

УДК 539.12.04+678.01

UDC 539.12.04+678.01

РАССЧЕТ И АНАЛИЗ СТОЙКОСТИ КМОП-КОМПОНЕНТОВ ИС В СТРУКТУРЕ САПР СБИС**CALCULATION AND ANALYSIS OF RESISTANCE COMPONENTS IN CMOS VLSI CAD STRUCTURE**

Чевычелов Юрий Акимович
д.т.н., профессор
*Воронежская государственная лесотехническая академия,
Воронеж, Россия*

Tchevytchelov Yury Akymovyтч
Dr.Sci.Tech., professor
*Voronezh State Forest Technical Academy, Voronezh,
Russia*

В статье рассматривается оценка стойкости библиотечных компонентов КМОП ИС с помощью расчетных методов в структуре САПР СБИС. Способы расчета используют результаты испытаний КМОП ИС, выполненных по аналогичной технологии. Представлены результаты и анализ расчета вентиля, как основного компонента ИС

The article considers the evaluation of resistance of the CMOS components in the structure of VLSI CAD, obtained by the computational method. Methods for calculating test results were using CMOS IC. We present the results of the calculation and analysis of the valve as the main component of the integrated circuit

Ключевые слова: СТОЙКОСТЬ, КМОП ИС, ВЕНТИЛЬ, ТОК УТЕЧКИ, ИЗЛУЧЕНИЕ, ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ, ЗАДЕРЖКА

Keywords: RESISTANCE, CMOS IC, VALVE, LEAKAGE CURRENT, RADIATION, IMMUNITY, DELAY

Использование САПР СБИС на всех этапах проектирования (схематическом, функциональном, системном) разрешает основную проблему, которая заключается в выборе рационального соотношения между сложностью уровня интеграции используемых компонентов и достигаемыми параметрами проектирования на их основе. При проектировании учитываются не только достижения надежного функционирования, но реальные условия эксплуатации изделия – ионизационное излучение, широкий температурный диапазон окружающей среды. В САПР ИЭТ для отработки технологических маршрутов изготовления радиационностойких КМОП-БИС определен набор тестовых групп базовых элементов. Для моделирования радиационных эффектов разработана методика методологии единого системного подхода при прогнозировании поведения ЧБИС в условиях ИИ. Она базируется на единстве процессов выделения энергии различными видами ИИ и рассмотрении процессов деградации их характеристик от естественного старения и радиации с учетом зависимости от широкого набора воздействий разделенных во времени. При воздействии ионизирующих излучений (ИИ) на ИС наблюдаются

различные эффекты, все разнообразие которых можно условно разбить на два класса устойчивые и временные отказы. Задача оценки стойкости изделия означает определение уровней ИИ, при которых изделие будет еще работоспособным.

Цель данной работы – определить стойкость вновь разрабатываемых библиотечных элементов ИС к гамма-, электронному и протонному статическому излучению.

Метод расчета стойкости опирается на расчетный и расчетно-экспериментальный способ. Расчетный способ оценки стойкости будет основным, так как определение стойкости осуществляется на этапе проектирования изделия. Кроме того, используются и элементы расчетно-экспериментального способа (используя результаты эксперимента подобных тестовых структур) в части получения некоторых необходимых данных, настройки параметров и получения точности прогнозирования.

Оценка стойкости проводилась по следующему алгоритму:

- на основе анализа экспериментальных данных по подобным КМОП ИС, определены наиболее критичные виды ИИ, критериальные параметры ИС;
- на основе теоретических исследований, анализа литературных данных и результатов, полученных на первом этапе, обоснованы критериальные параметры на микроуровне для компонентов ИС, выбран наиболее критичный компонент ИС;
- проводится расчет наиболее критичных характеристик компонента ИС под воздействием гамма-, электронного и протонного статического излучения, при этом недостающая входная информация определяется из экспериментальных данных.
- оценивается стойкость и проводится анализ работы компонентов, выполненных по предложенной технологии к рассматриваемому статическому ИИ.

