

Переходные процессы в высоковольтных карбид-кремниевых биполярных транзисторах

© В.С. Юферев, М.Е. Левинштейн, П.А. Иванов, Q.J. Zhang*, А.К. Agarwal*, J.W. Palmour*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

* CREE Inc., 4600 Silicon Dr.,
Durham NC 27703, USA

(Получена 12 ноября 2012 г. Принята к печати 23 ноября 2012 г.)

Теоретически и экспериментально исследованы особенности переходных процессов в высоковольтных карбид-кремниевых биполярных транзисторах. Показано, что в хорошем согласии с экспериментальными результатами процесс выключения из активного режима в широком диапазоне температур может быть описан с помощью полученного в работе простого аналитического выражения. Процесс включения транзистора, после которого он оказывается в активном режиме, хорошо описывается простой экспоненциальной зависимостью. При этом постоянная времени включения определяется средним значением коллекторной емкости до и после включения. Предложена численная модель, основанная на простой и физически прозрачной эквивалентной схеме, позволяющая в хорошем согласии с экспериментом описать оба переходных процесса, включения и выключения, в SiC биполярном транзисторе, как в активном режиме, так и в режиме насыщения.

1. Введение

Уникальные свойства карбида кремния (SiC): большая ширина запрещенной зоны (3.3 эВ для наиболее широко применяемого в электронной технике политипа 4H), очень высокое поле лавинного пробоя (2–5 МВ/см) и высокая теплопроводность (3–5 В/(см·К)), превосходящая при комнатной температуре теплопроводность меди, делают карбид кремния одним из наиболее перспективных материалов для высокотемпературной быстродействующей электроники. Мощные высоковольтные биполярные транзисторы (БТ) на основе карбида кремния являются одним из наиболее перспективных кандидатов на роль быстродействующих переключательных приборов вследствие сочетания таких параметров, как высокое блокируемое напряжение, малое остаточное сопротивление в состоянии „включеного“ (*low on-resistance*, R_{on}) и достаточно большой коэффициент усиления. В настоящее время разработаны 4H-SiC БТ с блокирующим напряжением, превосходящим 9 кВ [1], коэффициентом усиления в схеме с общим эмиттером $\beta > 300$ [2] и весьма низкими значениями R_{on} [3].

Переходные процессы включения и выключения относятся к важнейшим характеристикам биполярных транзисторов. При анализе экспериментальных результатов, полученных при исследовании SiC БТ, следует принимать во внимание такие особенности этих приборов, как очень широкий диапазон рабочих температур и сильную зависимость коэффициента усиления β от коллекторного тока [4,5].

Как правило, описание переходных процессов включения в БТ проводится в рамках малосигнального приближения, когда емкости коллекторного и эмиттерного переходов, а также коэффициент усиления β считаются постоянными [6]. Такой анализ приводит к экспоненциальной временной зависимости нарастания и спада тока

при включении и выключении с характерными постоянными времени, определяемыми „средними значениями“ емкостей [6]. Для высоковольтных структур, в которых значение коллекторной емкости, например, изменяется при включении и выключении в несколько десятков раз, такой подход представляется неадекватным.

Разумеется, переходные процессы в БТ могут быть рассчитаны в рамках современных коммерческих программ (ATLAS, Genius, DESSIS, MEDICI и др.). В таких моделях переходные процессы описываются в рамках решения системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. Хорошо известно, однако, что однозначная интерпретация и анализ решений нелинейных уравнений без адекватного аналитического исследования затруднены, а анализ влияния физически существенных параметров во многих случаях оказывается весьма трудоемкой задачей. Кроме того, несмотря на широкое использование численного моделирования для анализа работы полупроводниковых приборов, даже при современном развитии вычислительных средств, аналитическое исследование часто оказывается предпочтительным.

В данной работе приведены экспериментальные результаты по исследованию переходных процессов в высоковольтных 4H-SiC БТ. Показано, что процесс выключения из активного режима в широком диапазоне температур и коллекторных напряжений может быть адекватно описан в рамках простой аналитической модели заряда нелинейной коллекторной емкости. Процесс включения (и выключения из режима насыщения), неизбежно требующий рассмотрения перезарядки эмиттерной и коллекторной емкостей [6], может быть адекватно описан с помощью численного расчета в рамках достаточно простой эквивалентной схемы, позволяющей легко проследить влияние основных физических эффектов на переходные процессы.

2. Условия эксперимента

Исследовались два типа $n-p-n-4H-SiC$ БТ, изготовленных фирмой Cree Inc. В обоих типах приборов применена встречно-штырьевая конфигурация электродов эмиттера и базы (с геометрией типа „overlay“).

