

Комплексный подход к проектированию радиационно-стойких аналоговых микросхем. Часть 1. Учет влияния проникающей радиации в “*Spice*-подобных” программах

О.В. Дворников¹, В.Н. Гришков²

¹Открытое акционерное общество “МНИПИ”, Беларусь, г. Минск, Российско-Белорусский научно-технический центр аналоговой и дискретно-аналоговой микросхемотехники “МикАн” (СКНЦ ВШ), Россия, г. Таганрог, oleg_dvornikov@tut.by

²Филиал Научно-технический центр “Белмикросистемы” открытого акционерного общества “ИНТЕГРАЛ”, Беларусь, г. Минск, grishkovvn@tut.by

Аннотация — Сформулирована целесообразная последовательность работ при схемотехническом проектировании радиационно-стойких микросхем. Предложены “*Spice*-модели”, характеризующие влияние проникающей радиации на параметры активных и пассивных элементов биполярных микросхем.

Ключевые слова — Радиационная стойкость, схемотехническое моделирование, “*Spice*-параметры”, биполярные микросхемы.

I. ВВЕДЕНИЕ

Повышению радиационной стойкости интегральных микросхем (ИМС) постоянно уделяется внимание разработчиков технологических маршрутов, схемотехники и топологии [1]–[3]. Актуальность данной проблемы обусловлена расширяющимся рынком электронной аппаратуры, работающей в условиях воздействия как естественной, так и искусственной радиации.

Для существенного уменьшения материальных и временных затрат целесообразно учитывать влияние проникающей радиации (ПР) на основные параметры микросхем на ранних этапах проектирования, прежде всего при схемотехническом синтезе и моделировании.

Обычно при расчете биполярных ИМС принимают во внимание изменение сопротивления полупроводниковых резисторов, появление первичных фототоков, а также уменьшение статического коэффициента передачи тока в схеме с общим эмиттером β биполярных транзисторов (БТ) при облучении быстрыми нейтронами [4], [5]. К сожалению, при этом затруднительно определить деградацию малосигнальных параметров аналоговых микросхем.

Для учета влияния радиационных дефектов в [6] предложено идентифицировать параметры моделей БТ после воздействия ПР и применять полученные наборы параметров при схемотехническом моделировании. Такой подход обеспечивает адекватное описание воздействия ПР на параметры микросхем, но требует идентификации большого количества наборов параметров, каждый из которых допустимо применять только для конкретных условий облучения.

В [7] предпринята попытка описать влияние поглощенной дозы гамма-излучения на параметры *p-n-p*-транзисторов при помощи дополнительных элементов: диодов, отражающих увеличение базового тока при прямом и инверсном включении БТ, и резистора, характеризующего радиационно-индуцированный ток утечки между коллектором и эмиттером. Такая модернизированная модель Гуммеля–Пуна не достаточна для схемотехнического моделирования аналоговых схем, и она не адаптирована для *n-p-n*-транзисторов.

Целью настоящей статьи является рассмотрение этапов комплексного подхода к проектированию радиационно-стойких ИМС, позволяющих учесть влияние ПР в “*Spice*-подобных” программах.

II. КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ МИКРОСХЕМ

Высокоточное радиационное моделирование аналоговых микросхем затруднительно из-за сложной природы взаимодействия ПР с кремнием: зависимости количества и типа радиационных дефектов от вида излучения и его энергии, энергораспределения по толщине полупроводниковой подложки, изменения энергетических спектров и потоков частиц при прохождении через экранирующие поверхности. С нашей точки

зрения, основные усилия при проектировании радиационно-стойких микросхем должны быть направлены не на повышение абсолютной точности моделей элементов и создание аналоговых ИМС с уникальным набором характеристик, а на разработку моделей, корректно описывающих основные физические процессы, и синтез аналоговых схем с минимальным изменением характеристик при радиационном облучении. В связи с указанным, при проектировании радиационно-стойких микросхем рекомендуется применение следующего подхода:

