

Высоковольтный тиристор на основе карбида кремния с блокирующей базой n -типа

© М.Е. Левинштейн*, Т.Т. Мнацаканов⁺, С.Н. Юрков⁺, А.Г. Тандоев⁺,
Sei-Hyung Ryu[•], J.W. Palmour[•]

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

⁺ Всероссийский электротехнический институт им. В.И. Ленина,
111250 Москва, Россия

[•] Cree Inc., 4600 Silicon Dr.,
Durham NC 27703, USA

E-mail:melev@nimis.ioffe.ru

(Получена 14 июля 2015 г. Принята к печати 8 сентября 2015 г.)

Проанализирована возможность создания высоковольтного тиристора на основе карбида кремния с блокирующей базой n -типа. Показано, что тиристорная структура, созданная как „аналог“ современной тиристорной структуры с блокирующей базой p -типа, т.е. с сохранением толщин слоев структуры и заменой типа легирования слоев, не может быть включена ни при каком уровне входного сигнала. При комнатной температуре структура с приемлемыми параметрами при использовании блокирующей базы n -типа может быть реализована только при отсутствии стоп-слоя. В этом случае, однако, блокируемое структурой максимальное напряжение будет приблизительно в 2 раза ниже, чем напряжение, блокируемое тиристором с блокирующей базой p -типа с той же толщиной блокирующей базы. При наличии стоп-слоя при комнатной температуре на прямой вольт-амперной характеристике тиристора с блокирующей n -базой возникает участок S -образного дифференциального сопротивления, обусловленный нарушением и последующим восстановлением нейтральности. При температуре окружающей среды $\geq 150^\circ\text{C}$ вольт-амперные характеристики тиристора с блокирующей n -базой становятся вполне удовлетворительными и при наличии стоп-слоя.

1. Введение

Для реализации мощных импульсных систем необходимы высоковольтные мощные ключи, способные удовлетворить современные требования к высокой плотности мощности и малому размеру таких устройств. Способность SiC тиристоры блокировать высокие напряжения и коммутировать значительные токи в ряде случаев обеспечивают этим приборам существенные преимущества перед другими мощными переключательными приборами на основе карбида кремния, такими как JFETs, MOSFETs и IGBTs.

Первый SiC тиристор (динистор), продемонстрированный в 1988 году, имел блокирующее напряжение в диапазоне 30–50 В и эффективную площадь $7 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$ [1]. В последующие годы был достигнут впечатляющий прогресс в увеличении блокирующего напряжения, рабочей площади и тока, коммутируемого SiC тиристорами [2]. К настоящему времени продемонстрированы SiC тиристоры 18 кВ класса [3,4]. SiC тиристоры с блокирующим напряжением 9 кВ, большой скоростью нарастания тока dI/dt и коммутируемым импульсным током до ~ 5500 А исследованы в работе [5].

Хотя первые SiC тиристоры имели блокирующую базу n -типа [1], все современные высоковольтные SiC тиристоры создаются с блокирующей базой p -типа. Причина этого достаточно очевидна. Высококачественные сильно легированные подложки с малым удельным сопротивлением образуют эффективный эмиттер $n^{++}-p$ перехода катод–блокирующая база с коэффициентом инжекции,

близким к единице (рис. 1, *a*) [4]. Кроме того, важно отметить, что время жизни неравновесных носителей заряда в умеренно легированных слоях n^+ -типа, образующих тонкую базу тиристора ($N \approx 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ на рис. 1, *a*), существенно выше, чем время жизни неосновных носителей в слоях p -типа с тем же уровнем легирования. Следовательно, транспортный коэффициент усиления верхнего составного $p^{++}-n^+-p$ -транзистора при тех же толщинах тонкой базы и уровне легирования будет выше, чем у „аналогичного“ $n^{++}-p^+-n$ -транзистора в структуре с блокирующей базой n -типа (рис. 1, *b*).

