

УДК 621.3.049.77

Г.А. Пискун, В.Ф. Алексеев

Совершенствование математической модели расчета надежности КМОП СБИС с учетом особенностей воздействия электростатического разряда

Исследована специфика влияния разрядов статического электричества на современные полупроводниковые приборы. Установлено, что в существующей математической модели расчета интенсивности отказов СБИС не учитывается тип воздействующего разряда. Высказано предположение о целесообразности введения в данный расчет поправочного коэффициента, учитывающего тип воздействия электростатического разряда на наружный вывод микросхемы. Экспериментально подтверждено, что усовершенствование существующей математической модели позволит более точно осуществлять оценку надежности КМОП СБИС.

Ключевые слова: интенсивность отказов, КМОП СБИС, математическая модель, надежность, электростатический разряд

Развитие и распространение сложной микропроцессорной техники, построенной на базе сверхбольших интегральных схем (СБИС), к которым можно отнести быстродействующие микроконтроллеры (МК), требует совершенствования подходов к оценке их надежности. Это обусловлено тем, что рост сложности МК, наличие в их составе уникального программного кода и участие человека, способного в процессе эксплуатации (записи, стирания, преобразовании и т.д.) деструктивно воздействовать разрядом статического электричества на наружный вывод микросхемы, не позволяет использовать традиционные методы теории надежности.

В работах [1–5] показано, что особое внимание целесообразно уделять не только конструктивным повреждениям СБИС, но и безопасности информационного ресурса, а именно, защите сведений от их случайного или умышленного повреждения электростатическим разрядом (ЭСР). При этом, проблема защиты информации, как отмечено в работе [6], является многоплановой комплексной задачей, предполагающей не только рассмотрение вопросов обеспечения целостности программного кода, но и предложения способов защиты от сбоев, возможных при частичном повреждении данных.

В настоящее время в литературе практически отсутствуют универсальные методы оценки надежности СБИС. В частности, в существующих математических моделях не учитываются тип воздействия разряда статического электричества (контактный или воздушный) и носитель заряда (человек, предмет и т.д.), что подчеркивает нецелесообразность использования их в реальных условиях.

В связи с вышесказанным, актуальной является задача не только совершенствования существующих подходов к оценке надежности СБИС, но и строгой аргументации их применения, а также установления связи с традиционными показателями надежности. Решение данной задачи особо важно в настоящее время при проектировании высоконадежных и эффективных СБИС, которые к тому же должны удовлетворять требованиям конкурентоспособности на мировом рынке.

1. Анализ воздействия электростатических разрядов на СБИС

Возникновение электростатических зарядов обусловлено чаще всего 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 [7, 8]. Данные заряды, накапливаясь в определенной электрической емкости (человек, прибор и т.д.), создают электрический потенциал, который в большинстве случаев приводит к возникновению ЭСР, являющегося причиной образования электромагнитных помех (в случае распространения разряда в газовой среде) или неравномер-

ному распределению температур (в случае протекания разрядного импульса в системе токоведущих элементов СБИС) [9, 10].

Известно [7, 11], что при выполнении сравнительно простых операций на поверхности тела человека, взаимодействующего со СБИС или оборудованием, может сформироваться значительный заряд. В связи с этим, производителями полупроводниковых приборов и электронного оборудования была разработана модель, имитирующая разряд с тела оператора – «модель тела человека» (МТЧ). Она является наиболее изученной и широко распространенной при испытании СБИС на устойчивость к воздействию ЭСР.

Однако достаточно сложно провести анализ всех путей влияния ЭСР на СБИС. Это обусловлено тем, что различные виды воздействия обычно происходят комплексно, а также последовательно друг за другом без видимой границы между ними. В связи с этим, наиболее часто разряды статического электричества характеризуются таким базовым показателем, как тип разряда (контактный или воздушный).

В работах [7, 11, 12] показано, что контактный разряд статического электричества возникает тогда, когда разрядный наконечник испытательного генератора во время разряда удерживается в контакте с микросхемой. В свою очередь, особенностью воздушного разряда является то, что при его реализации наконечник испытательного генератора постепенно приближается к микросхеме до возникновения электромагнитного импульса.