В приборах типа А размер кристалла, на котором размещался транзистор, составлял 3.5×3.5 мм, площадь коллектора S_c равнялась 8.7 мм^2 , ширина эмиттерных полосок была равна 10 мкм , а расстояние между центрами полосок 30 мкм . Таким образом, эффективная площадь эмиттера S_e составляла приблизительно $1/3$ от площади коллектора. Толщина коллектора составляла 14 мкм , уровень легирования азотом $N_b = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Толщина базы $W_b = 0.25 \text{ мкм}$, уровень легирования алюминием $N_b = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

В транзисторе типа В толщина коллектора составляла 20 мкм при уровне легирования $N_c = 2.5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Толщина базы W_b равнялась 1 мкм , уровень легирования алюминием N_b составлял $2.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Размер кристалла, на котором размещался транзистор типа В, составлял 1×1.4 мм. Ширина эмиттерных полосок равнялась 12 мкм , а расстояние между центрами эмиттерных полосок 30 мкм .

Переходные процессы включения и выключения исследовались в схеме с общим эмиттером. Величина нагрузочного коллекторного сопротивления R_l во всех случаях равнялась 50 Ом . Временное разрешение установки было не хуже 10 нс .

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 показан спад коллекторного тока в процессе выключения при различных температурах для БТ типа А. Эксперимент проводился следующим образом. Во всех случаях начальное напряжение на коллекторе при токе коллектора, равном нулю, U_{c0} составляло 500 В . Через базу транзистора пропусклся импульсный ток I_b амплитудой 200 мА , длительностью 4 мкс (последовательно с базовым электродом включалось сопротивление 50 Ом). Длительность фронта базового тока не превышала 15 нс . Длительность процесса установления коллекторного тока в зависимости от температуры составляла $0.5\text{--}2 \text{ мкс}$. Таким образом, к моменту окончания импульса базового тока ток коллектора I_c не зависел от времени, а напряжение на коллекторе U_c равнялось $U_{c1} = U_{c0} - I_c R_l$. Через 4 мкс базовый ток „прерывался“, — время спада базового тока не превышало 15 нс и коллекторный ток начинал спадать.

Заметим прежде всего, что все зависимости, представленные на рис. 1, соответствуют выключению БТ из активного режима. Заметим далее, что процесс спада тока при выключении явно не экспоненциален. И наконец, из рис. 1 видно, что кривые спада тока практически параллельны во всем диапазоне температур.

Такой результат кажется несколько неожиданным. Действительно, поскольку амплитуда базового тока для

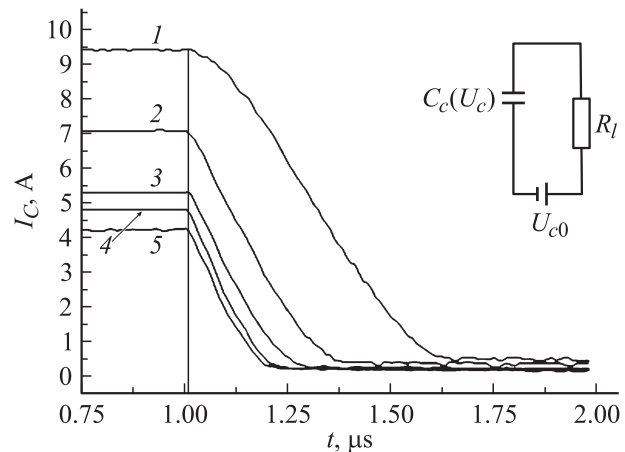


Рис. 1. Зависимости коллекторного тока I_C от времени в процессе выключения SiC БТ типа А при различных температурах T (К): 1 — 300, 2 — 352, 3 — 409, 4 — 460, 5 — 495. Во всех случаях исходное значение коллекторного напряжения $U_{c0} = 500 \text{ В}$, амплитуда базового тока равнялась 200 мА . На вставке показана простейшая эквивалентная схема, позволяющая адекватно описать процесс выключения.

всех кривых, представленных на рис. 1, одинакова, ясно, что коэффициент усиления в схеме с общим эмиттером β падает с ростом температуры. Соответственно величина эквивалентной коллекторной емкости $C \approx \beta C_{c0}$ также должна уменьшаться с ростом температуры. Здесь C_{c0} — величина „геометрической“ емкости коллектор–база, измеренной между коллекторным и базовым электродом. (Увеличение эквивалентной коллекторной емкости в β раз в схеме с общим эмиттером известно как „эффект Миллера“ [7]). Соответственно, если характерное время выключения определяется „перезарядкой“ коллекторной емкости БТ [6], следовало бы ожидать, что с ростом температуры коллекторный ток будет спадать быстрее. Напротив, если процесс выключения определяется рекомбинацией носителей в базе БТ, следовало бы ожидать, что с возрастанием температуры коллекторный ток будет спадать медленнее, поскольку время жизни носителей в SiC растет с температурой (см., например, [8]).

