

IMPACT OF DISCHARGES OF STATIC ELECTRICITY ON SEMICONDUCTOR STRUCTURES AND INTEGRAL SCHEMES**Alexeev V.***PhD, Associate Professor of Information Systems Design Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR), Minsk***Piskun G.***PhD, Associate Professor of Information Systems Design Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR), Minsk***Lisovsky A.***Graduate student Department of Information Computer Systems Design, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR), Minsk***ВОЗДЕЙСТВИЕ РАЗРЯДОВ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СТРУКТУРЫ И ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ****Алексеев В.Ф.***Кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР), г.Минск***Пискун Г.А.***Кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР), г.Минск***Лисовский А.А.***Аспирант кафедры проектирования информационно-компьютерных систем, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР), г.Минск***Abstrac**

The features of diagnostic methods for assessing the stability of the semiconductor structure and integrated circuits to the effects of electrostatic discharges are considered. It is shown that the reason for the occurrence of failures in integrated circuits can be a sufficiently large range of influencing destabilizing factors. However, one of the most destructive and dangerous is electrostatic discharge - a pulsed transfer of accumulated electrostatic charge between bodies with different electrostatic potentials. The analysis of detected defects in microcontrollers caused by exposure to electrostatic discharges has been performed.

Аннотация

Рассмотрены особенности диагностических методов оценки устойчивости полупроводниковых структур и интегральных схем к воздействию электростатических разрядов. Показано, что причиной возникновения отказов в интегральных схемах может служить достаточно большой спектр воздействующих дестабилизирующих факторов. Однако одним из самых разрушительных и опасных является электростатический разряд – импульсный перенос накопленного электростатического заряда между телами с разными электростатическими потенциалами. Выполнен анализ выявленных дефектов в микроконтроллерах, вызванных воздействием электростатических разрядов.

Keywords: integrated circuit, microcontroller, semiconductor structure, electrostatic discharge, electrostatic charge, impulse, diagnostic methods, defects, reliability, imitation, model.

Ключевые слова: интегральная схема, микроконтроллер, полупроводниковая структура, электростатический разряд, электростатический заряд, импульс, методы диагностики, дефекты, надежность, имитация, модель.

Актуальность исследований. В настоящее время практически во всех сегментах промышленности находят широкое применение изделия электроники и встроенного программного обеспечения. Современные электронные устройства содержат сотни интегральных схем (ИС). Фактически, мы вступаем с ними в контакт каждый день в таких областях, как транспорт, связь, развлечения, контрольно-измерительные приборы и управление, авиация, информационные технологии, банковское дело, медицинские приборы, бытовая техника, про-

изводство и т.д. Чтобы оставаться конкурентоспособными, необходимо предъявлять высокие требования к качеству и надежности ИС независимо от того, в каком радиоэлектронном средстве (РЭС) они будут применены. Особый интерес представляют исследования в области воздействия электростатических разрядов (ЭСР) на элементы структуры и конструкции полупроводниковых приборов и ИС.

Существует достаточно большое число работ в области определения влияния разрядов статического электричества на функционально сложные

изделия твердотельной электроники. Наиболее значимые результаты по исследованию воздействия ЭСР на полупроводниковые изделия были получены российскими и белорусскими учеными (Горлов М.И., Белоус А.И., Емельянов В.А.); методам защиты устройств от электромагнитных помех (Кечиев Л.Н.); средствам защиты интегральных схем от воздействия деструктивных импульсов разрядного тока (Каверзнев В.А., Грошева Г.Д.). Среди зарубежных авторов особый интерес вызывают работы Джоввета Ч., Хабигера Э., Шваба А., Amerasekera A., Semenov O. и Voldman Steven H., в которых представлено описание отдельных механизмов влияния и упрощенные аналитические подходы для решения задач, связанных с воздействием разрядов статического электричества на приборы [1–17].

Причиной возникновения сбоев в работе элементов полупроводниковых структур и ИС может служить достаточно большой спектр воздействующих дестабилизирующих факторов. Одним из самых разрушительных и опасных является электростатический разряд – импульсный перенос накопленного электростатического заряда (ЭСЗ) между телами с разными электростатическими потенциалами [2].

В настоящее время известно [3–6], что возникновение и накопление ЭСЗ, являющихся причиной появления разрядов статического электричества на всех этапах производства ИС, приводит к понижению их надежности и качества функционирования. Анализ [7–10] показывает, что до 65 % отказов МОП-структур на некоторых предприятиях-изготовителях ИС вызвано непосредственно воздействием ЭСЗ.

По мнению исследователей из США [11–16], воздействие ЭСР вызывает от 16 до 22 % всех отказов у изготовителей интегральных схем; 9 – 15 % у различных субподрядчиков, 8 – 14 % у изготовителей ЦС и 27 – 33 % у потребителей аппаратуры.

Методы технической диагностики полупроводниковых структур и интегральных схем при воздействии электростатических разрядов. При рассмотрении процессов влияния ЭСР на полупроводниковые структуры (ПС) и ИС могут использоваться различные структурные электрические модели (СЭМ), в которых тело человека и его отдельные части вместе с этой аппаратурой задаются в виде эквивалентных сопротивлений, емкостей и индуктивностей. Затем моделируется электрический разряд с тела на аппаратуру и рассматривается протекающий при этом переходный процесс.

В результате можно прийти к полному пониманию действия ЭСР на аппаратуру (в нашем случае на ПС и ИС), что позволяет сконструировать соответствующие имитаторы электростатических разрядов, генерирующие электрические импульсы, характеристики которых практически совпадают с характеристиками реального ЭСР. Подавая такие импульсы в определенные точки (узлы) электронной аппаратуры, опытным путем определяют ее стойкость к воздействию ЭСР.

При описаниях моделей также учитываются способы возникновения ЭСР. Так электрические заряды в материалах могут возникать при разрыве контакта между ними, при деформации материалов, при их трении друг о друга. Кроме того, они могут появляться при получении этих материалов, их переработке и эксплуатации.

На базе справочных данных о свойствах материалов, задействованных при воздействии ЭСР и физических характеристиках протекающих процессов, строится математическая модель для каждого случая, и на базе ее производится компьютерное моделирование [1].

