

УДК 621. 383. 2

РЕЖИМНАЯ И РАДИАЦИОННАЯ ДЕГРАДАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВЫХ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

В. Н. Устюжанинов, Т. Н. Фролова

Рассматривается совместное влияние эффектов режимной и радиационной деградации электрических параметров силовых биполярных транзисторов на динамические характеристики процессов переключения в условиях предельных уровней коммутлируемых токов и напряжений.

Динамические характеристики приборов силовой электроники, включая силовые биполярные транзисторы (*СБТ*), ограничивают достижимые значения рабочих частот, длительностей фронтов и спадов импульсов токов и напряжений. Такие параметры определяют эксплуатационную эффективность и надежность устройств силовой электроники, поскольку длительность переходных процессов переключения непосредственно влияет на величину рассеиваемой электрической и, соответственно, тепловой мощности, температуру перегрева кристалла и элементов конструкции силового модуля. Основные параметры силового биполярного транзистора, определяющие динамику переходных процессов: среднее время жизни неосновных неравновесных носителей (*НН*) в области базы τ , интегральный коэффициент передачи тока эмиттера при включении *СБТ* по схеме с *ОБ* α , интегральный коэффициент *B* усиления тока базы при включении *СБТ* по схеме с *ОЭ*, существенно зависят от электрических режимов функционирования транзисторов. Особенности процессов режимной деградации этих параметров, в частности зависимости их от уровней инжекции, рассмотрены в [1]. Результаты такого анализа позволяют прогнозировать снижение усилительных возможностей силовых транзисторов при сокращения длительностей переходных процессов смены состояний по мере повышения уровня инжекции. В значительной мере это является следствием сокращения времени жизни *НН* в области базы при предельно больших плотностях коллекторного тока.

В [2] установлены закономерности радиационной деградации указанных параметров при воздействии корпускулярных излучений. Полученные теоретические модели позволяют учитывать влияние как раздельного, так и совместного действия режимных и радиационных факторов на основные усилительные характеристики *СБТ*, что создает необходимые условия для анализа и оценки радиационной стойкости различных схмотехнических вариантов их применения.

Типовая структура силового биполярного транзистора вертикального типа и ключевые схемы на его основе представлены в [3]. Основная особенность такого конструктивного варианта *СБТ* – однородная многослойная структура с большими значениями отношений площади к толщине слоя для эмиттерной, базовой и коллекторной области обуславливает возможность адекватного математического моделирования нестационарных электрофизических процессов с учетом типичных для силовых приборов высоких уровней инжекции и действия радиационных факторов. Целью такого моделирования является определение основных закономерностей пространственно – временного распределения *НН* в базовой области в условиях действия сильных электрических полей и радиации для различных режимов переключения транзистора. Эти закономерности являются результатом решения краевых задач переноса заряда в базовой области с учетом влияния характеристик и режимов работы внешних электрических цепей. Динамические модели распределения *НН* необходимы для определения формы и длительности переходных токов и напряжений на разных этапах для разных режимов переключения силового транзисторного ключа.

Формальное определение параметров переходных процессов в структуре *СБТ* даже с учетом действия режимных и радиационных факторов является необходимым, но не достаточным условием определения электрических параметров ключевой схемы. Разнообразие схмотехнических решений и режимов функционирования силовых коммутационных устройств порождает соответствующее множество типов задач математического моделирования. В этих условиях представляется целесообразным анализ ограниченного набора (подмножества) типовых задач, имеющих аналитическое решение приемлемой сложности, с последующей интерпретацией его применительно к частным случаям.

Используемые расчетные модели для силовых транзисторных ключевых схем [3] основаны на применении уравнений зарядов, т.е. по умолчанию предполагают существование пропорциональной зависимости между зарядом, накопленным в исследуемой области транзистора, и протекающим током. При этом не учитываются топологические характеристики структуры и характеристики управляющих токов. В результате все возможные решения получают в виде экспоненциальных зависимостей, что явно не соответствует многообразию и сложности процессов в базовой области реальных транзисторных структур. Сигнал управления в виде импульса тока фиксированной амплитуды для ключевых схем на *СБТ* является частным и не типичным случаем, требующим, тем не менее, более строгого анализа, учитывающего электрическую толщину базы, влияние внутреннего электрического поля на процесс переноса *НН*, эффект модуляции проводимости и толщины базовой области и др.. Подобные особенности можно учитывать лишь в процессе анализа, основанного на решении краевых задач, что

требует реализации процедур классификации типов краевых задач применительно к схемотехническим особенностям различных ключевых устройств на основе *СБТ*.

