

УДК 629.78.05

UDC 629.78.05

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ
ЭФФЕКТОВ В САПР
МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ****MODELING OF RADIATING EFFECTS IN CAD
OF MICROELECTRONICS**

Ачкасов Владимир Николаевич
д.т.н., доцент
*ФГУП "Научно-исследовательский институт
электронной техники", Воронеж, Россия*

Achkasov Vladimir Nicolaevich
Dr.Sci.Tech., associate professor
*Scientific research institute of electronic engineering,
Voronezh, Russia*

Представлены методы моделирования радиационных эффектов микросхем в микросхемах. Рассмотрена методика проектирования, информационное и лингвистическое обеспечение. Предложены методы оценки стойкости к переходным эффектам

The methods of modeling of radiating effects of microcircuits in microcircuits are submitted. The technique of designing, information and lingware is considered. The methods of an estimation of stability to transitive effects are offered

Ключевые слова: САПР, МИКРОЭЛЕКТРОНИКА, РАДИАЦИЯ

Keywords: CAD, MICROELECTRONICS, RADIATION

Основными задачами при проектировании изделий микроэлектроники для нового поколения управляющих вычислительных комплексов являются: определение требований к элементной базе по функциональным возможностям и уровню стойкости и надежности, которые в ряде случаев являются достижением определенного компромисса между функциональными возможностями и обеспечением требуемого уровня стойкости; выбор оптимальной структуры типовых логических элементов изделия за счет применения алгоритма минимизации покрытия логических функций, анализа на тестопригодность, синтеза логической схемы, предварительной логической верификации, преобразования логического базиса в схемотехнический, моделирование статических и динамических характеристик типовых логических элементов КМОП БИС с учетом радиационных воздействий, логическая верификация и моделирование неисправностей базовых функциональных блоков с учетом реальных характеристик типовых логических элементов, генерация тестов, анализ дефектов и верификации топологии.

Решение поставленных задач обеспечивается предложенной методикой автоматизации проектирования КМОП СБИС двойного назначения, отличающаяся формированием требований к элементной базе на ранней стадии проектирования с учетом радиационной стойкости, моделированием радиационных эффектов на схемотехническом и функционально-логическом уровнях в зависимости от конструктивно-технологических особенностей изготовления и требований КГС «Климат-7». Данная методика позволяет оценить работоспособность изделия от комплекса внешних факторов: импульсных (рентгеновского, гамма, нейтронного излучения) и статических (гамма, нейтронного, протонного и электронного излучений) как по отдельным видам излучения так и при комплексном воздействии, которое может осуществляться в разные временные промежутки, что соответствует реальным условиям. Предложенная методика проектирования КМОП БИС двойного применения.

Был проведен анализ возможностей наиболее популярных отечественных и зарубежных автоматизированных рабочих мест, средств автоматизации проектирования и определены требования, которым должно удовлетворять современное лингвистическое обеспечение. В основу их разработки положен предложенный структурно-модульный принцип описания схем на всех уровнях иерархического процесса проектирования. Предложен входной язык описания модулей типовых элементов, на всех уровнях проектирования. В понятие модуля входит как сам модуль, который выполняет определенные функции, так и процедуры проектирования. Он строится по иерархическому принципу. Головной модуль содержит ссылки на основные подчиненные ему модули. Модуль многоуровневого описания обеспечивает представление типового элемента на основе более простых конструктивных элементов как на одном уровне иерархии проектирования, так и при прямом и обратном переходе с уровня на уровень. Таким образом, он является связующим звеном иерархического процесса проектиро-

вания, обеспечивающим возможность реализации принципа непрерывности.

Кроме того, модуль содержит описание его геометрической модели; многоуровневого представления; описания поведенческих, функционально-логических и электрофизических характеристик (в том числе и с учетом радиационных воздействий), топологии, символьного представления геометрической модели. Библиотека модулей может расширяться.