Структурные электрические модели заряжения и разрядов в электронной аппаратуре базируются, прежде всего, на понятии системы, как взаимодействующих объектов, в которой возникает ЭСР. Для рассмотрения и моделирования воздействия электростатических разрядов на ПС и ИС это прежде всего система «*оператор-аппаратура*», характеризующаяся разрядами статического электричества с заряженного тела оператора на аппаратуру. Еще одним примером такого рода системы является компонент электронной схемы, заряжающийся в процессе движения по конвейеру, и затем разряжающийся на близко расположенный и заземленный проводящий предмет. В этом случае система носит название модели «*заряженного компонента*».

Если рассматриваемые системы представить в виде соответствующей электрической схемы, состоящей из набора сопротивлений, емкостей и индуктивностей, имеющих определенные значения, то, рассматривая переходные процессы, протекающие в этой схеме, можно определить токи и напряжения на ее определенных участках. Это позволяет оценить вероятность выхода из строя (отказов) элементов электронной аппаратуры.

Модели воздействия электростатических разрядов на ПС и ИС основываются на следующих направлениях [1, 2]:

- структурные электрические модели заряжения и разрядов в электронной аппаратуре;
- имитаторы ЭСР.

Рассмотрим методы проверки работоспособности. Данные методы основываются на трех основных моделях воздействия ЭСР на ИС (и, или ПС): *модель тела человека* – МТЧ (англ. *Human Body Model*, НВМ); *машинная модель* – ММ (англ. *Machine Model*, ММ) и *модель заряженного прибора* – МЗП (англ. *Charged Device Model*, CDM) [1].

Наиболее изученной и широко распространенной моделью для оценки устойчивости электронных компонентов к воздействию ЭСР является МТЧ. Это обусловлено, в первую очередь тем, что МТЧ, так же, как и ММ, предназначена для симуляции процесса ЭСР заряженного объекта (человек или машина) при его соприкосновении с ИС. В МЗП же рассматривается процесс быстрого разряда электростатически заряженного электронного компонента.

Рассмотрим основополагающие принципы проведения испытаний ИС на устойчивость к ЭСР по вышеуказанным моделям.

Модель тела человека.

Даже при сравнительно простых движениях на поверхности тела человека может создаваться значительный заряд статического электричества (табл. 1) [1].

Таблица 1

Операция	Значения ЭСР при относительной влажности, кВ		
	10 %	40 %	55 %
Ходьба по ковру	35	15	7,5
Ходьба по виниловому покрытию пола	12	5	3
Движение работника по скамье или верстаку	6	0,8	0,4
Изъятие ИС из пластмассового пенала	2	0,7	0,4
Снятие ИС с винилового подноса или пластины	11,5	4	2
Изъятие ИС из мягкой пластиковой упаковки	14,5	5	3,5

Это обусловлено, в первую очередь, природой статической электризации, которая охватывает все процессы, ведущие к образованию и разделению положительных и отрицательных электрических зарядов в результате механической деформации, имеющей место при столкновении или контакте поверхностей двух твердых тел, поверхностей твердого тела и жидкости, а также при разрыве или отделении поверхностей твердых тел или жидкости

газами или каким-либо другим агентом, в частности, ионизированными газами.

Когда носитель заряда – человек, касается контактных выводов ИС, например, при операции ручной сборки (рис. 1), то часть энергии, содержащейся на поверхности его тела, передается, т.е. разряжается на интегральной схеме и через нее на землю [1].

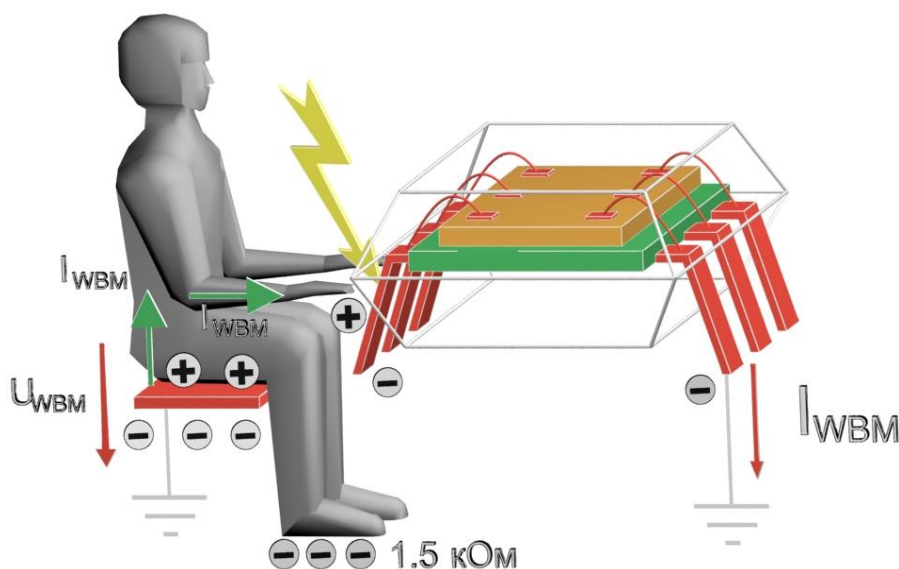


Рис. 1. Воздействие электростатического разряда на интегральные схемы по «модели тела человека»

Необходимо отметить, что при описании процесса воздействия ЭСР по МТЧ приняты некоторые допущения. Прежде всего, модель довольно упрощенно представляет распределенную систему (тело человека) и в ней не учитываются коронные явления, появляющиеся перед самим разрядом. Также не учтена индуктивность человека величиной 50–00 мкГн, которая в какой-то степени ограничивает

крутизну фронтов импульсов ЭСР. К тому же реально наблюдаемый разряд рассматриваемого типа протекает не однократно, а в виде серии последовательных разрядов при более низких напряжениях [17–22]. Полную модель ЭСР сложно воспроизвести на практике, поэтому отечественные и большинство зарубежных стандартов предусматривают только поверхностные RC-компоненты и максимально допустимое время нарастания 20 нс (рис. 2).