Проведение испытаний интегральных схем сверхбольшой степени интеграции на устойчивость к контактному разряду является наиболее предпочтительным, т.к. воздушный разряд является непредсказуемым и зависит от многих факторов, например, скорости приближения разрядного наконечника, влажности окружающей среды и конструкции испытательного оборудования, приводящих к изменениям времени нарастания импульса и величины тока разряда.

Стоит отметить, что на практике, контактный разряд возможен только при максимально близком нахождении человека к СБИС или оборудованию, а также недостаточно высоком напряжении заряда, не способном пробить диэлектрическую воздушную прослойку. В противном случае, разряд будет воздушным.

Воздушный (искровой) разряд статического электричества проявляется в виде искры. В работах [7, 13, 14] показано, что искровой разряд – неустановившийся электрический разряд в газе, возникающий обычно при давлениях порядка атмосферного в том случае, когда непосредственно после пробоя разрядного промежутка напряжение на нем падает в течение очень короткого времени ниже величины напряжения погасания разряда.

Данный тип разряда представляет собой пучок ярких, быстро исчезающих или сменяющих друг друга нитевидных, часто сильно разветвленных полосок – искровых каналов. Эти каналы заполнены плазмой, в состав которой в мощном искровом разряде входят не только ионы исходного газа, но и ионы вещества электродов, интенсивно испаряющегося под действием разряда. Механизм формирования данных каналов (и, следовательно, возникновения искрового разряда) объясняется стримерной теорией электрического пробоя газов [13, 14].

2. Разработка математической модели расчета надежности КМОП СБИС с учетом типа воздействия ЭСР

Одной из основных характеристик безотказной работы полупроводниковых приборов и электронного оборудования, с учетом как внезапных, так и постепенных отказов, приводимой в технической документации, является эксплуатационная интенсивность отказов λ_P [15, 16].

На основании анализа данных, представленных в [15], под эксплуатационной интенсивностью отказов СБИС в работе понимается условная плотность вероятности возникновения отказа за время эксплуатации объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник.

Рассмотрим принцип расчета эксплуатационной интенсивности отказов интегральных схем сверхбольшой степени интеграции иностранного производства, который наиболее оптимально осуществлять с использованием следующей расчетной формулы (1) [16, 17]:

$$\lambda_P = (\lambda_{BD} \pi_{MGF} \pi_T \pi_{CD} + \lambda_{BP} \pi_E \pi_Q \pi_{PT} + \lambda_{EOS}) \times 10^{-6}, 1/ч \quad (1)$$

где λ_{BD} – значение интенсивности отказов кристалла; π_{MGF} – поправочный коэффициент, зависящий от процесса изготовления; π_T – коэффициент температурного режима; π_{CD} – поправочный коэффициент, зависящий от сложности кристалла; λ_{BP} – значение интенсивности отказов корпуса; π_E –

коэффициент, зависящий от окружающей среды; π_Q – коэффициент, зависящий от качества; π_{PT} – поправочный коэффициент, зависящий от типа корпуса; λ_{EOS} – значение интенсивности отказов, зависящее от напряжения ЭСР.

В математическом выражении (1) первое слагаемое характеризует интенсивность отказов кристалла, второе – интенсивность отказов корпуса, а третье (λ_{EOS}) – интенсивность отказов, обусловленных стойкостью СБИС к воздействию электростатического разряда [16].

Кардинальным отличием модели (1) от существующих математических моделей расчета эксплуатационной интенсивности отказов является присутствие в ней слагаемого λ_{EOS} , что особенно важно для расчетов СБИС в которых используется технология КМОП, которая наиболее чувствительна к воздействию разрядов статического электричества [16, 18, 19].

В стандарте [17] приведена следующая формула для расчета λ_{EOS} :

$$\lambda_{EOS} = \frac{-\ln[1 - 0,00057 \exp(-0,0002U_{TH})]}{0,00876} \times 10^{-6}, 1/ч \quad (2)$$

где U_{TH} – напряжение разряда статического электричества, В.

В результате анализа формулы (2), установлено, что в ней не учитывается тип воздействия разряда, а именно, контактный или воздушный.

Приведенные в [17] значения λ_{EOS} , рассчитаны только для контактного разряда статического электричества, и не могут быть использованы при расчете эксплуатационной интенсивности отказов, в условиях воздействия воздушного ЭСР. Это обусловлено, в первую очередь, тем фактом, что при распространении разряда статического электричества в газовой среде происходит его затухание.

