

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОДИНОЧНЫХ ЭФФЕКТОВ ИНВЕРТИРОВАНИЯ ЛОГИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ В БИПОЛЯРНЫХ МИКРОСТРУКТУРАХ ПРИ ДЕЙСТВИИ ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

В.Н. Устюжанинов

Разработана расчетная модель эффектов инвертирования состояний логических элементов для биполярных цифровых микроструктур при воздействии тяжелых заряженных частиц космического пространства, учитывающая электрические режимы и топологические нормативы микросхем.

Ключевые слова: тяжелые заряженные частицы, одиночные эффекты, инвертирование логических состояний.

Устранимые одиночные эффекты (ОЭ) действия тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) космического пространства (КП) на цифровые микросхемы часто проявляются в виде кратковременной инверсии состояний бистабильных элементов (SEU) в составе цифровых микроструктур. Такие эффекты могут регистрироваться в виде ложных переходов из единичного в нулевое (10) или из нулевого в единичное (01) состояние на информационных выходах отдельных логических элементов (ЛЭ), а так же микросхем или функциональных модулей в составе цифровых структур. Частота и вид ложных переключений на уровне ЛЭ определяет значение этого показателя на выходах функциональных узлов и блоков. Достижение критических значений частоты сбойных событий рассматривается как отказ, ограничивающий длительность срока активного существования (САС) космических аппаратов (КА).

Одним из условий регистрации рассматриваемых ОЭ на информационных выходах цифровых микросхем при действии ТЗЧ является генерация импульсов ионизационных токов и напряжений с критическими значениями амплитуды в структуре отдельных логических элементов. Пороговые уровни генерируемых ТЗЧ сигналов определяются по передаточным характеристикам ЛЭ и транзисторных каскадов в его составе. Оценки амплитудно-временных характеристик импульсов ионизационных токов и напряжений, обусловленных действием одиночных ТЗЧ, можно получить в результате решения краевых задач электропроводности для области базы биполярных транзисторов в составе ЛЭ, с учетом особенностей электрических режимов функционирования. Многообразие различных вариантов постановки краевых задач, в условиях ограниченных возможностей нахождения решений в замкнутом виде, обуславливают необходимость поиска компромиссных вариантов постановки и решения таких задач, обеспечивающих получение приближенных решений с приемлемой погрешностью.

Постановка краевой задачи электропроводности для области базы эпитаксиально-планарного биполярного транзистора требует определения временных, топологических и зарядовых характеристик области локализации объемного заряда неравновесных носителей (НН), генерируемых налетающей частицей. Под временными понимаются соотношения между длительностью времени пролета тяжелой частицей базовой области t_0 и временем диффузионного переноса через толщу базы неосновных неравновесных носителей t_5 в нормальном активном режиме функционирования транзистора. Топологические характеристики определяют геометрию области локализации неравновесной концентрации неосновных носителей после пролета частицы. Концентрационно-зарядовые характеристики области локализации неравновесного объемного заряда определяют уровень ионизационных токов и амплитудно-временные параметры ложных сигналов, генерируемых ТЗЧ в структуре биполярного интегрального транзистора. В результате решения краевой задачи определяется мгновенное значение заряда НН, форма и длительность импульса ионизационного тока и потенциала коллектора транзистора – мишени, а так же параметры ложных сигналов на информационном выходе ЛЭ.

Закономерности взаимодействия ТЗЧ с элементами структуры планарного интегрального транзистора можно установить на примере протонов с широкими пределами изменения энергий, характерных для галактических космических лучей [1]. Известные аналитические оценки и табличные значения средних пробегов протонов в составе жесткого протонного излучения [2] позволяют определить, обусловленный преимущественно ионизационными потерями энергии (dE_p/dx) , средний пробег протона R с энергией E_p в кремнии. Поэтому для слоя базы толщиной d , простреливаемого налетающим протоном, тем же способом определяется энергия E_{p1} частицы на нижней границе базовой области по величине пробега $R - d$. Обусловленное потерей энергии $\Delta E_p = E_p - E_{p1}$ снижение скорости частицы в приближении равнозамедленного движения позволяет определить время пролета в виде оценки

$$t_0 = \frac{2d}{v_p + v_{p1}}, \quad (1)$$

где v_p, v_{p1} – скорости налетающей и вылетающей частицы [2].