Очевидно, что при разработке „аналогичной“ тиристорной структуры с базой n -типа (рис. 1, *b*) эти преимущества отсутствуют. Существует, однако, убедительная мотивация к созданию высоковольтных тиристоры с блокирующей базой n -типа. Как известно, время жизни неосновных носителей в чистых слоях карбида кремния n -типа значительно выше, чем в слоях p -типа с той же концентрацией (см., например, [6–9]). Достижимое время жизни в толстой слабо легированной блокирующей базе определяет минимально возможное отношение W_b/L , где W_b — толщина блокирующей базы, $L = \sqrt{D_a \tau}$ — амбиполярная диффузионная длина в базовом слое. (Здесь $D_a = 2(kT/q)[\mu_n \mu_p / (\mu_n + \mu_p)]$ — амбиполярный коэффициент диффузии, τ — время жизни неосновных носителей, μ_n и μ_p — подвижности электронов и дырок соответственно). Именно величина W_b/L в значительной мере определяет величину прямого напряжения и, следовательно, потери энергии во включенном состоянии. Как показывает многолетний опыт

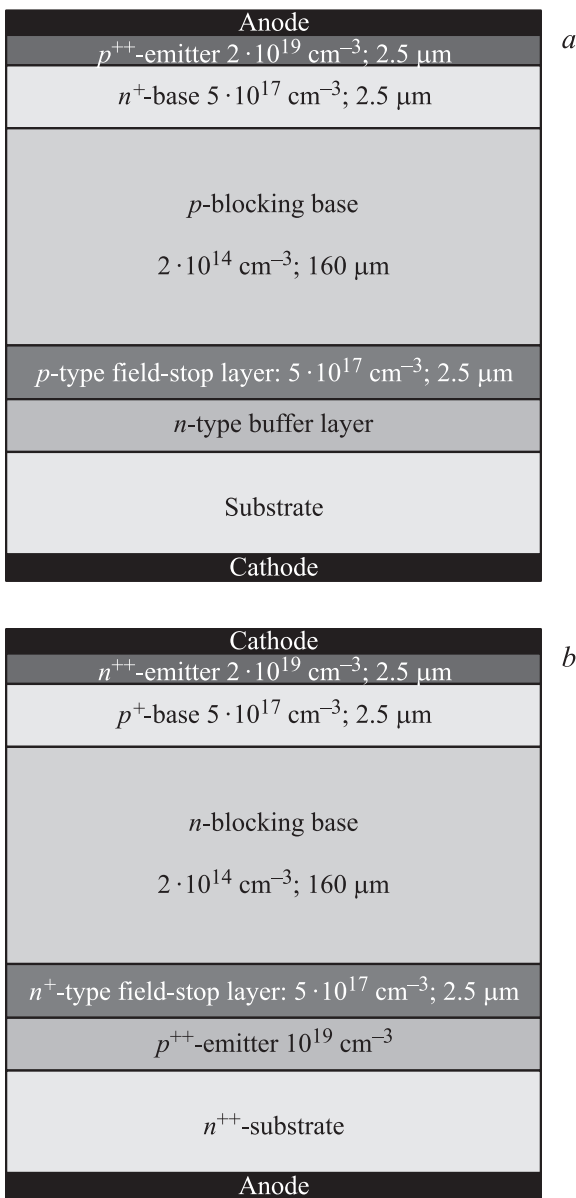


Рис. 1. *a* — схема поперечного сечения 4H-SiC тиристора 18 кВ класса с блокирующей базой *p*-типа [4]. *b* — схема поперечного сечения тиристора с блокирующей базой *n*-типа. Используется *n*⁺-подложка. Толщины и уровень легирования всех слоев в случаях (*a*) и (*b*) одинаковые.

эксплуатации кремниевых тиристорov, оптимальным является отношение $W_b/L \approx 2-3$.

В Si высоковольтных приборах получение достаточно больших времен жизни неосновных носителей при современном уровне технологии существенных трудностей не представляет. Однако для высоковольтных SiC структур с большим значением W_b получение оптимальных соотношений W_b/L оказывается трудно достижимым. Например, при комнатной температуре, времени жизни электронов τ_n в блокирующей *p*-базе 2 мкс [4] и значениях $\mu_n = 900 \text{ см}^2/\text{Вс}$ и $\mu_p = 120 \text{ см}^2/\text{Вс}$ отношение W_b/L

для тиристора, показанного на рис. 1, *a*, составит ≈ 4.9 . С другой стороны, время жизни дырок в чистой слабо легированной базе *n*-типа (рис. 1, *b*) может составлять ~ 20 мкс [6]. В этом случае минимальное отношение W_b/L составит ≈ 1.55 . Таким образом, в принципе в структуре с блокирующей базой *n*-типа может быть реализована оптимальная величина W_b/L . Однако совершенно не очевидно, что большее время жизни в базе *n*-типа сможет компенсировать отсутствие преимуществ структур с базой *p*-типа, отмеченных выше.

В настоящей работе на основе численного моделирования проделан подробный анализ параметров высоковольтных 4H-SiC тиристорov с блокирующей базой *n*-типа. Результаты сопоставлены с соответствующими данными для тиристорov с базой *p*-типа, проанализированными в работах [3,4,10].

