

Переходной процесс выключения $4H$ -SiC биполярного транзистора из режима глубокого насыщения

© В.С. Юферев¹, М.Е. Левинштейн^{1,¶}, П.А. Иванов¹, Jon Q. Zhang², John W. Palmour²

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

² Wolfspeed, A Cree company, Research Triangle Park, NC 27709, USA

¶ E-mail: Melev@nimis.ioffe.ru; Pavel.Ivanov@mail.ioffe.ru

(Получена 7 февраля 2017 г. Принята к печати 13 февраля 2017 г.)

В рамках одномерного численного моделирования исследованы основные физические процессы, определяющие переходной процесс выключения биполярного SiC-транзистора из режима глубокого насыщения. Исследован процесс выключения в режиме обрыва базового тока и в режиме выключения отрицательным (выключающим) током базы. Показано, что при вполне реалистических значениях выключающего базового тока время выключения может быть уменьшено в ~ 40 раз по сравнению с временем выключения при нулевом базовом токе. Время задержки также может быть существенно, в несколько раз, сокращено. Отмечается, что в режиме глубокого насыщения, когда реализуется интенсивная модуляция проводимости коллекторного слоя, транзистор может работать в непрерывном режиме при весьма высокой плотности тока.

DOI: 10.21883/FTP.2017.09.44889.8540

1. Введение

К мощным импульсным переключающим системам предъявляются все более жесткие требования с точки зрения предельных рабочих частот, размеров, плотности рассеиваемой мощности, предельных рабочих температур и радиационной стойкости. Наиболее перспективными переключающими приборами с точки зрения соответствия этим требованиям являются переключающие приборы на основе $4H$ -SiC (см., например [1]). По сравнению с другими переключающими приборами, такими, как полевые транзисторы с управляющим p - n -переходом (JFETs), MOSFETs и IGBTs биполярные транзисторы (БТ) на основе $4H$ -SiC обладают потенциальным преимуществом очень низкого сопротивления в открытом состоянии (R_{on}). Малые значения R_{on} могут быть реализованы за счет возможной модуляции коллектора неосновными носителями заряда и взаимной компенсации падения напряжения на встречно включенных p - n -переходах база-эмиттер и база-коллектор. Последнее обстоятельство для приборов на карбиде кремния является особенно существенным, поскольку встроенный потенциал $4H$ -SiC p - n -переходов весьма высок (≤ 2.85 В при реальных рабочих плотностях тока). С момента появления первых $4H$ -SiC БТ [2,3] достигнут существенный прогресс в увеличении коэффициента усиления, рабочего напряжения и рабочей площади приборов [4–6].

Когда БТ используется в качестве мощного переключателя, одним из наиболее важных параметров прибора (при заданном рабочем блокируемом напряжении) является сопротивление R_{on} . В большинстве опубликованных работ величина R_{on} была равна или даже превышала величину сопротивления немодулированного коллекторного слоя (см., например, [7–9]). Тем не менее в нескольких работах была продемонстрирована

возможность существенного снижения R_{on} за счет модуляции сопротивления коллекторного слоя неосновными носителями, инжектированными в режиме насыщения из базового слоя структуры (см., например, [10,11]).

Подробный анализ условий, необходимых для быстрой и эффективной модуляции коллектора и существенного снижения R_{on} , проделан в рамках одномерного моделирования в работах [12,13]. Показано, что заметное снижение сопротивления коллекторного слоя транзистора и, как следствие, существенное снижение остаточного напряжения на приборе могут быть достигнуты при достаточно быстром включении транзистора, условием которого являются большая амплитуда и резкий фронт нарастания включающего базового тока. При выполнении этих условий сопротивление коллектора может быть снижено за счет модуляции неосновными носителями на порядок и более.

