

ХАРАКТЕРИСТИКИ СИЛОВЫХ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ В ПОЛЯХ КОРПУСКУЛЯРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

В. Н. Устюжанинов, Т.Н. Фролова

Установлены основные закономерности деградации характеристик силовых биполярных транзисторов в условиях действия корпускулярных излучений.

Оптимизация параметров физико – топологических моделей силовых приборов различных типов, включая структуры *IGBT*, возможна лишь на основе адекватных математических моделей. Актуальность подобных задач возрастает при необходимости учета влияния внешних факторов, в частности радиационных воздействий, вызывающих эффекты смещения. Обычно используемые расчетные оценки электрических параметров биполярных транзисторов получены из модели Эберса – Мола для относительно низких уровней инжекции и классического описания *VAX p-n* – переходов [1]. Особенности работы силовых транзисторов требуют учета влияния режимов с предельно высокими уровнями инжекции, коммутируемых токов и напряжений на электрические параметры и характеристики приборов. Влияние режимных факторов особенно важно учитывать в условиях действия корпускулярных излучений, когда эффекты режимной и радиационной деградации электрических параметров силовых биполярных транзисторов (*СБТ*) обуславливают развитие параметрических или необратимых отказов.

Одним из следствий высокого уровня инжекции является линеаризация прямой ветви *VAX p-n* – перехода в составе структуры силового биполярного транзистора (*СБТ*), обусловленная падением напряжения на распределенном сопротивлении базы при протекании прямого тока. В [1] прямая ветвь *VAX* эмиттерного перехода при высоких уровнях инжекции для кремния моделируется зависимостью

$$I = I_{pn} e^{\frac{U}{2u_T}}, \quad (1)$$

где U – напряжение прямого смещения *p-n* – перехода, u_T – тепловой потенциал, I_{pn} – характеристический ток при высоких уровнях инжекции. Расчет значений характеристического тока по данным [1] в [2] для *p-n* переходов с «тонкой» базой приводит к оценке

$$I_{pn} = \frac{2Sq n_i \sqrt{u_T \mu_p D_p}}{d \left[1 - \frac{N_d}{N_a} b (1 + \delta) \right]}, \quad (2)$$

где N_a – концентрация акцепторных примесей в p^+ - области, N_d – концентрация донорных примесей в *n* – области, $b = \mu_n / \mu_p$ – отношение подвижностей электронов и дырок в базовой области, δ – уровень инжекции,

$$\delta \cong \frac{\Delta p(0)}{n_0},$$

$\Delta p(0)$ – граничная концентрация неравновесных дырок в базе при протекании прямого тока I , n_0 – равновесная концентрация электронов в базе, S – площадь сечения области базы, d – толщина базы, n_i – концентрация носителей в собственном кремнии, q – заряд электрона, μ_p – подвижность дырок в базовой области, D_p – коэффициент диффузии дырок.

С учетом падения напряжения на базовой области транзистора при протекании коллекторного тока выражение (1) принимает вид

$$I = I_{pn} e^{(U - I r_\delta) / 2u_T}, \quad (3)$$

где r_δ – распределенное сопротивление базовой области. Представление прямой ветви *VAX* трансцендентным уравнением (3) значительно усложняет количественные оценки влияния высоких уровней инжекции на электрические параметры транзистора.

Преобразование (3) к виду

$$\ln \left(\frac{I}{I_{pn}} \right) = \frac{U - I r_\delta}{2u_T} \quad (4)$$

позволяет использовать степенной ряд

$$\ln x = 2 \left[\frac{x-1}{x+1} + \frac{(x-1)^3}{3(x+1)^3} + \frac{(x-1)^5}{5(x+1)^5} + \dots \right] \quad (5)$$

и представление отношения токов в степенной форме

$$\frac{I}{I_{pm}} = m \cdot 10^r, \quad (6)$$

где $2 \leq m \leq 9$, для приведения (3) к более простому виду. Из (6) следует уравнение

$$\ln(I/I_{pm}) = 2,3r + \ln m. \quad (7)$$

При условии $2,3r > \ln m$ или $r > 1$ можно ограничиться первым членом ряда (5), что позволяет представить (7) в виде

$$\ln(I/I_{pm}) = 2,3 \left(r + \frac{m-1}{m+1} \right). \quad (8)$$

Максимальная относительная погрешность аппроксимации (7) выражением (8) при $m=9, r=1$ не превышает уровня 0,09.

