

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 621.3.049.77-048.24:537.2

О. А. Брылева, Г. А. Пискун, В. Ф. Алексеев

ОСНОВНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ПОВРЕЖДЕНИЯ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ ВСЛЕДСТВИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ

UDC 621.3.049.77-048.24:537.2

O. A. Bryleva, G. A. Piskun, V. F. Alekseyev

BASIC MECHANISMS OF MICROCONTROLLERS DAMAGE DUE TO THE INFLUENCE OF ELECTROSTATIC DISCHARGES

Аннотация

Представлена классификация основных механизмов повреждения современных типов микроконтроллеров вследствие воздействия разрядов статического электричества. Впервые проведена систематизация электростатических разрядов по типу воздействия и механизму влияния на оборудование. Приведена градация разрядов по степени повреждения и области выявления разрушения.

Ключевые слова:

микроконтроллер, электростатический разряд, отказ параметрический и катастрофический, пробой, систематизация.

Abstract

The paper presents the classification of main mechanisms of modern microcontrollers damage from discharges of static electricity. The systematization of electrostatic discharges with regard to the type of impact and the mechanism of influence on equipment was performed for the first time. The gradation of discharges according to the degree of damage and the revealed destruction area is presented.

Key words:

microcontroller, electrostatic discharge, failure parametric and catastrophic, breakdown, systematization.

В настоящее время выявление причины неработоспособности микроконтроллеров (МК) связано с необходимостью поиска и устранения дефектов, возникших в процессе производства или эксплуатации. Большая часть времени, которую затрачивает персонал на определение дефекта, расходуется непосредственно на поиск дефекта. Следовательно, одна из важнейших задач – систематизация видов и механизмов отказов, свойственных для МК при воздействии на них электростатических

разрядов (ЭСР). Данная классификация позволит оптимизировать процесс выявления скрытых дефектов и с высокой вероятностью обнаружить потенциально ненадежные сегменты в структуре МК, а также, исходя из полученных результатов, выбрать методы и программы поиска дефекта, при которых обеспечатся минимальные затраты на техническое диагностирование и последующий ремонт либо поиск каких-то новых решений. Электрические заряды, накапливаясь в определенной электри-

ческой емкости, создают электрический потенциал, который в ряде случаев можно регулировать с помощью специализированных технических средств или специальных мероприятий. Однако в большинстве случаев имеет место возникновение ЭСР, который, в свою очередь, приводит к образованию электромагнитных помех (ЭМП) (в случае распространения разряда в газовой среде) или неравномерному распределению градиентов температур (в случае контактного разряда) [1].

На сегодняшний день в научно-технических источниках, посвященных исследованию ЭСР, не встречается целостного анализа путей воздействия разрядов на МК. Однако давно известно, что средние ежедневные потери электронной промышленности США от ЭСЗ в конце 70-х гг. составляли от 10 до 18 %; затраты, обусловленные потерями от воздействия ЭСЗ на ИЭТ, ремонтом и дополнительным обслуживанием оборудования, – около 10 млрд долл. в год.

Таким образом, предложим систематизацию ЭМП, образованных при разряде, и механизмов их воздействия на микросхемы.

1 Электростатические разряды можно характеризовать двумя базовыми показателями: *типом разряда и механизмом влияния*.

1.1 В соответствии с [2] разряды подразделяются на следующие типы:

- *контактный разряд*, который применяется в испытаниях МК на устойчивость к влиянию ЭСР, когда наконечник испытательного генератора во время разряда удерживается в контакте с микросхемой и разряд производится при помощи разрядного ключа внутри испытательного генератора;

- *воздушный разряд*, специфика которого заключается в том, что при его реализации наконечник испытательного генератора постепенно приближается к МК до возникновения ЭСР.