Очевидно, однако, что накопление неосновных носителей в коллекторе способно существенно увеличить время задержки и время выключения транзистора [14]. Такая ситуация может сделать неприемлемым желаемое снижение R_{on} при высокочастотном переключении. С другой стороны, в работах [15,16] была экспериментально продемонстрирована возможность значительного уменьшения времен задержки и выключения при приложении в процессе выключения импульса обратного базового тока.

Цель настоящей работы заключается в исследовании в рамках модели, использованной в [12,13], условий выключения SiC БТ.

2. Условия и параметры моделирования

Как отмечалось в работе [12], точное количественное описание переходных процессов в реальных мощных

SiC БТ со встречно-штыревой структурой требует, вообще говоря, двумерного (2D) моделирования. Однако основные физические закономерности процессов включения и выключения БТ во многих случаях удобно изучать в рамках одномерных моделей. Такое моделирование позволяет наглядно проанализировать влияние на переходные процессы основных параметров структуры и режимов переключения. Влияние на параметры переключения таких, по определению двумерных, процессов, как поверхностная рекомбинация и стягивание тока к краю эмиттера (crowding) до известной степени может быть учтено введением таких подгоночных параметров, как эффективное время жизни носителей в базовых и эмиттерных слоях структуры.

Одномерная численная модель, использованная в данной работе, неоднократно успешно использовалась для описания Si, GaAs и SiC биполярных транзисторов, в том числе и в режимах предельно больших плотностей тока [12,17–19]. Детали процесса моделирования подробно описаны в работе [17].

Входной сигнал (базовый ток) в одномерной модели учитывается путем введения однородного по всей площади базы источника дырок. При включении этот источник можно считать равномерно распределенным по толщине базы и равным $G(x) = \frac{I_b}{qS_0W_b}$, где q — заряд электрона, I_b — базовый ток, S_0 — площадь структуры, W_b — толщина базы.

Для описания процесса выключения транзистора обратным базовым током такой подход оказывается непригодным, поскольку приводит к появлению отрицательной концентрации дырок в окрестности коллекторного перехода. Детальный вывод выражения для источника дырок в процессе выключения приводится в *Приложении*.

При включении источник дырок включался в момент $t = 0$ в форме „ступеньки“ с длительностью переднего фронта 0.6 нс, а в момент времени t_{off} становился либо равным нулю, либо задавался в виде отрицательной функции времени и координаты.

Моделировались переходные процессы в структуре, включение которой детально исследовалось в работах [12,13]. Толщина p -базы $n^+ - p - n_0 - n^+$ -структуры составляла 0.5 мкм при уровне легирования $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, толщина коллектора W_c равнялась 15 мкм при уровне легирования $N_c = 4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, уровень легирования n^+ -эмиттера толщиной 2 мкм составлял $N_e = 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Времена жизни неосновных носителей в эмиттере, базе и коллекторе составляли $3 \cdot 10^{-10}$, 10^{-7} и $2 \cdot 10^{-6}$ с соответственно. Площадь транзистора, S_0 , равнялась $S_0 = 0.02 \text{ см}^2$. Параметры 4H-SiC выбирались в соответствии с данными, приведенными в работе [20].

Моделировалось включение и выключение транзистора в схеме с общим эмиттером при исходном напряжении на коллекторе $U_0 = 500 \text{ В}$ и нагрузочном сопротивлении в цепи коллектора $R_l = 50 \text{ Ом}$.