Покажем, что процесс выключения SiC БТ из активного режима в широком диапазоне температур можно аналитически описать как перезарядку эквивалентной коллекторной емкости C через нагрузочное сопротивление R_l (см. вставку на рис. 1), если учесть зависимость этой емкости от напряжения. Поскольку в активном режиме напряжение на коллекторном переходе практически равно напряжению на транзисторе, получаем, что в процессе выключения коллекторная емкость *зарядается* от напряжения $U_{c1} = U_{c0} - I_c R_l$. в начале процесса выключения до $U_c = U_{c0}$ в конце процесса.

Переходной процесс зарядки емкости описывается уравнением

$$U_c + IR_l = U_{c0}, \quad (1)$$

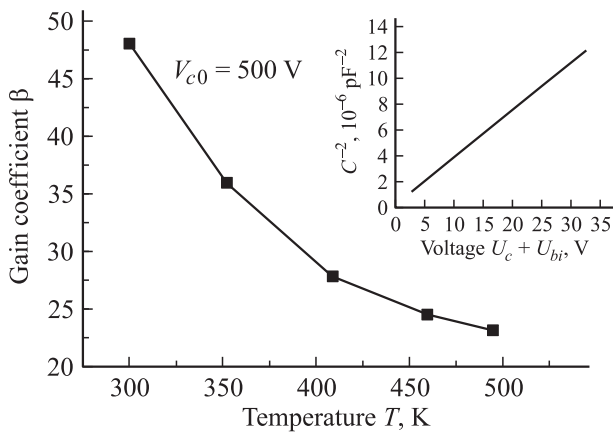


Рис. 2. Зависимость коэффициента усиления в схеме с общим эмиттером β для транзистора типа А от температуры. На вставке показана экспериментально измеренная зависимость емкости перехода коллектор–база от напряжения, построенная в координатах $C^{-2}(U + U_{bi})$ при значении встроенного потенциала $U_{bi} = 2.8$ В.

где

$$I = C(U_c) \frac{dU_c}{dt}. \quad (2)$$

Решение уравнения (1) заметно облегчается, благодаря тому обстоятельству, что $p-n$ -переходы в карбиде кремния являются резкими, и зависимость дифференциальной емкости перехода от напряжения $C(U_c)$ очень хорошо описывается выражением

$$C(U_c) \approx \beta C_0 = \frac{\beta a}{(U_c + U_{bi})^{1/2}}, \quad (3)$$

где $a = S_c \sqrt{\frac{1}{2} q \epsilon_0 \epsilon N_c}$. Здесь q — элементарный заряд, S_c — площадь коллекторного перехода, ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума, ϵ — диэлектрическая проницаемость $4H$ -SiC, U_{bi} — встроенный потенциал на переходе коллектор–база. Экспериментально измеренная зависимость $C_c(U_c)$ для перехода коллектор–база БТ типа А показана на вставке к рис. 2. Как видно из приведенных данных, измеренная зависимость практически точно следует формуле (3).

С учетом (3) уравнение (1) переписывается в виде

$$2aR_l \frac{d}{dt} (U_c + U_{bi})^{1/2} + U_c = U_{c0}. \quad (4)$$

Решение уравнения (4) с начальным условием $U_c|_{t=0} = U_{c1} = U_{c0} - I_c R_l$ и с учетом малости U_{bi} по сравнению с U_c в активном режиме имеет вид

$$U_c = U_{c0} \left(\frac{G - e^{-\gamma t}}{G + e^{-\gamma t}} \right)^2, \quad (5)$$

где

$$G = \frac{\sqrt{U_{c0}} + \sqrt{U_{c1}}}{\sqrt{U_{c0}} - \sqrt{U_{c1}}}, \quad \gamma = \frac{\sqrt{U_{c0}}}{aR_l}.$$

Отсюда для тока I следует выражение

$$I = \frac{4U_{c0}}{R_l} G \frac{e^{-\gamma t}}{(G + e^{-\gamma t})^2}. \quad (6)$$

На рис. 3 экспериментальные результаты, показанные на рис. 1, сравниваются с результатами расчета по формуле (6). Для каждой температуры значение β соответствовало экспериментально измеренной величине (рис. 2).