1.2 Механизмы влияния ЭСР классифицируются следующим образом:

- *прямой механизм*, т. е. разряды статического электричества воздействуют только на те точки и поверхности МК, которые являются доступными для персонала в течение нормальной эксплуатации;

- *косвенный механизм*, особенностью воздействия которого на МК, расположенные или установленные около испытательного элемента, имитируют подачу разрядов от испытательного генератора ЭСР на пластины связи по методу контактного разряда.

2 В результате воздействия разрядов в структуре МК могут иметь место два типа повреждений, вызванных вышеприведенными источниками помех:

- *катастрофические* повреждения, которые обнаруживаются наиболее легко, потому что поврежденное изделие не выполняет своих функций.

Данный тип повреждений можно разделить на отказы под действием мощности или тока и отказы под действием напряжения, когда им пробивается насквозь диэлектрик или разрушается поверхность кристалла [3];

- *скрытые* повреждения затрагивают один и более параметров или вызывают некоторые изменения начальных характеристик, которые могут, тем не менее, не выходить за рамки допустимых отклонений. Обнаружить данные повреждения весьма трудно, т. к. они проявляются лишь в результате повторяющихся разрядов или в процессе эксплуатации [4, 5].

Дефекты в структуре МК, возникающие под воздействием ЭСР, характеризуются появлением небольших повреждений, которые, тем не менее, приводят к отказу изделия при эксплуатации в начальный период. Эти дефекты можно обнаружить, проводя испытания на принудительный отказ (например, электротермотренировку и т. д.) [6].

В свою очередь, дефекты можно подразделить на *три категории*:

- нанесенный ущерб настолько мал, что прибор полностью соответ-

вует паспортным характеристикам. Вероятность безотказной работы в течение всего срока служба достаточно велика;

- поврежденный элемент прибора соответствует техническим условиям либо слегка выходит за установленные пределы и вполне способен выполнять свои функции в системе. Однако имеется достаточная вероятность преждевременного отказа;

- прибор работоспособен, но не соответствует всем предъявленным к нему требованиям. Надежность его существенно ослаблена.

По физическому принципу скрытые дефекты, вызванные воздействием ЭСР, можно разделить на три большие группы [7, 8].

1 *Дефекты оксида*. Прежде всего, это проколы и захват заряда оксидом. Первые обычно приводят либо к короткам, либо к образованию диодов Шоттки. В некоторых случаях подобные дефекты могут в течение длительного времени оставаться незамеченными и проявляться лишь при значительном повышении температуры. Вторые приводят к сдвигу пороговых напряжений МОП-транзисторов и образованию паразитных каналов утечки.

2 *Дефекты металлизации*. Они проявляются в виде ухудшения свойств металла. В результате таких дефектов могут возрасти токи утечки либо появиться коротка. Во многих случаях возникающие проводящие перемычки могут не влиять на нормальную работу схемы, а иногда даже исчезают (плавятся) при перегрузках по напряжению. Несмотря на это, считается, что дефекты подобного рода приводят к сокращению срока службы микроконтроллеров, в частности, из-за того, что делают их наиболее восприимчивыми и чувствительными к импульсным перегрузкам в процессе эксплуатации.

3 *Дефекты, связанные с расплавлением объемных участков кремния*, не влияющие на выходные параметры микроконтроллеров. Примером может

служить пробой диффузионного резистора в месте соединения с алюминиевой дорожкой, т. е. импульс разряда может проплавить дорожку из алюминия через диффузионный резистор [9].

Анализ механизмов повреждений МК, вызванных воздействием электростатических разрядов

В результате воздействия разрядов статического электричества в структуре микроконтроллера, вследствие тепловых процессов, сопровождающих разряд, могут возникать различные повреждения. Анализ их механизмов необходим, поскольку важно знать причины образования электростатических зарядов в процессе изготовления и применения изделий, виды отказов под действием разрядов статического электричества для принятия соответствующих мер защиты от их воздействия. Как было отмечено выше, наличие и накопление электростатического заряда на любом изделии не ведёт, как правило, к его повреждению или изменению характеристик до тех пор, пока не произойдёт электростатический разряд через это изделие. Таким образом, актуальным является предупреждение возникновения самого пробоя. Если предотвратить повреждение не удалось, то имеет место наличие ряда поврежденных структур МК.