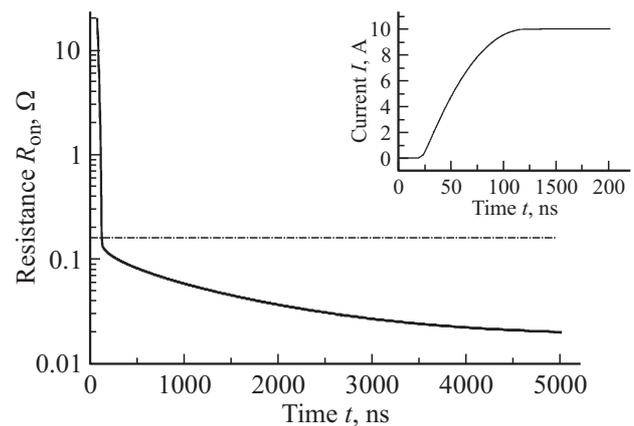


Рис. 1. Зависимость от времени сопротивления транзистора $R_{\text{on}} = U(t)/I(t)$ при включении транзистора базовым током $I_b = 0.2 \text{ А}$. Пунктиром показано сопротивление нелегированного коллекторного слоя. На вставке — зависимость тока от времени $I(t)$ в процессе включения.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 показан процесс уменьшения сопротивления транзистора $R_{\text{on}} = U(t)/I(t)$ при включении транзистора базовым током $I_b = 0.2 \text{ А}$. Здесь $U(t)$ — мгновенное значение напряжения на структуре, $I(t)$ — мгновенное значение тока. На вставке приведена зависимость тока от времени $I(t)$ в процессе включения.

Видно, что время включения в выбранном режиме составляет $\sim 100 \text{ нс}$. В режиме насыщения ток через транзистор составляет приблизительно $U_0/R_l \approx 10 \text{ А}$, что соответствует плотности тока $j \approx 500 \text{ А/см}^2$.

Как видно из рис. 1, процесс уменьшения сопротивления транзистора оказывается значительно более медленным, чем процесс включения (см. также [12]). Участок быстрого спада R_{on} на временном промежутке $t \leq 200 \text{ нс}$ сменяется участком плавного уменьшения R_{on} . Видно, что в конце быстрого участка спада, R_{on} , величина сопротивления транзистора лишь несколько меньше, чем сопротивление нелегированного коллекторного слоя $R_0 = W_c/\sigma S_0 = W_c/en_c\mu_n S_0 = 0.15 \text{ Ом}$ (принимая $W_c = 15 \text{ мкм}$, $n_c = 4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, подвижность электронов $\mu_n = 800 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$). Стационарное состояние, соответствующее значению $R_{\text{on}} \approx 0.02 \text{ Ом}$, достигается через $\sim 5 \text{ мкс}$ после начала включения. Детальный анализ процесса включения и сопровождающего его процесса модуляции коллектора слоя неосновными носителями (дырками) подробно описан в работах [12,13].

На рис. 2 показан процесс уменьшения концентрации неосновных носителей в коллекторе структуры после выключения базового тока ($I_b = 0$) в момент $t = 5000 \text{ нс}$.

Видно, что в стационарном состоянии (кривая 1) уровень модуляции коллектора очень высок. На границе база–коллектор ($x = 0$) концентрация дырок составляет $1.1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, т.е. превышает равновесную концентра-

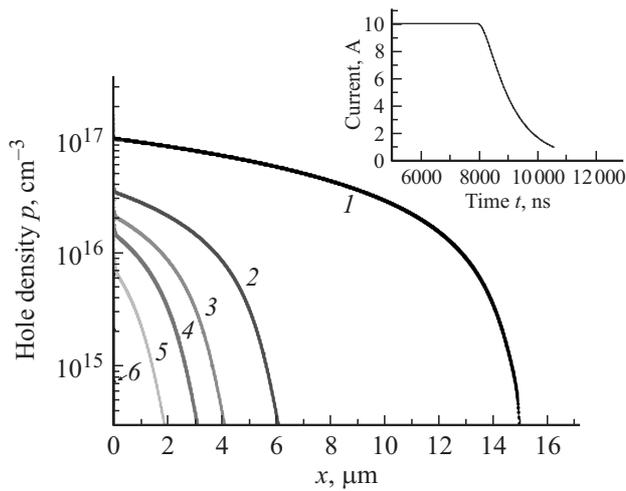


Рис. 2. Распределение дырок в коллекторе в процессе выключения. Точка $x = 0$ соответствует границе база–коллектор. В момент $t = 5000$ нс (5 мкс) базовый ток прерывается ($I_b = 0$) и начинается процесс выключения. t (нс): 1 — 5000, 2 — 7000, 3 — 7500, 4 — 7700, 5 — 7900, 6 — 8000. На вставке — зависимость тока через транзистор от времени в процессе выключения.