Из (4) и (8) следует

$$U = 4,6\varphi_T \left(r + \frac{m-1}{m+1} \right) + Ir_o, \quad (9)$$

где начальное значение распределенного сопротивления области базы $r_o = d/\mu_n qS$. Параметры μ, n - соответственно подвижность и концентрация основных носителей в области базы. Соотношение (9) определяет прямую ветвь *VAX* силового диода с учетом влияния уровня инжекции и падения напряжения на базовой области

$$U = 4,6\varphi_T \left(r + \frac{m-1}{m+1} \right) + \frac{dI}{(\mu_n n + \mu_p p)qS}, \quad (10)$$

где μ_p - подвижность неосновных носителей - дырок, генерируемых протекающим током I , в базовой области силового транзистора, p - концентрация неравновесных дырок, определяемая для «тонкой» базы выражением

$$p = \frac{I\tau}{qSd}. \quad (11)$$

Расчеты по (11) показывают, что для силовых транзисторов концентрация неосновных неравновесных носителей в базе всегда значительно превышает концентрацию основных равновесных, что отражается условием $bN_a/q \ll 1$. В результате уравнение (10) принимает вид

$$U = 4,6\varphi_T \left(r + \frac{m-1}{m+1} \right) + \frac{d^2}{\mu_p \tau}. \quad (12)$$

Для реальных значений параметров всегда выполняется условие

$$\left(r + \frac{m-1}{m+1} \right) \gg \frac{d^2}{\tau\mu_p},$$

что позволяет представить прямую ветвь *VAX* силового диода уравнениями

$$U = 4,6\varphi_T \left(r + \frac{m-1}{m+1} \right), \quad I = I_{pm} m 10^r, \quad (13)$$

где $2 \leq m = 10^{-r} \frac{I}{I_{pm}} \leq 9$ - нормирующий коэффициент.

Параметрическое представление прямой ветви *VAX* силового диода отражает особенности процессов переноса носителей заряда при высоких уровнях инжекции и обеспечивает возможность определения уровней прямых токов и напряжений в пределах каждой декады наиболее простым способом. Оно допускает реализацию различных расчетных схем. В частности для заданного уровня

прямого тока и прогнозируемого значения характеристического тока определяется значение номера r декады, в пределах которой соответствующим перебором $2 \leq m \leq 9$ определяются соотношения между токами и напряжениями для разных уровней инжекции:

$$\left(\frac{I}{I_{pn}} \right)_r \Leftrightarrow [r] \Leftrightarrow (U_m).$$

Модель Эберса – Мола для транзистора, включенного по схеме с $ОБ$, позволяет представить семейство коллекторных характеристик в обобщенном виде [1]

$$I_K = \alpha_N I_E - I_{pn} \left(e^{U/U_T} - 1 \right). \quad (14)$$

С учетом (13) и оценки коэффициента передачи тока эмиттера α_N в [2] для нормального активного режима функционирования коллекторные характеристики (14) принимают вид

$$I_K = \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{d}{L} \right)^2 \right] \left[1 - \frac{N_d}{N_a} b(1 + \delta) \right] I_{pn} m 10^r, \quad (15)$$

а напряжение U_{EB} рассчитывается по (13).

Включение силового транзистора по схеме с $ОЭ$ сопровождается преобразованием коллекторной характеристики к виду [2]

$$I_K = B \left[I_B + \frac{2Sq n_i \sqrt{u_T \mu_p D_p}}{d \left[1 - \frac{N_d}{N_a} b(1 + \delta) \right]} \right], \quad (16)$$

где B – интегральный коэффициент усиления тока базы, I_B – ток базы, задаваемый внешними цепями смещения.