- 1) Выявление параметров моделей элементов, оказывающих наиболее сильное влияние на характеристики аналоговых микросхем.
- 2) Определение взаимосвязи параметров моделей с конструктивно-технологическими параметрами типовой структуры ИМС.
- 3) С помощью известных эмпирических коэффициентов оценка влияния ПР на параметры полупроводника. Разработка соотношений, связывающих параметры моделей и излучения (вид излучения, энергия, поглощенная доза, интегральный поток частиц).
- 4) Разработка методов идентификации основных параметров моделей из измерений и методик радиационного воздействия на элементы и аналоговые компоненты (усилители, умножители и др.) в режимах близких к рабочим.
- 5) Измерение вольт-амперных характеристик облученных интегральных элементов, идентификация основных параметров моделей, корректировка эмпирических коэффициентов для выбранного технологического маршрута изготовления микросхем. Сравнение результатов измерений и моделирования облученных аналоговых компонентов и дополнительное уточнение эмпирических коэффициентов.
- 6) Схемотехническое моделирование разрабатываемых аналоговых ИМС, выявление каскадов наиболее чувствительных к воздействию ПР и их модернизация (введение цепей компенсации входных токов, стабилизация режима работы, уменьшение изменения напряжения смещения нуля, применение новых методов построения сложно-функциональных аналоговых компонентов, обеспечивающих структурную и параметрическую компенсацию изменений параметров [1], [8], [9]).
- 7) Установление, при необходимости, интегральных элементов критически чувствительных к воздействию ПР, их топологическая модернизация или замена на радиационно-стойкие.

III. РАДИАЦИОННОЕ ИЗМЕНЕНИЕ “SPICE-ПАРАМЕТРОВ”

Машинное моделирование ИМС обычно осуществляют с применением физико-топологических и электрических моделей. Физико-топологическая модель

описывает поведение элемента ИМС, используя конструктивно-технологические и электрофизические параметры, а элементами в электрической модели являются диоды, источники тока и напряжения, сопротивления, емкости, индуктивности или их сочетания.

Для исследования поведения аналоговых устройств аналитическими методами нами были созданы комбинированные модели, в основе которых лежат электрические модели, причем ряд параметров определяется исходя из конструктивно-технологических и электрофизических параметров как в физико-топологических моделях. Комбинированные модели предназначены для выявления факторов, преимущественно влияющих на требуемые характеристики, и поэтому целесообразно их применение при радиационном моделировании аналоговых микросхем.

Выполненный анализ комбинированных моделей позволил установить, что на характеристики биполярных и полевых транзисторов с *p-n*-переходом (ПТП), наиболее существенно влияют следующие изменяющиеся при радиационном облучении параметры: *BF* (*BR*)- коэффициент передачи тока β в активном режиме работы “идеального” БТ при прямом (инверсном) включении, т.е. в том случае, когда отсутствует зависимость β от тока и напряжения на коллекторном переходе; *VAF*- напряжение Эрли при прямом включении; *IKF*- ток “излома” зависимости $I_C(V_{BE})$, приблизительно равный коллекторному току, при котором β уменьшается до величины $0,5BF$; *IS*- ток, описывающий перенос неосновных носителей заряда (ННЗ) в базе; *ISE*- ток, обусловленный процессами генерации-рекомбинации в области пространственного заряда (ОПЗ) эмиттерного *p-n*-перехода; *RC*, *RE*, *RB*- сопротивления полупроводниковых областей коллектора, эмиттера, базы (максимальное); *TF*- время пролета ННЗ через квазинейтральную базу в активном режиме работы при прямом включении; *BETA*- коэффициент пропорциональности (удельная крутизна) ПТП; *LAMBDA*- коэффициент модуляции длины канала ПТП; *VTO*- напряжение отсечки ПТП; *RD*, *RS*- сопротивления полупроводниковых областей стока и истока ПТП.

