих крышек интегральных схем (ИС) методом распыления. Электрический заряд, возникающий при трении капле жидкости о крышку, накапливается на крышке и может разрядиться на заземленную подложку либо наводиться на заземленной части металлизации и разряжается на заземленную часть.

Модель заряженного устройства (МЗУ, *Charged Device Model – CDM*) имитирует ситуацию, когда на электронное средство переходит заряд,

накопленный другим электронным средством, такая ситуация также характерна для производственных процессов, в роли источника заряда выступают электронные компоненты технологического оборудования [1, 2].

Модель заряженного устройства подробно описывает другой тип ЭСР, который может стать причиной неисправностей, отличающихся от описанных выше. В ММУ рассматривается случай (рис. 7, 8), когда устройство или ИС ещё в процессе его производства приобретает электростатический заряд, а затем разряжается на объект, обладающий высокой проводимостью (например, на землю) (рисунок 1.8). Этот чрезвычайно быстрый разряд не приводит к перегреву схемы защиты ИС от ЭСР (как это происходит при использовании моделей МТЧ или ММ), зато он вызывает пробой изолирующего оксидного слоя.

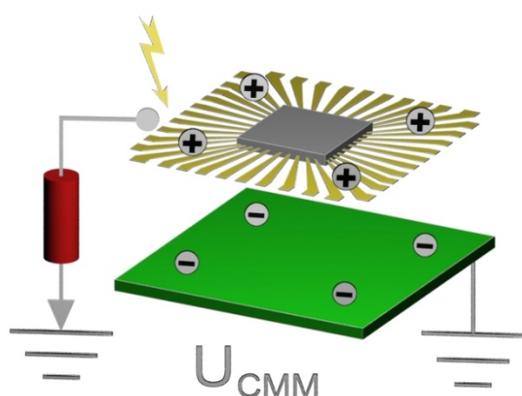


Рис. 7. Воздействие ЭСР на микроконтроллер по МЗУ

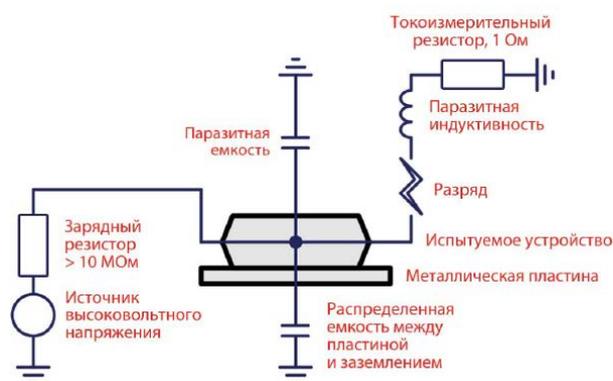


Рис. 8. Стенд модели заряженного устройства

На рис. 8 металлическая пластина и испытуемое устройство разделены изолирующим материалом. Эта пластина подключается к высоковольтному источнику питания. На ней устанавливается требуемый уровень напряжения. Этот тест повторяется для каждого вывода устройства, на который подаются по три разрядных импульса положительной и отрицательной полярности.

Испытания, проходящие по данной модели, позволяют получить такие виды отказов электронных средств как разрушение оксидного слоя затвора

транзистора, захват заряда, повреждение $p-n$ -перехода.

Модель устройства в гнезде (МУГ, *Socketed Device Model – SDM*) по своим параметрам во многом схожа с МЧТ и ММУ. В этом случае испытываемое устройство помещается в гнездо, затем происходит разряд. Изначально данная модель разрабатывалась как попытка реализации МЗУ с одновременным воздействием ЭСР на все выходы микросхемы, однако практика показала, что испытания по МУГ плохо коррелируют со стандартами МЗУ.

Пример реализации установки МУГ приведен на рис. 9.