Краевые задачи переноса *НН* в базовой области *СБТ* отличаются видом уравнения непрерывности, граничными и начальными условиями. Анализ показал, что задачи учета влияния режимных и радиационных факторов на процессы переноса заряда в базовой области силовых транзисторов могут ставиться и решаться на основе одного типа уравнения непрерывности. При этом особенности электрических режимов функционирования и влияния внешних факторов могут учитываться соответствующей модификацией уравнения непрерывности, граничных и начальных условий в составе краевой задачи. В частности, режимная зависимость первичных параметров транзистора учитывается подстановкой соответствующих зависимостей в решение линейной краевой задачи. Особенности схемотехнических решений и режимов функционирования ключевых схем учитываются назначением соответствующих граничных условий в составе краевой задачи. Ионизационные эффекты воздействующих излучений учитываются введением соответствующего элемента в уравнение непрерывности без изменения граничных и начальных условий. Эффекты радиационной деградации первичных параметров при воздействии корпускулярных излучений отображаются введением соответствующих зависимостей в решения, полученные для упрощенной краевой задачи на основе типового уравнения непрерывности. Сравнительный анализ показывает, что разнообразие вариантов постановки краевых задач не менее числа практически значимых прикладных задач расчета динамических параметров процессов переключения силовых ключей на биполярных транзисторах. Это создает предпосылки для обоснованного выбора типа краевых задач с учетом меры адекватности исследуемым процессам и возможности получения аналитического решения приемлемой сложности.

Рассматриваемый подход не является математически строгим. Однако результаты численного и аналитического моделирования подтверждают приемлемость погрешностей количественных оценок в подавляющем большинстве случаев. Для задач, не имеющих строгих аналитических решений, подобный подход является практически безальтернативным вариантом по отношению к методам численного моделирования. Эффективность практической реализации его определяется обоснованностью выбора вариантов уравнения непрерывности, граничных и начальных условий, наиболее точно отражающих особенности исследуемых эффектов при условии существования аналитических решений краевой задачи.

Первым этапом решения подобных задач является определение характеристик переходных процессов при работе ключа на активную нагрузку целью определения закономерности, длительности и постоянных времени процессов пространственно – временного распределения неосновных неравновесных носителей (*НН*) в области базы *СБТ*. Уравнение непрерывности для базовой области силового транзистора с внутренним электрическим полем имеет вид

$$\frac{\partial P(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 P(x,t)}{\partial x^2} + b \frac{\partial P(x,t)}{\partial x} - \frac{P(x,t)}{\tau}, \quad (1)$$

где $P(x,t)$ - функция пространственно – временного распределения неосновных неравновесных носителей в базе *СБТ*, D - коэффициент диффузии *НН* в области базы, $b = ED/\varphi$ - параметр, учитывающий влияние напряженности E внутреннего электрического поля в базе транзистора, $\varphi = kT/q$ - тепловой потенциал, k - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура, q - заряд электрона, τ - среднее время жизни *НН* в базовой области транзистора.

Уравнение (1) не учитывает процессы перезаряда барьерной емкости коллекторного перехода. Для силовых транзисторов длительность времени заряда барьерной емкости может составлять значительную часть переходного процесса нарастания коллекторного тока транзистора при включении из нейтрального состояния импульсом напряжения. Однако возрастающая сложность и нелинейность уравнения непрерывности в строгой постановке краевой задачи исключает возможность нахождения аналитического решения. Это обуславливает необходимость реализации других алгоритмов учета влияния барьерной емкости на динамику процессов переключения *СБТ*.

Уравнение (1) входит в состав различных краевых задач переноса заряда в *СБТ* для переходных процессов включения, переключения, выключения и др.. При этом адаптация задачи для конкретного процесса обеспечивается соответствующим назначением граничных и начальных условия. Применительно к особенностям формирователей импульсов управления возможны два предельных случая:

- управление режимом базовой цепи *СБТ* от источника с большим внутренним сопротивлением – генератора тока;
- управление источником с малым внутренним сопротивлением – генератора напряжения.

Формальная математическая интерпретация этих режимов осуществляется назначением соответствующих граничных условий [4]. Для режимов токового управления назначаются граничные условия второго рода

$$\frac{\partial P(0,t)}{\partial x} = -\frac{j}{qD}, \quad \frac{\partial P(d,t)}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

где j – плотность коллекторного тока. В общем случае условие для границы коллекторного перехода в (2) может быть представлено в виде, аналогичном первому условию, но с другим значением плотности тока. Для режимов потенциального управления базовой цепью *СБТ* граничные условия принимают наиболее простой вид

$$P(0,t) = P_1, \quad P(d,t) = 0, \quad (3)$$

где P_1 – концентрация *НН* на границе эмиттерного перехода *СБТ*. Второе граничное условие в составе (3) также может быть отлично от нуля.