В связи с этим, преобразуем формулу (2), введя поправочный коэффициент K_{ESD} , который позволит учитывать тип разряда статического электричества при расчете интенсивности отказов λ_{EOS} , в следующий вид (3):

$$\lambda_{EOS} = \frac{-\ln[1 - 0,00057 \exp(-0,0002K_{ESD}U_{TH})]}{0,00876} \times 10^{-6}, 1/ч \quad (3)$$

где K_{ESD} – поправочный коэффициент, учитывающий тип воздействия разряда статического электричества (контактный или воздушный).

Основываясь на данных, приведенных в [7, 11], были рассчитаны значения коэффициента K_{ESD} для соответствующих напряжений и типа разряда статического электричества. Принцип расчета данного коэффициента заключался в максимальном приближении значения напряжения воздушного разряда к контактному, с учетом условий одинаковых степеней жесткости испытаний.

На основании вышесказанного, расчет поправочного коэффициента (K_{ESD}), учитывающего тип воздействия разряда статического электричества (контактный или воздушный) осуществлялся следующим образом (4):

$$K_{ESD} = \frac{U_{TH(contact)}, В}{U_{TH(air)}, В}, \quad (4)$$

где $U_{TH(contact)}$ – напряжение контактного разряда статического электричества, В, $U_{TH(air)}$ – напряжение воздушного разряда статического электричества, В.

Полученные в результате расчета по формуле (4) значения поправочного коэффициента представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения поправочного коэффициента K_{ESD} с учетом типа разряда статического электричества и величины его напряжения

Степень жесткости испытаний	Контактный ЭСР		Воздушный ЭСР	
	Значение напряжения $U_{TH(contact)}, В$	Значение коэффициента K_{ESD}	Значение напряжения $U_{TH(air)}, В$	Значение коэффициента K_{ESD}
1	2000	1	2000	1
2	4000	1	4000	1
3	6000	1	8000	0,75
4	8000	1	15000	0,53

В связи с тем, что введенный поправочный коэффициент для контактного типа ЭСР независимо от величины напряжения равен 1 ($K_{ESD} = 1$), результаты расчетов с внедрением коэффициента не будут отличаться от результатов, рассчитанных по формуле (2).

В случае воздушного воздействия разряда статического электричества на СБИС напряжениями 8 000 В и 15 000 В, значения эксплуатационной интенсивности отказов целесообразнее рассчитывать по формуле (3) с введением поправочных коэффициентов 0,75 и 0,53 соответственно.

Разница расчета интенсивности отказа λ_{EOS} , с учетом и без учета поправочного коэффициента, при различных напряжениях воздействующего разряда статического электричества в рамках обязательного выполнения условия одинаковых степеней жесткости проводимых испытаний, представлена на сравнительном графике (рис. 1).

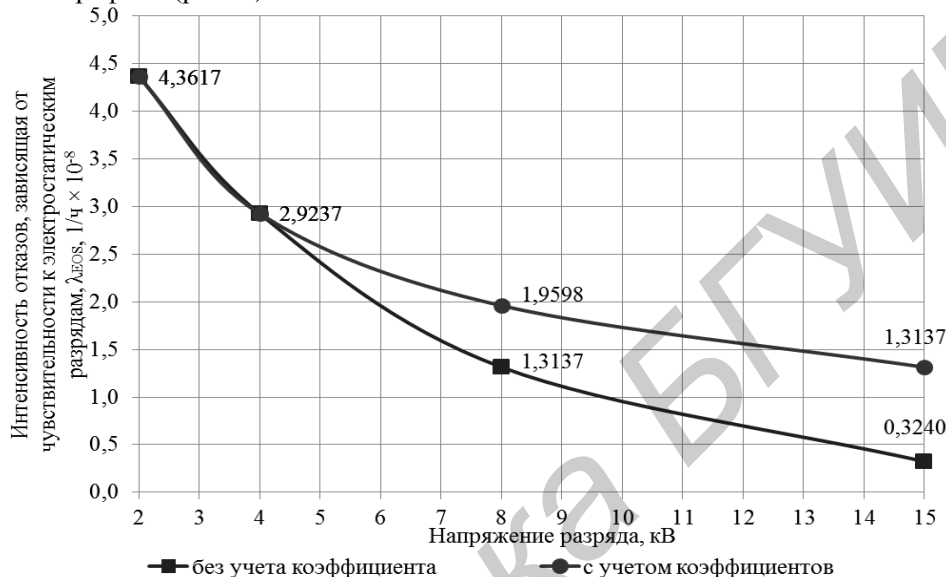


Рис. 1. График сравнения расчета интенсивности отказов при соответствующих напряжениях разряда статического электричества