Для установления взаимосвязи параметров моделей с характеристиками ПР рекомендуется применение следующих выражений, в которых выделены параметры полупроводника, наиболее изменяющиеся при радиационном облучении:

$$BF \approx \frac{N_{DE} X_E D_{NB}}{N_{AB} W_{BA} D_{PE}} \sim \frac{\mu_{NB} N_{DE}}{\mu_{PE} N_{AB}} \sim \frac{N_{DE}}{N_{AB}}, \quad (1)$$

$$BR \sim \frac{N_{DC}}{N_{AB}}, \quad (2)$$

$$VAF = \frac{Q_{B0}}{C_{JCO}} \sim N_{AB} d_C \sim N_{AB} \sqrt{\frac{1}{N_{AB}} + \frac{1}{N_{DC}}}, \quad (3)$$

$$d = \left[\frac{2\epsilon\epsilon_0}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (VJ - V_{PN}) \right]^{0.5} \sim \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)^{0.5}, \quad (4)$$

$$IS \approx \frac{qD_{NB}n_I^2 S_E}{N_{AB}W_{BA}} \sim \frac{\mu_{NB}}{N_{AB}} \sim \frac{1}{N_{AB}}, \quad (5)$$

$$ISE = qn_I \left(\frac{d_E}{2\tau} S_{E\Sigma} + v_S S_{SURF} \frac{n_I}{N_{AB}} \right), \quad (6)$$

$$TF \approx \frac{W_{BA}^2}{2D_{NB}} \sim \frac{1}{\mu_{NB}}, \quad (7)$$

$$IKF = \frac{Q_{B0}S_E}{TF} \approx \frac{qN_{AB}W_{BA}S_E}{TF} \sim N_{AB}\mu_{NB} \sim N_{AB}, \quad (8)$$

$$BETA = \frac{4\epsilon\epsilon_0\mu_{CH}W}{3aL} \sim \mu_{CH}, \quad (9)$$

$$VTO = \frac{qN_{CH}a^2}{2\epsilon\epsilon_0} \sim N_{CH}, \quad (10)$$

$$RC \sim N_{DC}^{-1}, RE \sim N_{DE}^{-1}, RB \sim N_{AB}^{-1}, \quad (11)$$

$$LAMBDA \sim N_{CH}^{-0.5}, RD \sim N_D^{-1}, RS \sim N_S^{-1},$$

где N_{DE} , N_{DC} , N_{AB} , N_{CH} , N_D , N_S – концентрация ионизированных доноров в эмиттере и коллекторе, акцепторов в базе $n-p-n$ БТ, ионизированной примеси в канале, стоке, истоке ПТП; x_E , W_{BA} – протяженность квазинейтральной области эмиттера, активной базы; D_{NB} , D_{PE} – коэффициент диффузии электронов в базе, дырок в эмиттере; μ_{NB} , μ_{PE} , μ_{CH} – подвижность электронов в базе, дырок в эмиттере $n-p-n$ БТ, основных носителей заряда в канале ПТП; Q_{B0} – удельная плотность “встроенного” заряда в базе (на единицу площади); C_{JCO} – удельная барьерная емкость коллекторного перехода (на единицу площади); S_E ($S_{E\Sigma}$) – донная (суммарная) площадь эмиттерного перехода ($S_{E\Sigma} = S_E + P_E x_{JE}$); P_E – периметр эмиттера; x_{JE} – глубина залегания эмиттерного перехода; q – заряд электрона; n_I – собственная концентрация носителей; d – ширина ОПЗ $p-n$ - перехода (d_E – эмиттерного, d_C – коллекторного); τ – эффективное время жизни носителей заряда в ОПЗ; VJ (V_{PN}) – контактная разность потенциалов (падение напряжения) на $p-n$ -переходе; v_S – скорость поверхностной рекомбинации; S_{SURF} – величина площади полупроводника, на которой происходит поверхностная рекомбинация; ϵ – относительная диэлек-

трическая проницаемость полупроводника; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; W , L – ширина и длина затвора ПТП; a – половина толщины токопроводящей части канала ПТП при отсутствии внешнего напряжения.

