

# Моделирование сбора заряда при воздействии тяжелых заряженных частиц в КМОП элементах микросхем

В.К. Зольников<sup>1</sup>, И.П. Потатов<sup>2</sup>, К.И. Таперо<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Воронежская государственная лесотехническая академия, w kz@rambler.ru

<sup>2</sup>ФГУП НИИ Электронной техники, pip\_66@mail.ru

<sup>3</sup>ФГУП НИИ Приборов, tapero@bk.ru

**Аннотация** — Рассматриваются вопросы моделирования эффектов в КМОП-структурах при воздействии тяжелых заряженных частиц. Приводятся численные формулы расчета заряда в чувствительных элементах СБИС при воздействии тяжелой заряженной частицы. Предложенная методика позволяет рассчитать, для заданного значения линейных потерь, энергии падающих частиц, форму импульса диффузионной составляющей ионизационного тока и зависимость собранного заряда от времени после попадания частицы.

**Ключевые слова** — моделирование; радиация; тяжелые заряженные частицы; стойкость; КМОП; микросхемы.

## I. ВВЕДЕНИЕ

При проектировании микросхем, которые используются в космических летательных аппаратах, одной из основных задач является обеспечение стойкости к воздействию тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) космического пространства (КП). Для современных БИС с высокой степенью интеграции достаточно попадания одной такой частицы в чувствительный объем прибора, чтобы произошел сбой в его функционировании. Задача прогнозирования частоты возникновения одиночных сбоев и отказов, вызванных попаданием ТЗЧ КП, представляется достаточно сложной, поскольку реальная радиационная обстановка КП характеризуется весьма широким набором видов ТЗЧ и значений их энергии, а также наличием высокоэнергетических протонов, которые способны вызывать одиночные сбои различного характера. Кроме того, потоки протонов и ТЗЧ характеризуются изотропным угловым распределением.

Наиболее общий подход к прогнозированию чувствительности БИС к одиночным сбоям заключается в том, что вблизи элементарной ячейки БИС, подверженной сбоям, выделяется так называемый чувствительный объем (как правило, в виде прямоугольного параллелепипеда), при поглощении в котором энергии

ТЗЧ, превышающей критическое значение  $E_{\text{крит}}$ , происходит сбой в работе прибора.

При выборе физической модели для прогнозирования чувствительности к одиночным сбоям основное значение имеет определение доминирующих процессов сбора заряда из трека ТЗЧ в чувствительном объеме прибора. Обычно в качестве чувствительного объема выступает область пространственного заряда (ОПЗ) обратно смещенного  $p$ - $n$  перехода. Во многих работах отмечалось, что величина собранного заряда из трека, при прямом попадании ТЗЧ в ОПЗ, может значительно возрастать за счет эффекта воронки, когда реализуется дрейфовый механизм сбора заряда из трека ТЗЧ. Однако, авторы многих работ, появившихся в последнее время, приходят к заключению, что диффузия является доминирующим процессом в сборе заряда из трека ТЗЧ [1, 2]: носители заряда, генерируемые вне ОПЗ, диффундируют к её границе и дают вклад в суммарный собранный заряд. В зависимости от того, на каком удалении от ОПЗ располагается ионный трек, при неизменном значении линейных потерь энергии (ЛПЭ) падающих ТЗЧ, величина собранного заряда будет меняться. Это, в конечном итоге, приводит к тому, что зависимость сечения сбоев от ЛПЭ имеет вид плавно нарастающей функции, для аналитического описания которой часто используется аппроксимация распределением Вейбулла.

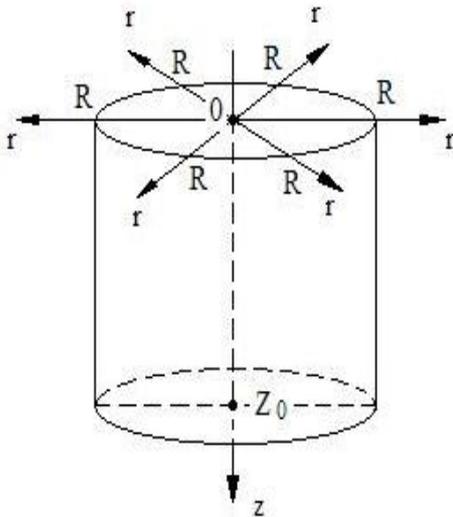
## II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Задачи моделирования сбора заряда из трека ТЗЧ являются принципиально трёхмерными, и их решение представляется весьма сложным (в силу таких факторов, как сложность конструкции прибора, для которого проводится моделирование, случайность расположения трека ТЗЧ, изотропная геометрия облучения прибора в реальных условиях КП и др.). Как правило, решение задач подобного рода осуществляется с ис-

пользованием специализированных САПР и, даже в этих случаях, используются различные допущения и приближения, существенно упрощающие решение поставленной задачи.