Для входного языка используется буквы алфавита и набора ключевых командных слов, которые делятся на две группы - для описания начала и конца записей и имен атрибутов остальных записей. Основной структурной единицей языка описания модулей служит запись. Тело записи заключается между ключевыми словами начала и конца и состоит из набора атрибутов, их значений.

```
<КЛЮЧЕВОЕ СЛОВО 1 >: :=<ИМЯ ТИПА/<КОМАНДНОЕ СЛОВО>  
<ИМЯ ТИПА>: := MODUL/DELAY/PARAM/LGRAF/INP/  
OUT/SUB_MOD/ATR/D_INP/G_INP/G_OUT  
<КОМАНДНОЕ СЛОВО>::=END/REPEAT/END_FILE
```

где MODUL, DELAY, DIP, PARAM, LGRAF, INP, OUT, D_INP, G_INP, G_OUT, ATR, SUB_MOD - имена типов записи логического модуля, задержек, электрических параметров, изображение логического элемента, входа и выходов логического элемента, выводов изображения элемента, входов и выходов изображения логического элемента, произвольных атрибутов, подмодулей логического модуля соответственно;

END, END_FILE - признаки конца записи и файла;

REPERAT - оператор повторения.

Во вторую группу ключевых слов входят имена атрибутов основных записей.

В лингвистические средства также входит разработанный язык описания входных воздействий (определенные значения напряжений и токов) и задания на проектирования.

Эффективность языка обеспечивалась за счет возможностей как символического, так и графических способов описания, использования сокращенных и командных форм описания и автоматического формирования наиболее объемных данных, рациональных процедур манипулирования данными.

Исходя из общей концепции построения информационных сред САПР, типа решаемых задач обоснованы требования к информационному обеспечению подсистемы.

В соответствии со сформулированными требованиями разработана система единой подготовки исходной информации, использующая особенности предложенного языка структурно-модульного описания схем как текстовых, так и графических данных, которые дополнены графосимволическим языком описания структур.

Для построения информационного обеспечения системы предложено использовать два типа внутренних структур – списочная с указателями и ассоциативная кольцевая. Предложена модификация кольцевой структуры обеспечения двунаправленного поиска, которая заключается в том, что первый элемент списка в кольцевой структуре имеет метку головного элемента, содержащего общие данные для всех элементов списка и каждый элемент списка включает в себя одну или несколько связей "вперед/назад". Элементы списка могут являться головными для списка элементов другого типа. Это обеспечивается включением в элемент метки связи как к подчиняющим, так и подчиненным элементам структуры данных. Подобная организация массивов, содержащих координаты элементов изображения позволяет выполнять выборку и вставку элементов изображения в произвольном порядке с достаточно малым временем поиска. Кроме того, при вводе

графической информации, учитывая процедуру последующего документирования, при формировании рисунка в массивы заносятся специальные метки, позволяющие выполнять декомпозицию рисунка по страницам.

На основе предложенной модификации кольцевой структуры и структуры с последовательным размещением элементов проведена сравнительная оценка их эффективности по времени выборки данных. Использование модификации ассоциативной кольцевой структуры данных дает преимущества по основному критерию эффективности времени выборки данных, хотя и требует при этом больших затрат памяти.

Опираясь на опыт построения технических средств в организациях и сформулированных целевых задач, обоснована архитектура технических средств. Она представляет собой сетевую трехзвенную систему, построенную по модели клиент - сервер приложений - сервер данных. Реализация автоматизированных рабочих мест быть проведена на основе рабочих станций, X-терминалов или ПЭВМ с большим объемом внешней и оперативной памяти.

Все технические средства объединены в локальную вычислительную сеть. Взаимодействие компьютеров осуществляется по прямым физическим магистралям с использованием сети Ethernet.

Необходимыми условиями эффективной работы средств проектирования являются надежность и быстродействие программного обеспечения. Поэтому используемый сервер приложений дает значительные преимущества. Он уменьшает нагрузку и обеспечивает эффективную работу до 5 клиентов и позволяет значительно увеличить количество клиентов, работающих с одинаковым массивом данных.