Постановка краевой задачи предусматривает задание начального условия одного из видов

$$P(x,0) = 0, \quad P(x,0) = const, \quad P(x,0) = f(x). \quad (4)$$

Первое из условий (4) означает отсутствие заряда *НН* в любой точке базы с координатой x в начальный момент времени $t = 0$. Второе условие означает существование независимой от координаты начальной концентрации *НН*. Третье условие в составе (4) определяет закономерность распределения концентрации *НН* по координате в начальный момент времени.

Изложенное означает, что схемотехнические и режимные особенности функционирования ключевых схем на *СБТ* отображаются конкретной комбинацией условий (2) – (4) при неизменной конфигурации уравнения непрерывности (1). Число возможных комбинаций образует набор краевых задач переноса неосновных неравновесных носителей через базу силового биполярного транзистора, отличающихся сложностью уравнения непрерывности, граничных и начального условия. Ограниченные возможности получения аналитических решений известными методами [4], [5] сужают перспективы реализации рассматриваемого подхода. Нахождение приемлемых по сложности аналитических моделей переходных токов и напряжений возможно лишь для подмножества задач, отличающихся сочетаниями наиболее простых граничных и начальных условий. Анализ показывает, что во многих приложениях, мощность такого подмножества достаточна для решения основных задач переключения *СБТ* в различных режимах функционирования. Во всех случаях решения краевых задач отображают особенности переноса заряда в базовой области транзистора и характеризуют свойства силового ключа.

Решение краевой задачи с граничными условиями первого рода (3) и нулевым начальным условием, т.е. для режима потенциального управления генератором напряжения на стадии нарастания коллекторного тока, имеет вид

$$P(x,t) = P_1 \left\{ \frac{sh \frac{d-x}{\sqrt{D\tau}}}{sh \frac{d}{\sqrt{D\tau}}} - \frac{2}{d^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n\pi \sin \frac{n\pi x}{d}}{\frac{1}{D\tau} + \frac{n^2\pi^2}{d^2}} e^{-\left(1 + \frac{D\tau n^2 \pi^2}{d^2}\right) \frac{t}{\tau}} \right\}. \quad (5)$$

Для варианта тонкой базы, когда выполняется условие $d/L \leq 1$, выражение (5) упрощается до вида

$$P(x,t) = P_1 \left\{ 1 - \frac{x}{d} - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi x}{d}}{n} e^{-\left(\frac{L}{d}\right)^2 \frac{n^2 \pi^2 t}{\tau}} \right\}. \quad (6)$$

Численный анализ (6) показал, что бесконечный ряд быстро сходится в области малых времен. При этом число удерживаемых членов ряда сокращается в соответствии с условием

$$\frac{t}{\tau} \leq \frac{3}{n^2 \pi^2} \left(\frac{d}{L}\right)^2 = \frac{0,3}{n^2} \left(\frac{d}{L}\right)^2. \quad (7)$$

Из (7) следует, что для $n = 2$ и $d \approx L$ время достижения стационарного распределения *НН* в области базы уменьшается до значения $t/\tau \approx 0,075$, а выражение (6) принимает вид

$$P(x, t) = P_1 \left\{ 1 - \frac{x}{d} - \frac{2}{\pi} \left[e^{-\left(\frac{L}{d}\right)^2 \pi^2 \frac{t}{\tau}} \sin \frac{\pi x}{d} \left(1 + e^{-3\left(\frac{L}{d}\right)^2 \pi^2 \frac{t}{\tau}} \cos \frac{\pi x}{d} \right) \right] \right\}. \quad (8)$$

Анализ (8) показывает, что длительность процесса установления стационарного распределения можно определить из более строгого условия

$$\frac{2d}{x\pi} \left[e^{-\left(\frac{L}{d}\right)^2 \pi^2 \frac{t_1}{\tau}} \sin \frac{\pi x}{d} \right] \leq 0,05, \quad (9)$$

где t_1 - длительность времени установления стационарного распределения. Для координаты экстремума функции (8) $x = d/2$ условие (9) приводит к оценке

$$\frac{t_1}{\tau} = 0.33. \quad (10)$$

Из (8) следует, что максимальное значение градиента концентрации HH на границе базовой области, определяющее мгновенное значение плотности коллекторного тока, имеет место в начальный момент времени. Для оценки плотности коллекторного тока необходимо использовать производную по координате от функции распределения (8) в соответствии с уравнением

$$J = -qD \frac{\partial P(0, t)}{\partial x} = \frac{qDP_1}{d} \left\{ 1 + 2e^{-\left(\frac{L}{d}\right)^2 \pi^2 \frac{t}{\tau}} + 2e^{-4\left(\frac{L}{d}\right)^2 \pi^2 \frac{t}{\tau}} \right\}. \quad (11)$$