На рис. 4 представлены экспериментальные и расчетные зависимости коллекторного тока от времени в процессе выключения для образца SiC БТ типа В. В отличие от случая, рассмотренного выше, темпера-

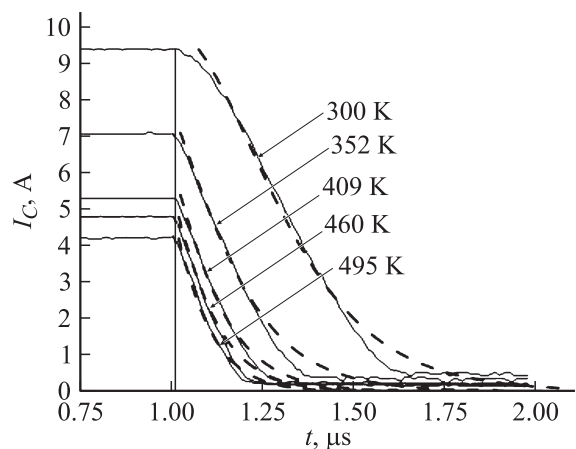


Рис. 3. Сравнение экспериментальных результатов по выключению SiC БТ типа А (ср. с рис. 1) с результатами расчетов по формуле (6).

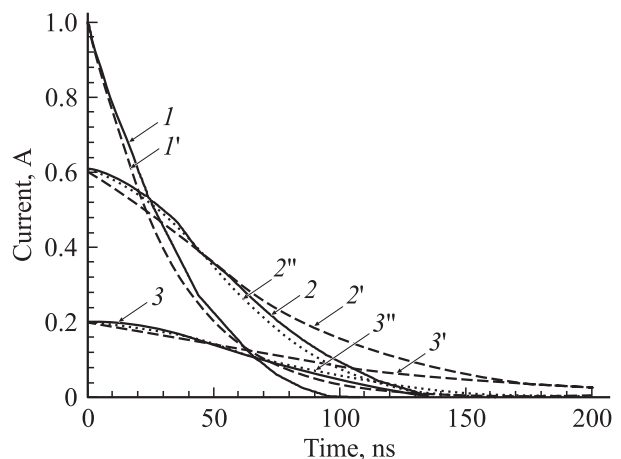


Рис. 4. Сравнение экспериментальных результатов по выключению SiC БТ типа В при различных значениях коллекторного напряжения U_{c0} с результатами расчетов. $T = 300$ К. Сплошные кривые 1, 2, 3 — экспериментальные результаты. Штриховые кривые 1', 2', 3' — расчет в рамках модели перезарядки коллекторной емкости для $\beta = 30$ (выражение (6)). U_{c0} (В): 1, 1' — 100, 2, 2' — 30, 3, 3' — 10. Пунктирные кривые 2'', 3'' — по модели, описанной в Приложении. Для кривой 2'' ток базы $I_b = 34$ мА, для кривой 3'' — $I_b = 22$ мА.

тура была равна комнатной, а исходное коллекторное напряжение U_{c0} менялось.

Заметим прежде всего, что кривая 1 соответствует, как и зависимости, приведенные на рис. 3, выключению из активного режима. При входном базовом токе $I_b = 30$ мА и $\beta = 30$ коллекторное напряжение перед началом процесса выключения составляет $U_{c0} - I_c R_{kl} \approx 50$ В. Для этого случая модель, описывающая выключение в рамках модели перезарядки коллекторной емкости (формула (6)), достаточно адекватно описывает процесс выключения.

Кривые 2 и 3 на рис. 4 соответствуют выключению из насыщенного режима. Степень насыщения η [6] равняется

$$\eta = \frac{\beta I_b - I_{cs}}{I_{cs}} \approx \frac{\beta I_b - U_{c0}/R_l}{U_{c0}/R_l} \quad (7)$$

и составляет $\eta \approx 0.7$ для кривой 2 и $\eta \approx 2.2$ для кривой 3. Здесь $I_{cs} \approx U_{c0}/R_l$ — насыщенное значение тока.

Из сравнения кривых 2 и 2' видно, что, хотя совпадение между экспериментальной зависимостью и зависимостью, рассчитанной в рамках модели перезарядки коллекторной емкости, заметно хуже, чем для кривых 1 и 1', тем не менее при небольших значениях степени насыщения η эта простая модель может быть использована для качественного описания процесса выключения.