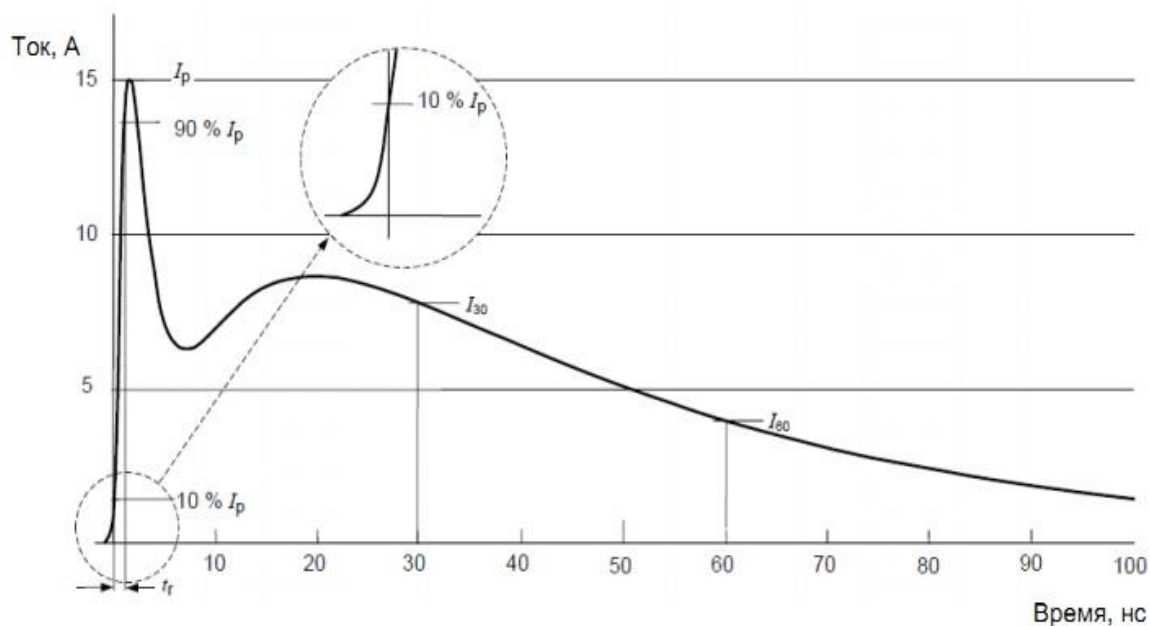
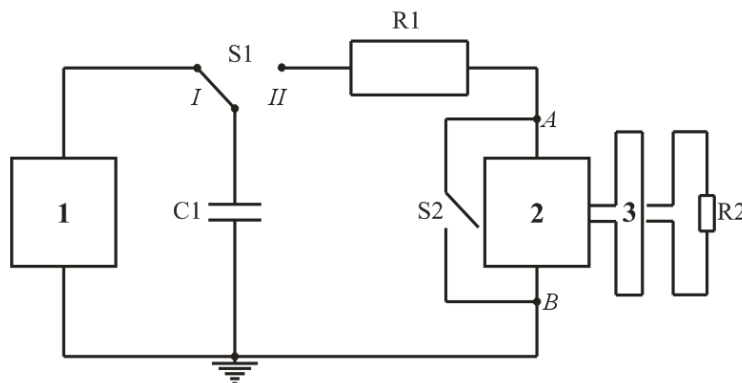


Рис. 2. График зависимости разрядного тока от времени для испытательного генератора, работающего по МТЧ

Эквивалентная схема тела человека (рис. 3), используемая при описании данного явления, в общем случае состоит из последовательно соединенной емкости ($C_{НВМ}$) и сопротивления ($R_{НВМ}$). В стандарте, действующем в Республике Беларусь [2], емкость и сопротивление тела человека соответственно равны:

$$C_{НВМ} = 100 \div 2500 \text{ пФ} \text{ и } R_{НВМ} = 80 \div 2000 \text{ Ом},$$

что соответствует отдельно стоящему человеку, несущему заряд на всей поверхности кожи. Обычный уровень заряда, накопленный на теле человека, равен 12 кВ, причем энергия заряда при этом составляет 15 мДж., при максимальном же значении напряжении 15 кВ, энергия составляет 17 мДж.



$R1 = (1500 \pm 1) \text{ Ом}$; $R2$ – безындуктивный резистор номиналом $(500 \pm 1) \text{ Ом}$, рассчитанный на напряжение 4 кВ; $C1$ – конденсатор емкостью $(100 \pm 10) \text{ пФ}$; 1 – высоковольтный источник постоянного напряжения; 2 – разъем испытываемой микросхемы; 3 – место подсоединения токового щупа

Рис. 3. Схема установки имитации ЭСР по МТЧ

Несмотря на это, результаты какой-нибудь одной испытательной ситуации можно использовать для сравнения ИС по их пороговым уровням напряжения разрушения. Установленные таким образом пороговые уровни обладают значениями, характерными для наихудшего случая, так как реальные разряды статического электричества с определенным потенциалом почти всегда слабее, чем в испытательных схемах.

Машинная модель.

Отличительной особенностью ММ, 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 [23–30].

Пример случая, описываемого машинной моделью, может наблюдаться при автоматической подаче интегральных схем путем скольжения в подводящих каналах (рис. 4). Система проводников ИС

и его корпуса в результате трения могут заряжаться электричеством таким же образом, как заряжается тело человека при осуществлении операций, сопряженных с процессом трения.