Соотношения (1)-(8) справедливы для $n-p-n$ БТ, однако их допустимо применять и для $p-n-p$ при соответствующей замене переменных и учета того, что параметр IS горизонтального $p-n-p$ БТ необходимо умножить на безразмерный коэффициент, описывающий двумерный характер протекания тока; вместо донной площади эмиттера S_E для горизонтального транзистора необходимо применять $P_E x_{JE}$; в качестве S_{SURF} для $n-p-n$ БТ рекомендуется использовать $P_E d_E$, а для $p-n-p$ – $P_E W_{BA}$.

В ряде случаев экспериментальные данные для эффективного времени жизни носителей заряда τ не достаточно достоверны вследствие высокой сложности измерений малых времен жизни носителей. Кроме того, скорость поверхностной рекомбинации v_S до радиационного облучения мала (от 1 до 5 см/с) и ее величиной пренебрегают. В связи с указанным, радиационное изменение параметра ISE целесообразно описывать следующим образом для $n-p-n$ (12) и горизонтальных $p-n-p$ - транзисторов (13):

$$ISE_F = ISE_0 \frac{d_{EF}}{d_E} + qn_I v_{SF} K_{SURF} \frac{n_I}{N_{AB}} P_E (d_{EF} + d_{SURF}), \quad (12)$$

$$ISE_F = ISE_0 \frac{d_{EF}}{d_E} + qn_I v_{SF} K_{SURF} \frac{n_I}{N_{DB}} P_E W_{BA}, \quad (13)$$

где K_{SURF} – эмпирический коэффициент радиационного изменения скорости поверхностной рекомбинации, зависящий от вида частиц (электроны, протоны, гамма-кванты, нейтроны) и их энергии, типа проводимости полупроводника; d_{SURF} – ширина дополнительных ОПЗ на поверхности, появившихся из-за влияния положительного заряда в окисле, созданного при радиационном облучении. Здесь и далее нижним индексом “ F ” обозначаем параметры после воздействия ПР, а индексом “ 0 ” – до облучения. Коэффициент K_{SURF} указывает относительное изменение по сравнению с экспериментальными данными v_{SF} , приведенными в [5] и аппроксимированными нами полиномом (рис. 1). Величину d_{EF} для эмиттерного перехода БТ можно рассчитать по (4).

Кроме того, при схемотехническом моделировании аналоговых микросхем со стабилизаторами, использующими эффект лавинного пробоя $p-n$ -перехода, необходимо учитывать следующую зависимость

$$V_{BR} \cong 60 \left(\frac{E_G}{1,1} \right)^{1,5} \left(\frac{N_B}{10^{16}} \right)^{-0,75} \sim N_B^{-0,75}, \quad (14)$$

где V_{BR} – напряжение пробоя резкого, не симметричного p - n -перехода, В; E_G – ширина запрещенной зоны полупроводника при комнатной температуре, эВ; N_B – концентрация примеси в слаболегированной области, см^{-3} .

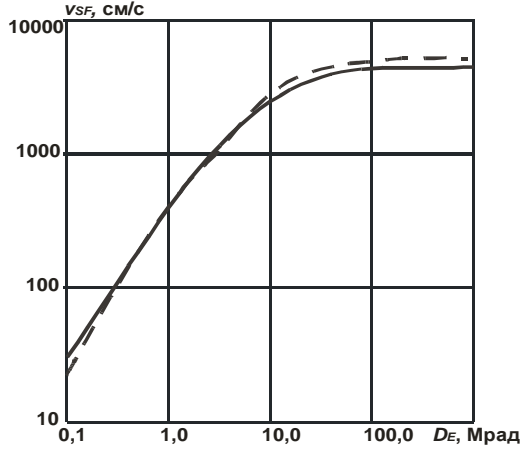


Рис. 1. Зависимость скорости поверхностной рекомбинации v_{SF} от дозы поглощенного излучения D_E быстрых электронов. Штриховая линия – экспериментальные данные [5], сплошная линия – аппроксимация полиномом