цию электронов n_c в коллекторе в ~ 55 раз. Даже на расстоянии 1 мкм от правой границы коллектора ($x = 14$ мкм) концентрация дырок ($\sim 3.1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) превышает равновесную концентрацию n_c .

Немедленно после прерывания базового тока концентрация дырок начинает монотонно уменьшаться. Однако вплоть до момента $t = 8000$ нс (кривая 6) ток, протекающий через транзистор, остается неизменным (этап задержки [14]). Таким образом, длительность этапа задержки t_d составляет в рассматриваемом случае 3000 нс. Спад тока начинается только тогда, когда в коллекторе неосновных носителей практически не остается (рис. 2, кривая 6). Время выключения t_{off} (по уровню 0.1–0.9) составляет ~ 2200 нс. Таким образом, полное время от момента обрыва базового тока до выключения транзистора, т.е. сумма времени задержки t_d и времени выключения t_{off} , равняется ~ 5200 нс и более чем в 100 раз превышает время включения структуры (см. вставку к рис. 1). Ситуация, когда время выключения является наиболее медленным переходным процессом, определяющим частотный предел работы прибора, является типичной для БТ в стандартном режиме, когда транзистор выключается при нулевом базовом токе. При этом с ростом уровня насыщения время включения падает, а время выключения растет [14].

Однако, как это было экспериментально продемонстрировано применительно к SiC-транзисторам в работах [15,16], как время задержки, так и время выключения могут быть значительно уменьшены, если выключение происходит не при нулевом, а при отрицательном базовом токе.

На рис. 3 показан процесс выключения исследуемого транзистора при различных значениях отрицательного базового тока.

Для $I_b = -0.2$ А (см. вставку к рис. 3) время задержки составляет $t_d = 820$ нс, а время выключения (по уровню 0.1–0.9) $t_{off} = 57$ нс. Таким образом, по сравнению со стандартным режимом, когда транзистор выключается при нулевом базовом токе, значение t_d уменьшилось в 3.6, а t_{off} — в 38 раз. При этом время выключения практически равняется времени включения. Заметим, что в экспериментальной работе [16] при использовании для выключения большого отрицательного базового тока было зафиксировано уменьшение t_d в 4, а t_{off} — в 20 раз.

Из рис. 3 видно, что время задержки t_d монотонно уменьшается с ростом отрицательного базового тока ($-I_b$). Время выключения t_{off} также монотонно падает с увеличением ($-I_b$) (рис. 4).

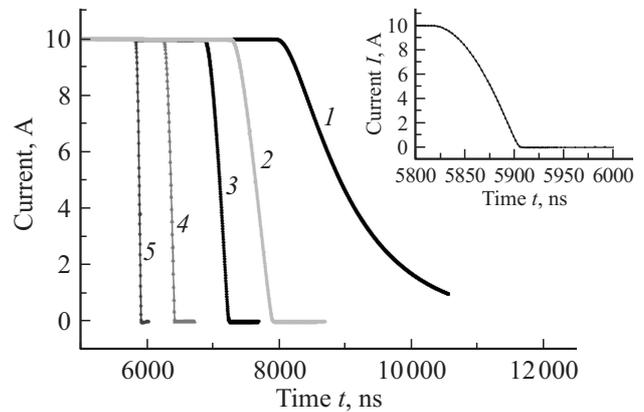


Рис. 3. Зависимость тока через транзистор от времени в процессе выключения при различных значениях выключающего (отрицательного) базового тока. Во всех случаях положительный ток базы I_b сменяется отрицательным в момент времени $t = 5000$ нс. I_b (А): 1 — 0, 2 — -0.02 , 3 — -0.04 , 4 — -0.1 , 5 — -0.2 . На вставке — зависимость тока через транзистор от времени в процессе выключения при $I_b = -0.2$ А (кривая 5 рис. 3 в другом временном масштабе).