Численный анализ (1) для протонов, с относительно низкими энергиями (единицы МэВ), и характерных для интегральных транзисторов значений толщины базы в единицы микрометров, приводит к оценкам отношения $t_0/t_1 \approx 10^5 \dots 10^7$. Это позволяет рассматривать процесс генерации НН в базовой области транзистора тяжелой частицей, как мгновенный. Следствием является возможность постановки и решения краевой задачи электропроводности для базы транзистора при пересечении ее треком ТЗЧ с нормальной ориентацией к поверхности кристалла в упрощенном варианте.

Для определения количественных характеристик импульса ионизационного тока, генерируемого ТЗЧ, необходимо знать величину генерируемого заряда и закономерности пространственно-временного распределения концентрации неосновных неравновесных носителей в базовой области транзистора с учетом режима его функционирования. Заряд НН определяется по величине ионизационных потерь в базе с учетом энергии образования пары носителей $3\Delta E_3$, где ΔE_3 - ширина запрещенной зоны полупроводника. Для кремния

$$Q_{БИ} = 4,6 \cdot 10^{-14} d\rho \left(\frac{dE_p}{dx} \right) = 1,1 \cdot 10^{-10} d \left(\frac{dE_p}{dx} \right), \quad (2)$$

где ρ – объемная плотность полупроводника, а ионизационные потери энергии измеряются в $МэВ \cdot кг^{-1} \cdot м^2$.

Импульсы ионизационного тока и напряжения, т.е. ложного сигнала с определенными амплитудно-временными характеристиками, при достижении некоторого критического уровня, воспринимаются другими элементами цифровой структуры в качестве информационного сигнала. Параметры его зависят не только от пространственно-временного распределения заряда (2) в области базы, но и от режима функционирования интегрального транзистора в момент воздействия ТЗЧ. В нормальном активном режиме, когда эмиттерный переход смещен прямо, а коллекторный – в обратном направлении, концентрация генерируемых ТЗЧ НН маскируется режимной концентрацией неравновесных носителей с максимумом у эмиттерного перехода и нулевым значением у коллекторного. Это означает, что воздействие ТЗЧ на открытый транзисторный ключ не сопровождается сбойными эффектами. Одиночный эффект в виде смены единичного состояния потенциала коллектора низким уровнем логического нуля, $1 \rightarrow 0$, может иметь место только в структуре транзистора с обратносмещенными эмиттерным и коллекторным переходами, т.е. в режиме отсечки коллекторного тока.

Особенности пространственно-временного распределения НН в активной части базовой области планарного биполярного транзистора обусловлены процессами диффузионного переноса генерируемых налетающей частицей носителей заряда в направлении x , нормальном по отношению к границам эмиттерного и коллекторного переходов, и в поперечном направлении y , т.е. параллельно плоским границам переходов. Это означает, что строгие закономерности могут быть установлены в результате решения двумерного уравнения непрерывности, что сопряжено с большими математическими трудностями. Существенные различия размерностей активной базовой области по координатам x и y вместе с закономерностями, вытекающими из оценки (1), создают предпосылки для раздельного исследования процессов диффузионного переноса носителей по каждой координате и последующего определения интегрального эффекта.

Практическая реализация такого алгоритма предусматривает постановку и решение двух краевых задач. Первая задача имеет целью определение закономерностей распределения концентрации НН в базе транзистора в процессе боковой диффузии с учетом топологии базовой области. В упрощенном варианте рассматривается случай, когда налетающая ТЗЧ пересекает центр базовой области, а диффузионный перенос неравновесных носителей происходит симметрично в периферийные области. Для случаев, когда размер базы по оси y не менее значения удвоенной диффузионной длины, задача пространственно-временного распределения концентрации НН может рассматриваться как электронный аналог задачи Коши для распространения теплового импульса в виде дельта - функции в бесконечном стержне [3].