При относительно больших значениях степени насыщения (кривая 3) модель перезарядки коллекторной емкости становится не адекватной (ср. кривые 3 и 3'). Хотя эффективное значение β в процессе выключения из режима насыщения меняется довольно сильно, однако улучшить совпадение между расчетом и экспериментом не удастся ни при каких значениях β . Это можно объяснить тем, что даже для „идеального транзистора“, напряжение на котором в режиме насыщения должно быть равно нулю, напряжение на коллекторном переходе нулю не равно, поскольку при переходе в режим насыщения переход смещается в прямом направлении, что существенно влияет на величину коллекторной емкости.

Для описания процесса выключения при произвольной степени насыщения (а также при выключении из активного режима и при включении БТ) нами была использована модель, базирующаяся на физически прозрачной и более детальной эквивалентной схеме. Подробное описание модели приведено в *Приложении*. Здесь же отметим только, что предложенная модель качественно аналогична модели, основанной на методе управления зарядом и описанной, например, в [9]. Основное отличие развитой нами модели состоит в том, что независимыми переменными являются напряжения на переходах, а не заряды, что позволило избежать излишних допущений, а также учесть такой важный фактор, как ток рекомбинации в слое объемного заряда эмиттера. Как видно из рис. 4, предложенная модель во всех случаях обеспечивает удовлетворительно согласие с экспериментальными результатами.

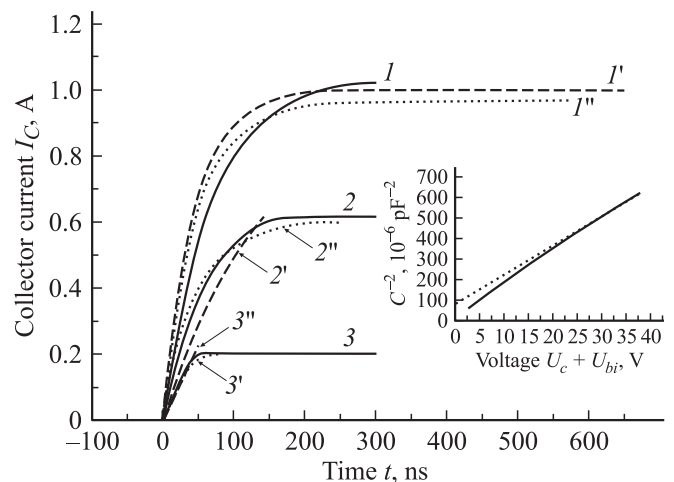


Рис. 5. Сравнение экспериментальных результатов по включению SiC БТ типа В при различных значениях коллекторного напряжения U_{c0} с результатами расчетов. $T = 300$ К. Сплошные кривые 1, 2, 3 — экспериментальные результаты. Штриховые кривые 1', 2', 3' — аппроксимация включения экспоненциальной зависимостью, а пунктирные кривые 1'', 2'', 3'' — расчет по модели, описанной в *Приложении*. U_{c0} (В): 1, 1', 1'' — 100; 2, 2', 2'' — 30; 3, 3', 3'' — 10. Ток базы I_b (мА): 1'' — 30, 2'' — 34, 3'' — 22. На вставке показана экспериментально измеренная зависимость емкости перехода коллектор–база от напряжения (сплошная кривая). Пунктирная кривая соответствует зависимости, описываемой выражением (3).

На рис. 5 показаны экспериментальные и расчетные зависимости коллекторного тока от времени в процессе *включения*. Экспериментальные зависимости получены для SiC БТ типа В при тех же параметрах включения, что кривые выключения, показанные на рис. 4.

Экспериментальная кривая 1 соответствует включению транзистора в активном режиме, а кривые 2 и 3 переключению транзистора в режим насыщения со степенью насыщения η , равной $\eta = 0.7$ для кривой 2 и $\eta = 2.2$ для кривой 3. Интересно отметить, что в отличие от кривых на рис. 3, 4, описывающих выключение транзистора, кривые 1–3 на рис. 5 весьма близки к экспонентам. Такой характер изменения тока естественно наводит на мысль использовать для описания режима включения простую аппроксимацию, предложенную в монографии [6]:

$$I = I_0 [1 - \exp(-t/\tau)], \quad (8)$$

где I_0 — ток, на который БТ включается в *активном* режиме, т. е. $I_0 = \beta I_b$; τ — постоянная времени включения, вычисляемая как

$$\tau = \beta R_l \bar{C}_0 = \beta R_l \frac{1}{2} [C(U_{c0}) + C(U_{c1})]. \quad (9)$$

Здесь $C(U_{c0})$ — емкость коллектора перед началом включения, $C(U_{c1})$ — емкость во включенном состоянии. Таким образом, величина \bar{C} представляет собой „среднюю“ емкость коллектора в процессе включения.