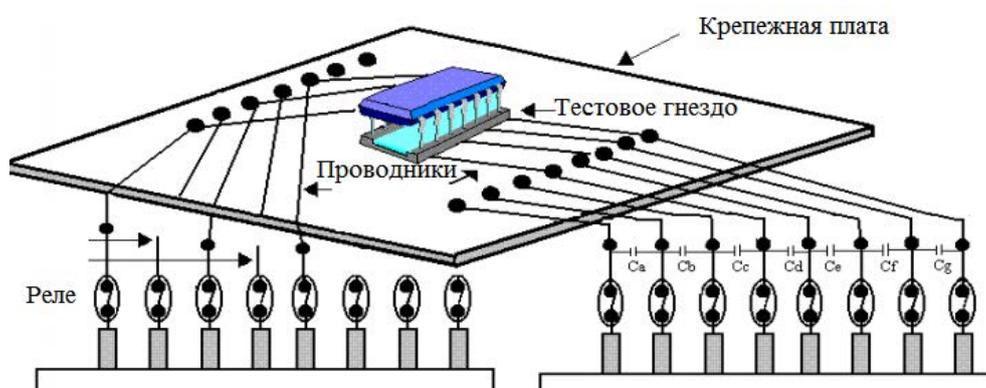


Рис. 9. Стенд модели устройства в гнезде

Стандарт *ANSI/ESD SP5.3.2-2008* устанавливает пять уровней воздействия на электронные средства для МУГ, значения напряжения для них указаны в табл. 1 [5].

Таблица 1. Уровни воздействия МУГ по *ANSI/ESD SP5.3.2-2008*

| Класс | Эквивалентное напряжение, В |
|-------|-----------------------------|
| 1 | 250 |
| 2 | 500 |
| 3 | 750 |
| 4 | 1000 |
| 5 | 1250 |

Модель человек-металл (МЧМ, *Human Metal Model – HMM*) имеет существенное отличие от других видов стендовых моделей ЭСР. Оно заключается в том, что электронное устройство, подвергаемое воздействию

разряда, находится во включенном состоянии. Во-первых это позволяет исследовать устойчивость к ЭСР не отдельных компонентов, а собранных модулей, блоков и всей системы в целом, во-вторых такая ситуация приближена к реальности. На рис. 10 представлена схема установки для испытаний электронных средств по МЧМ [5].

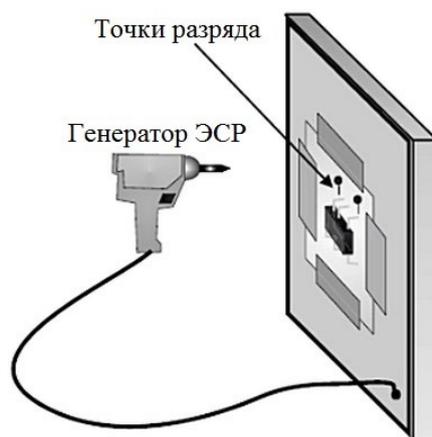


Рис. 10. Стенд модели человек-металл

Модель заряженной платы (МЗП, *Charged Board Model – CBM*) предназначена для испытаний на воздействие ЭСР собранного печатного модуля с компонентами. Плате от внешнего источника через цепи питания либо нулевого потенциала придаётся определенный заряд. Заряженная плата помещается через изолирующую прокладку на заземленную пластину. Емкость полученной системы существенно выше емкости самого печатного модуля. Схема стенда для данной модели приведена на рис. 11 [5].

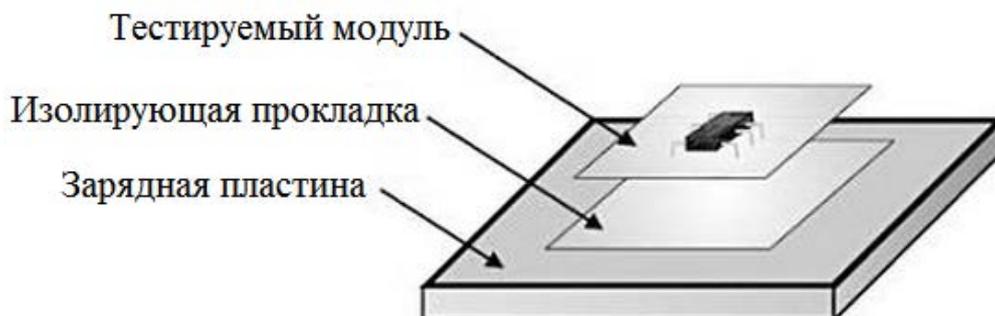


Рис. 11. Стенд модели заряженной платы

Подход к компьютерному моделированию воздействия ЭСР на электронные средства может быть различным. Одним из наиболее популярных и применяемых подходов является **схмотехническое моделирование**. Он представляет собой создание эквивалентной реальной системе электрической принципиальной схемы и моделирование по методу *Spice*. *SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)* – симулятор электронных схем общего назначения и язык описания. Он предназначен для описания электрических цепей разной сложности, и используется для расчета схем во временной и частотной областях, а также в статическом режиме. При проведении моделирования все элементы схемы заменяются их математическими моделями [1, 7, 8].

Основные этапы моделирования в данном случае:

- анализ процессов ЭСР для конкретного случая и создание эквивалентной схемы;
- построение модели – файла, содержащего символические имена компонентов схемы, указания на их связи, и команды управления;
- трансляция файла модели в систему уравнений;
- численное решение модельных уравнений и вывод результатов.