Возможность масштабирования вычислительной мощности системы достигается за счет так называемой «сегментации» рабочих мест, иными словами, за счет распределения нагрузки между несколькими компьютерами — серверами приложений. Такое решение существенно повышает

производительность и отказоустойчивость системы в условиях многопользовательской работы.

Предложена структура проблемно-ориентированной прикладной программной платформы, которая включает следующие программные блоки: управляющий, лингвистический, диалоговой обработки, графический редактор, схемотехнического моделирования, расчета параметров типовых элементов при радиационном воздействии, расчета температуры, вычисления механических напряжений, анализа тестопригодности, функционально-логического моделирования, генерации тестов, анализа дефектов.

Основным механизмом проектирования микросхем стойких к радиации является алгоритм оценки стойкости. Он заключается в следующем: вначале, исходя из требований к аппаратуре, определяется внешняя радиационная обстановка, при которой необходимо обеспечить работоспособность изделия. Затем она рассматривается как совокупность видов ионизирующего излучения со своими амплитудно-временными и спектрально-энергетическими характеристиками. Следующим этапом является моделирование тепловых, термомеханических, ионизационных и структурных эффектов. Степень их проявления и взаимодействия между собой определяется исходя из комплекса внешних факторов. Результатом моделирования является определение численного значения максимальных уровней различных видов ионизирующего излучения (в зависимости от требования технического задания), при котором изделие остается работоспособным. При этом определяются все характеристики, входящие в понятие стойкости: максимальный предельный уровень воздействия, при котором все параметры изделия находятся в пределах норм технического задания, уровень бессбойной работы, время потери работоспособности, уровень возникновения тирристорного эффекта (если он возможен), уровень катастрофического отказа. Такая оценка стойкости вначале производится расчетными и расчетно-экспериментальными методами. На ранних этапах

разработки могут быть использованы упрощенные методы, а на более поздних более точные решения. На основании этих методов определяются показатели стойкости элементной базы, как в вероятностной форме, так и в виде уровней воздействующих ионизирующих излучений. Окончательная оценка стойкости определяется на завершающем этапе при проведении испытаний полученных готовых изделий.

Предложены математические модели переходных радиационных процессов в типовых элементах микросхем при воздействии импульсного ионизирующего излучения.

Вначале рассчитывается мощность дозы ионизирующего излучения, которая в общем случае может быть определена по предложенной формуле:

$$\begin{aligned}
 P_h = & \int_{t_{\min h}}^{t_{\max h}} \frac{\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \mu_{km}(E) \cdot E \cdot n(E) \cdot e^{-\mu(E)h} dE}{t_{\text{имп}}} f_h(t) dt + \\
 & + \int_{t_{\min \gamma}}^{t_{\max \gamma}} P_{\max \gamma} \cdot f(t) \cdot dt + \\
 & + \int_{t_{\min n}}^{t_{\max n}} 1.13 \cdot \int_{E_{\text{нижн}}}^{E_{\text{верх}}} W_E(E) \cdot f_{np}(E, t) \cdot f_n(E) dE dt
 \end{aligned} \tag{1}$$

В данном выражении времена t_{\min} и t_{\max} относятся к рентгеновскому, гамма- и нейтронному излучению. Так $t_{\min h}$ – время, когда начинается действие рентгеновского излучения, $t_{\max h}$ – время окончания действия рентгеновского излучения; $t_{\min \gamma}$ – время, когда начинается действие гамма-излучения, $t_{\max \gamma}$ – время окончания действия гамма-излучения; $t_{\min n}$ – время, когда начинается действие нейтронного излучения, $t_{\max n}$ – время окончания действия нейтронного излучения.