Из (10) и (11) следует, что в начальный момент времени происходит выброс коллекторного тока. Амплитуда выброса находится из условия

$$J_0 = -qD \frac{\partial P(0, 0)}{\partial x} = \frac{5qDP_1}{d}, \quad (12)$$

а стационарное значение плотности коллекторного тока определяется соотношением

$$J_\infty = -qD \frac{\partial P(0, \infty)}{\partial x} = \frac{qDP_1}{d}. \quad (13)$$

Оценки (12) и (13) получены для идеализированной модели с нулевым сопротивлением цепи формирования импульса управления. Результатом идеализации является вывод о существовании выброса тока на фронте импульса коллекторного тока с пятикратным превышением стационарного значения и длительностью, определяемой соотношением (10). Форма импульса тока задается выражением (11). Реальное значение амплитуды выброса определяется суммарным сопротивлением цепи, включая сопротивление базы транзистора. Тем не менее, в рамках идеализированной модели выявлена важная закономерность: минимизация внутреннего сопротивления источника сигнала приводит к сокращению длительности фронта и формированию выброса тока на фронте импульса. Это способствует ускорению перезаряда барьерной емкости коллекторного перехода и сокращению длительностей фронта импульса коллекторного тока и напряжения.

Спад импульса управляющего напряжения сопровождается переходным процессом рассасывания и рекомбинации неравновесных носителей в базе транзистора, определяющим характеристики спада импульса коллекторного тока и напряжения. Для определения параметров процесса переключения транзистора из режима прямого тока в нейтральное состояние необходимо решить краевую задачу, включающую уравнение (1) с нулевым значением напряженности электрического поля в базе, граничные условия

$$P(x, t) = P_2, \quad P(d, t) = 0 \quad (14)$$

и начальное условие

$$P(x, 0) = P_1 \left(1 - \frac{x}{d} \right), \quad (15)$$

совпадающее с решением (8) в стационарном режиме.

Решение краевой задачи для спада коллекторного тока имеет вид

$$P(x,t) = \frac{P_2 sh \frac{d-x}{\sqrt{D\tau}}}{sh \frac{d}{\sqrt{D\tau}}} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{P_1}{n\pi} - \frac{P_2 n\pi}{d^2 \left(\frac{1}{D\tau} + \frac{n^2 \pi^2}{d^2} \right)} \right) \sin \frac{n\pi x}{d} e^{-\left(\frac{n^2 \pi^2 D}{d^2} + \frac{1}{\tau} \right) t}. \quad (16)$$

Ограниченные пределы изменения координаты $0 \leq x \leq d$ и толщины базы $0 < d \leq L$ позволяют с минимальной погрешностью использовать аппроксимацию

$$\frac{sh \frac{d-x}{\sqrt{D\tau}}}{sh \frac{d}{\sqrt{D\tau}}} \cong 1 - \frac{x}{d}. \quad (17)$$

Для $d = 0,5L$ максимальная погрешность аппроксимации (17) составляет не более 4%. С учетом реальных значений первичных параметров и условия (17) уравнение (16) упрощается до вида

$$P(x,t) = P_2 \left(1 - \frac{x}{d} \right) + \left(\frac{2}{\pi} \right) (P_1 - P_2) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi x}{d}}{n} e^{-\left(\frac{L}{d} \right)^2 n^2 \pi^2 \frac{t}{\tau}}. \quad (18)$$

Количественные характеристики процесса спада коллекторного тока находятся из (18) по значению градиента концентрации на границе области базы

$$\frac{\partial P(0,x)}{\partial x} = -\frac{P_2}{d} + \frac{2}{d} (P_1 - P_2) \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\left(\frac{L}{d} \right)^2 n^2 \pi^2 \frac{t}{\tau}}. \quad (19)$$

Из (19) следует, что максимальное значение градиента концентрации HH имеет место в начальный момент времени

$$\frac{\partial P(0,0)}{\partial x} = \frac{2P_1 - 3P_2}{d}. \quad (20)$$

В стационарном состоянии значение градиента

$$\frac{\partial P(0,\infty)}{\partial x} = -\frac{P_2}{d}. \quad (21)$$

Различие градиентов (20) и (21) означает существование отрицательного выброса на срезе импульса тока. Для $P_2 = 0$ величина выброса достигает максимального значения

$$J_0 = -\frac{2qD}{d} P_1. \quad (22)$$

В общем случае

$$J = -(2P_1 - 3P_2) \frac{qD}{d}. \quad (23)$$

При условии

$$P_2 = \frac{2}{3} P_1 \quad (24)$$

выброс тока отсутствует, а стационарное значение тока в соответствии с (23) равно нулю.