Обычно радиационное изменение параметров кремния описывается с помощью эмпирических соотношений [10]:

$$\frac{n_F}{n_0} = \exp(-K_N F), \quad (15)$$

$$K_N = \frac{1}{cn_0^\gamma}, \quad (16)$$

$$\frac{1}{\mu_F} = \frac{1}{\mu_0} + K_\mu F, \quad (17)$$

где K_N , K_μ – коэффициенты радиационного изменения концентрации и подвижности основных носителей заряда; F – интегральный поток частиц; c , γ – эмпирические коэффициенты, зависящие от вида частиц (электроны, протоны, гамма-кванты, нейтроны) и их энергии, типа проводимости полупроводника.

В [10] приведены некоторые численные значения эмпирических коэффициентов K_N , K_μ для распространенных типов облучения. Совместное применение соотношений (1)–(17) позволяет описать радиационное изменение “*Spice*-параметров”.

Радиационное облучение вызывает также появление первичных фототоков через p - n -переходы, амплитуды которых пропорциональны площадям переходов S_{PN} и мощности дозы облучения [4]

$$I_{PP} = qGS_{PN}(d + \lambda_P W_P + \lambda_N W_N), \quad (18)$$

где I_{PP} – первичный фототок; G – скорость генерации носителей заряда; λ_P , λ_N – коэффициенты собирания носителей, которые для биполярных микросхем выбираются в интервале от 0,4 до 0,8 [4]; W_N , W_P – толщины прилегающих к p - n -переходу областей собирания носителей.

Обычно радиационную стойкость микросхем оценивают при воздействии интегрального потока нейтронов с энергией более 1 МэВ, поглощенной дозе электронного и протонного излучения с энергией более 1 МэВ. Поэтому для применения (15)–(17) необходимо учитывать взаимосвязь интегрального потока частиц с поглощенной дозой излучения [4]

$$D_N = 1,55 \cdot 10^{-15} E_N F_N, \text{ при } E_N \leq 1 \text{ МэВ}, \quad (19)$$

$$D_N = 6,88 \cdot 10^{-16} E_N F_N, \text{ при } E_N \text{ от } 3 \text{ до } 14 \text{ МэВ}, \quad (20)$$

$$D_{E(P)} = 1,60 \cdot 10^{-13} K_{E(P)} F_{E(P)}, \quad (21)$$

$$D_\gamma = 1,60 \cdot 10^{-13} K_\gamma E_\gamma F_\gamma, \quad (22)$$

$$G_N = 4 \cdot 10^5 f_N, \quad (23)$$

$$G_N = 2,34 \cdot 10^6 P_N, \quad (24)$$

$$G_E = 4,13 \cdot 10^{21} P_E (1 - K_{DE}), \quad (25)$$

$$G_P = 4,13 \cdot 10^{21} P_P (1 + K_{DP}), \quad (26)$$

$$G_\gamma = 4,13 \cdot 10^{21} P_\gamma (1 - K_{D\gamma}), \quad (27)$$

где D_N , D_E , D_P , D_γ – поглощенная доза излучения с размерностью грэй (1 Гр = 1 Дж/кг) при воздействии потока нейтронов, электронов, протонов, гамма-квантов; E_N , E_γ – энергия нейтронов, гамма-квантов, МэВ; F_N , F_E , F_P , F_γ – интегральный поток нейтронов, электронов, протонов, гамма-квантов, частиц/ м^2 ; K_E , K_P – коэффициент, характеризующий полные потери энергии электрона, протона, МэВ· $\text{м}^2/\text{кг}$; K_γ – коэффициент, характеризующий полные потери энергии гамма-кванта, $\text{м}^2/\text{кг}$; K_{DE} , K_{DP} , $K_{D\gamma}$ – относительная поглощенная доза, расходуемая на образование радиационных дефектов; G_N , G_E , G_P , G_γ – скорость генерации носителей заряда, обусловленная действием потока нейтронов, электронов, протонов, гамма-квантов, частиц/ $(\text{м}^3 \cdot \text{с})$; P_N , P_E , P_P , P_γ – мощность поглощенной дозы излучения, обусловленная действием потока нейтронов, электронов, протонов, гамма-квантов, Гр/с; f_N – плотность потока нейтронов, частиц/ $(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