Для прогнозирования величины тока ионизации предложены математические модели, учитывающие спектрально-энергетические и ампли-

трудно-временные характеристики импульса, технологические особенности изготовления и температурный режим.

Для одиночного прямоугольного импульса ионизирующего излучения с учетом периферийных областей ионизационный ток $p-n$ перехода можно записать в следующем виде:

$$I_{ipn}(t) = q \cdot g_0 \cdot P(t) \cdot S_{pn} \cdot \left[w_{pn} + L_p \cdot \operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{t}{\tau_p}}\right) + L_n \cdot \operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{t}{\tau_n}}\right) \right] + I'_{ipn} \quad (2)$$

где I'_{ipn} - составляющая ионизационного тока от периферийных областей $p-n$ перехода, определяющаяся выражением:

$$I'_{ipn}(t) = q \cdot g_0 \cdot P(t) \cdot S'_{pn} \cdot \left[w_{pn} + L'_{n(p)} \cdot \left(1 - e^{-\frac{3 \cdot t \cdot L_n^2(p)}{\tau_{n(p)} \cdot w_{n(p)}^2}}\right) \right] \quad (3)$$

При условии малых размеров периферийных областей, ионизационный ток периферийной области зависит от диффузионной длины неосновных носителей заряда с внешней стороны перехода и будет выглядеть следующим образом [1]. $\lambda(t) = \lambda_0 \left(1 - e^{(-t/\tau_{i\lambda})}\right)$ где $\tau_{i\lambda}$ - при уменьшении толщины области полупроводника будет равняться $\frac{\tau \cdot w_i^2}{3 \cdot L_i^2}$.

Выражение для зависимости ионизационного тока от температуры примет следующий вид:

$$I_{ipn}(t, T) = q \cdot g(T) \cdot P(t) \cdot S(T) \cdot \left[L_p(T) \cdot \operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{t}{\tau_p(T)}}\right) + w_{pn}(T) + L_n(T) \cdot \operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{t}{\tau_n(T)}}\right) \right] + I'_{ipn}(t, T), \quad (4)$$

где составляющая ионизационного тока, учитывающая уменьшение размеров активных областей элементов, будет выглядеть:

$$I'_{ipn}(t, T) = q \cdot g_0(T) \cdot P(t) \cdot S'_{pn}(T) \cdot \left[w_{pn}(T) + L'_{n(p)}(T) \cdot \left(1 - e^{-\frac{3 \cdot t \cdot L_{n(p)}^2(T)}{\tau_{n(p)}(T) \cdot w_{n(p)}^2(T)}} \right) \right] \quad (5)$$

Величина ионизационного тока в зависимости от мощности дозы для реального импульса ИИ может быть получена путем разложения сложной формы импульса излучения на суперпозицию N прямоугольных импульсов.

Для каждого i-го прямоугольного импульса вычисляется функция изменения ионизационного тока I_{ipn} во времени. Суммарный ионизационный ток равен

$$I_{pn}(t) = \sum_{i=1}^N I_{ipn}(t) \cdot \delta(t - t_i) \quad (6)$$

где - $\delta(t-t_i)$ – дельта-функция; t_i – шаг разбиения реального импульса на совокупность прямоугольных импульсов; t – длительность импульса по времени.

Выражения для токов ионизации подставляются в виде генераторов токов в средства схемотехнического моделирования; при этом импульс генератора тока задается с применением экспоненциальной функции EXP ($y_1, y_2, t_d, t_{cr}, t_r, t_{fr}$) и описывается выражением:

$$y(t) = \begin{cases} y_1 & \text{при } 0 < t < t_d; \\ y_1 + (y_2 - y_1) \left[1 - \exp\left[-(t - t_d)/t_{cr}\right] \right] & \text{при } t_d < t < t_r; \\ y_1 + (y_2 - y_1) \left[\begin{matrix} 1 - \exp\left[-(t - t_d)/t_{cr}\right] \\ -1 + \exp\left[-(t - t_r)/t_{fr}\right] \end{matrix} \right] & \text{при } t_r < t < TSTOP. \end{cases} \quad (7)$$

Для проектирования СБИС с малыми проектными нормами предложено использовать короткоканальную модель, которая по сравнению с ра-

нее существующими моделями позволяет учитывать следующие особенности: зависимость подвижности носителей от вертикального поля; распределение заряда обедненной области между стоком и истоком; неоднородность легирования для транзисторов, изготовленных с применением ионной имплантации; модуляция длины канала; зависимость всех параметров от геометрии транзистора.