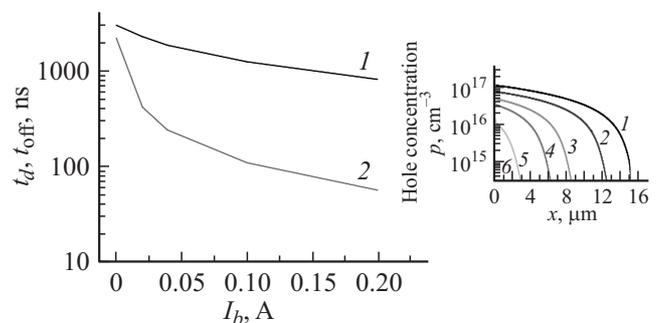


Рис. 4. Зависимости времени задержки t_d (1) и времени выключения t_{off} (2) от отрицательного базового тока I_b . На вставке — распределение дырок в коллекторе в процессе выключения при значении $I_b = -0.2$ А (ср. с рис. 2). t (нс): 1 — 5000, 2 — 5300, 3 — 5600, 4 — 5700, 5 — 5800, 6 — 5840.

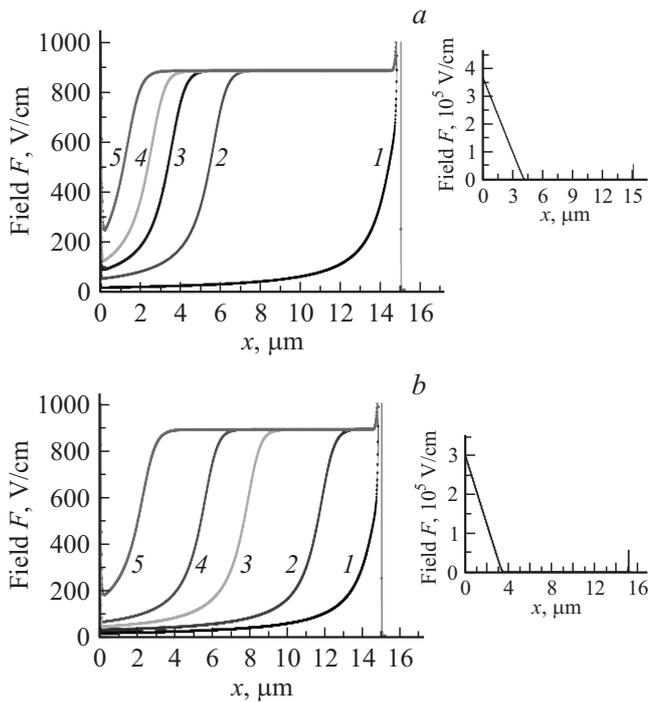


Рис. 5. *a* — распределение поля в коллекторе в процессе выключения после обрыва базового тока I_b в момент $t = 5000$ нс. t (нс): 1 — 5000, 2 — 7000, 3 — 7500, 4 — 7700, 5 — 7900. На вставке показано распределение поля в момент $t = 8340$ нс (сопоставить с зависимостью тока от времени на вставке к рис. 2). *b* — распределение поля в коллекторе в процессе выключения после включения базового тока $I_b = -0.2$ А в момент $t = 5000$ нс. t (нс): 1 — 5000, 2 — 5300, 3 — 5600, 4 — 5700, 5 — 5800. На вставке показано распределение поля в момент $t = 5840$ нс (сопоставить с зависимостью тока от времени на вставке к рис. 3).