Общепринято существование шести наиболее распространенных и связанных с электростатическим разрядом механизмов отказов: тепловой вторичный пробой, расплавление металлизации, объемный пробой, пробой диэлектрика, поверхностный пробой и газовый дуговой разряд [10, 11]. Классификация наиболее часто встречающихся повреждений представлена на рис. 1.

Первые три механизма отказов МК (тепловой вторичный пробой, расплавление металлизации и пробой диэлектрика) определяются током (мощностью) разряда, остальные три – напряжением [12].



Рис. 1. Классификация механизмов повреждений микроконтроллеров при воздействии электростатических разрядов

Наиболее часто встречаемые механизмы повреждений микросхем с описанием характерных особенностей представлены ниже.

Тепловой вторичный пробой из-

вестен как выгорание (выжигание) перехода. При данном механизме отказа температура на переходе приближается к точке плавления кремния (рис. 2).

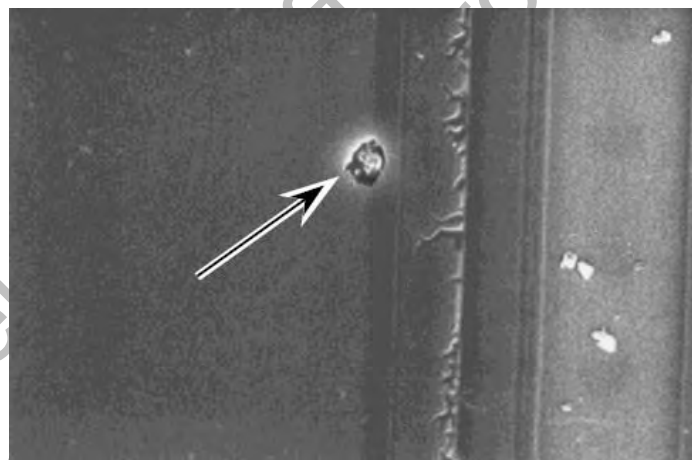


Рис. 2. Локальное расплавление участка кремния

Когда температура достигает уровня плавления, то в первую очередь происходит расплавление неоднородных «горячих» точек, что приводит к локальному расплавлению участка кремния. Если импульс ЭСР имеет достаточную продолжительность, эти горячие точки увеличиваются до возникновения короткого замыкания на переходе. Таким об-

разом, данный механизм повреждений МК связан с плавлением кремния в обедненной области р-п-перехода или локальном разогреве. Однако термический или тепловой вторичный пробой может не проявиться немедленным коротким замыканием на переходе, а возникнуть позднее как результат миграции электронов и ионов [13].

Расплавление металлизации происходит, когда разряд статического электричества обладает достаточной мощностью для расплавления металла соединительных дорожек, т. к. их тол-

щина, а зачастую и ширина настолько малы, что металл расплавляется как у плавких предохранителей под действием повышенного значения тока (рис. 3).