Из графика видно, что точность расчета значения интенсивности отказов (λ_{EOS}), в котором учтено напряжение воздействующего разряда статического электричества и его тип, увеличивается в 1,5 раза (при $U_{TH(air)} = 8000$ В), и в 4 раза (при $U_{TH(air)} = 15000$ В).

Таким образом, экспериментально установлено, что использование математической модели (2) при воздушном воздействии разряда статического электричества приводит к некорректному расчету значения λ_{EOS} . Показано, что введение поправочного коэффициента K_{ESD} позволит скорректировать расчет и максимально приблизиться к получению точного результата.

3. Экспериментальное подтверждение эффективности разработанной математической модели

Для подтверждения эффективности введения поправочного коэффициента в расчет интенсивности отказов, зависящих от напряжения ЭСР, произведем вычисление эксплуатационной интенсивности отказов (λ_p) СБИС типа IN80C49N (изготовитель ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»). Данная микросхема представляет собой высокопроизводительный однокристалльный 8 разрядный микроконтроллер, реализованный на базе КМОП технологии высокой плотности, и предназначена для использования в бытовой технике, средствах связи, системах управления технологическими процессами, транспортом и других областях народного хозяйства [20], что подчеркивает ее востребованность при производстве не только отечественного, но и зарубежного оборудования. В связи с этим, был осуществлен расчет по математической модели (1).

При проведении расчета использовались численные значения параметров, полученных по моделям и таблицам, указанным в [17, 20, 21], а также отчетах по надежности, полученных в рамках выполненных исследований по гранту Министерства образования Республики Беларусь (№ ГР 20121726).

Ниже представлен график сравнения полученных результатов расчета (рис. 2).

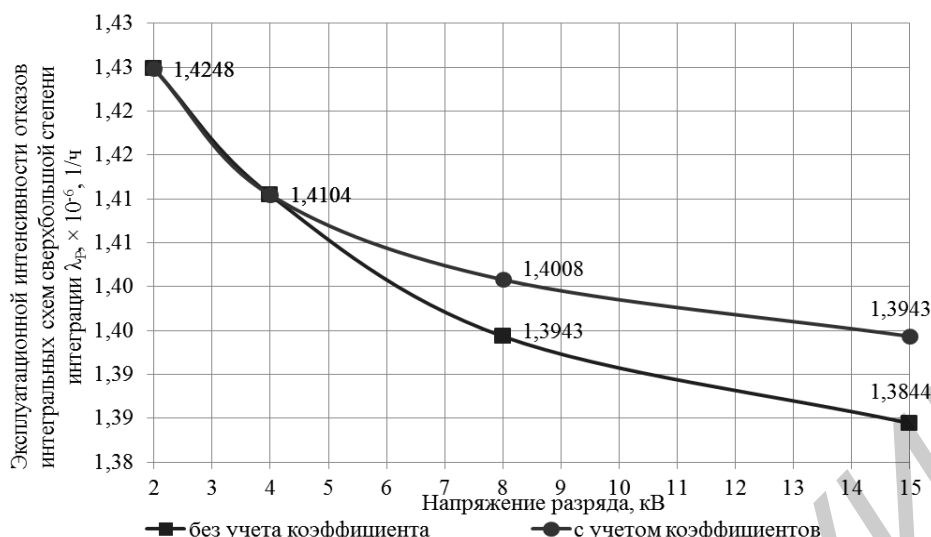


Рис. 2. График сравнения расчета эксплуатационной интенсивности отказов СБИС типа IN80C49N при различных типах воздействия разряда статического электричества

Из приведенных на рис. 2 результатов видно, что точность расчета эксплуатационной интенсивности отказов СБИС типа IN80C49N при воздействии разрядов статического электричества с учетом введенного поправочного коэффициента выше. Так, при импульсе разрядного тока напряжением 8000 В точность повышается на 0,46%, а при 15000 В – на 0,71%.