В настоящей работе предлагается упрощенный метод моделирования процессов сбора заряда из трека ТЗЧ для прогнозирования характеристик чувствительности БИС к одиночным радиационным эффектам. Целью данных расчетов является определение порогового значения ЛПЭ ТЗЧ, при котором наблюдаются одиночные сбои. При этом, моделирование проводится лишь для случая попадания ТЗЧ непосредственно в центр чувствительной области, что будет соответствовать максимальному значению собранного заряда. Для достижения поставленной цели процесс моделирования сбора заряда предлагается свести к решению упрощенной задачи, основанной на следующих предположениях.

Во-первых, чувствительный объем представляется в виде цилиндра, по оси которого проходит трек ТЗЧ. Вдоль оси цилиндра направлена координатная ось  $z$  (см. рис. 1). Заряд, генерированный в треке, собирается коллекторной областью, которой является верхняя торцевая поверхность цилиндра. В начальный момент времени задается радиальное распределение носителей заряда в треке, а дальше рассматривается эволюция трека с учетом объемной рекомбинации носителей заряда.



**Рис. 1.** Модельное представление чувствительного объема в виде цилиндра радиусом  $R$  и высотой  $Z_0$ : трек ТЗЧ располагается по оси цилиндра (ось  $z$ ); верхняя торцевая поверхность цилиндра ( $z = 0$ ) — коллекторная область для сбора носителей заряда из трека ТЗЧ

Во-вторых, предполагается отсутствие внешнего поля. Таким образом, рассматривается только заряд, собранный посредством диффузии. В работах [1, 3]

указывается, что учет вклада дрейфа носителей в суммарную величину собранного заряда может быть проведен путем удвоения диффузионного тока. При этом следует понимать, что такое приближение не означает, что временная форма импульса дрейфовой составляющей ионизационного тока совпадает с формой диффузионной составляющей: приближение позволяет лишь оценить конечный результат — заряд, собранный за счет диффузии и дрейфа неравновесных носителей.

В-третьих, объемная рекомбинация определяется двумя механизмами: Оже-рекомбинацией (характерно для высокого уровня инжекции) и рекомбинацией Шокли-Рида-Холла (характерно для низкого уровня инжекции). Общая скорость объемной рекомбинации  $R_{rec}$  будет складываться из скоростей этих двух видов рекомбинации:

$$R_{rec} = R_{Auger} + R_{SRH}. \quad (1)$$

Для скорости Оже-рекомбинации  $R_{Auger}$  можно записать [2]

$$R_{Auger} = \frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial t} = C_e (n^2 p - n_0^2 p_0) + C_h (p^2 n - p_0^2 n_0), \quad (2)$$

где  $n$  и  $p$  — полные концентрации носителей, а  $n_0$  и  $p_0$  — начальные равновесные концентрации носителей.

Значения Оже-коэффициентов  $C_e$  и  $C_h$  для кремния обычно составляют порядка  $2 \cdot 10^{-31}$  см<sup>6</sup>/с [2].

Для скорости рекомбинации Шокли-Рида-Холла можно записать [2]

$$R_{SRH} = \frac{pn - n_i^2}{\tau_{pl}(n + n_t) + \tau_{nl}(p + p_t)}, \quad (3)$$

где  $\tau_{nl} = \frac{1}{v_{thn} \sigma_n N_t}$ ,  $\tau_{pl} = \frac{1}{v_{thp} \sigma_p N_t}$  — время жизни

электронов и дырок (при низком уровне инжекции);  $v_{thn}$ ,  $v_{thp}$  — тепловая скорость электронов и дырок соответственно;  $\sigma_n$ ,  $\sigma_p$  — сечение захвата электронов и дырок соответственно.

Для низкого уровня инжекции (когда доминирует механизм рекомбинации Шокли-Рида-Холла) можно приблизительно считать, что скорость рекомбинации определяется выражением

$$R_{SRH} = \frac{n - n_0}{\tau} = \frac{p - p_0}{\tau}, \quad (4)$$

где  $\tau_{pl} = \tau_{nl} = \tau$ .

Следует отметить, что в состоянии с высоким уровнем инжекции, что типично для ионных треков, перенос неравновесных электронов и дырок осуществляется за счет амбиполярной диффузии, и коэффициент амбиполярной диффузии может быть рассчитан по формуле [1, 2]

$$D = \frac{2D_{min}D_{maj}}{D_{min} + D_{maj}}, \quad (5)$$

где  $D_{min}$ ,  $D_{maj}$  — коэффициенты диффузии неосновных и основных носителей заряда, соответственно. В состоянии с низким уровнем инжекции диффузионный перенос неравновесных носителей заряда определяется их коэффициентами диффузии.