Формальная постановка задачи Коши для базовой области транзистора предусматривает нахождение функции пространственно – временного распределения концентрации P неравновесных носителей в результате решения уравнения

$$\frac{\partial P}{\partial T} = D \frac{\partial^2 P}{\partial Y^2}, \quad (3)$$

где $T = \frac{t}{\tau}$, $Y = \frac{y}{L}$ - нормированные переменные времени и координаты, τ - время жизни НН, $L = \sqrt{D\tau}$ - диффузионная длина НН, D - коэффициент диффузии НН в базовой области. Уравнение (3) решается при начальном условии $P(Y,0) = P_0$. Решение (3) имеет вид

$$P(Y,T) = P_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{Y}{2\sqrt{T}} \right) \right), \quad (4)$$

где erf - функция интеграла ошибок. Для анализа решения (4) необходимо учесть физически обусловленные пределы изменения аргументов: $0 \leq T \leq 1$, $0 \leq Y \leq 1$. Это означает, что предельное значение аргумента функции ошибок для боковых поверхностей цилиндрической области локализации неравновесного заряда в активной базовой области транзистора не может превышать уровня

$$\frac{Y}{2\sqrt{T}} \leq 0,5,$$

что позволяет воспользоваться аппроксимацией $\operatorname{erf}X \cong X$. В результате уравнение (4) принимает вид

$$P(Y,T) \cong P_0 \left(1 - \frac{Y}{2\sqrt{T}} \right). \quad (5)$$

Область существования решений (4) и (5) ограничена топологическими особенностями тонкой базовой области планарного биполярного транзистора. Процессы рассасывания НН обусловлены механизмом диффузионного переноса носителей на границы обратносмещенного эмиттерного и коллекторного перехода по оси x . Поэтому эффекты боковой диффузии могут проявляться лишь на временном интервале с длительностью t_σ , равной времени диффузионного переноса носителей через толщину базы. С учетом этого, оценка концентрации НН на границе области локализации принимает вид

$$P\left(\frac{d}{L}, \frac{t_\sigma}{\tau}\right) \cong 0,5P_0. \quad (6)$$

Оценка (6) позволяет представить ионизационный эффект воздействия ТЗЧ на область активной базы планарного транзистора как процесс формирования области локализации НН в виде кругового цилиндра диаметром $2d$ и высотой $0,75P_0$. В результате, генерируемый одиночной ТЗЧ заряд НН в базовой области интегрального планарного транзистора определяется выражением

$$Q_{БИ} \cong 3,7 \cdot 10^{-19} d^3 P_0. \quad (7)$$

Уравнение (7) получено для случая нормального падения ТЗЧ на граничную поверхность базовой области планарного транзистора. Падение частицы под произвольным углом $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$ к поверхности кристалла сопровождается увеличением объема ионизированной области, «вырезаемой» из области базы в виде трубки постоянного диаметра $2d$. Топологический анализ приводит к результату

$$Q_{БИ} = 3,7 \cdot 10^{-19} d^3 P_0 / \sin \alpha, \quad (8)$$

где P_0 определяется, с учетом (2), соотношением

$$P_0 = 2,2 \cdot 10^5 \frac{(dE_p/dx)}{d^2}. \quad (9)$$

Из (8) и (9) следует расчетное определение заряда в области активной базы для кремния

$$Q_{БИ} = 9 \cdot 10^{-11} d \left(\frac{dE_p}{dx} \right) / \sin \alpha. \quad (10)$$

Уравнение (10) устанавливает пропорциональную зависимость между толщиной базы d и зарядом, генерируемым ТЗЧ. Линейная зависимость от параметра d характерна и для режимных токов и зарядов базы транзисторов, работающих в ключевых режимах в составе цифровых микросхем. Такие закономерности позволяют использовать соотношения между ионизационными и режимными зарядами, а также соответствующими токами, для оценки пороговых значений спектрально-энергетических характеристик ТЗЧ, вызывающих ОЭ в структуре цифровых микросхем.

Оценки (7) – (10) показывают, что ионизационные эффекты действия ТЗЧ в ряде случаев эквивалентны процессам равномерной ионизации части или всей базовой области транзистора, в зависимости от угла падения частицы. Практически значимым следствием этого является вывод о возможности разработки экспериментальных методик исследования действия ТЗЧ в наиболее опасных ситуациях латеральной ориентации трека частицы с использованием гамма-импульсного облучения малой длительности.

«Точки роста» одиночных эффектов в цифровых микроструктурах позиционируются в виде конкретных транзисторов в составе логических элементов, как элементарных ячеек цифровых структур. Схемотехнические решения ЛЭ в составе ИМС на базе различных типов логики регламентируют топологические характеристики, включая толщину и площадь базы, а также электрические режимы функционирования каждого транзистора. Поэтому амплитуды режимных токов, площади и объемы области базы интегральных транзисторов по определению тесно увязаны между собой. Такая особенность расширяет возможности аналитических исследований закономерностей проявления ОЭ, в частности с использованием принципов масштабирования и типовых соотношений между токами, объемами и зарядами для режимных и радиационных условий.