Модели (15) и (16) позволяют получить количественные оценки уровней деградации электрических параметров силовых транзисторов, включенных по схеме с $ОЭ$ и $ОБ$, при воздействии корпускулярных излучений. Известно, что основным радиационно – чувствительным первичным параметром транзистора является время жизни τ неосновных носителей в базовой области и, в значительно меньшей степени, – удельное объемное сопротивление ρ этой области. Используя известную модель радиационного повреждения времени жизни [3]

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + K_\tau F, \quad (17)$$

где τ_0 – начальное значение времени жизни, K_τ – коэффициент корпускулярного повреждения времени жизни, F – интегральный поток, с учетом (17) уравнение (15) можно представить в виде

$$I_{KF} = \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{d}{L} \right)^2 \right] \left[1 - \frac{N_d}{N_a} b(1 + \delta) \right] I_{pn} m_F 10^r, \quad (18)$$

где m_F – эквивалентное значение параметра m , учитывающее снижение уровня коллекторного тока силового транзистора в результате деградации времени жизни неосновных носителей в области базы в соответствии с (17).

Количественная оценка параметра m_F может быть получена из условия пропорционального уменьшения заряда неосновных неравновесных носителей (HH) в базе, создаваемых коллекторным током за среднее время пролета τ_α [1],

$$\tau_\alpha = t_d = \frac{d^2}{2D_p} = \tau(1 - \alpha_0), \quad (19)$$

тонкой базы силового транзистора, при наличии и отсутствии облучения. С учетом (17) это условие может быть представлено в виде

$$m_F = \frac{m}{1 + K_\tau F \tau_0}. \quad (20)$$

Радиационная зависимость коэффициента передачи тока эмиттера (14), (15) является, в первую очередь, следствием деградации коэффициента переноса α_0 , и, в меньшей степени, - результатом изменения коэффициента инжекции эмиттера. Представление его в виде

$$\alpha_F = \gamma \alpha_{0F} = \gamma \left(1 - \frac{d^2}{2D\tau_F} \right)$$

позволяет, с учетом (17), определить радиационную зависимость

$$\alpha_F = \gamma \alpha_0 (1 - K_\alpha F), \quad (21)$$

где параметр радиационного повреждения коэффициента переноса тока эмиттера

$$K_\alpha = \frac{d^2}{2D\alpha_0} K_\tau. \quad (22)$$

Учитывая (19), оценку (22) можно представить в виде

$$K_\alpha = \frac{\tau_0}{B_0} K_\tau. \quad (23)$$

где B_0 - начальное значение интегрального коэффициента усиления тока базы при включении силового транзистора по схеме с *ОЭ*. С учетом (23) и режимной зависимости коэффициента инжекции эмиттера радиационная зависимость коэффициента передачи тока эмиттера принимает вид

$$\alpha_F = \alpha_0 \left[1 - \frac{N_d}{N_a} b(1 + \delta) \right] \left(1 - \frac{\tau_0}{B_0} K_\tau F \right). \quad (24)$$

Радиационная зависимость интегрального коэффициента усиления тока базы для схемы с *ОЭ* может быть установлена, используя определение этого параметра и оценки (21) – (24)

$$B(F) = B_F = \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F} = B_0 \left(\frac{1 - \alpha}{\alpha} \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F} \right).$$

После преобразований зависимость принимает вид

$$B_F = B_0 [1 - K_B F], \quad (25)$$

где коэффициент повреждения K_B определяется соотношением

$$K_B = \frac{K_\alpha}{1 - \alpha(1 - K_\alpha F)} = \frac{K_\alpha}{1 - \alpha_F}, \quad (26)$$

где K_α определяется по (23).

Соотношения (20) – (26) показывают, что радиационная зависимость времени жизни *НН* определяет меру деградации параметров α_0 и B_0 силового транзистора. Использование этих моделей приводит к расчетным оценкам радиационной деградации основных параметров транзисторов по известному изменению времени жизни неосновных носителей. Определение допустимой меры деградации времени жизни *НН* значением показателя

$$k = \frac{\tau_F}{\tau_0}, \quad (27)$$

позволяет рассчитать интегральный поток нейтронов, вызывающий такое изменение времени жизни, по

$$F_\tau = \frac{1 - k}{k K_\tau \tau_0}, \quad (28)$$

а повреждающее действие излучения на коэффициент передачи тока эмиттера с учетом (23), (24) и (27) представить соотношением

$$\alpha_F = \alpha_0 \left[1 - \frac{N_d}{N_a} b(1 + \delta) \right] \left(1 - \frac{1-k}{kB_0} \right). \quad (29)$$