2. Условия и параметры моделирования

Численное моделирование проводилось с помощью компьютерной программы „Исследование“ [11]. Эта программа основана на современных уравнениях переноса носителей заряда в полупроводниках, позволяющих корректно учитывать полную совокупность нелинейных эффектов высокого уровня инжекции и высокого уровня легирования: оже-рекомбинацию, электронно-дырочное рассеяние, сужение ширины запрещенной зоны, зависимость кинетических коэффициентов и времени жизни носителей заряда от уровня легирования в сильно легированных слоях структуры и т.д. [12]. С помощью программы „Исследование“ ранее были успешно промоделированы как статические, так и динамические характеристики 4H-SiC диодов и тиристорov [12–15].

Сужение ширины запрещенной зоны в 4H-SiC при высоких уровнях легирования описывалось в соответствии с данными [16]. Коэффициенты излучательной и оже-рекомбинации C_n и C_p принимались равными $B = 10^{-12} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$, $C_n = 5 \cdot 10^{-31} \text{ см}^6 \cdot \text{с}^{-1}$ и $C_p = 2 \cdot 10^{-31} \text{ см}^6 \cdot \text{с}^{-1}$ и $C = 7 \cdot 10^{-31} \text{ см}^6 \cdot \text{с}^{-1}$ соответственно [17]. Зависимости подвижности электронов и дырок от уровня легирования в *p*⁺- и *n*⁺-слоях описывались на основе данных, представленных в [16,18,19]. Уменьшение времени жизни с ростом уровня легирования в *p*⁺- и *n*⁺-слоях описывалось хорошо известным эмпирическим выражением [20]

$$\tau_{n0,p0(\text{emitt.})} = \frac{\tau_{n0,p0(\text{base})}}{1 + (N/N_{n,p})^{\alpha_{n,p}}}, \quad (1)$$

где $\tau_{n0,p0(\text{base})}$ — значения времен жизни τ_{n0} , τ_{p0} в слабо легированной блокирующей базе, N — уровень легирования в сильно легированных слоях, $N_{n,p}$ и $\alpha_{n,p}$ — характерные параметры, зависящие как от материала, так и от технологии изготовления прибора. Параметры, характеризующие вклад электронно-дырочного рассеяния в SiC, учитывались в соответствии с результатами

работы [21]. Для слоев p -типа принимался во внимание эффект неполной ионизации атомов Al при комнатной температуре.

Включение тиристора моделировалось импульсной генерацией электронно-дырочных пар в базах тиристора. Длительность импульса была много меньше всех характерных времен включения. Концентрация носителей спадала в соответствии с законом

$$n = p = n(0)[\exp(-\beta(x))], \quad (2)$$

где точка $x=0$ соответствует верхней границе p^{++} -эмиттера (рис. 1). Результаты слабо зависят от величины β . Детальные расчеты проделаны для $\beta = 2 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$. Концентрация электронно-дырочных пар, созданных в момент $t = 0$ в базах структуры, была такой же, как и концентрация носителей, создаваемая в процессе аналогичного моделирования высоковольтных SiC тиристорov класса 18 кВ с p -базой [4] и соответствовала энергии светового импульса $J_0 = 4.0 \cdot 10^{-6} \text{ Дж см}^{-2}$. Как и в работе [4], расчет проводился для рабочей площади структуры $S_{in} = 0.0152 \text{ см}^2$, соответствующей площади первоначального включения структуры под действием импульса света.

Детали численного решения соответствующих дифференциальных уравнений представлены в работе [11].

3. Результаты и обсуждение

В качестве первого шага мы промоделировали процесс включения тиристорной структуры, представленной на рис. 1, *b*. Как отмечалось выше, эта структура представляет собой „аналог“ тиристорной структуры с базой p -типа, показанной на рис. 1, *a* и подробно исследованной в работах [3,4]. Толщины всех слоев структур, представленных на рис. 1, *a* и *b*, совпадают. В обоих случаях используется подложка n -типа. Заметим, что использование для создания высоковольтных тиристорных структур сильно легированных подложек p -типа практически невозможно: удельное сопротивление таких подложек на 2 порядка больше, чем удельное сопротивление подложек n -типа [22]. Кроме того, структурное совершенство подложек p -типа значительно хуже. Параметры структуры, использованные при моделировании, приведены в таблице.