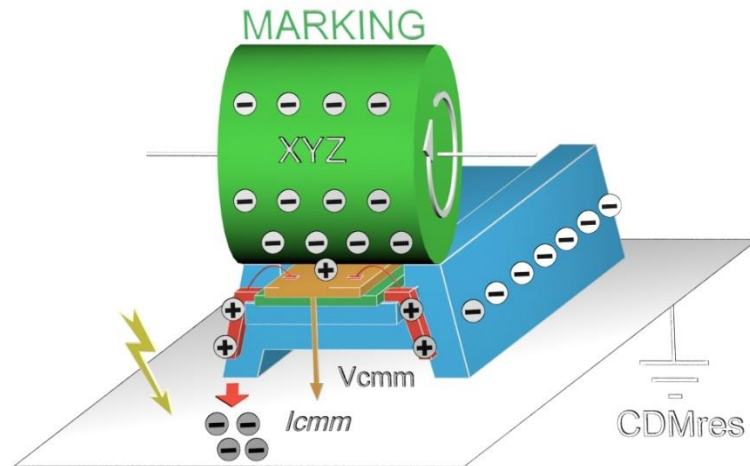
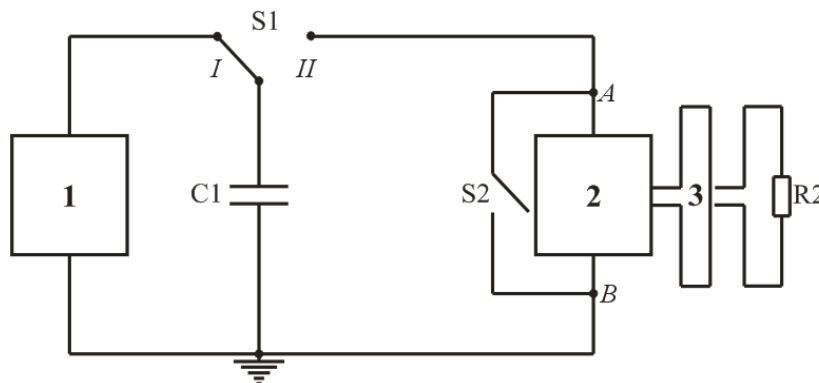


Рис. 4. Воздействие электростатического разряда на ИС по «машинной модели»

При имитации электростатического разряда по ММ в эквивалентной схеме, в отличие от уже рассмотренной выше модели тела человека, являются

лишь величины собственной ёмкости объекта ($C = 200$ пФ) и разрядного сопротивления ($R = 0$ Ом) (рис. 5) [31].



$R2$ – безындуктивный резистор номиналом (500 ± 1) Ом, рассчитанный на напряжение 4 кВ; $C1$ – конденсатор емкостью (100 ± 10) пФ; 1 – высоковольтный источник постоянного напряжения; 2 – разъем испытываемой микросхемы; 3 – место подсоединения токового щупа
Рис. 5. Схема установки имитации разрядов статического электричества по «машинной модели»

Вследствие малости разрядного сопротивления, форма разрядного импульса (рис. 6) определяется лишь величинами паразитных элементов схемы. Следовательно, повторяемость и взаимная

совместимость результатов испытаний при использовании модели ММ оказывается значительно ниже, чем при использовании модели НВМ [32].

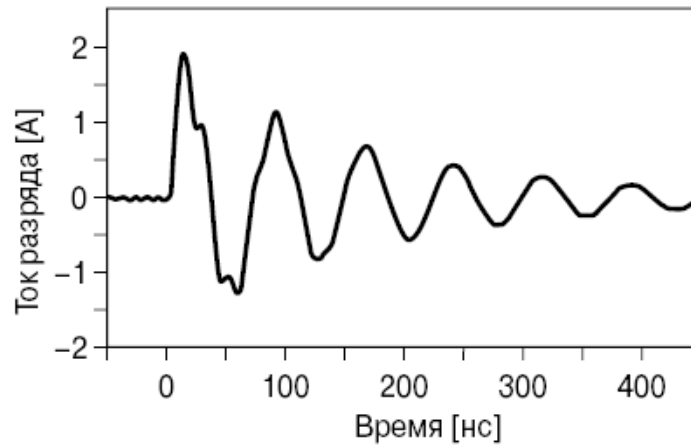


Рис. 6. Разрядный ток при испытаниях по «машинной модели» и напряжении 100 В

Разрушение ИС (и, или ПС) может произойти даже притом, что емкость прибора в ММ ниже, чем в МТЧ. Разрядный импульс происходит настолько быстро, что выделяемая плотность потока мощности превышает порог разрушения.

Случай, подобный ММ, также на практике возникает, например, при лакировке непроводящих крышек ИС методом распыления. Электрический заряд, возникающий при трении каплей жидкости о крышку, накапливается на крышке и может разрядиться на заземленную подложку либо наводится на заземленной части металлизации и разряжается на заземленную часть.

Модель заряженного прибора.

Модель заряженного прибора подробно описывает другой тип ЭСР, который может стать причиной неисправностей устройства, отличающихся от описанных выше. В ней рассматривается случай, когда устройство (ИС) ещё в процессе его производства приобретает электростатический заряд, а затем разряжается на объект, обладающий высокой проводимостью, например, на землю (рис. 7). 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 [1].

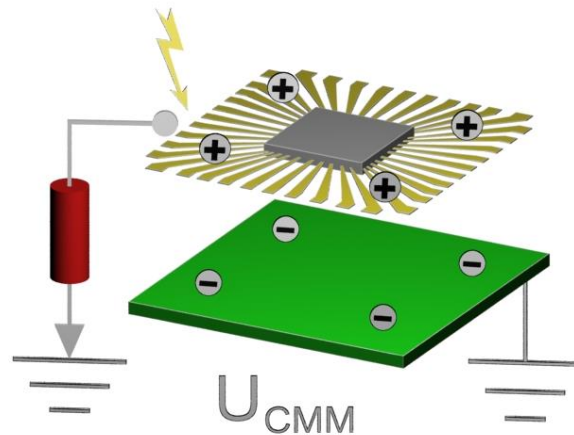


Рис. 7. Воздействие электростатического разряда на ИС по «модели заряженного прибора»

На рис. 8 показана типичная форма разрядного импульса при испытаниях по модели МЗП. Его нарастающий фронт гораздо короче (время нарастания приблизительно 300 пс), а общая длительность импульса существенно ниже (приблизительно 0,5 нс), чем соответствующие параметры

импульсов в моделях МТЧ и ММ. Это означает, что, хотя амплитуда тока в импульсе достигает нескольких ампер даже при низких напряжениях разряда, при использовании модели МЗП уровень мощности, рассеиваемой в устройстве, оказывается ниже, чем при использовании моделей МТЧ и ММ.