В режиме сильной инверсии пороговое напряжение определяется

$$V_{to} = V_{FB} + \text{PHI} + K1\sqrt{\text{PHI} - V_{bs}} - K2(\text{PHI} - V_{bs}) - h \cdot V_{ds} \quad (8)$$

Параметры $K1$, $K2$ моделируют неоднородность легирования, где $K1$ подобен параметру GAMMA в модели первого уровня, V_{FB} частично моделирует уменьшение длины канала.

Ток стока в режиме сильной инверсии определяется соотношениями:

$$\text{В режиме отсечки } (V_{gs} \leq V_{to}) \cdot I_{\text{drainS}} = 0$$

$$\text{В линейном режиме } (V_{gs} > V_{to} \text{ и } 0 < V_{ds} < V_{D_{\text{sat}}})$$

$$I_{\text{drainS}} = \frac{\text{MUS}}{1 + U_0(V_{gs} - V_{to})} \cdot \frac{C_{\text{ox}} \cdot W / L}{(1 + U_1 \cdot V_{ds} / L)} \cdot \left[(V_{gs} - V_{to}) \cdot V_{ds} - \frac{a}{2} (V_{ds})^2 \right]$$

На основе схемотехнического моделирования создается библиотека моделей элементов, которые учитывают ионизационное излучение. Условно такие элементы можно считать «неисправными». При переходе из схемотехнического базиса в функционально-логический необходимо каждому «неисправному» элементу на схемотехническом уровне поставить в соответствие «неисправный» элемент на функционально-логическом уровне. Однако, число этих элементов достаточно велико. Так как одному исправному элементу необходимо поставить в соответствие множество «неисправных», число элементов которого зависит от мощности дозы, длительности импульса, температуры.

Для сокращения вычислительных затрат и уменьшения объема памяти предложены аппроксимационные соотношения, позволяющие провести пересчет времени потери работоспособности каждого элемента для любой мощности дозы, длительности импульса и температура по известным 4 значениям полученных при различных уровнях мощности дозы, длительности и температуры.

Список литературы

1. Коршунов, Ф.П. Радиационные эффекты в полупроводниковых приборах. [Текст] / Ф.П. Коршунов, Г.В. Гатальский, Г.М. Иванов // Минск. - Наука и техника, 1978. - 232 с.
2. Зольников, В.К. Создание отечественной проектной среды разработки микроэлектронных систем / В.К.Зольников, В.Н.Ачкасов, П.Р.Машевич, И.П.Потапов // Вестник ВГТУ. Системы автоматизации проектирования. 2006. Вып.2. - №3. –С.9 – 11.
3. 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.
4. Яньков, А.И., Сравнительный анализ процессов возникновения ионизирующего тока в транзисторных ключах КМОП и КМОП КНИ-технологиях / А.И.Яньков, В.К. Зольников // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2010. № 3. С. 40-41.
5. 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.
6. Ачкасов, В. Н. Разработка средств автоматизации проектирования специализированных микросхем для управляющих вычислительных комплексов двойного назначения : монография / В.Н. Ачкасов, В.М. Антимиров, В.Е. Межов, В.К. Зольников. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2005. – 240 с.
7. Зольников, К. В. Проблемы моделирования базовых элементов КМОП БИС двойного назначения / К. В. Зольников // Моделирование систем и процессов. 2010. №3-4. С. 20-27.