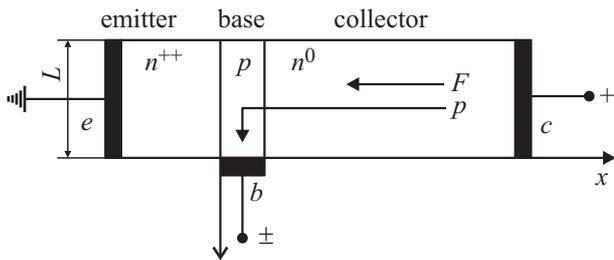


Рис. 6. Схема выключения БТ.

На рис. 5, *a* и *b* показаны распределения электрического поля в коллекторе в процессе выключения для случаев $I_b = 0$ и $I_b = -0.2$ А соответственно. Как видно из рис. 5, *a*, в момент выключения базового тока, в стационарном состоянии (кривая 1), поле в большей части коллектора не превышает нескольких десятков В/см. Существенный рост поля по мере приближения к правой границе коллектора наблюдается при $x \geq 12$ мкм, т.е. в области, где происходит заметный спад концентрации неосновных носителей (ср. с рис. 2). После выключения

базового тока концентрация инжектированных дырок монотонно уменьшается со временем, а поле в каждой точке коллектора монотонно возрастает. В тех областях коллектора, где по мере уменьшения концентрации дырок реализуется низкий уровень инжекции и ток является током основных носителей, поле составляет ~ 880 В/см.

Через 7900 нс после обрыва базового тока (кривая 5) поле в коллекторе вблизи границы база–коллектор составляет ~ 300 В/см. При этом все еще продолжается этап задержки (см. вставку к рис. 2). Спад тока (этап выключения) начинается при $t \approx 8000$ нс, когда дырок в коллекторе практически не остается. При этом „восстановление“ поля в коллекторе происходит достаточно быстро. Уже через 340 нс после начала этапа выключения поле на границе база–коллектор составляет ~ 350 кВ/см (см. вставку к рис. 5, *a*).

При выключении транзистора током управления (рис. 5, *b*) картина распределения поля в коллекторе в процессе выключения качественно напоминает аналогичный процесс при обрыве тока управления (рис. 5, *a*). Концентрация инжектированных дырок монотонно уменьшается со временем, а поле в каждой точке коллектора монотонно возрастает. В тех областях коллектора, где по мере уменьшения концентрации дырок реализуется низкий уровень инжекции, и ток является током основных носителей, поле составляет ~ 880 В/см.

Этап задержки, как и в предыдущем случае, продолжается вплоть до практически полного исчезновения дырок в коллекторе. Однако как процесс экстракции дырок из коллектора, так и процесс выключения происходят значительно быстрее. Так, поле на границе база–коллектор составляет ~ 300 кВ/см уже через 40 нс после окончания этапа задержки (см. вставку к рис. 5, *b*).

Отметим в заключение, что глубокая модуляция проводимости коллекторного слоя транзистора делает возможным работу прибора в непрерывном режиме при весьма высокой плотности тока. Действительно, в стационарном состоянии ($t \geq 5$ мкм, рис. 1) сопротивление транзистора R_{on} не превышает ~ 0.02 Ом. В приведенном выше расчете величины R_{on} учитываются падение напряжения на эмиттерном, коллекторном и базовом слоях, а также падение напряжения на барьерах эмиттер–база и база–коллектор. Разумеется, при оценке практически достижимых значений R_{on} необходимо также учесть сопротивление контактов структуры. Легко убедиться, что при типичных значениях удельного контактного сопротивления $10^{-5} - 10^{-4}$ Ом·см², контактное сопротивление не вносит заметного вклада в общее сопротивление прибора. Таким образом, при плотности тока $j = 500$ А/см² плотность мощности, выделяющейся при работе транзистора, составит ~ 10 В/см².