Анализ результатов эксперимента

Экспериментальные исследования проводились на ИС серии 1554. Сравнение результатов испытаний по факторам И1, И2, С3 показало, что из всех видов воздействия быстрее всего требуемый уровень стойкости достигается по фактору С3. То есть фактор С3 – наиболее критичный вид воздействия.

Анализ результатов испытаний ИС показал, что наиболее критичным электрическим режимом работы в условиях воздействия фактора С3 является статический режим при высоком уровне сигнала на входах и наименее критичным - пассивный режим. Наиболее чувствительным параметром к воздействию фактора С3 является статический ток потребления I_{sch} , т.е. этот параметр является критериальным. Первые отказы у образцов были зарегистрированы для ИС, у которых в процессе облучения поддерживался высокий уровень входных сигналов ($U_{ih}=U_{cc}=6B.$).

Функциональные отказы ИС наблюдались при более высоких дозах, чем отказы по току потребления. Ток потребления I_{sch} при облучении и после значительно превышал I_{sc1} . Отказы ИС в первую очередь наблюдались, для образцов, у которых в процессе облучения поддерживался высокий уровень входных сигналов ($U_{ih}=U_{cc}$).

Критериальные параметры стойкости элементов ИС.

Известно [1-3], что основными критериальными параметрами логических элементов ИС являются:

1. **Токи утечки.** В качестве нормы на него в [1-3] приводится критерий: ток утечки в цепи питания превышает $10^{-4}A$. Этот параметр напрямую связан с током потребления и поэтому необходим для оценки стойкости логических элементов ИС.

2. Помехоустойчивость. В качестве критерия в [1] выбраны значения: от 2В до 8В при напряжении питания 10В. При питании 5В значения соответственно равны 1,5 и 4В. Оценку по данному параметру также необходимо провести.

3. Работоспособность (функционирование). Данный параметр хорошо коррелирует с уменьшением помехоустойчивости и в силу этого, оценка отказов по данному параметру рассматриваться не будет.

3. Время задержки распространения сигнала. В качестве нормы для данного критерия может служить значение, при котором время задержки распространения сигнала увеличивается в 4 раза.

Основным элементом цифровых ИС является ключ-инвертор (вентиль). Практически любую ИС можно представить в виде цепочек однотипных инверторов. С точки зрения логики этот элемент представляет собой передающий вентиль, функционирующий как реле. Если на управляющем входе имеется сигнал, соответствующий 1, то выключатель замкнут и уровни левого и правого сигнала одинаковы. Если управляющий сигнал равен 0, то выключатель разомкнут. Именно процессы, происходящие в инверторе под действием радиации, определяют в основном стойкость элементов ИС. Поэтому в качестве объекта исследований был выбран ключ-инвертор. Следует отметить, что результаты экспериментальных исследований показали, что в первую очередь наблюдаются отказы ИС, связанные с током потребления, поэтому наибольшее внимание должно быть уделено определению значения токов утечки.

Расчетные значения характеристик библиотечных элементов

Расчетные соотношения для определения стойкости библиотечных элементов могут быть определены по каждому из вышеперечисленных критериев отказов. Соотношения для расчета используют ряд

коэффициентов, определение которых осуществлялось из результатов эксперимента по тестовым структурам ИС серии 1554.

Токи утечки. Определяется суммой токов теплового, терморегуляции и поверхностного тока утечки [2]. Тепловой ток заметного вклада в суммарный ток утечки не дает, поэтому не рассматривается и выражение для тока утечки следующее:

$$I_g = I_g(0) + q \cdot A_{pn} \cdot l_0 \cdot N_i \cdot Kt \cdot D + q \cdot A_s \cdot N_i \cdot S(D) + I_{so} + I_{sn}(1 - \exp(-bD)) \quad (1)$$