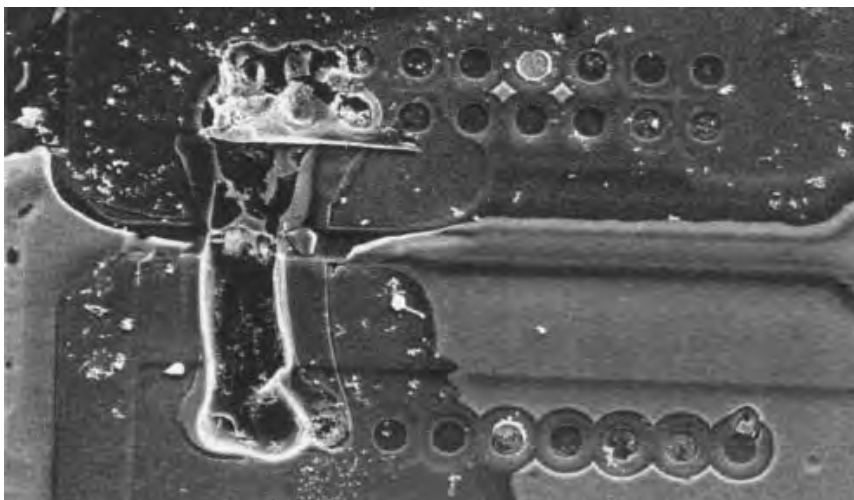


Рис. 3. Расплавление металлизированных дорожек в структуре кристалла

Данный процесс осуществляется при плотности тока, как правило, не меньше 10^7 А/см². При этом эффекте достаточно большую роль играет плотность тока, а не величина напряжения.

Объемный пробой возникает в ре-

зультате изменения параметров перехода вследствие воздействия высоких температур под влиянием тока разряда. Это приводит к быстрой диффузии примесей и замыканию переходов в объеме (рис. 4).

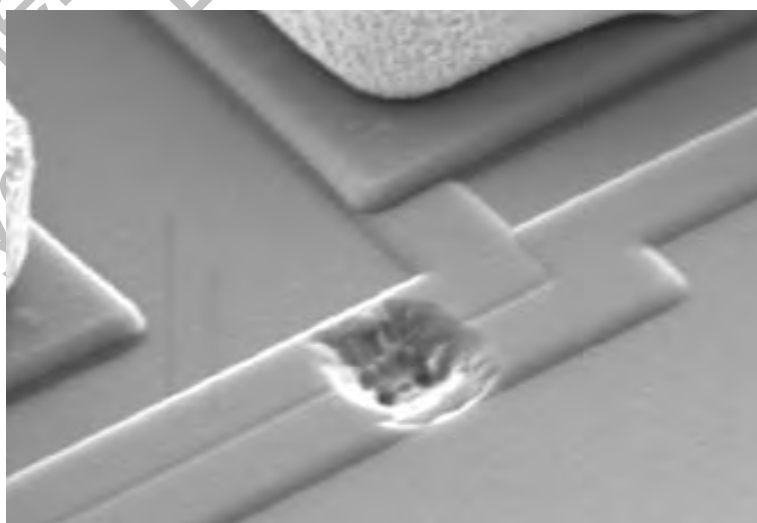


Рис. 4. Объемный пробой в структуре микроконтроллера

Пробой диэлектрика возникает, если значение напряженности электрического поля превышает значение напряженности поля, связывающего электроны с ядрами атомов. При этом освобожденные электроны формируют внут-

ренний ток, который способствует возникновению лавинного эффекта, разрушающего диэлектрик в структуре кристалла МК (рис. 5).