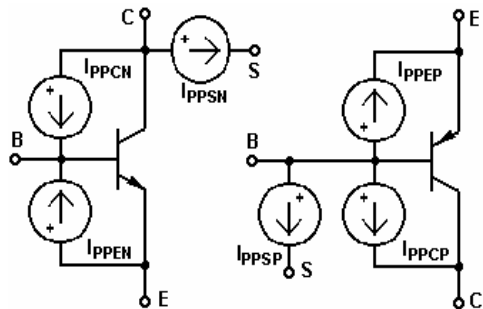
В [4] приведены численные значения эмпирических коэффициентов.

Соотношения (19)–(27) справедливы при облучении относительно тонких кристаллов в условиях, когда поглощаемая энергия равномерно распределена по толщине образца, поэтому известные величины эмпи-

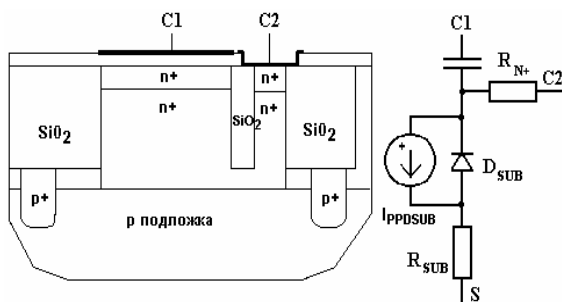
рических коэффициентов допускается применять только при предварительном моделировании ИМС. Рекомендуется для каждого конкретного технологического маршрута изготовления микросхем уточнить значения эмпирических коэффициентов на основе результатов идентификации “Spice-параметров” облученных транзисторов.

IV. УЧЕТ РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ

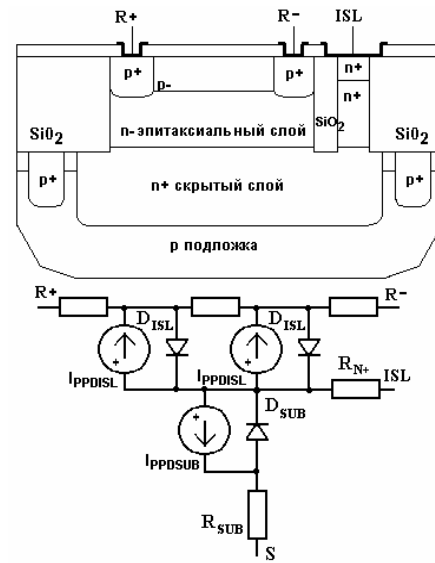
Для описания первичных фототоков в элементах ИМС параллельно всем $p-n$ -переходам необходимо подключить источники тока, величины которых определяются площадями переходов в соответствии с (18), а по направлению фототоки должны вытекать из области n -типа проводимости. Особое внимание необходимо обращать на изолирующие $p-n$ -переходы в активных и пассивных элементах. На рис. 2 приведены эквивалентные электрические схемы основных интегральных элементов с источниками фототоков для техмаршрута изготовления ИМС с комбинированной изоляцией элементов окислом и $p-n$ -переходом. На рисунке показаны выводы элементов (S – вывод подложки, ISL – вывод изолирующего кармана); диоды изолирующих $p-n$ -переходов D_{ISL} и подложки D_{SUB} ; паразитные сопротивления полупроводниковых областей R_{N+} , R_{SUB} . Нижние индексы в названии фототоков указывают на $p-n$ -переходы, через которые они протекают: “C” – коллекторный, “E” – эмиттерный, “S” – подложки, “N” – $n-p-n$ БТ, “P” – $p-n-p$ БТ.