4. Заключение

В рамках одномерного моделирования проанализирован процесс выключения высоковольтного SiC бипо-

лярного транзистора из режима глубокого насыщения. Показано, что, в согласии с ранее полученными экспериментальными данными, время задержки при выключении t_d и собственно время выключения t_{off} могут быть существенно уменьшены при выключении структуры отрицательным током базы. При вполне реалистическом значении отрицательного тока базы $I_b = -0.2$ А (для транзистора с рабочей площадью 0.02 см²) время выключения может составить $t_{off} \sim 50$ нс, что в 2 раза меньше времени включения при том же значении включающего базового тока и в ~ 40 раз меньше времени выключения в стандартном режиме выключения ($I_b = 0$).

В ФТИ им. А.Ф. Иоффе работа поддержана фирмой Wolfspeed, A Cree company.

Приложение

На рис. 6 показана схема выключения биполярного транзистора. Знак (–) сигнала на базе соответствует режиму выключения транзистора. Очевидно, что поток дырок, экстрагируемых из коллектора, замыкается через базовый электрод.

Чтобы промоделировать такое поведение дырок, нами была развита следующая квазидвумерная модель. Пусть к базовому контакту включенного транзистора прикладывается импульс напряжения амплитудой U_b . Ток через базовый электрод тогда будет равен

$$I_b = \frac{U_b}{R_{lb} + R_b}, \tag{П.1}$$

где R_{lb} — сопротивление нагрузки в цепи базы (в соответствии с типичными условиями эксперимента $R_{lb} = 50$ Ом), а внутреннее сопротивление базы R_b меняется в процессе выключения. На этапе задержки, а также на начальном этапе процесса выключения $R_{lb} \gg R_b$, и ток выключения практически равен U_b/R_{lb} .

Для y -компоненты плотности базового тока можно написать

$$j_y^b = \sigma F_y, \tag{П.2}$$

где $\sigma = q\mu_p p$ — удельная проводимость базового слоя, F_y — y -компонента поля в базе.

Полагая σ и F_y зависящими только от координаты y , для падения напряжения на базе получим, что

$$R_b = \frac{L_E}{w \int_0^{Z_E} \sigma(x, t) dx}, \tag{П.3}$$

$$j_y^b = \frac{q\sigma}{L_E} I_b R_b, \tag{П.4}$$

а мощность источника дырок в базе будет равна

$$G(x, t) = \frac{j_y^b(x, t)}{qL_E}, \tag{П.5}$$

где L_E — ширина эмиттерного контакта, а Z_E — суммарная длина эмиттера (см. рис. 6). Полагая, что на

этапе выключения U_b не меняется со временем, и комбинируя (П.1)–(П.5), получим следующее выражение для источника дырок:

$$G(x, t) = \frac{G(x, t)}{qL_E^2} \frac{R_b(t)}{R_{bi} + R_b(t)} (R_{bi} + R_b(t_{off})) I_{b,off}, \tag{П.6}$$

где индекс „off“ относится к моменту начала процесса выключения. Из выражения (П.6) видно, что мощность источника дырок зависит от их концентрации и стремится к нулю при $p(x) \rightarrow 0$. Заметим также, что при $R_{bi} \gg R_b$ выражение для источника дырок (П.6) весьма близко к тому, которое использовалось в режиме включения.