где $I_g(0)$ - ток начальной термогенерации; A_{pn} - площадь p-n перехода; A_s - площадь поверхности над обедненной областью p-n перехода; l_0 - длина канала; Kt - деградационный коэффициент времени жизни, который зависит от вида воздействия и дозовых характеристик; D - дозовая характеристика воздействия гамма-, рентгеновского, нейтронного, электронного и протонного излучений; I_{sn} - изменение поверхностного тока утечки до момента насыщения плотности поверхностных состояний; b - параметр аппроксимации; S - скорость поверхностной рекомбинации, которая может быть определена по формуле:

$$S = S_0 + S_{nac}(1 - \exp(-aD))$$

S_{nac} - изменение поверхностной рекомбинации до момента насыщения плотности поверхностных состояний; a - параметр аппроксимации; N_i - концентрация, аппроксимируется формулой:

$$N_i = \sqrt{1.5 \cdot 10^{23} T^3 \exp(-14028/T)}$$

Наибольшую неопределенность в токе утечки вносят такие характеристики Kt , a и b . Численная величина этих характеристик может быть получены из сравнения экспериментальных данных по аналогичным тестовым структурам. Результаты расчета дают значение $a = 1,24 \cdot 10^{-6}$ (1/Рад) и $b = 7,13 \cdot 10^{-5}$. Коэффициент Kt в общем случае имеет функциональную зависимость от мощности дозы. Однако для мощности воздействия от 10 до 500Р/с можно ограничиться константной приблизительно равной 10^{-5} .

Помехоустойчивость. Напряжение переключения определяется по формуле [2]:

$$U_{nep} = \frac{\sqrt{K_k} \cdot (U_{num} - U_{op}) + U_{on}}{1 + \sqrt{K_k}}, \quad (2)$$

где U_{op} , U_{on} – пороговые напряжения n-канального и p-канального транзисторов соответственно; K_k – отношение приведенной крутизны n-МОП транзистора к приведенной крутизне p-МОП транзистора.

Сдвиг порогового напряжения U_t при воздействии стационарного ИИ можно представить в виде суммы составляющих [4-6]:

$$\Delta U_t = \Delta U_{to} + \Delta U_{ot} + \Delta U_{it} + \Delta U_{ah} \quad (3)$$

где ΔU_{to} – вклад от подвижных дырок, ΔU_{ot} – сдвиг за счет захвата дырок, ΔU_{it} – сдвиг за счет роста поверхностных состояний и ΔU_{ah} – сдвиг за счет отжига дырок. Для p-МОП транзисторов все слагаемые имеют положительный знак, кроме ΔU_{ah} , для n-МОП транзистора знак, противоположный остальным слагаемым, имеют ΔU_{it} и ΔU_{ah} .

Выражение для U_t в общем случае имеет зависимость

$$U_t = F(q, q_0, D, d, e, f_e, K_1, K_2, T, t, T_a) \quad (4)$$

где q – заряд электрона; q_0 – скорость генерации; D – доза; d – толщина диэлектрика; ϵ – диэлектрическая проницаемость окисла; f_E – функция, определяющая, долю заряда, захваченного на различные уровни ловушек, которая зависит от концентрации примеси и сечения захвата дырок; K_1 – коэффициент, соответствующий максимальному сдвигу порогового напряжения за счет захвата заряда в окисле при поглощенной дозе, равной 1 рад; K_2 соответствует коэффициенту полного отжига дырок; K_3 – коэффициент, соответствующий максимальному сдвигу порогового напряжения за счет захвата заряда на поверхностные состояния при поглощенной дозе, равной 1 рад; T - температура; t -характерное время образования поверхностных состояний; T_a - типовое время отжига.

Результаты испытаний позволили определить все коэффициенты и недостающие зависимости. С этой целью решалась система из 5 уравнений с 5 неизвестными. Значения f_E – определялось соотношением $f_E = s N$; s – сечение захвата дырок; N - поверхностная плотность ловушек. Результаты представлены в таблице 1 и на рис 1.

Таблица 1. Значения параметров модели, полученные из экспериментальных данных.

Параметры модели	K1	K2	K3	Ta	t
значения констант	$3,0 \cdot 10^{-6}$	0,118	$9,23 \cdot 10^{-6}$	$5,3 \cdot 10^5$	34,0

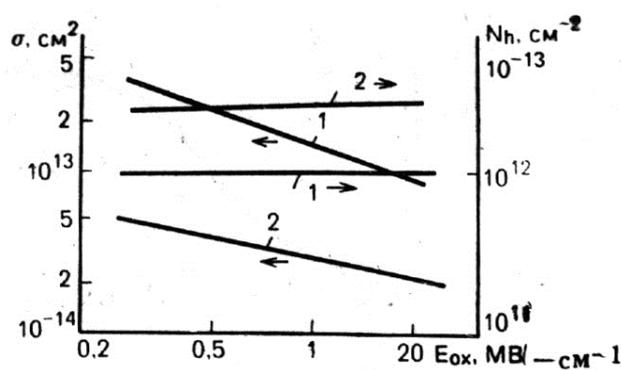


Рис. 1. Зависимость сечений захвата и концентраций дырочных ловушек первого (1) и второго (2) типов от напряженности электрического поля в окисле

Быстродействие. Быстродействие микросхем характеризуется средней задержкой распространения сигнала и определяется по формуле:

$$t = 0.5 \cdot (t^{10} + t^{01}) \quad (5)$$

где величины t^{01} и t^{10} определяются по формулам

$$t^{10} = C \cdot U_{num} \cdot \frac{1+h_n}{K_{on}(U_{num} - U_{on})^2} \quad t^{01} = C \cdot U_{num} \cdot \frac{1+h_p}{K_{op}(U_{num} - U_{op})^2} \quad (6)$$

где C – емкость на выходе инвертора, равная сумме емкостей нагрузки, межсоединений и выхода инвертора.

Результаты расчета

Для проведения расчета использовались Spice – параметры, параметры техпроцесса и структур КМОП СПК БМК10-БМК100. Значения характеристик радиационной среды определялись из [7]. Расчет проводился определением токов утечки, помехоустойчивости и времени задержки распространения сигнала для фактора СЗ, К1 и К3 по спектрально-энергетическим и амплитудно-временным характеристикам соответствующим моделирующим установкам. Пересчет к реальным характеристикам факторов космического пространства осуществлялся по методике [5,6].

Результаты расчета представлены на рисунках 2, 3, 4 и 5. На рис.2. приведены зависимости изменение значений порогового напряжения n-МОП транзистора и p-МОП транзистора от дозы, при напряжении питания 5В, для высокого и низкого уровня. На рисунке 3 - изменение тока утечки в зависимости от дозы. Изменение стойкости в зависимости от напряжения питания по значениям тока утечки представлено на рис. 4. Изменение задержки распространения сигнала приведено на рисунке 5.

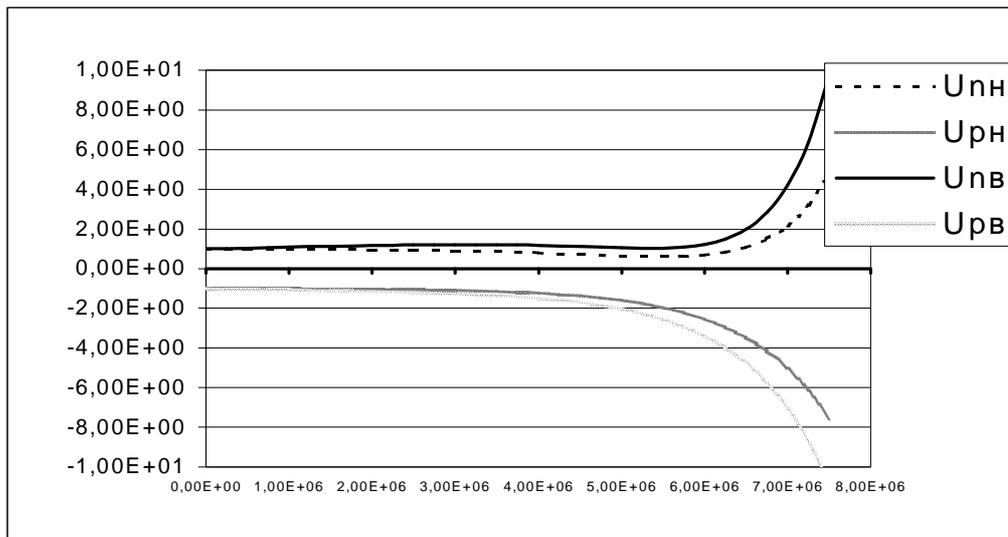


Рис.2. Изменение пороговых напряжений тестовой структуры от дозы (доза взята с коэффициентом 0.5). U_{thn} – n-МОП транзистор, низкий уровень; U_{thv} - n-МОП транзистор, высокий уровень; U_{thn} - p-МОП транзистор, низкий уровень; U_{thv} – p-МОП транзистор, высокий уровень.

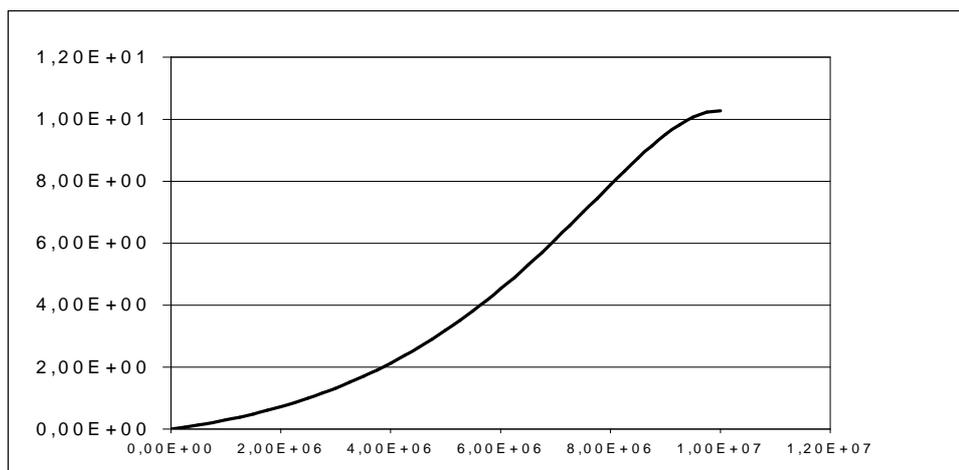


Рис.3. Изменение тока утечки от дозы (ток имеет множитель $0,5 \cdot 10^{-4}$ А).

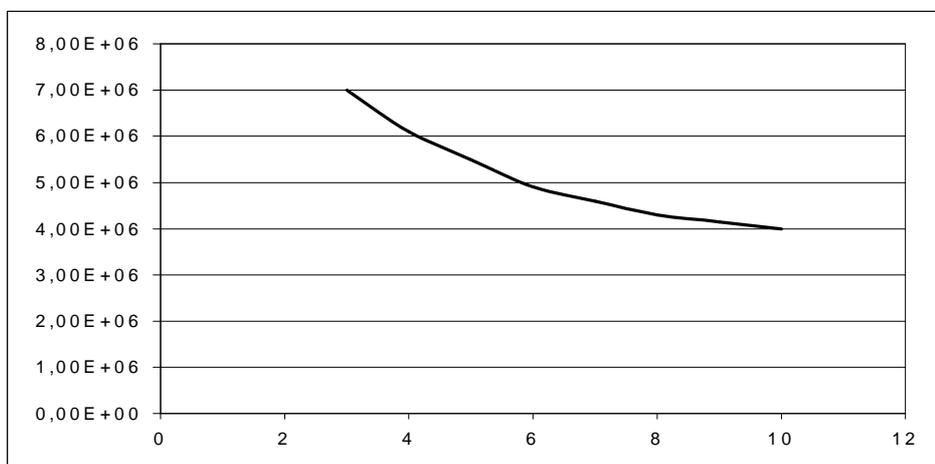


Рис.4. Изменение предельной дозы в зависимости от напряжения питания по току утечки ось X – напряжение питания (В), ось Y – доза в условных единицах (множитель0.5).

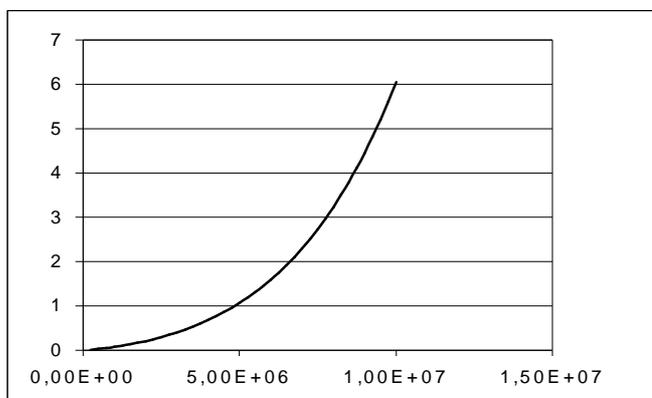


Рис. 6. Изменение задержки распространения сигнала (в относительных единица (t/to) – к начальному значению (доза взята с коэффициентом 0.5)

Представленные результаты получены для фактора С3, аналогично получают результаты по К1 и К3. Для этого использовались коэффициенты эквивалентности пересчета, полученные в [6]. Результирующие значения приведены в таблице 2.

Таблица 2. Значения предельных уровней дозы по факторам С3, К1, К3

Фактор	значение уровня дозы (в единицах уровня 2У)	
	минимальное значение	максимальное значение
С3	4	7
К1	3	9
К3	3	8

Анализ результатов расчета и выводы.

Наибольшей чувствительностью на микроуровне к воздействию статических видов радиации обладает ток утечки. Стойкость элементов зависит от электрического режима эксплуатации. Для тока утечки увеличение напряжения питания приводит к уменьшению стойкости изделия.

Среди видов воздействия С3, К1 и К3 наибольшее изменение электропараметров наблюдается от воздействия факторов К1 и К3.

Проведенный расчет позволяет оценить стойкость компонентов для данной технологии по фактору С3 – $4 \cdot 2У$, К1- $3 \cdot 2У$.

Литература

1. Зольников, В.К. Разработка схмотехнического и конструктивно-технологического базиса ЭКБ / В.К.Зольников, А.А.Стойнов // Моделирование систем и процессов. 2011. № 1-2. С. 28-30.
2. Чибисов, Д.Е. Воздействие ионизирующего излучения на интегральные микросхемы. / Д.Е.Чибисов, В.К.Зольников // Моделирование систем и процессов. 2010. № 3-4. С. 60-67.
3. Зольников, В.К. Модель расчета накопленного заряда для учета радиационных эффектов в САПР ИЭТ / В.К.Зольников, А.П. Затворницкий // Моделирование систем и процессов. 2009. № 1-2. С. 16-22.
4. Потапов, И.П. Средства автоматизации проектирования радиационно-стойкой элементной базы / И.П. Потапов, А.В.Ачкасов, В.К.Зольников // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2006. № 1-2. С. 147-148.
5. Зольников, В.К. Модель накопления заряда в диэлектрике паразитного транзистора КМОП структуры / В.К.Зольников // Информационные технологии моделирования и управления. 2009. № 1 (53). С. 63-67.
6. Методы прогнозирования и оценки стойкости и надежности изделий электронной техники в условиях длительного НИ: Методическое руководство / Баюков А.В., Хаустов В.В., Агаханян Т.М., Малышев М.М., Зольников В.К. // РНИИ "Электронстандарт"; С-Пб, 1995. 453 с.
7. В.К.Зольников Типовая методика испытаний и оценки стойкости биполярных ИМС к воздействию факторов И1,И2,И4,И5,С3,К1,К3 с учетом комплексного характера воздействия и импульса напряжения обусловленного факторами И8-И11.– НИИЭТ, 1997г. – 107с.