Важно подчеркнуть, что формула (8) предполагается справедливой даже в том случае, когда при включении БТ оказывается в режиме насыщения, т.е. когда $I_0 R_l = \beta I_b R_l > U_{c0}$. Таким образом, предполагается, что БТ включается в соответствии с (8), а при значении тока насыщения $I_s \approx U_{c0}/R_l$ ток „обрезается“.

Если после включения БТ оказывается в активном режиме, использование формулы (9) не представляет трудности. Величины $C(U_{c0})$ и $C(U_{c1})$ могут быть легко измерены экспериментально или вычислены в соответствии с выражением (3). Для исследуемого образца при $U_{c0} = 100$ В и $U_{c1} = U_{c0} - I_c R_l \approx 50$ В среднее значение величины \bar{C} составляет ~ 31.5 пФ, что соответствует значению τ в формуле (8): $\tau \approx 47$ нс. Как видно из рис. 5, пунктирная кривая I , рассчитанная в соответствии с (8), при $I_0 = 1$ А и $\tau = 47$ нс вполне удовлетворительно описывает экспериментальный результат.

Если после включения БТ оказывается в режиме насыщения, использование формулы (8) становится затруднительным. Значение коллекторной емкости после переключения $C(U_{c1})$ далеко не всегда возможно измерить, особенно при большой степени насыщения η , поскольку емкостной ток измерительного моста шунтируется током проводимости прямосмещенного коллекторного перехода. С другой стороны, использование формулы (3) для расчета $C(U_{c1})$ также невозможно. Прежде всего значение напряжения на коллекторном переходе априори неизвестно. Кроме того, вблизи $p-n$ -перехода распределение примеси нередко становится неоднородным и может заметно отличаться от уровня легирования вдали от перехода. Это видно, в частности, из вставки к рис. 5. Как легко заметить, даже при малых значениях *обратного* напряжения на переходе экспериментальная зависимость начинает отличаться от зависимости, описываемой формулой (3).

Таким образом, использование формулы (7) при включении БТ в режим насыщения практически невозможно, и ее можно применять лишь для эмпирической аппроксимации экспериментальных данных. Кривые 2' и 3' на рис. 5 построены в соответствии с формулой (7) при $I_0 = 1$ А и эмпирически подобранных постоянных времени $\tau = 150$ и 200 нс соответственно. Из формулы (9) можно установить, что этим значениям τ соответствуют значения $\bar{C}_0 \approx 100$ пФ и $\bar{C}_0 \approx 130$ пФ, которые значительно меньше значений емкости в рассматриваемых режимах насыщения, рассчитанных в рамках развитой модели (см. Приложение).

Как видно из рис. 5, кривые 1'', 2'' и 3'', рассчитанные в рамках предложенной модели (см. Приложение), во всех случаях обеспечивают адекватное описание процесса включения.

4. Заключение

Получено простое аналитическое выражение, в хорошем согласии с экспериментальными результатами, описывающее выключение SiC биполярного транзистора

из активного режима в широком интервале температур (300–500 К). Это выражение может быть также использовано для приближенного описания процесса при малых степенях насыщения. Показано, что процесс включения SiC биполярного транзистора хорошо описывается простой экспоненциальной зависимостью. При этом для процесса включения, после которого транзистор оказывается в активном режиме, постоянная времени включения определяется средним значением коллекторной емкости до и после включения. Для описания процессов включения и выключения биполярного SiC-транзистора при произвольных степенях насыщения предложена модель, учитывающая все основные инжекционные, рекомбинационные и емкостные токи, протекающие в транзисторе, и позволяющая получать результаты, хорошо согласующиеся с экспериментом.

В ФТИ им. Иоффе работа поддержана фирмой Stree Inc. и Российским фондом фундаментальных исследований.

Приложение

На рис. П.1 показана наглядная и физически прозрачная схема, позволяющая адекватно описать переходные процессы включения и выключения SiC БТ.

Из рис. П.1 вытекают следующие очевидные соотношения:

$$\begin{aligned} I_b &= I^* + I_{be}, \\ I_c &= I_{bc} + I_l, \\ I_e &= I^* + I_l, \end{aligned} \tag{П.1}$$

$$U_{c0} = I_l R_l - U_{bc} + U_{be}, \tag{П.2}$$

где U_{bc} и U_{be} — напряжения, приложенные к коллекторному и эмиттерному переходам соответственно. Падением напряжения на коллекторном и базовом слоях транзистора пренебрегалось.