Параметры слоев тиристорной структуры с n -базой (рис. 1, *b*)

Слой	Уровень легирования, см^{-3}	Толщина W , мкм	$\tau_{p0} = \tau_{n0}$, мкс
n^{++} -эмиттер	$2 \cdot 10^{19}$	2.5	$3 \cdot 10^{-4}$
p^+ -база	$5 \cdot 10^{17}$	2.5	10^{-2}
n -база	$2 \cdot 10^{14}$	160	2
n^+ -„стоп-слой“	$5 \cdot 10^{17}$	2.5	10^{-2}
p^{++} -эмиттер	10^{19}	2.5	$6 \cdot 10^{-4}$
Подложка	$2 \cdot 10^{19}$	350	$3 \cdot 10^{-4}$

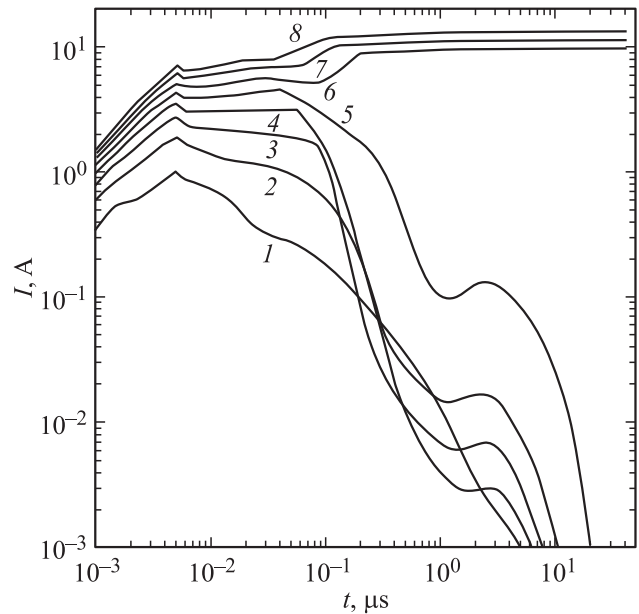


Рис. 2. Отклик катодного тока на входной сигнал (кривые 1–5) и переходной процесс включения тиристора (кривые 6–8) для тиристора с n -базой без стоп-слоя. Катодное напряжение U_0 (В): 1 — 100, 2 — 200, 3 — 300, 4 — 400, 5 — 500, 6 — 600, 7 — 700, 8 — 800. Последовательно с транзистором включено нагрузочное сопротивление $R_L = 53.6 \text{ Ом}$.

Моделирование показывает, что такая структура не может быть включена ни при каком уровне входного сигнала. Реакция на импульс входного сигнала носит характер, типичный для транзисторной структуры: ток через структуру нарастает, а затем уменьшается до значения, соответствующего току утечки.

Качественное рассмотрение показывает, что такой результат является следствием прежде всего крайне низкого коэффициента инжекции перехода p^{++} -эмиттер– n^+ -„стоп-слой“. Действительно, вследствие большой энергии ионизации Al в SiC (0.24–0.26 эВ) только около 2% атомов Al оказываются ионизованными при комнатной температуре [20]. В результате концентрация дырок в p^{++} -эмиттере составляет $\sim 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, т.е. она меньше, чем концентрация электронов в n^+ -стоп-слое. Очевидно, что в такой ситуации сколько-нибудь эффективная инжекция дырок в блокирующую базу невозможна.

Инжекция дырок может быть существенно улучшена, если использовать структуру без стоп-слоя. В этом случае инжекционная способность перехода p^{++} -эмиттер (с концентрацией дырок $\sim 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) — блокирующая n -база (с концентрацией электронов $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$) значительно повышается.

На рис. 2 показан переходной процесс включения тиристора без стоп-слоя при различных значениях катодного напряжения U_0 . За исключением отсутствия стоп-слоя, исследуемая структура полностью аналогична структуре, показанной на рис. 1, *b*.

Видно, что при $U_0 < 600$ В реакция на импульс входного сигнала носит характер, типичный для транзисторной структуры: ток через структуру нарастает, а затем уменьшается до значения, соответствующего току утечки. При $U_0 \geq 600$ В тиристор включается. Интересно отметить, что процесс включения носит немонокотонный характер. После первого достаточно быстрого этапа включения, длительность которого составляет ~ 6 нс, ток несколько спадает, после чего снова следует участок нарастания тока. Затем ток снова немного уменьшается и нарастает уже до стационарного значения. Сходный (двухэтапный) процесс включения экспериментально наблюдался при исследовании $4H$ -SiC тиристоров 18 кВ класса с *p*-базой [3] и был теоретически проанализирован в работе [4].