а) $n-p-n$ и горизонтальный $p-n-p$ -транзистор



б) конденсатор на области n -типа проводимости



в) резистор на области p -типа проводимости

Рис. 2. Учет фототоков в основных интегральных элементах

При создании эквивалентных схем рекомендуется рассчитать по (18), (23)–(27) или экспериментально определить фототоки одного элемента, например мощного $n-p-n$ БТ, а фототоки остальных элементов масштабировать пропорционально заданным в их моделях емкостям соответствующих переходов. Так, при известных параметрах модели CJC , CJS $n-p-n$ БТ и величинах фототоков I_{PPCN} , I_{PPSN} фототоки изолирующих диодов I_{PPDISL} и диода подложки I_{PPDSUB} будут

$$I_{PPDISL} \approx I_{PPCN} C_{DISL} / CJC, \quad (28)$$

$$I_{PPDSUB} \approx I_{PPSN} C_{DSUB} / CJS, \quad (29)$$

где C_{DISL} , C_{DSUB} – емкости, указанные в моделях диодов D_{ISL} , D_{SUB} .

Во многих “Spice-подобных” программах предусмотрена возможность проведения анализа при различных значениях глобальных параметров, что позволяет масштабировать параметры моделей транзисторов в зависимости от характеристик облучения в соответствии с приведенными ранее выражениями.

Эту возможность поясняет приведенный ниже фрагмент файла, подготовленный по правилам программы *OrCAD*. В нем символ “*” в первой позиции строки указывает на то, что данная строка является комментарием.

*задание энергии нейтронов, МэВ

.param En=1.4

* задание потока нейтронов, m^{-2}

.param Fn=1e18

*оценка поглощенной дозы, Гр

.param Dn={1.548e-15*En*Fn}

*Оценка относительного изменения концентрации

* в областях эмиттера (em), базы (pb), коллектора (epi)

```
.param Nnem={exp(-Fn/(444*pwr(Nem, 0.77)))}
```

```
.param Nnepi={exp(-Fn/(444*pwr(Nepi, 0.77)))}
```

```
.param Nnpb={exp(-Fn/(387*pwr(Npb, 0.77)))}
```

*Оценка относительного изменения подвижности

```
.param Mnepi={1/(1+Fn*Mepi*1.65e-18)}
```

*Расчет площади и периметра переходов эмиттер-

*база, база-коллектор, скрытый слой- подложка

```
.param Pem={2.04+22.54*2*1e-6}
```

```
.param Sem={2.04*22.54*1e-12}
```

```
.param Ppb={16.9+30.9*2*1e-6}
```

```
.param Spb={16.9*30.9*1e-12}
```

```
.param Pnss={39.6+56.6*2*1e-6}
```

```
.param Snss={39.6*56.6*1e-12}
```

*задание плотности потока нейтронов, $m^{-2}c^{-1}$

```
.param Fn_t=1e10
```

*Оценка скорости генерации носителей заряда, $m^{-3}c^{-1}$

```
.param Gn={4e5*Fn_t}
```

* Оценка толщины ОПЗ

```
.param Wmpb={sqrt(129.5e7*0.7/2.9e24)}
```

```
.param Wpbepi={sqrt(129.5e7*5/2.4e22)}
```

```
.param Wnsssub={sqrt(129.5e8/1.4e21)}
```

*оценка фототоков

```
.param Vem={Wmpb*Sem+Wmpb*Pem*Xem}
```

```
.param Vpb={Wpbepi*Spb+Wpbepi*Ppb*Xpb}
```

```
.param Vnss={Wnsssub*Snss+Wnsssub*Pnss*0.8*Xnss}
```

```
.param Inem={1.6e-19*Gn*Vem}
```

```
.param Inpb={1.6e-19*Gn*Vpb}
```

```
.param Innss={1.6e-19*Gn*Vnss}
```