Заметим, что

$$I_{be} = C_e \frac{dU_{be}}{dt}$$

и

$$I_{bc} = C_{c0} \frac{dU_{bc}}{dt}$$

представляют собой емкостные токи база–эмиттер и база–коллектор соответственно. Здесь

$$C_e = S_e \left(\frac{q \epsilon \epsilon_0 N_b}{2(U_{bi}^e - U_{be})} \right)^{1/2} \tag{П.3}$$

и

$$C_{c0} = S_c \left(\frac{q \epsilon \epsilon_0 N_c}{2(U_{bi}^c - U_{bc})} \right)^{1/2}. \tag{П.4}$$

Ток эмиттера I_e может быть представлен суммой токов:

$$I_e = I_{en}^e + I_{ep}^e + I_{er}^e - \alpha I_{en}^c, \tag{П.5}$$

где I_{en}^e — диффузионный ток электронов, I_{ep}^e — диффузионный ток дырок через эмиттерный переход, I_{er}^e — ток

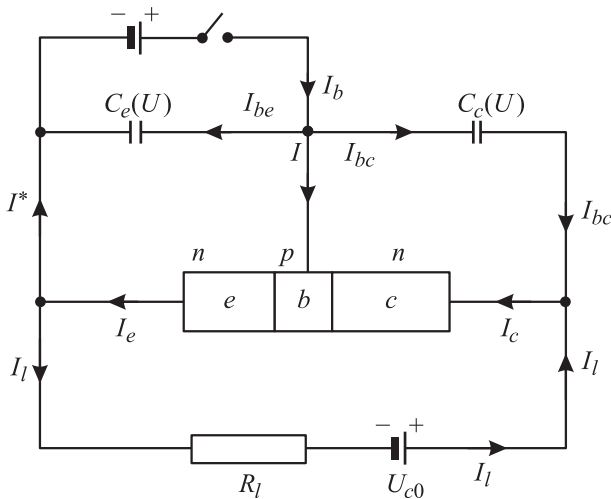


Рис. П.1. Эквивалентная схема для расчета переходных процессов в SiC БТ.

рекомбинации в слое объемного заряда база–эмиттер, $\alpha = \frac{1}{2} \frac{W_b^2}{\tau_b}$ — „коэффициент передачи“ базы, т.е. транспортный коэффициент усиления в схеме с общей базой, τ_b — время жизни неравновесных носителей в базе, I_{en}^c — диффузионный ток электронов через переход коллектор–база.

Аналогично для коллекторного тока справедливо соотношение

$$I_c = \alpha I_{en}^e - I_{en}^c - I_{ep}^c - I_{er}^c, \quad (\text{П.6})$$

где соответственно I_{ep}^c — диффузионный ток электронов через коллекторный переход и I_{er}^c — ток рекомбинации в слое объемного заряда база–коллектор.

Для тока I_{en}^e использовалось известное соотношение (см., например, [10]):

$$I_{en}^e = qS_e \frac{n_i^2}{N_b} \frac{D_n}{W_b} \left[\exp\left(\frac{qU_{be}}{kT}\right) - 1 \right], \quad (\text{П.7})$$

где n_i — собственная концентрация носителей, D_n — коэффициент диффузии электронов в базовом слое прибора.

Выражение для I_{ep}^e имеет вид

$$I_{ep}^e = \frac{1 - \gamma}{\gamma} I_{en}^e, \quad (\text{П.8})$$

где γ — коэффициент инжекции эмиттерного перехода.

Аналогично для токов I_{en}^e и I_{ep}^e использовались выражения:

$$I_{en}^c = qS_c \frac{n_i^2}{N_b} \frac{D_n}{W_b} \left[\exp\left(\frac{qU_{bc}}{kT}\right) - 1 \right], \quad (\text{П.9})$$

$$I_{ep}^c = qS_c \frac{n_i^2}{N_c} \frac{D_p}{L_p} \left[\exp\left(\frac{qU_{be}}{kT}\right) - 1 \right], \quad (\text{П.10})$$

где D_p — коэффициент диффузии дырок в коллекторном слое.

Ток рекомбинации в слое объемного заряда эмиттерного перехода, I_{er}^c , описывался известным соотношением:

$$I_{er}^c = I_{er0}^c \left[\exp\left(\frac{qU_{be}}{2kT}\right) - 1 \right]. \quad (\text{П.11})$$

Током рекомбинации в коллекторном переходе пренебрегалось.

Комбинируя уравнения (П.1)–(П.9), получаем систему из двух дифференциальных уравнений относительно напряжений U_{bc} и U_{be} , которая решалась численно.