Такие модели могут быть легко использованы на практике, описывают временные и энергетические параметры, однако их применение ограничено контактным разрядом, также они недостаточно наглядны.

Возможно, также моделирование воздействия ЭСР на основе **уравнений тепло- и электропроводности**. В этом случае основное внимание уделяется распределению энергии ЭСР в объеме вещества. Используется уравнение теплопроводности, которое описывает перенос теплоты микроскопическими структурными частицами вещества в процессе их теплового движения в телах с неоднородным распределением температуры и уравнение объемной мощности тепловых потерь, с помощью которого определяется величина, равная количеству выделившегося тепла в единицу времени [1, 2, 7, 8].

Подобные модели позволяют получить наглядную картину распределения энергии ЭСР в пространстве, однако недостаточно описывают процессы протекания разряда и применимы только к разрядам контактного типа.

Еще одним направлением является **моделирование стримерных процессов**. Данное направление по своему физическому смыслу применимо исключительно к ЭСР, протекающим в газовой среде. Сущность стримерной теории разряда заключается в том, что после образования начальной лавины электронов на некотором расстоянии от катода плотность электронов во главе лавины резко возрастает, следовательно, возрастает и напряженность электрического поля во главе лавины. Благодаря этому на некотором расстоянии от головы первоначальной лавины возможно возникновение свободных электронов за счет фотонной ионизации. Фотоэлектроны, находящиеся в сильном электрическом поле, приобретают энергию, достаточную для образования новой лавины, которая перемещается к аноду. Таким образом, объемный заряд первой лавины оказывается перенесенным на некоторое расстояние. Возникает стример – узкий светящийся канал ионизованного газа, возникающий в предпробойной стадии коронного или искрового разрядов. При увеличении напряжения в той же системе становится возможен следующий после лавины этап разряда – лавинно-стримерный переход с последующим развитием стримера [9].

Компьютерные модели стримеров основываются на решении системы уравнений в частных производных для концентраций частиц и электрического поля в осесимметричном приближении. Такие модели позволяют получить подробные данные о процессах протекания ЭСР при очень малом временном разрешении, однако они не описывают энергетические параметры разряда и его воздействие на электронные средства.

Список использованных источников

1. The Impact of ESD on Microcontrollers / Gennady A. Piskun, Viktor F. Alexeev, Sergey M. Avakov, Vladimir E. Matyushkov, Dmitry S. Titko ; Edited by PhD, Associate professor Viktor E Alexeev. – Minsk : Kolograd, 2018. – 184 p.
2. Кечиев, Л.Н. Защита электронных средств от воздействия статического электричества / Л.Н. Кечиев, Е.Д. Пожидаев. – М.: Изд. дом «Технологии», 2005. – 352 с.
3. ГОСТ Р 53734.3.1-2013 (МЭК 61340-3-1:2006). Электростатика. Методы моделирования электростатических явлений. Электростатический разряд. Модель человеческого тела. – М.: Стандартинформ, 2014. – 11 с.
4. ГОСТ Р 53734.3.2-2013 (МЭК 61340-3-2:2006). Электростатика. Методы моделирования электростатических явлений. Электростатический разряд. Модель механического устройства. – М.: Стандартинформ, 2014. – 6 с.
5. ESD association standard practice. For the Protection of Electrostatic Discharge Susceptible Items. Sensitivity Testing Socketed Device Model (SDM) Component Level: ANSI/ESD SP5.3.2-2008. – ESD Association, 2008. – 19 p.
6. Voldman, S. ESD Basics: From Semiconductor Manufacturing to Product Use / Steven H. Voldman. – John Wiley & Sons, 2012. – 226 p.
7. Кечиев, Л.Н. Воздействие ЭСР на полупроводниковые компоненты: моделирование схем защиты, методов средств защиты / Л.Н. Кечиев [и др.] // Технологии электромагнитной совместимости. – 2012. – № 3. – С. 44-58.
8. Моделирование распределения температуры в токоведущих элементах интегральных микросхем в результате воздействия электростатических разрядов / Г.А. Пискун, В.Ф. Алексеев, В.Л. Ланин, В.Г. Левин // Доклады БГУИР. – 2014. – №4. – С. 16-22.
9. Воскобойникова, О.И. Инициация микроволнового стримерного разряда в газе / О. И. Воскобойникова [и др.]. – М.: Препринт ИПМ им. М.В.Келдыша РАН. – 2001. – №13. – 5 с.