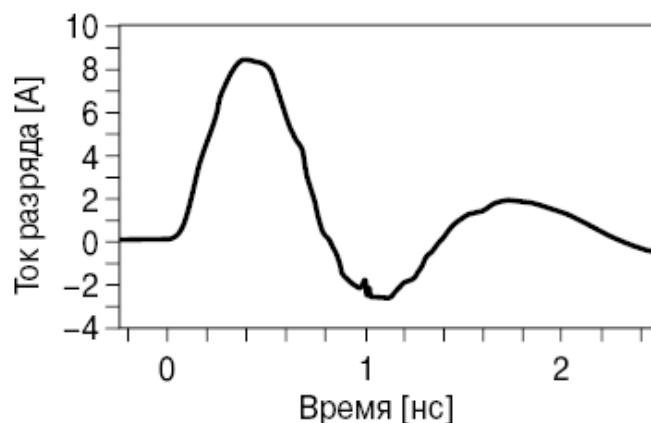


Рис. 8. Форма разрядного импульса по «модели заряженного прибора»

В процессе тестирования, когда ИС испытывается на устойчивость к воздействию ЭСР, она вынута из панельки и лежит на металлической пластине выводами вверх. Сначала ИС заряжается посредством подачи заряда на земляной вывод через высокоомный резистор либо за счёт электростатической индукции от заряженной подложки. Затем выводы ИС поочередно разряжаются (при касании их заземлённой иглой). Как видно из рис. 9, кристалл ИС и металлическая пластина, на которой лежит ИС, образуют конденсатор. Ёмкость этого кон-

денсатора зависит от геометрии корпуса ИС. Значение данной ёмкости определяет величину электрического заряда, который может быть накоплен кристаллом ИС, и, следовательно, амплитуду разрядного тока. Поскольку процесс разряда начинается с того, что между тестируемым выводом ИС и заземлённой иглой возникает искра (ещё до того, как они соприкасаются друг с другом), повторяемость теста МЗП также невысока. Однако данное испытание очень хорошо моделирует реальные ситуации, возникающие при различных манипуляциях с ИС [1].

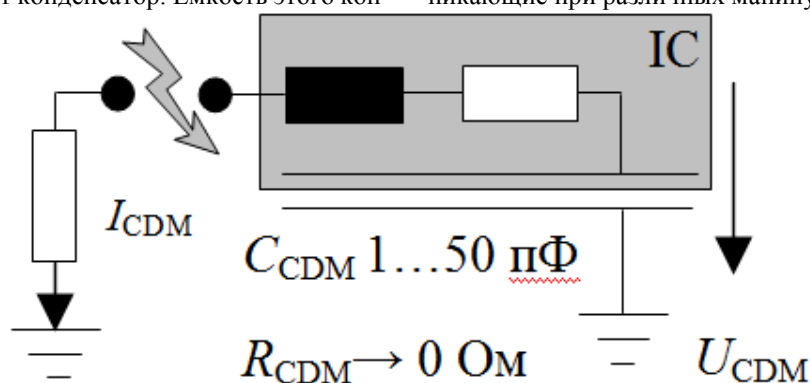


Рис. 9. Эквивалентная модель по МЗП

Анализ выявленных дефектов в микроконтроллерах, вызванных воздействием электростатических разрядов. Одним из наиболее интересных случаев является рассмотрение воздействия ЭСР на микроконтроллеры (МК). В настоящее время, выявление причин неработоспособности МК связаны с необходимостью поиска и устранения дефектов, возникших в процессе производства или эксплуатации. Большая часть времени, затрачиваемая обслуживающим персоналом на определение дефекта, расходуется непосредственно на поиск дефекта. Поэтому важно выбрать методы и программы

поиска дефекта, при которых обеспечивается минимальные затраты на диагностирование.

Рассмотрим виды и механизмы отказов полупроводниковых структур, вызываемые ЭСР. Современные исследования, в области технической диагностики МК, на которые производилось воздействие ЭСР, классифицируют дефекты в строгом соответствии с протекающими физическими механизмами зарождения, развития и распространения (рис. 11) [1, 33–37].