Численный анализ (29) показывает что, при прочих равных условиях, относительные изменения коэффициента передачи тока эмиттера значительно меньше соответствующих изменений времени жизни (17). Из (25), (26) и (28) находится радиационная зависимость коэффициента усиления тока базы для схемы с *ОЭ*

$$B_F = k(B_0 + 1) - 1. \quad (30)$$

Из (29) и (30) следует соотношение

$$\frac{\alpha_F}{B_F} = \frac{\alpha_0}{B_0} \frac{1}{k} \left[1 - \frac{N_d}{N_a} b(1 + \delta) \right]. \quad (31)$$

Приведенные соотношения показывают, что введение критерия (27), как меры радиационного повреждения времени жизни *НН*, позволяет установить зависимости между показателями радиационной деградации коэффициентов передачи тока эмиттера и базы для включения силового транзистора по схеме с *ОЭ* и *ОБ*. В конечном итоге формальные модели (27) – (31) позволяют определить расчетные значения показателей радиационной стойкости силовых биполярных транзисторов в условиях действия режимных и внешних факторов.

Одним из важных показателей качества силовых биполярных транзисторов, часто ограничивающих возможность использования их в конкретных приложениях, является величина падения напряжения в открытом состоянии. В значительной степени эта характеристика определяется особенностями прямой ветви *ВАХ* эмиттерного перехода. Известно [3], что при воздействии квантовых излучений радиационная деградация прямой ветви *ВАХ* кремниевых диодов проявляется в увеличении падения напряжения. Такие процессы в силовых приборах сопровождаются повышением рассеиваемой мощности и температуры перегрева, т.е. появлением предпосылок для развития необратимых отказов.

В рамках предложенной модели радиационная зависимость напряжения прямого смещения силового диода определяется по (13) в виде

$$U_F = 4,6u_T \left(r + \frac{m_F - 1}{m_F + 1} \right), \quad (32)$$

где параметр m_F рассчитывается по (20). С учетом (28) оценка радиационной зависимости прямого падения напряжения на силовом диоде принимает вид

$$U_F = 4,6u_T \left(r + \frac{km - 1}{km + 1} \right). \quad (33)$$

Из (33) следует, что особенно заметные изменения напряжения прямого смещения в пределах декады происходят при начальных значениях m и малых k , когда выполняется условие $km \rightarrow 1$. Сопоставление (13) и (33) позволяет определить количественную меру эффективности влияния радиационных и режимных факторов на величину напряжения прямого смещения силового диода

$$K_U = \frac{(m+1)[mk(r+1) + (r-1)]}{(mk+1)[m(r+1) + (r-1)]}. \quad (34)$$

Анализ (34) показывает, что в режиме больших прямых токов, когда $r > 2$, зависимость $U(F)$ практически исчезает даже при значениях интегральных потоков, обуславливающих значения $k \leq 0,5$.

Приведенные результаты анализа особенностей функционирования силовых биполярных транзисторов в условиях воздействия корпускулярных излучений показали существование формальных зависимостей между коэффициентами радиационной деградации времени жизни *НН* и коэффициентами передачи тока эмиттера и базы. Это создает достаточные условия для разработки расчетных методов определения показателей радиационной стойкости. Другим важным выводом представляется заключение об ослаблении влияния стационарных полей корпускулярных излучений на основные электрические параметры силовых транзисторов на фоне значительной режимной деградации этих параметров.

Литература

1. Степаненко И. П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. М: Энергия, 1967.

2. Устюжанинов В.Н, Фролова Т.Н. Параметры силовых биполярных транзисторов в составе NPT IGBT в условиях действия ионизирующих излучений // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2007. Вып. 1-2. С. 24 – 28.

3. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники / В. М. Кулаков, Е. А. Ладыгин, В. И. Шаховцов и др.; Под ред. Е. А. Ладыгина. – М.: Сов. радио, 1980.- 224 С.

ВАНТ, Вып. 4, 2009, с. 11 -