*подключение к модели источника фототока и

*диодов, описывающих пробой переходов,

```
.SUBCKT NPN_N b c e substr
```

```
D_D1 B N02475 DC
```

```
I_CB N02475 B {Inpb}
```

```
I_EB N02495 B {Inem}
```

```
I_CSUB N02475 [SUBSTR] {Innss}
```

```
D_D2 B N02495 DE
```

```
R_RC N02475 c {70*Nnem}
```

```
R_RE e N02495 {6.67*Nnem}
```

```
Q_Q1 N02475 N02455 N02455 [SUBSTR] NPN
```

```
.ENDS
```

*фрагмент модели NPN

```
.model NPN NPN
```

```
+IS={5.4e-17/Nnpb}
```

```
+BF={300*Nnem/Nnpb}
```

```
+VAF={31*Nnpb/sqrt(Nnepi)}
```

```
+IKF={4.3m*Nnpb}
```

```
+BR={0.7*Nnepi/Nnpb}
```

```
+RB={200/Nnpb}
```

```
+RBM={6.67/Nnpb}
```

*фрагменты моделей диодов

```
.model DE D
```

```
+Bv={5.33*pwr(Nnpb, -0.75)}
```

```
.model DC D
```

```
+Bv={25*pwr(Nnepi, -0.75)}
```

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью полученных выражений, устанавливающих взаимосвязь параметров моделей, полупроводника и радиационного облучения, описано влияние проникающей радиации на характеристики интегральных элементов в “Spice-подобных” программах. Модели использованы при разработке радиационно-стойких аналоговых микросхем в системе проектирования *OrCad*.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Дворников О.В., Крутччинский С.Г., Прокопенко Н.Н., Старченко Е.И., Щёкин Д.А., Щербинин И.П., Чеховский В.А. Импортзамещающие практические разработки и проекты ИС на базе радиационно-стойкого АБМК // Сб. науч. трудов «Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем». – М.: ИППМ РАН, 2006. – С. 200-205.
- [2] Snoeys W. [et al.] Layout techniques to enhance the radiation tolerance of standard CMOS technologies demonstrated on a pixel detector readout chip // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2000. – Vol. A439. – P.P. 349–360.
- [3] Прибыльский, А.В. Конструктивно-схемотехнические методы проектирования, тестирования и контроля интегральных схем. – Минск: ОСПИ, 2003. – 199 с.
- [4] Устюжанинов В.Н., Чепиженко А.З. Радиационные эффекты в биполярных интегральных микросхемах. – М.: Радио и связь, 1989. – 144 с.
- [5] Кулаков В.М., Ладыгин Е.А., Шаховцов В.И., Вологдин Э.Н., Андреев Ю.Н. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники. – М.: Сов. радио, 1980. – 224 с.
- [6] Barnaby H. [et al.] Analysis of bipolar linear circuits response mechanisms for high and low dose rate total dose irradiations // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1996. – Vol. NS-43. - No 6. – P.P. 3040–3048.
- [7] Montagner X. [et al.] Implementation of total dose effects in the bipolar junction transistor Gummel-Poon model // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1997. – Vol. NS-44. - No 6. – P.P. 1922–1929.
- [8] Прокопенко Н.Н., Конев Д.Н., Серебряков А.И. Архитектура аналоговых микросхем с повышенной стабильностью нулевого уровня в условиях температурных и радиационных воздействий // Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА: материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции. – М.: ФГУП «НПП «Пульсар», 2009. – С. 29-31.
- [9] Крутччинский С.Г., Титов А.Е. Структурный синтез инструментальных усилителей на базе мультидифференциальных операционных усилителей (МОУ) // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск «Актуальные проблемы производства и потребления электроэнергии». – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – № 5, (94). – С.72-80.
- [10] Вологдин Э.Н., Лысенко А.П. Интегральное радиационное изменение параметров полупроводниковых материалов: учеб. пособие по дисциплине «Радиационная стойкость полупроводниковых приборов и радиоэлектронных устройств». – М., 1998. – 94 с. – Режим доступа: <http://foet.miem.edu.ru>.