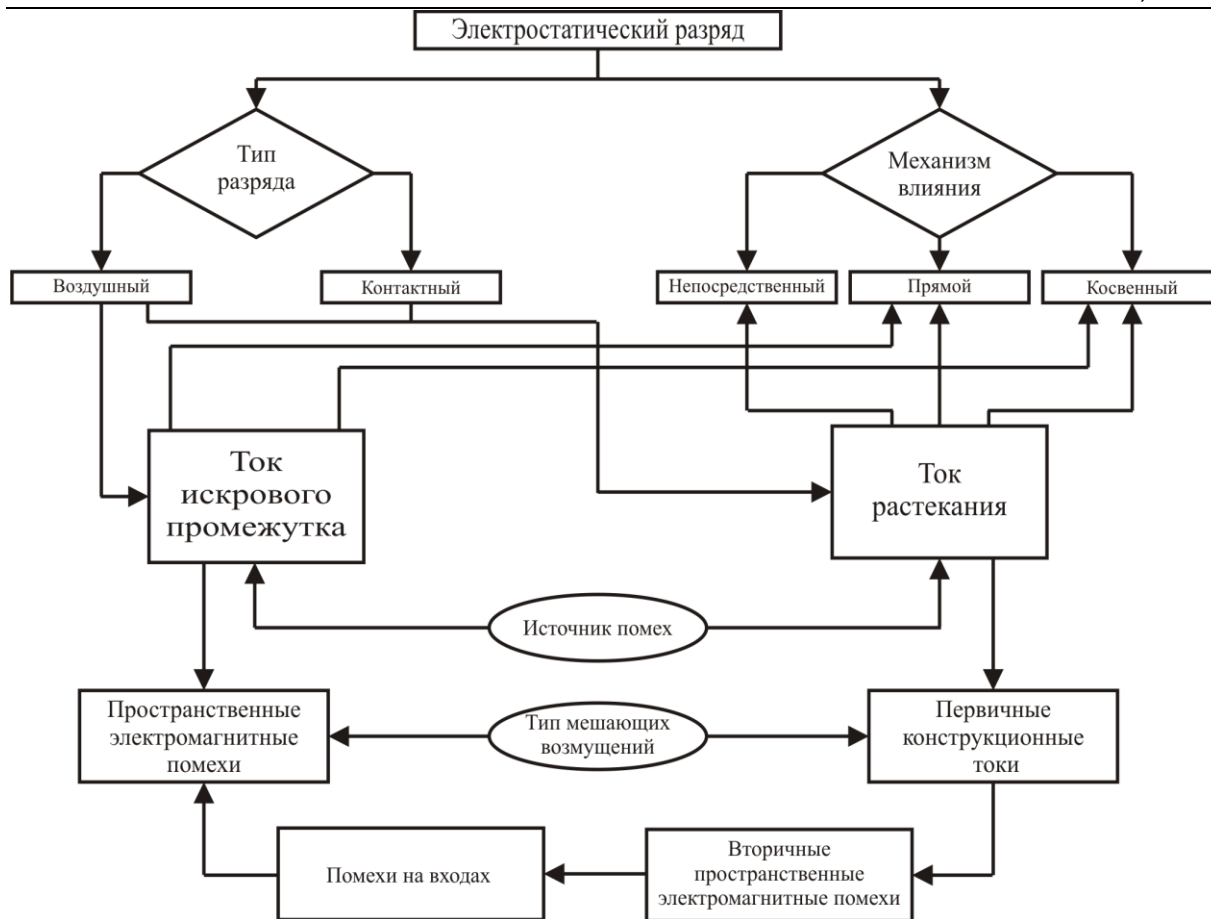


Рис. 11. Классификация физических механизмов, протекающих в микроконтроллере, при воздействии разряда статического электричества

Непосредственно перед ЭСР и в течение первых десятков наносекунд, на МК действует наведенное высокое напряжение, которое является источником тока. В связи с этим на изделие действует и потенциал электрического заряда, и ток разряда [1, 33–37]. В связи с этим, ППИ и МК, на которые воздействует ЭСР, могут иметь место два типа повреждений:

– *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, которые часто опознают по горячим точкам или расплавленным участкам на кристалле, и отказы под действием напряжения, когда им пробивается насквозь диэлектрик или разрушается поверхность кристалла);

– *скрытые* повреждения, которые затрагивают только один из параметров – усиление, утечку и т.д. – или вызывают некоторые изменения начальных характеристик, которые могут, тем не менее, не выходить за рамки допустимых отклонений. Эти повреждения обнаружить труднее, так как зачастую они проявляются лишь в результате повторяющихся разрядов или в процессе эксплуатации.

Различают шесть наиболее распространенных и связанных с ЭСР механизмов отказов МК: тепловой вторичный пробой; расплавление металлизации; пробой диэлектрика; поверхностный пробой; объемный пробой; газовый дуговой разряд [1].

Первые три механизма отказов определяются током (мощностью) ЭСР, остальные три – напряжением разряда.

Тепловой вторичный пробой известен как выгорание (выжигание) перехода [1, 33–35]. При данном механизме отказа температура на переходе приближается к точке плавления кремния. Когда температура достигает этого уровня, то плавятся с начала неоднородные «горячие» точки, что приводит к локальному расплавлению участка кремния. Если импульс ЭСР имеет достаточную продолжительность, эти горячие точки увеличиваются до возникновения короткого замыкания на переходе. Таким образом, данный механизм повреждений полупроводниковых структур связан с плавлением кремния в обедненной области *p-n*-перехода или локальном разогреве, при этом наиболее часто повреждаются переходы эмиттер-база *n-p-n*-транзисторов линейных биполярных ИС. Повреждение продольных *n-p-n*-транзисторов встречается реже. Однако термический или тепловой вторичный пробой может не проявиться немедленным коротким замыканием на переходе, а проявится позднее как результат миграции электронов и ионов.

Расплавление металлизации происходит, когда ЭСР обладает достаточной мощностью для расплавления металла соединительных дорожек, так как толщина, а зачастую и ширина металлизированных дорожек настолько малы, что металл расплавляется

как у плавких предохранителей под действием повышенного значения тока. Это происходит при плотности тока порядка 10^7 А/см^2 . При этом эффекте большую роль играет плотность тока, а не величина напряжения [1, 33–37].

Объемный пробой возникает в результате изменения параметров перехода из-за воздействия высоких температур под влиянием тока разряда, что приводит, в итоге, к быстрой диффузии примесей и замыканию переходов в объеме [1].

Пробой диэлектрика возникает, если значение электрического поля превышает значение поля, связывающего электроны с ядрами атомов. При этом освобожденные электроны формируют внутренний ток, который дает лавинный эффект, разрушающий диэлектрик. Диэлектрический пробой чаще всего встречается у МОП-транзисторов и емкостей линейных биполярных ИС [33–37].

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 [1].

Газовый дуговой разряд также зависимый от напряжения механизм отказа, вызывающий, в конечном счете, испарение металлических частей кристалла [33–35].

Одинаковый ЭСР по разному влияет на различные ПС. Так МДП-транзисторы и ИС более подвержены отказам в результате пробоя диэлектрика. Например, биполярные приборы более подвержены отказам, связанным с током (мощностью) – тепловому пробую.

Наиболее часто встречаются, *три механизма отказов*: расплавление металлизации на кристалле, разрушение защитного слоя, расплавление объемных участков кремния [1, 33–35].

Чаще всего причиной отказов ПС под воздействием ЭСР является совместное действие нескольких механизмов отказа. 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.

Как показано в работе [1] у 90 % биполярных ИС, получивших повреждение из-за ЭСР, были повреждены переходы, у остальных 10 % была повреждена металлизация. Одновременно у 27 % схем имел место пробой диэлектрика.

Нельзя не отметить еще один вид отказов ПС под воздействием ЭСР – обрыв соединительных внутренних выводов в месте их сварки на кристалле и на траверсах корпусов [1]. Воздействие ЭСР приводит к уменьшению минимальной прочности сварного соединения и к возрастанию на 4–22 % количества обрывов по месту деформации золотого проводника в области сварки.