С учетом (19) длительность выброса на спаде импульса тока при выключении можно определить из условия

$$e^{-\left(\frac{L}{d} \right)^2 \pi^2 \frac{t}{\tau}} = 0,05,$$

определяющего численное значение длительности переходного процесса

$$\frac{t_2}{\tau} = 0,3 \left(\frac{d}{L} \right)^2. \quad (25)$$

Оценки амплитуд и длительностей выбросов на фронтах и срезах импульсов коллекторного тока получены в линейном приближении без учета влияния режимных и внешних факторов. В силовых транзисторах такими факторами являются радиационная деградация времени жизни HH τ , режимная и

радиационная деградация коэффициента усиления тока базы B . В рамках рассматриваемой модели для оценки влияния корпускулярных излучений на длительность переходных процессов (10) и (25) достаточно учесть зависимость времени жизни HN от интегрального потока

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + K_\tau F, \quad (26)$$

где τ_0 - начальное значение времени жизни, K_τ - коэффициент корпускулярного повреждения времени жизни, F - интегральный поток. Из (10), (25) и (26) следует, что длительности выбросов коллекторного тока при управлении базовой цепью импульсом напряжения, сокращаются по мере увеличения потока.

Изменения амплитудных характеристик импульсов коллекторного тока и напряжения в переходном и стационарном состоянии обусловлены так же деградацией коэффициента усиления тока базы B при ужесточении электрических режимов и действии корпускулярных излучений. Результаты анализа влияния режимных и радиационных факторов на B в стационарных режимах [2] распространяются и на оценки амплитудных характеристик в переходных состояниях. Это позволяет представить параметры (12), (13), (22), (23) в обобщенном виде

$$J = A \left(1 - \frac{K_\alpha F}{1 - \alpha_F} \right), \quad (27)$$

где
$$K_\alpha = \frac{\tau_0}{B_0} K_\tau, \quad (28)$$

$$\alpha_F = \alpha_0 \left[1 - \frac{N_d}{N_a} b(1 + \delta) \right] (1 - K_\alpha F), \quad (29)$$

A - правая часть в расчетных соотношениях (12), (13), (22), (23).

Представленные результаты анализа соотносятся с нормальным активным режимом работы биполярного силового транзистора с гомогенной базой и потенциальным управлением. В рамках рассмотренного подхода и полученных моделей возможен анализ динамических характеристик для всех режимов работы транзистора: нормальный инверсный, насыщения, отсечки и их сочетаний. Методика исследования сохраняется и для транзисторов с негомогенной (слоистой) базой, однако усложняется необходимостью решения нескольких краевых задач.

Полученные оценки длительности переходных состояний (10) и (25) позволяют распространить известные для метода заряда усредненные оценки влияния нелинейной барьерной емкости коллекторного перехода [3] на динамические параметры транзисторного каскада. В частности, при работе его на активную нагрузку R постоянная времени коллекторной цепи учитывается введением эквивалентного времени жизни HN в (10) и (25). В результате длительности выбросов на фронте и срезе импульса коллекторного тока определяются соотношением

$$t_1 = t_2 \left[\frac{0,3 \left(\frac{d}{L} \right)^2}{\frac{1}{\tau_0} + K_\tau F + \frac{1}{B_0 RC_{KB}}} \right], \quad (30)$$

где C_{KB} - усредненная емкость коллекторного перехода.

Оценка (30) позволяет учесть влияние режимных, радиационных и схемотехнических факторов на динамические и электрические параметры силового ключа. Увеличение интегрального потока излучений, так же, как и уменьшение постоянной времени коллекторной цепи CBT сопровождается сокращением длительности и повышением амплитуды выбросов коллекторного тока и напряжения.

Литература

1. Степаненко И. П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. М: Энергия, 1967.
2. Устюжанинов В.Н. Характеристики силовых биполярных транзисторов в полях ионизирующих излучений // наст. сб.
3. Воронин П.А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Издательский дом Додэка-XXI, 2005.- 384 с.
4. Тихонов А.Н, Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М, «Наука», 1972 г.
5. Полянин А.Д. Справочник по линейным уравнениям математической физики. М.: Физматгиз, 2001. ВАНТ, Вып. 1, 2009.