Список литературы

- [1] A. Agarwal, J. Muth, P. Gradzki, L. Marino, R. Ivester, N. Justice. Mater. Sci. Forum, **858**, 797 (2016).
- [2] S. Ryu, A. Agarwal, R. Singh, J.W. Palmour. 58th IEEE Device Research Conf. Dig (Denver, Colorado, USA, June 19–21, 2000) p. 133.
- [3] S. Ryu, A. Agarwal, R. Singh, J.W. Palmour. IEEE Electron Dev. Lett., **22**, 124 (2001).
- [4] S. Krishnaswami, A. Agarwal, Ryu Sei-Hyung, C. Capell, J. Richmond, J. Palmour, S. Balachandran, T.P. Chow, S. Bayne, B. Geil, K. Jones, C. Scozzie. IEEE Electron Dev. Lett., **26**, 175 (2005).
- [5] Q.J. Zhang, A. Agarwal, Al Burk, B. Geil, C. Scozzie. Sol. St. Electron., **52**, 1008 (2008).
- [6] H. Miyake, T. Okuda, H. Niwa, T. Kimoto, J. Suda. IEEE Electron Dev. Lett., **33**, 1598 (2012).
- [7] S. Balachandran, T.P. Chow, A. Agarwal, C. Scozzie, K.A. Jones. IEEE Electron Dev. Lett., **26**, 470 (2005).
- [8] M. Domeij, C. Zaring, A. Konstantinov, M. Nawaz, J.-O. Svedberg, K. Gumaelius, I. Keri, A. Lindgren, B. Hammarlund, M. Ostling, K. Reimark. Mater. Sci. Forum, **645–648**, 1033 (2010).
- [9] R. Ghandi, B. Buono, M. Domeij, C. Zetterling, M. Ostling. Mater. Sci. Forum, **679–680**, 706 (2011).
- [10] Y. GAO. <https://repository.lib.ncsu.edu/handle/1840.16/4818>
- [11] B. Benedetto, R. Ghandi, M. Domeij, B.G. Malm, C.-M. Zetterling, M. Östling. IEEE Trans. Electron. Dev., **58**, 2081 (2011).
- [12] V.S. Yuferev, M.E. Levinshtein, P.A. Ivanov, J.Q. Zhang, J.W. Palmour. Sol. St. Electron., **123**, 130 (2016).
- [13] P.A. Ivanov, V.S. Yuferev, M.E. Levinshtein, J.Q. Zhang, J.W. Palmour. Abstracts 11th Eur. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials (ECSCRM-2016), Halkidiki, Greece, September 25–29, 2016) p. 407.
- [14] И.П. Степаненко. *Основы теории транзисторов и транзисторных схем* (М.–Л., Госэнергоиздат, 1963).
- [15] M.E. Levinshtein, P.A. Ivanov, A.K. Agarwal, J.W. Palmour. Sol. St. Electron., **48**, 491 (2004).
- [16] P.A. Ivanov, M.E. Levinshtein, J.W. Palmour, A.K. Agarwal, J. Zhang. Semicond. Sci. Technol., **25**, 045030 (2010).
- [17] S.N. Vainshtein, V.S. Yuferev, J.T. Kostamovaara. IEEE Trans. Electron. Dev., **49**, 142 (2002).
- [18] S.N. Vainshtein, V.S. Yuferev, J.T. Kostamovaara. Sol. St. Electron., **47** 1255 (2003).

- [19] S.N. Vainshtein, V.S. Yuferev, J.T. Kostamovaara. *Phys. Rev. Lett.*, **99**, 176601 (2007).
- [20] M. Levinshtein, S. Rumyantsev, M. Shur. *Properties of Advanced Semiconductor Materials: GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe* (John Wiley & Sons, N. Y., 2001).

Редактор Г.А. Оганесян

Transient of 4H-SiC bipolar transistor switch-off process from deep saturation mode

V.S. Yuferev¹, M.E. Levinshtein¹, P.A. Ivanov¹,
Jon Q. Zhang², John W. Palmour²

¹ Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia
² Wolfspeed, A Cree company,
Research Triangle Park,
NC 27709, USA

Abstract Transient of 4H-SiC BJT switch-off processes from deep saturation mode have been investigated in the framework of one-dimensional simulation. The switch-off in zero base current mode and in the mode of negative base current are studied. It is shown that in the latter case, the switch-off time can be reduced up to ~ 40 times in comparison with that in zero base current mode at quite realistic values of negative base current. The delay time can be also substantially (in some times) reduced. It is noted that in the deep saturation mode, when vigorous conductivity modulation of the collector layer by minority carriers is realized, a BJT can operate in continuous mode at rather high current density.