Значение возникающих в местах термокомпрессии нормальных напряжений определяется по формуле:

$$\sigma = \frac{1,3 \cdot I^2 L^2 \theta}{hR^3}$$

где I – ток, проходящий через сварные соединения, А; L – расстояние от места сварки до края торца вывода траверсы или до края контактной площадки, мкм; h – удвоенная высота наклона проводника над торцом вывода траверсы или контактной площадки, мкм; R – радиус проводника, мкм; θ – коэффициент динамической нагрузки, равный $30 \text{ Н/А}^2\text{см}^2$.

Так для ЭСР со значениями: потенциал – 2 кВ, ток, проходящего через сварное соединение – 4 А, при величине контактного сопротивления – 0,5 кОм, $L = 100 \div 1200$ мкм, $R = 20$ мкм и $h = 3R$, напряжения в месте сварки составляют от 27 до 1900 Н/см^2 . Предел прочности сварных соединений из золотой проволоки равен $10\,000 \text{ Н/см}^2$. Для отожженного золотого проводника диаметром 40 мкм это соответствует усилию разрыва $20 \div 25$ г. Следовательно, воздействия ЭСР потенциалом в 2 кВ может привести к обрыву сварных соединений в месте деформации, если усилие разрыва не более 4 – 6 г.

Скрытые дефекты ПС, возникающие под воздействием ЭСР, характеризуются возникновением небольшого повреждения, которое, тем не менее, приводят к отказу изделия при эксплуатации в начальный период. Эти дефекты можно обнаружить, проведя испытания на принудительный отказ (например, электротермотренировка).

По физическому принципу скрытые дефекты, вызванные ЭСР, можно разделить на три большие группы [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 к образованию паразитных каналов утечки.

Дефекты металлизации. Они проявляются в виде выброса металла. В результате таких дефектов могут возрасти токи утечки либо появиться коротки. 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 сокращают срок службы приборов, в частности, потому, что делают их более восприимчивыми к импульсным перегрузкам в процессе эксплуатации.

Дефекты, связанные с расплавлением объемных участков кремния, не влияющие на выходные параметры ПС. Примеров такого случая является пробой диффузионного резистора в месте соединения с алюминиевой дорожкой. Импульс ЭСР может проплавить дорожку из алюминия через диффузионный резистор.

Обнаружено также, что ЭСР может приводить к возникновению эффектов термоупругости, которые могут быть причиной деградации характеристик ПС.

Заключение. Параметры воздействующего ЭСР на МК варьируются в широком диапазоне напряжений, однако закономерности их развития идентичны. Для оценки их характеристик целесообразно рассматривать ЭСР как последовательность одиночных либо многократных ЭМИ, которые воздействуют на МК. Для оценки воздействия на МК разряда наиболее важен учет напряжения и длительности импульса разряда, которые оказывают основное влияние на возможность возникновения отказов МК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. The Impact of ESD on Microcontrollers / Genady A. Piskun, Viktor F. Alexeev, Sergey M. Avakov, Vladimir E. Matyushkov, Dmitry S. Titko ; Edited by PhD, Associate professor Viktor F. Alexeev. – Minsk : Kolorgrad, 2018. – 184 p.
2. Электромагнитная совместимость. Часть 4-2. Методы испытаний и изменений. 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.
3. Уильямс, Т. ЭМС для разработчиков продукции / Т. Уильямс. – М.: Издательский дом «Технология», 2003. – 540 с.
4. Кечиев, Л.Н. Электростатический разряд и электронное оборудование / Л.Н. Кечиев, В.И. Кульмин. – М.: Изд. МИЭМ, 1996. – 84 с.
5. Berbeco, G.R. Static protection in electronics manufacturing / G.R. Berbeco // *Electronic Packaging and Production*. – 1980. – № 7. – P. 148–157.
6. Kohlhaas, P. Controlling potential static charge problem / P. Kohlhaas // *Electronic Packaging and Production*. – 1997. – № 1. – P. 71–73.
7. Горлов, М.И. Отбраковочные технологические испытания как средство повышения надежности партий ИС / М.И. Горлов, Л.П. Ануфриев, А.В. Строго-нов // *Инженерная микроэлектроника*. – 2001. – № 5. – С. 22–26.
8. Горлов, М.И. Физические основы надежности интегральных микросхем / М.И. Горлов, С.Ю. Королев. – М.: Воронеж ВГУ, 1995. – 200 с.
9. Ho, R. Electrostatic effects on resistors / R. Ho // *Insulation Circuits*. – 1971. – P. 23.
10. Minear, R.L. Effects of electrostatic discharge on linear bipolar integrated circuits / R.L. Minear, G.A. Dodson // *15-th Annual Proc. Reliability Physics*. – 1977. – P. 138–143.
11. Himmel, R.P. Thick-film Resistor Adjustment by High Voltage Discharge / R.P. Himmel // *Proc. Elect. Comp. Conf.* – 1971. – P. 504 p.
12. Avery, L.R. Electrostatic discharge: mechanism, protection techniques and effects on integrated circuit reliability / L.R. Avery // *RCA Rev.* – 1984. – № 2. – P. 291–302.
13. Greason, W.D. The effects of electronics discharge on microelectronic devices – a review / W.D. Greason, G.S.P. Castbe // *IEEE Trans. Ind. Appl.* – 1984. – № 2. – P. 247–252.
14. Davies, D.K. Les bases des problemes electrostatiques en electronique / D.K. Davies // *Rev. General D L'Electricite*. – 1987. – № 2. – P. 3–13.
15. Bernier, J. ESD improvements for familiar automated handlers / J. Bernier, B. Heshner // *EOS/ESD Symposium*. – 1995. – P. 110–117.
16. Gossner, H. ESD protection for the deep sub micron regime – a challenge for design methodology / H. Gossner // *Proc. of the Int. Conf. on VLSI Design (VLSID)*. – 2004. – P. 809–818.
17. Кармашев, В.С. Электромагнитная совместимость технических средств. Справочник / В.С. Кармашев. – М.: Научно-производственный центр «НОРТ», 2001. – 401 с.
18. Каверзнев, В.А. Статическое электричество в полупроводниковой промышленности / В.А. Каверзнев. – М.: Энергия, 1975. – 164 с.
19. Кечиев, Л.Н. Электростатический разряд и электронное оборудование / Л.Н. Кечиев, В.И. Кульмин // М.: Изд. МИЭМ, 1996. – 84 с.
20. Внутренние элементы защиты интегральных схем от воздействия электростатических разрядов / С.И. Быковский, А.В. Шинтар, Г.А. Пискун, В.Ф. Алексеев // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. – 2015. – № 7 (18-1). – С. 195–198.
21. Kelly, M. A comparison of electrostatic discharge models and failure signatures for CMOS integrated circuit devices / M. Kelly, G. Servais, T. Diep, D. Lin, S. Twerefour, G. Shah // *Journal of Electrostatics*. – 1996. – № 1-2. – P. 53–71.
22. Notermans, G. Pitfalls when correlating TLP, HBM and MM testing / G. Notermans, P. de Jong, F. Kuper // *EOS/ESD Symposium*. – 1998. – P. 170–176.
23. Amerasekera, E.A. An investigation of the nature and mechanism of ESD damage in NMOS transistor / E.A. Amerasekera, D.S. Campbell // *Solid-State Electronics*. – 1989. – № 3. – P. 199–206.
24. Брылева, О. А. Основные механизмы повреждения микроконтроллеров вследствие влияния электростатических разрядов / О.А. Брылева, В.Ф. Алексеев, Г.А. Пискун // *Вестник Белорусско-Российского университета*. – 2013. – № 2 (39). – С.130–137.
25. Пискун, Г.А. Методы технической диагностики микроконтроллеров при воздействии электростатических разрядов / Г.А. Пискун, В.Ф. Алексеев, О.А. Брылева // *Вестник Белорусско-Российского университета*. – 2013. – №2(39). – С.156–163.
26. Hu, C.-K. Copper interconnection integration and reliability / C.-K. Hu, B. Luther, F.B. Kaufman, J. Hummel, C. Uzoh, D.J. Pearson // *Thin Solid Films*. – 1995. – № 1-2. – P. 84–92.
27. Алексеев, В.Ф. Методика оценки устойчивости микроконтроллеров к воздействию разрядов статического электричества при ступенчатом повышении напряжения / В.Ф. Алексеев, Г.А. Пискун // *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*. – 2012. – № 2 (40). – С.34–40.
28. Voldman, S.H. The impact of technology evolution and scaling on electro-static discharge (ESD)