Предложенная математическая модель расчета интенсивности отказов КМОП СБИС, включающая поправочный коэффициент, который учитывает тип воздействия разряда статического электричества (контактный или воздушный) и его напряжение (для контактного разряда поправочный коэффициент равен 1; для воздушного разряда – 0,75 при напряжении 8 кВ и 0,53 при напряжении 15 кВ), позволяет повысить точность расчета λ_p до 0,71% (при напряжении разряда 15000 В).

Список литературы

1. 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.
2. 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.
3. Пискун Г.А. Контроль функционирования микроконтроллеров при воздействии электростатического разряда / Г.А. Пискун, В.Ф. Алексеев // Доклады БГУИР. – 2012. – № 6(68). – С. 12–18.
4. 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.
5. Пискун Г.А. Планирование эксперимента по выявлению изменений в программном обеспечении микроконтроллеров с flash-памятью при воздействии электростатического разряда / Г.А. Пискун, В.Ф. Алексеев // Известия Гомельского государственного университета имени Ф.Скорины. Естественные науки. – 2013. – № 6(81). – С. 139–146.
6. Кечиев Л.Н. ЭМС и информационная безопасность в системах телекоммуникаций / Л.Н. Кечиев, П.В. Степанов. – М.: «Технологии», 2005. – 302 с.
7. Кечиев Л.Н. Защита электронных средств от воздействия статического электричества / Л.Н. Кечиев, Е.Д. Пожидаев. – М.: «Технологии», 2005. – 352 с.
8. Леб Л.Б. Статическая электризация / Л.Б. Леб; пер. В.М. Фридкина. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 408 с.
9. 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.

10. 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(82). – С. 16–22.
11. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний: ГОСТ Р 51317.4.2-2010. – Введ. 01.01.2001. – Российская Федерация: Госстандарт России, 2001. – 33 с.
12. 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.
13. Райзер Ю.П. Физика газового разряда / Ю.П. Райзер. М.: Наука, 1992. – 536 с.
14. Базелян Э.М. Искровой разряд: учеб. пособие для вызов / Э.М. Базелян, Ю.П. Райзер. – М.: Изд-во МФТИ, – 1997. – 320 с.
15. Надежность в технике. Термины и определения: ГОСТ Р 53480-2009. – Введ. 01.01.2011. – Российская Федерация: Стандартиформ, 2010. – 33 с.
16. Абрамешин А.Е. Расчетная оценка надежности электронных модулей аппаратуры космических аппаратов / А.Е. Абрамешин, В.В. Жаднов, И.В. Жаднов // Технология ЭМС. – 2012. – № 1. – С. 29–33.
17. Reliability prediction of electronic equipment: Military Handbook MIL-HDBK-217F. Washington: Department of defense DC 20301, 1995. – 205 p.
18. Вонг Б.П. Нано-КМОП-схемы и проектирование на физическом уровне / Б.П. Вонг, А. Миттал, Ю. Цао, Г. Старр. – М.: Техносфера, 2014. – 432 с.
19. Сыдоров, В.Ф. Физические основы надежности интегральных схем / В.Ф. Сыдоров и др.; под ред. Ю.Г. Миллера. – М., «Сов. радио», 1976. – 320 с.
20. Datasheet // Company «INTEGRAL» [Electronic resource]. – 2015. – Mode of access: <http://www.chipfind.ru/datasheet/integral/in80c49n.htm>. – Date of access: 05.11.2015.
21. Надежность ЭРИ: Справочник. // С.Ф. Прытков, В.М. Горбачева, А.А. Борисов и др. / Науч. рук. С.Ф. Прытков. – М.: 22 ЦНИИ МО РФ, 2002. – 574 с.

Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» (УО БГУИР), г. Минск.

Статья получена 13.08.2015

Piskun G.A., Alexeev V.F.

Improvement of the mathematical model for calculating reliability of CMOS VLSIC taking into account features of impact of electrostatic discharge

This article presents an improved mathematical model for calculating the failure rate of CMOS VLSIC, which takes into account the correction factor depending on the type of impact of the discharge of static electricity

Key word: Failure rate, CMOS VLSIC, mathematical model, reliability, electrostatic discharge

Educational establishment "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics".