

УДК 539.12.04+678.01

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ-КРИТЕРИЕВ ГОДНОСТИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ**

Чевычелов Юрий Акимович

д.т.н., профессор

*Воронежская государственная лесотехническая академия, Воронеж, Россия*

UDC 539.12.04+678.01

**SIMULATION OF CHANGES PARAMETERS –CRITERIA FOR VALIDITY UNDER THE INFLUENCE OF RADIATION OF LOWER POWER**

Tchevytchelov Yury Akymovyтч

Dr.Sci.Tech., professor

*Voronezh State Forest Technical Academy, Voronezh, Russia*

Представлены результаты работы авторов по моделированию изменения электропараметров ИС, при воздействии статических видов ИИ, полученные в экспериментальных и теоретических исследованиях. Разработаны физические и математические модели и программное обеспечение для расчета параметрической надежности биполярных ИМС, учитывающие температуру окружающей среды и режим эксплуатации изделий

In the article, we present the results of the simulation changes of electrical parameters of IC under the influence of static radiation, which obtained in theoretical and experimental studies. We developed physical and mathematical models and software for calculating parametric reliability by polar IC, which takes into account the temperature of environment and mode of the products

Ключевые слова: МОДЕЛИРОВАНИЕ, ПАРАМЕТР, ИНТЕГРАЛЬНАЯ СХЕМА, НАДЕЖНОСТЬ, ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА, МОДЕЛЬ

Keywords: SIMULATION, PARAMETER, IC, RELIABILITY, ENVIRONMENT, MODEL

При эксплуатации ИС в космических летательных аппаратах на них воздействуют следующие внешние факторы: длительное низкоинтенсивное радиационное воздействие, различные температурные и электрические режимы. Специфичность этих процессов обусловлена не только радиационными воздействиями, но и естественным старением, возникающим в том случае, если мощность воздействия мала, т.е. возрастает длительность воздействия. Такое совместное воздействие радиации и естественного старения изменяет надежность изделий и, что особенно важно, влияние температуры и электрического режима на скорость деградации электропараметров не аддитивно. Важность прогнозирования поведения ИС в этих условиях определяется не столько даже стоимостью испытаний, сколько их продолжительностью. Достаточно сказать, что продолжительность испытаний для определения надежности при мощности воздействия 1Р/с для некоторых ИС составляет более 30 лет. И поэтому единственной возможностью оценки работоспособности ИС является прогнозирование его на ЭВМ.

При исследовании надежности полупроводниковых ИМС используются следующие показатели: вероятность безотказной работы  $R(t)$ , интенсивность отказов ( $t$ ), среднее время наработки до отказа ( $T$ ), гамма-процентный ресурс и т.п. В значение этих показателей вносят вклад внезапные и постепенные (дрейфовые) отказы. Внезапные отказы зависят от множества случайных факторов - производственно-технологических и эксплуатационных. Причины появления внезапных отказов трудно формализовать и оценить посредством какой-то математической модели. Поэтому целесообразно рассмотреть только постепенные дрейфовые отказы или оценить параметрическую надежность. Изменение надежности изделий, обусловленное действием этого фактора, проявляется преимущественно в дрейфе характеристик и постепенных отказах приборов. Критерием отказа является выход электропараметра за норму ТУ.

Таким образом, областью определения данной модели является параметрическая надежность.

В общих чертах физическая картина деградационного процесса сводится к следующему [1]. Рассматривается область приборной структуры, содержащая выход эмиттерного  $p$ - $n$ -перехода к поверхности кремния и толстый полевой оксид кремния над ним. В результате воздействия статического излучения малой мощности в оксиде генерируются электронно-дырочные пары, которые мигрируют в  $SiO_2$  под действием градиента концентрации и электрического поля. Электроны, имея гораздо большую подвижность, чем дырки, быстро покидают оксид, а дырки захватываются ловушками, образуя таким образом радиационно-индуцированный заряд. Накапливаемый в оксиде заряд, в свою очередь, вызывает увеличение поверхностного потенциала в месте выхода  $p$ - $n$ -перехода к поверхности кремния, увеличение скорости поверхностной рекомбинации и, как следствие этого, увеличение поверхностных рекомбинационных потерь носителей заряда в  $p$ - $n$ -переходе и снижение коэффициента усиления транзистора.

Специфика воздействия статического излучения низкой мощности заключается в том, что характеристическое время термического освобождения захваченных дырок с ловушек соизмеримо со временем облучения в диапазоне мощностей дозы  $P = (0.01-100) P/c$ . Поэтому в этом диапазоне вышеуказанные параметры будут зависеть от мощности дозы [1,2]. Электрический режим в процессе облучения влияет на миграцию электронов и дырок, кинетику захвата дырок ловушками, что, в конечном итоге, сказывается на деградации электропараметров. Деградация поверхностных зарядовых свойств в месте выхода р-п-переходов к границе раздела полупроводник - диэлектрик в конечном итоге влияет на свойства биполярных транзисторных структур, вызывая нежелательные эффекты [1,2]:

1) возрастание токов утечки, приводящих к отсутствию насыщения обратного тока обратносмещенных р-п-переходов; смягчение обратных ВАХ р-п-переходов, снижение и нестабильность обратного пробивного напряжения на коллекторе;

2) шунтирование эмиттера с коллектором, приводящее к прямым утечкам коллектор-эмиттер, большому статическому коэффициенту усиления по току при малом коэффициенте усиления по переменной составляющей;

3) уменьшение эффективности эмиттера из-за омического шунтирования эмиттера с базой или значительного увеличения рекомбинационных потерь, что приводит к снижению нормального коэффициента усиления по току при малых плотностях тока инжекции.

Специфика воздействия длительного низкоинтенсивного ионизирующего излучения (ДНИИ) приводит к тому, что отмеченные деградационные эффекты под действием радиации складываются (не обязательно аддитивно) с деградационными процессами, обусловленными естественным старением в процессе эксплуатации изделий. При малых интенсивностях ИИ диффузионные процессы и радиационное дефектообразование стано-

вятся процессами, ускоряющими друг друга и усиливающими деградацию электропараметров изделия в целом. Эти закономерности определяются эффектом мощности дозы, связанным с образованием и миграцией заряда в диэлектрике транзисторных структур.

В наиболее упрощенном виде модельное представление воздействия ДНИИ на надежность характеристики ИМС должно содержать в деграционной части параметра критерия годности (ПКГ) три слагаемых: изменение ПКГ под действием естественного старения, изменение ПКГ под действием радиационной деградации и изменение ПКГ под действием неаддитивности этих процессов [3].

Причем, каждое из слагаемых должно иметь коэффициент (сомножитель), учитывающий влияние электрического режима и температуры окружающей среды. Ввиду того, что показатели надежности ИМС носят вероятностный характер, желательно в качестве электропараметра-критерия годности иметь электропараметр, плавно изменяющий свое среднее значение и дисперсию в зависимости от времени наработки и условий среды, а также, чтобы изменение электропараметра в результате деградационных процессов было соизмеримо с его абсолютным значением. В таком случае расчет показателей надежности ИМС может быть произведен с удовлетворительным доверительным интервалом при коэффициенте доверия 0,95.

Исходя из вышеперечисленных требований и предварительных результатов эксперимента в качестве параметра-критерия годности были выбраны максимальный выходной ток низкого уровня и выходное напряжение высокого уровня и строилась математическая модель аппроксимационного характера [4].

Метод моделирования основывается на результатах, полученных на НПО «Электроника» за более чем 20 лет работы.

Сущность его заключается в том, что строится уравнение, описыва-

ющее изменение среднего значения ПКГ (с учетом среднеквадратичного отклонения) от времени (причем в это уравнение неявно входит доза воздействия). Среднеквадратическое отклонение, характеризующее разброс электропараметров и предназначенное для вероятностного расчета показателей надежности, вычисляется стандартным образом. Таким образом, кроме средних значений параметров аппроксимации модели, рассчитываются среднеквадратические отклонения параметров аппроксимации, по которым и оценивается параметрический ресурс изделия по гамма-процентной доверительной границе.

Изменение ПКГ определяется по предложенной нами формуле [5].

$$Y = Y_o + Y_{об} \cdot K_{MO} + Y_{ст} \cdot K_Y + K_V \cdot Y_{об} \cdot Y_{ст} \cdot K_{MO} \cdot K_Y, \quad (1)$$

где  $Y$  - общее изменение электропараметра;  $Y_o$  - начальное значение параметра;  $Y_{ст}$  - изменение электропараметра вследствие старения;  $Y_{об}$  - изменение электропараметра вследствие облучения;  $K_{MO}$  - коэффициент, учитывающий изменения деградации от облучения вследствие различной мощности воздействия и температуры среды;  $K_Y$  - коэффициент, учитывающий изменения деградации от старения вследствие различного электрического режима и температуры;  $K_V$  - коэффициент, учитывающий взаимное влияние процессов старения и "облучения".

Коэффициент влияния температуры и электрического режима равен

$$K_Y = K_T \cdot K_{э} \quad (2)$$

где  $K_T$  – коэффициент влияния температуры;  $K_{э}$  – коэффициент влияния электрического режима.

Коэффициент влияния температуры определяется из соотношения

$$K_T = \exp \left[ \frac{E_a}{k} \cdot \left( \frac{1}{T_{ПЕР0} + 273} - \frac{1}{T_{ПЕРФ} + 273} \right) \right], \quad (3)$$

где  $E_a$  – энергия активации;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T_{ПЕР0}$ ,  $T_{ПЕРФ}$  - температура кристалла (перехода) в нормальном и форсированном

режимах соответственно.

Значение  $Ea$  определяется по формуле

$$Ea = \sum_{i=1}^{N1} q_i \cdot Ea_i \quad (4)$$

где  $N1$  - число механизмов отказа;  $q_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го механизма отказа;  $Ea_i$  - значение энергии активации для  $i$ -го механизма отказа.

Значения энергии активации для отдельных механизмов отказов ( $Ea_i$ ) определяют экспериментально в соответствии с РД II 0755-90 одним из следующих методов:

на основе параллельных испытаний выборок в различных режимах (метод 2--1);

по накопленным данным (метод 2-2);

по результатам испытаний со ступенчато возрастающей нагрузкой (метод 2-3);

по результатам электротермотренировки (ЭТТ) при ступенчато возрастающей нагрузке (метод 2-4);

Перечисленные методы изложены в приложениях 2-5 РД II 0755-90.

При недостаточном объеме данных для определения  $q_i$  общий коэффициент рассчитывают по формуле:

$$K_T = 0,9 \exp \left[ \frac{E_{амин}}{k} \cdot \left( \frac{1}{T_{ПЕР0} + 273} - \frac{1}{T_{ПРЕФ} + 273} \right) \right] + 0,1 \exp \left[ \frac{E_{амак}}{k} \cdot \left( \frac{1}{T_{ПЕР0} + 273} - \frac{1}{T_{ПРЕФ} + 273} \right) \right], \quad (5)$$

где  $E_{амин}$  и  $E_{амак}$  - соответственно минимальное и максимальное значения энергии активации из диапазона наименьших значений для основных механизмов отказов.

Значение  $T_{ПЕР0}$ ,  $T_{ПРЕФ}$  рассчитывают по формуле

$$T_{ПЕР} = T_{ОКРСП} + R_{ПЕР-ОКРСП} \cdot P, \quad (6)$$

где  $T_{ПЕР}$  – температура перехода;  $T_{ОКРСР}$  – температура окружающей среды;  $R_{ПЕР-ОКРСР}$  – тепловое сопротивление переход – окружающая среда;  $P$  – мощность, которая определяется произведением тока питания на напряжения питания.

Коэффициент влияния электрического режима определяется из соотношения:

$$K_{\text{Э}} = K_{\text{Эт}} K_{\text{Энап}}, \quad (7)$$

где  $K_{\text{Эт}}$  - коэффициент, зависящий от токовой составляющей.  $K_{\text{Энап}}$  - коэффициент, зависящий от составляющей напряжения.

При воздействии на ИС форсированным током коэффициент равен:

$$K_{\text{Эт}} = \left( \frac{J_{\Phi}}{J_{\text{ном}}} \right)^n \quad (8)$$

При форсированном напряжении питания коэффициент равен:

$$K_{\text{Энап}} = \exp \left[ A \cdot \left( \frac{U_{\text{СС}\Phi}}{U_{\text{ССном}}} \right) \right], \quad (9)$$

где  $J_{\Phi}$  – величина тока потребления при эксплуатации ИС в форсированном режиме;  $J_{\text{ном}}$  – величина тока потребления ИС, в соответствии с режимами ТУ;  $U_{\text{СС}\Phi}$  - величина напряжения питания при эксплуатации ИС в форсированном режиме;  $U_{\text{ССном}}$  - величина напряжения питания ИС, в соответствии с режимами ТУ;  $A, n$  – коэффициенты аппроксимации.

Коэффициенты аппроксимации определяются из РД П 0755-90.

В случае отсутствия данных по изменению среднеквадратичного отклонения ПКГ со временем ее величина принимается равной

$$\sigma = \sigma_{\text{нач}} K_{\text{нр}}, \quad (10)$$

где  $\sigma_{\text{нач}}$  – начальное значение среднеквадратичного отклонения;  $K_{\text{нр}}$  – коэффициент определяемый видом приемки.

Коэффициент влияния температуры и малой мощности представляется в виде

$$K_{MO} = K_M \cdot K_O \quad (11)$$

где  $K_O$  – коэффициент влияния температуры;  $K_M$  – коэффициент влияния малой мощности.

Коэффициент влияния температуры определяется из соотношения

$$K_O = C \cdot (1 - \exp(-\frac{t}{\tau})) \quad (12)$$

где  $t$  – время;  $\tau$  – постоянная отжига;  $C$  – параметр аппроксимации.

Значение  $\tau$  определяется по формуле:

$$t = t_0 \cdot (1 + A \cdot \exp(-B \cdot N \cdot T / D)) \quad (13)$$

где  $T$  – температура среды;  $N$  – кратность воздействия температуры;  $t_0$ ,  $A$ ,  $B$  – коэффициенты аппроксимации.

Коэффициент влияния малой мощности определяются для каждой ИС экспериментально. В случае невозможности провести испытания, определение осуществляется по формуле для наихудшего случая

- в пределах мощности от 0.05 до 1P/c:

$$K_M = 1 + \frac{0,1}{M} \quad (13)$$

где  $M$  – мощность;

- в пределах мощности от 0.05 до 0.01P/c:

$$K_M = 2 + \frac{0,05}{M} \quad (14)$$

Среднеквадратические отклонения параметров, входящих в математические модели параметров—критериев годности, рассчитываются по результатам испытаний и описываются известной формулой

$$s_i^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (X_{ji} - X_{j-p})^2 \quad (15)$$

где  $X_{jcp}$  — среднее значение параметров аппроксимации,  $j$  характеризует вид параметра аппроксимации модели;  $X_{ji}$  — значение параметра аппроксимации, для которого расчетная точка модели совпадает с экспе-



риментальной для каждой ИМС.

Для разработки данного метода и определения коэффициентов аппроксимации были проведены как теоретические (анализ литературных данных), так и экспериментальные исследования. Экспериментальные исследования проводились на ИС серии 530 с тестовыми структурами, а также на ИМС серий 134, 106, 1838, 1804. Кроме того, для определения деградации электропараметров от естественного старения использованы результаты, полученные на НПО "Электроника" в течение более 20 лет работы, более чем по 200 типономиналам ИМС различного конструктивно-технологического исполнения.

Проведенные исследования позволили в качестве ПКГ взять следующие параметры:

- $U_{OL}$  — выходное напряжение логического нуля;
- $I_{OL}$  — максимальный ток нагрузки по выходу в состоянии логического нуля.

В качестве надежных показателей ИМС используются: средний ресурс, когда определяется временная точка пересечения среднего значения электропараметра с нормой ТУ, и гамма-процентный ресурс, когда определяется временная точка достижения гамма-процентной доверительной границы электропараметра (параметра—критерия годности) нормы ТУ.

На основе представленной модели, разработаны алгоритм расчета, методика и программный комплекс расчета показателей стойкости и надежности ИМС, эксплуатируемых в активном и пассивном режимах в полях гамма-излучения малой мощности при нормальной и повышенной температуре окружающей среды.

### Литература

1. Зольников, В.К. Разработка схемотехнического и конструктивно-технологического базиса ЭКБ / В.К.Зольников, А.А.Стоянов // 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. Зольников В.К. Оценка показателей стойкости и надежности биполярных ИМС, работающих в полях гамма-излучения малой мощности. // Проблемы обеспечения надежности и качества приборов, устройств и систем: Тез. докл. науч.-техн. конф. - Воронеж. - 1998. - С.47.
5. Моделирование и расчет параметров радиационно-стойких ИМС/ Телец А.В., Малилин В.Г., Малышев М.М., Зольников В.К., Нисков В.Я.// Радиационная стойкость электронных систем: Науч.-тех. сборник. - М.: СПЭЛС-НИИП. - 1998. - С.23.