protection in high-pin count high-performance microprocessors / S.H. Voldman // IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. (ISSCC). – 1999. – P. 366–367.

29. Voldman, S.H. High-current characterization of dual-damascene copper interconnects in SiO₂ and low-k interlevel dielectrics for advanced CMOS semiconductor technologies / S.H. Voldman // Proc. of the Int. Reliability Physics Symp. (IRPS). – 1999. – P. 144–153.

30. Максимов, Б.К. Статическое электричество в промышленности и защита от него / Б.К. Максимов, А.А. Обух. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 95 с.

31. Микросхемы интегральные. Методы испытаний. Методы электрических испытаний. Часть 7 : ОСТ 11 073.013-2008. – Введ. 01.01.09. – Российская Федерация : Госстандарт России, 2009. – 35 с.

32. Smedes, T. The application of transmission line pulse testing for the ESD analysis of integrated circuits / T. Smedes, R.M.D.A. Velghe, R.S. Ruth, A.J. Huising // Journal of Electrostatics. – 2002. – P. 399–414.

33. Методика испытания микроконтроллеров на чувствительность к электростатическим разрядам / В.Ф. Алексеев, Н.И. Силков, Г.А. Пискун,

А.Н. Пикулик // Доклады БГУИР. – 2011. – № 5 (59). – С.5–12.

34. Гиззатулин, З.М. Частотный анализ воздействия электростатического разряда на элементы печатных плат / З.М. Гиззатулин // Технологии ЭМС. – 2004. – № 1. – С. 47–51.

35. Пискун, Г.А. Способы защиты радиоэлектронных устройств от воздействия электростатических разрядов: обзор современного состояния и перспективы развития в приборостроении / Г.А. Пискун, В.Ф. Алексеев, А.Л. Житников // Стандартизация. – 2017. – № 5. – С. 54–59.

36. Пискун, Г.А. Контроль функционирования микроконтроллеров при воздействии электростатического разряда / Г.А. Пискун, В.Ф. Алексеев // Доклады БГУИР. – 2012. – № 6 (68). – С.12–18.

37. Алексеев, В.Ф. Влияние разрядов статического электричества на программное обеспечение, инсталлированное во встроенную flash-память микроконтроллеров / В.Ф. Алексеев, Г.А. Пискун // Радиоэлектроника и информатика. – 2012. – № 3 (58). – С.8–12.

CONTROL OF THE DEGRADATION OF PARAMETERS OF P-MOSFET ON SUBMICRONIC IMC WITH PROJECT STANDARDS 0.35 MICRON

Bondarev A.

*Undergraduate Department of the PIKS
Belarusian state University
Informatics and Radioelectronics*

Zagorskiy A.

*Undergraduate Department of the PIKS
Belarusian state University
Informatics and Radioelectronics*

КОНТРОЛЬ ДЕГРАДАЦИИ ПАРАМЕТРОВ P-МОП-ТРАНЗИСТОРОВ НА СУБМИКРОННОЙ ИМС С ПРОЕКТНЫМИ НОРМАМИ 0.35 МКМ

Бондарев А.А.

*Магистрант кафедры ПИКС
Белорусского Государственного Университета
Информатики и Радиоэлектроники*

Загорский А.В.

*Магистрант кафедры ПИКС
Белорусского Государственного Университета
Информатики и Радиоэлектроники*

Abstract

The article presents the analysis of the degradation of p-MOS transistors parameters under accelerated testing for commercially available submicron CMOS integrated circuits with project standards of 0.35 μm using the gate current method.

Аннотация

В статье приведен анализ деградации параметров p-МОП-транзисторов при ускоренных испытаниях для серийно выпускаемых субмикронных КМОП интегральных микросхемах с проектными нормами 0.35 мкм, используя метод тока затвора.

Keywords: MOSFET, degradation, parameter, accelerated test, current, gate.

Ключевые слова: МОП-транзистор, деградация, параметр, ускоренное испытание, ток, затвор.