В-четвертых, предполагается наличие аксиальной симметрии относительно оси  $z$  (направление начального трека). Если использовать цилиндрическую систему координат, то данное предположение позволяет превратить решаемую задачу из трехмерной в двумерную относительно независимых координат  $z$  и  $r$ . Плотность носителей заряда не будет зависеть от полярного угла в силу наличия аксиальной симметрии относительно оси  $z$ .

Общий ток, характеризующий значение собранного заряда, определяется диффузионным током неосновных носителей заряда. Как отмечалось выше, учет вклада дрейфовой составляющей в величину собранного заряда может быть осуществлен путем удвоения диффузионного тока [1, 3].

Известно [2], что обычно в качестве чувствительной области, отвечающей за возникновение одиночных обратимых сбоев при воздействии ТЗЧ, выступает ОПЗ стокового  $p$ - $n$ -перехода закрытого  $n$ -канального транзистора. Если считать, что уровень легирования  $n^+$ -стоковой области значительно выше, чем в  $p$ -подложке, то ОПЗ будет практически полностью сосредоточена в подложке. Следовательно, в качестве неосновных носителей заряда можно рассматривать электроны. В качестве «границы» между высоким и низким уровнями инжекции можно взять равенство концентраций избыточных неосновных носителей (электронов) и основных носителей заряда (дырок):  $n - n_0 = p_0$ . Если концентрация избыточных электронов превышает равновесную концентрацию дырок, то реализуется состояние с высоким уровнем инжекции, иначе — с низким.

Радиус области сбора заряда  $R$  выбирается, исходя из значения площади чувствительной области  $S_{чО}$ :

$$R = \sqrt{S_{чО} / \pi}. \quad (6)$$

В случае одиночных обратимых сбоев чувствительными областями являются стоковые переходы закрытых  $n$ -канальных транзисторов, и их площадь определяется исходя из известных топологических размеров ячеек памяти. При отсутствии информации о топологии ячеек памяти можно ориентироваться на значение топологической нормы проектирования, характерное для технологии изготовления рассматриваемых БИС, и использовать эмпирическое соотношение для микросхем статических оперативных запоминающих устройств (СОЗУ) [2]

$$S_{зЯ} [\text{мкм}^2] \approx 300(l_T [\text{мкм}])^2, \quad (7)$$

где  $S_{зЯ}$  — площадь запоминающей ячейки,  $\text{мкм}^2$ ;  $l_T$  — топологическая норма проектирования,  $\text{мкм}$ .

В этом случае площадь чувствительной области может быть оценена как половина площади одного транзистора, т.е. 1/12 площади 6-транзисторной ячейки памяти СОЗУ.

Следует отметить, что площадь чувствительной области соответствует значению сечения насыщения для обратимых сбоев, которое вместе с пороговыми ЛПЭ является основным параметром чувствительности БИС к сбоям при воздействии ТЗЧ, необходимым для расчета частоты сбоев.

Глубина области сбора заряда  $Z_0$  определяется глубиной залегания стоковых  $p$ - $n$ -переходов, шириной ОПЗ этих переходов и длиной воронки. В большинстве случаев эта величина составляет порядка 3  $\text{мкм}$  [4].

С учетом рассмотренных предположений, моделирование сбора заряда из трека ТЗЧ, в случае нормального падения ТЗЧ по центру области сбора заряда, может быть проведено следующим образом.

1. Решается краевая задача для распределений концентрации носителей заряда в чувствительном объеме, которая с учетом рассмотренных выше допущений формулируется в виде

$$\frac{\partial p}{\partial t} = D_1 \left( \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} \right) - C_e (n^2 p - n_0^2 p_0) - \quad (8)$$

$$- C_h (p^2 n - p_0^2 n_0) - \frac{p - p_0}{\tau}$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D_2 \left( \frac{\partial^2 n}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 n}{\partial r^2} \right) - C_e (n^2 p - n_0^2 p_0) - \quad (9)$$

$$- C_h (p^2 n - p_0^2 n_0) - \frac{n - n_0}{\tau}$$

$$n|_{z=0} = 0; \quad \frac{\partial p}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{\partial p}{\partial z} \Big|_{z=Z_0} = \frac{\partial n}{\partial z} \Big|_{z=Z_0} = 0; \quad (10)$$

$$\frac{\partial p}{\partial r} \Big|_{r=0} = \frac{\partial p}{\partial r} \Big|_{r=R} = \frac{\partial n}{\partial r} \Big|_{r=0} = \frac{\partial n}{\partial r} \Big|_{r=R} = 0; \quad (11)$$

$$p(z, r, t = 0) = n(z, r, t = 0) = \begin{cases} \frac{\rho L}{\varepsilon_i \pi r_i^2}, & r \leq r_i; \\ 0, & r > r_i; \end{cases} \quad (12)$$

$$D_1 = \begin{cases} D_p, & n - n_0 < p_0; \\ \frac{2D_p D_n}{D_p + D_n}, & n - n_0 \geq p_0; \end{cases} \quad (13)$$

$$D_2 = \begin{cases} D_n, & n - n_0 < p_0; \\ \frac{2D_p D_n}{D_p + D_n}, & n - n_0 \geq p_0. \end{cases} \quad (14)$$