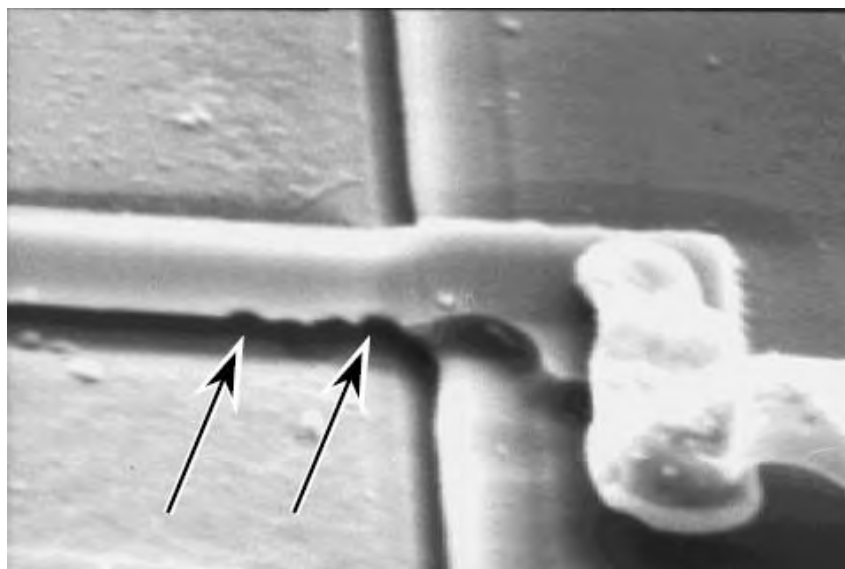


Рис. 5. Пробой диэлектрика в структуре кристалла микроконтроллера

Диэлектрический пробой чаще всего встречается у МОП-транзисторов и емкостей линейных биполярных ИС.

Поверхностный пробой представляет собой механизм отказа, связанный с напряжением разряда, и зависит от целого ряда параметров кристалла изделия, таких как уровни легирования, нарушения непрерывности (разрыва) и геометрии (структура, размеры). Явление закономерно приводит к утечке на переходе [14].

Газовый дуговой разряд зависит от напряжения механизма отказа и вызывает в конечном счете испарение металлических частей кристалла.

Наиболее часто встречаются три механизма отказов: расплавление металлизации на кристалле, разрушение защитного слоя, расплавление объемных участков кремния.

В большинстве случаев причиной отказов МК из-за воздействия ЭСР является совместное действие нескольких механизмов отказа [15, 16]. Разрушение перехода носит сложный характер. В этом случае ни напряжение, ни ток по отдельности не играют решающей роли. Их совместное действие влияет на переход, изменяя его состояние, что, в свою очередь, сопровождается воздействием на ток и напряжение. В результате возникает точечное повышение температуры и расплавление кремния. Этот процесс еще усложняется благодаря электромиграции в алюминиевых проводниках, что, соответственно, вынуждает задумываться о том, как учесть все составляющие такого сложного процесса.

Применяемые в настоящее время серийные защитные схемы для МК по ряду параметров (стойкости к ЭСР, ис-

пользуемой площади и т. д.) не отвечают требованиям изготовителей высокоточного оборудования [17, 18]. Поэтому ведётся интенсивная работа как по поиску новых схем защиты, имеющих повышенную стойкость к ЭСР без значительного увеличения площади кристалла, так и по модернизации уже существующих схем защиты.

Использование систематизированных данных по механизмам и видам воздействия разрядов статического электричества, а также градации разрядов по степени повреждения структуры МК позволит существенно сократить затрачиваемое время и средства на выявление и