Генерируемый ТЗЧ ионизационный заряд (10) в базовой области транзистора в режиме отсечки является источником ионизационного тока, замыкающегося через вывод базы и внешнюю цепь. В условиях рассмотренных ограничений на размеры области локализации ионизационного заряда (10) динамика процессов рассасывания заряда ионизационным током определяется временем диффузионного переноса НН через толщину базы

$$t_o = \frac{d^2}{D}. \quad (11)$$

С учетом (11) связь между ионизационным током и зарядом базы может быть представлена соотношением

$$I_{БИ} = \frac{Q_{БИ} D}{d^2}. \quad (12)$$

Уравнения (10) и (12) ограничивают ионизационный ток базы уровнем

$$I_{БИ} = \frac{9 \cdot 10^{-11} D}{d \sin \alpha} \left(\frac{dE_p}{dx} \right). \quad (13)$$

Первичный импульс ионизационного тока базы (13) является причиной формирования вторичного импульса тока в коллекторной цепи транзистора [4]

$$I_{КИ} \cong I_{БИ} h_{21Э}, \quad (14)$$

где $h_{21Э}$ - коэффициент усиления тока базы транзистора при включении с ОЭ. В результате, перепад напряжения на коллекторе биполярного транзистора, обусловленный действием ТЗЧ, может быть рассчитан, с учетом (13) и (14), по формуле

$$\Delta U_K = 9 \cdot 10^{-11} D h_{21Э} R_K \frac{(dE_p/dx)}{d \sin \alpha}, \quad (15)$$

где R_K – сопротивление в коллекторной цепи транзистора.

Уравнение (15) устанавливает влияние основных параметров транзистора ($h_{21Э}$, d), нагрузочного резистора в цепи коллектора и внешнего фактора, в виде спектрально-энергетических характеристик ТЗЧ, на перепады потенциала коллектора транзистора – мишени. Обобщенный анализ передаточных характеристик ЛЭ, в частности ТТЛ, ТТЛШ – типа, показывает, что при значениях $\Delta U_K = 0,3 - 0,5 V$, относительно пороговых уровней логического нуля или единицы для одного из транзисторов в составе ЛЭ, происходит смена логического состояния информационного выхода логического элемента. Практически важным выводом из (15) является заключение о потенциально низкой стойкости к действию ТЗЧ элементной базы на основе субмикронных технологий с малыми значениями конструкторских нормативов, поскольку минимизация элементов топологической структуры, включая толщину базы, сопровождается еще и увеличением параметра $h_{21Э}$. При прочих равных условиях сокращение конструкторского норматива приводит к непропорционально быстрому росту амплитуды импульсов ионизационных токов и напряжений.

Абсолютная оценка (15) в большей степени ориентирована на решение задач анализа стойкости конкретных схемотехнических решений. В частности, из (15) следует, что наибольшей чувствительностью к действию ТЗЧ характеризуются каскады в составе логических элементов, работающие с минимальными амплитудами режимных коллекторных токов и, соответственно, с большими сопротивлениями нагрузочных резисторов R_K . Для ряда прикладных задач (выбор

электронной компонентной базы, сравнительный анализ стойкости ИМС в составе одной серии, определение «слабого звена в составе ЭКБ» и др.) целесообразно адаптировать рассматриваемую концепцию к задачам анализа относительной стойкости ЭКБ, с использованием косвенных признаков в виде электрических параметров микросхем. При этом в качестве критериев могут использоваться соотношения ионизационных и режимных зарядов, а также соответствующих перепадов потенциалов в характеристических точках функциональных узлов, включая информационные входы и выходы.