Начальные условия для сформулированной системы уравнений задавались следующим образом. В режиме включения при $t = 0$, $U_{bc} = U_{c0}$, $U_{be} = 0$. В режиме выключения в качестве начального условия использовалось стационарное решение задачи, соответствующее заданному значению тока нагрузки I_l . При этом для выключения из активного режима

$$U_{be}(0) = \frac{U_{c0}}{1 + \frac{q}{kT} U_{c0}} \ln \frac{U_{c0}}{R_l [I_{en}^e(0) - I_{er}^e(0)]}, \quad (\text{П.12})$$

$$U_{bc}(0) = R_l I_l - U_{c0} + U_{be}(0). \quad (\text{П.13})$$

Для описания режима выключения из насыщенного режима решение находилось в два этапа. На первом этапе находились значения \bar{I}_l , \bar{U}_{be} и \bar{U}_{bc} , соответствующие условию $U_{bc} = 0$, а на втором — поправки к U_{be} и U_{bc} , соответствующие разнице ΔI_l между I_l и \bar{I}_l . При этом

$$U_{be}(0) = \bar{U}_{be} + \frac{kT}{q} \frac{\Delta I_l}{I_l}, \quad (\text{П.14})$$

$$U_{bc}(0) = \Delta I_l R_l + \frac{kT}{q} \frac{\Delta I_l}{I_l}. \quad (\text{П.15})$$

При расчетах использовались следующие значения параметров: $R_l = 50$ Ом, $S_e = 0.0072$ см², $S_c = 0.014$ см², $N_c = 2.5 \cdot 10^{15}$ см⁻³, $N_b = 2.5 \cdot 10^{17}$ см⁻³, $W_b = 1$ мкм, $D_n = 12$ см²/с, $D_p = 3$ см²/с, $L_p = 1.7 \cdot 10^{-3}$ см, $T = 300$ К, $I_{er}^c = 1.23 \cdot 10^{-24}$ А/см², $U_{be} = 3.06$ В, $U_{bc} = 2.85$ В, $\gamma = 0.985$ и $\tau_b = 4 \cdot 10^{-8}$ с.

Список литературы

- [1] J. Zhang, J.H. Zhao, P. Alexandrov, T. Bur. Electron. Lett., **40**, 1381 (2004).
- [2] Hiroki Miyake, Tsunenobu Kimoto, Jun Suda. IEEE Electron. Dev. Lett., **32**, 841 (2011).
- [3] J. Zhang, P. Alexandrov, T. Burke, J.H. Zhao. IEEE Electron. Dev. Lett., **27**, 368 (2006).
- [4] P.A. Ivanov, M.E. Levinshtein, S.L. Rumyantsev, Sci-Hyang Ryu, A.K. Agarwal, J.W. Palmour. Sol. St. Electron. **46**, 567 (2002).
- [5] B. Buono, R. Ghandi, M. Domeij, B.G. Malm, C.-M. Zetterling, M. Östling. IEEE Trans. Electron. Dev., **57**, 704 (2010).
- [6] И.П. Степаненко. *Основы теории транзисторов и транзисторных схем* (М.; Л., Госэнергоиздат, 1963).
- [7] J.M. Miller. Scientific Papers of the Bureau of Standards, **15**, 367 (1920).

- [8] M.E. Levinshtein, S.L. Rumyantsev, T.T. Mnatsakanov, A.K. Agarwal, J.W. Palmour. „SiC thyristors“ in „SiC Materials and Devices“, ed. by M. Shur, S. Rumyantsev and M. Levinshtein (World Scientific, 2006) v. 1.
- [9] Р. Маллер, Т. Кейминс. *Элементы интегральных схем* (М., Мир, 1989).
- [10] S.M. Sze. *Physics of Semiconductor Devices* (John Wiley & Sons, N.Y., 1981).

Редактор Т.А. Полянская

Transient processes in high voltage silicon carbide bipolar transistors

V.S. Yuferev, M.E. Levinshtein, P.A. Ivanov, Q.J. Zhang, A.K. Agarwal*, J.W. Palmour**

Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

* CREE Inc., 4600 Silicon Dr.,
Durham NC 27703, USA

Abstract Transient processes in high voltage silicon carbide bipolar transistors have been studied experimentally and theoretically. It was shown that the processes of switch-off from active regime can be described in wide temperature interval by the simple analytical expression suggested in the paper. The switch-on processes into active regime can be described by a simple exponential dependence. The time constant of the switch-on process is determined in this case by the mean value of the collector capacity before and after the switch-on process. Numerical model to describe both, switch-off and switch-on transient processes has been suggested. This model is based on a simple and physically clear equivalent circuit and makes it possible to describe the transient processes in both, active and saturation regimes.