идентификацию соответствующих повреждений, что, в свою очередь, благотворно отразится на качестве и стоимости выпускаемой продукции. В статье впервые представлены сведения по механизмам отказов МК вследствие влияния разрядов статического электричества с описанием конкретной области микросхемы. В связи с отсутствием в Республике Беларусь действующих стандартов в области испытания элементов микроэлектроники на устойчивость к ЭСР [12], представленная систематизация механизмов отказов может быть принята за основу при разработке республиканских отраслевых стандартов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Горлов, М. И.** Электростатические заряды в электронике / М. И. Горлов, А. В. Емельянов, В. И. Плебанович. – Минск : Белорус. наука, 2006. – 295 с.
2. **Кечиев, Л. Н.** Защита электронных средств от воздействия статического электричества / Л. Н. Кечиев, Е. Д. Пожидае. – М. : Технология, 2005. – 352 с.
3. **Хабигер, Э.** Электромагнитная совместимость. Основы ее обеспечения в технике / Э. Хабигер ; пер. И. П. Кужекина ; под ред. Б. К. Максимова. – М. : Энергоатомиздат, 1995. – 304 с.
4. **Уильямс, Т.** ЭМС для систем и установок / Т. Уильямс, К. Армстронг. – М. : Технология, 2004. – 508 с.
5. **Gieser, H. A.** ESD testing : HBM to very fast TLP / H. A. Gieser // Tutorial presented at the ISREF. – 2004. – С. 3–10.
6. **Johnson, C. C.** Two unusual HBM ESD failure mechanisms on a mature CMOS process / C. C. Johnson, T. J. Maloney, S. Qawami // EOS/ESD Symposium. – 1993. – P. 225–231.
7. Методика испытания микроконтроллеров на чувствительность к электростатическим разрядам / В. Ф. Алексеев [и др.] // Докл. БГУИР. – 2011. – № 5 (59). – С. 5–12.
8. **Алексеев, В. Ф.** Методика оценки устойчивости микроконтроллеров к воздействию разрядов статического электричества при ступенчатом повышении напряжения / В. Ф. Алексеев, Г. А. Пискун // Вестн. Рязанского гос. радиотехнического ун-та. – 2012. – № 2 (40). – С. 34–40.
9. Analysis of HBM and MM ESD failures in nMOS devices / M. Beh [et al.] // Int. Symp. on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA). – 1995. – P. 111–115.
10. **Пискун, Г. А.** Контроль функционирования микроконтроллеров при воздействии электростатического разряда / Г. А. Пискун, В. Ф. Алексеев // Докл. БГУИР. – 2012. – № 6 (68). – С. 12–18.
11. Электромагнитная совместимость. Ч. 4–2. Методы испытаний и измерений. Испытания на устойчивость к электростатическим разрядам : СТБ МЭК 61000-4-2-2006. – Введ. 08.12.06. – Минск : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2006. – 27 с.
12. **Пискун, Г. А.** Устойчивость радиоэлектронного оборудования на базе микроконтроллеров к электростатическим разрядам / Г. А. Пискун, В. Ф. Алексеев, А. Н. Пикулик // Стандартизация. – 2012. – № 1. – С. 37–39.
13. **Джоввет, Ч. Э.** Статическое электричество в электронике / Ч. Э. Джоввет. – М. : Энергия, 1980. – 135 с.
14. **Шваб, А.** Электромагнитная совместимость / А. Шваб ; под ред. И. П. Куженина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1998. – 480 с.
15. **Lyman, J.** A special report the drive for quality and reliability, part 1 / J. Lyman, D. Rosenblatt // Electronics. – 1981. – № 10. – P. 125–131.
16. **Hatfield, P. A.** Electronic package and production / P. A. Hatfield // Electronics. – 1984. – № 2. – P. 61–73.

17. **Горлов, М. И.** Влияние электростатических разрядов на интегральные схемы типа К561ЛН2 / М. И. Горлов, А. А. Каехтин, Е. А. Пахомова // Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах : материалы докл. науч.-техн. семинара. – М. : МНТОРЭС им. А. С. Попова. – МЭИ. – 2000. – С. 340–342.

18. **Greason, W. D.** The effects of electronic discharge on microelectronic devices – a review / W. D. Greason, G. S. P. Castle // IEEE Trans. Ind. Apl. – 1984. – Vol. 20, № 2. – P. 147–252.

Статья сдана в редакцию 21 марта 2013 года

Ольга Александровна Брылева, ассистент, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. Тел.: 8-017-293-22-07.

Геннадий Адамович Пискун, ассистент, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. Тел.: 8-017-293-22-07.

Виктор Федорович Алексеев, канд. техн. наук, доц., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. Тел.: 8-017-293-22-07.

Volha Aliaksandrauna Bryleva, assistant lecturer, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. Tel.: +375 17-293-22-07.

Gennady Adamovich Piskun, assistant lecturer, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. Tel.: +375 17-293-22-07.

Viktor Fedorovich Alekseyev, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. Tel.: +375 17-293-22-07.