Возможность решения подобных задач может быть реализована, если известны зависимости между режимными токами и зарядами НН в базовой области транзистора. В соответствии с основными положениями метода заряда [5] и с учетом специфики работы планарных интегральных транзисторов в цифровых микросхемах (включение с ОЭ, высокий уровень инжекции, относительно тонкая база) неравновесный заряд неосновных носителей в базе определяется соотношением

$$Q_{БР} = \frac{I_{КР}}{h_{21Э}} \frac{d^2}{2D}, \quad (16)$$

где $I_{КР}$ – амплитуда коллекторного тока. Для конкретного схмотехнического варианта эта величина ограничивается очевидным условием

$$I_{КР} = \frac{U_{П} - U_{ТР}}{R_{К}}, \quad (17)$$

где $U_{П}$ – напряжение источника питания, $U_{ТР}$ – падение напряжения на транзисторе, $R_{К}$ – суммарное сопротивление в цепи коллектора. Из (10), (16) и (17) следует соотношение между режимным и ионизационным зарядом

$$\frac{Q_{БР}}{Q_{БИ}} = 5,5 \cdot 10^9 \frac{U_{П} - U_{ТР}}{h_{21Э} R_{К}} \frac{d \sin \alpha}{D \left(\frac{dE_P}{dx} \right)}. \quad (18)$$

Оценка (18) для транзисторов с минимальными амплитудами коллекторных токов в составе ЛЭ может использоваться как системный критерий стойкости цифровых биполярных микроструктур по одиночным эффектам действия ТЗЧ. Она позволяет сопоставлять показатели стойкости микросхем в составе одной или различных серий, выполняемых на основе одинаковых или отличающихся технологий. Возможность получения количественных оценок предельных значений этого отношения позволяет решать ряд прикладных задач обеспечения стойкости аппаратных средств КА. В частности, критерий (18) позволяет определить возможность и целесообразность дополнительных затрат энергетических ресурсов для обеспечения стойкости наиболее ответственных функциональных модулей. Это соотношение можно использовать для относительной оценки стойкости различных блоков в составе РЭА КА, отличающихся электрическими режимами функционирования и технологиями применяемой ЭКБ. Выражение (18) может быть использовано для выравнивания показателей относительной стойкости узлов, модулей и блоков путем оптимизации компоновочных решений РЭА КА с учетом фактора взаимной ориентации функциональных модулей и блоков в условиях прогнозируемых значений угловых распределений α ТЗЧ для различных источников в космическом пространстве.

Определение соотношений между режимными и ионизационными зарядами (18) на основе минимального информативного набора режимных ($U_{П}$, $U_{ТР}$), схмотехнических ($h_{21Э}$, $R_{К}$) и топологических (d) параметров в масштабах отдельного транзистора позволяет установить системные зависимости между относительными оценками стойкости ЭКБ к действию внешних факторов и ее электрическими параметрами. Это создает предпосылки, в виде необходимых условий, для выбора ЭКБ с учетом требований к показателям надежности и оценки дополнительных затрат энергоресурсов, как вынужденной меры ее обеспечения. Применение типовых схмотехнических решений для ЛЭ, выполняемых по разным технологиям, обуславливает возможность определения амплитуд режимных токов для каждого транзистора в составе ЛЭ и, соответственно, его вклад в общий баланс энергопотребления. В частности, для ЛЭ ТТЛ – типа [6], подобная задача может быть решена в виде табличных данных, устанавливающих зависимости между потребляемой мощностью, амплитудами входных и выходных токов в состоянии логического нуля и логической единицы на информационном выходе, с относительными оценками стойкости по (18). Такой формат может быть реализован и для других типов логики.

Рассматриваемый подход создает предпосылки для сокращения объема экспериментальных исследований, поскольку позволяет ограничиться испытаниями типового ЛЭ в составе ИМС различных серий и типоминалов. Другим альтернативным вариантом, расширяющим возможности концептуального подхода, является возможная замена экспериментальных исследований стойкости к действию ТЗЧ испытаниями, с применением гамма-импульсного излучения.

Литература

1. 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.
2. Ширшов Л. Г. Ионизирующие излучения и электроника. – М.: Сов. радио, 1969. – 192 с.
3. Полянин А.Д. Справочник по линейным уравнениям математической физики. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 576 с.
4. Устюжанинов В.Н., Чепиженко А.З. Радиационные эффекты в биполярных интегральных микросхемах. – М.: Радио и связь, 1989. – 144 с.
5. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники : Учебное пособие для вузов / И.П. Степаненко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2004. – 488 с.
6. Применение интегральных микросхем в электронной вычислительной технике: Справочник / Р.В. Данилов, С.А. Ельцова, Ю.П. Иванов и др.; Под ред. Б.Н. Файзулаева, Б. В. Тарабрина. – М.: Радио и связь, 1987. – 384 с.

ВАНТ, Вып.2, 2010 г. С 23 – 27.