Данная задача решается для различных значений ЛПЭ падающих частиц, которые определяют начальную концентрацию электронно-дырочных пар в треке.

2. Вычисляется диффузионный ток неосновных носителей заряда (электронов) через верхнюю торцевую поверхность цилиндрического чувствительного объема:

$$I_d(t) = -qD_n \int_S \frac{\partial n(z=0)}{\partial z} dS. \quad (15)$$

В полярной системе координат, с учетом аксиальной симметрии относительно оси  $z$ , выражение (15) можно преобразовать следующим образом:

$$\begin{aligned} I_d(t) &= -qD_n \int_S \frac{\partial n(z=0; r; t)}{\partial z} r dr d\varphi = \\ &= -qD_n \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^R \frac{\partial n(z=0; r; t)}{\partial z} r dr = \\ &= -2\pi qD_n \int_0^R \frac{\partial n(z=0; r; t)}{\partial z} r dr. \end{aligned} \quad (16)$$

3. Рассчитывается собранный заряд путем интегрирования выражения (16), при этом для учета вклада дрейфовой компоненты в величину собранного заряда значение диффузионного тока удваивается:

$$Q(t) = -4\pi qD_n \int_0^t dt' \int_0^R \frac{\partial n(z=0; r; t')}{\partial z} r dr. \quad (17)$$

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая методика позволяет рассчитать для заданного значения ЛПЭ падающих частиц форму импульса диффузионной составляющей ионизационного тока и зависимость собранного заряда от времени после попадания частицы. После того, как получена зависимость

собранного заряда от значения ЛПЭ ТЗЧ, может быть определено пороговое значение ЛПЭ ТЗЧ для одиночных обратимых сбоев. В качестве порогового выбирается такое значение ЛПЭ, при котором собранный заряд равен заряду переключения логического состояния КМОП-триггера, для которого проводится моделирование. Величина заряда переключения обычно известна: как правило, она рассчитывается на этапе разработки конструкции и технологии БИС.

Результатом реализации предлагаемого метода будет оценка порогового значения ЛПЭ ТЗЧ и сечения насыщения для одиночных сбоев. Полученное пороговое значение ЛПЭ соответствует случаю нормального падения ТЗЧ на кристалл БИС. Аналогичные характеристики, как правило, получаются и в экспериментах на ускорителях тяжелых ионов. Для восстановления зависимости сечения сбоев от ЛПЭ можно применить аппроксимацию распределением Вейбулла с использованием полученных значений пороговых ЛПЭ и сечения насыщения, а для определения значений оставшихся параметров аппроксимации воспользоваться рекомендациями [4].

Основным преимуществом предлагаемого метода прогнозирования характеристик чувствительности БИС к одиночным сбоям при воздействии ТЗЧ является то, что оценка этих характеристик получается практически на основе рассмотрения только диффузионных механизмов переноса заряда. Реальный учет дрейфовой компоненты в уравнениях непрерывности для неравновесных носителей заряда представляется весьма сложным, поскольку современные БИС имеют очень сложную конструкцию, включающую большое количество контактов,  $p$ - $n$ -переходов, границ раздела и т.п. и в процессе воздействия ТЗЧ микросхемы могут находиться в динамическом режиме. В результате точное описание распределения электрического потенциала по объему кристалла БИС представляет собой очень сложную задачу.

На основе данного материала можно провести моделирование к воздействию ТЗЧ всех основных элементов микросхем, выявить наиболее критичные и с помощью специальных мер повысить стойкость изделий.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Edmonds L.D. A Time-Dependent Charge-Collection Efficiency for Diffusion // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2001. Vol. 48, N 5. P. 1609–1622.
- [2] Weatherford T. From Carriers to Contacts, a Review of SEE Charge Collection Processes // Radiation Effects — From Particles to Payloads. IEEE NSREC Short Course, 2002. P. IV-1 – IV-80.
- [3] Edmonds L.D. Electric Currents through Ion Tracks in Silicon Devices // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1998. Vol. 45, N 6. P. 3153–3164.
- [4] РД В 319.03.38-2000. 22 ЦНИИ МО, 2000.