Сравнивая характеристики включения тиристора с *p*-базой, исследованного в [3], с характеристиками, представленными на рис. 2, можно сделать следующие выводы. Минимальное катодное напряжение $U_{0\min}$, с которого может быть включен тиристор с *p*-базой, заметно меньше 50 В. В то же время для тиристора с *n*-базой без стоп-слоя величина $U_{0\min}$ превышает 600 В (рис. 2).

Такая разница между свойствами рассматриваемой структуры и тиристора с *p*-базой, описанного в [3], обусловлена обстоятельством, отмеченным выше: транспортный коэффициент усиления верхнего составного $p^{++}-n^+-p$ -транзистора при тех же толщинах тонкой базы и уровне легирования выше, чем у „аналогичного“ $n^{++}-p^+-n$ -транзистора в структуре с блокирующей базой *n*-типа.

С этой точки зрения интерес представляет вопрос о возможности включения тиристора с *n*-базой при наличии стоп-слоя с уменьшенным уровнем легирования. Поскольку коэффициент инжекции перехода p^{++} -эмиттер–стоп-слой, грубо говоря, определяется отношением концентрации дырок в p^{++} -эмиттере к концентрации электронов в стоп-слое, можно ожидать, что существенное уменьшение уровня легирования стоп-слоя приведет к весьма заметному увеличению коэффициента инжекции.

Действительно, моделирование показывает, что уменьшение уровня легирования в стоп-слое позволяет реализовать тиристор с блокирующей базой *n*-типа. На рис. 3 показан переходной процесс включения тиристора с уровнем легирования стоп-слоя $5 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$ при различных значениях катодного напряжения U_0 . Толщина стоп-слоя для этой структуры составляла 3 мкм, толщина p^+ -базы равнялась 2 мкм.

Из рисунка видно, что структура может быть включена при минимальном значении катодного напряжения $U_{0\min} = 400$ В. Некоторое снижение величины $U_{0\min}$ по сравнению со структурой без стоп-слоя (рис. 2) обусловлено тем, что в данном случае толщина p^+ -базы уменьшена с 2.5 до 2 мкм.

Пониманию явлений, происходящих в тиристоре, способствует рассмотрение статических вольт-амперных

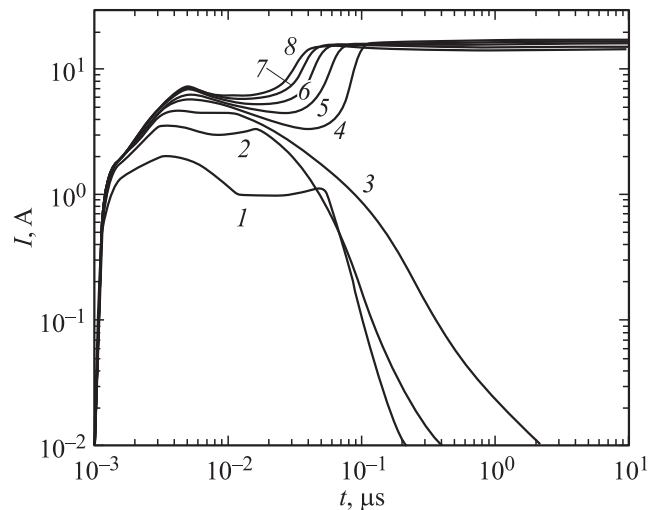


Рис. 3. Отклик катодного тока на входной сигнал (кривые 1–3) и переходной процесс включения тиристора (кривые 4–8) для тиристора с *n*-базой с уменьшенным уровнем легирования и несколько увеличенной толщиной стоп-слоя. Катодное напряжение U_0 (В): 1 — 100, 2 — 200, 3 — 300, 4 — 400, 5 — 500, 6 — 600, 7 — 700, 8 — 800. Последовательно с транзистором включено нагрузочное сопротивление $R_L = 53.6$ Ом.

характеристик тиристорных структур. Исследование вольт-амперных характеристик тиристорных структур с блокирующей базой *n*-типа показывает, что при большой толщине базы (160 мкм) и времени жизни в блокирующей базе $\tau_{p0} = \tau_{n0} = 2$ мс при протекании прямого тока реализуется эффект, предсказанный в работе [23]. Как показано в [23], в структурах с базой *n*-типа при большом отношении W_b/L и (или) сильной асимметрии инжектирующей способности эмиттеров на прямой ветви вольт-амперной характеристики должен возникнуть участок *S*-образного сопротивления. Напряжение на структуре и плотность тока, при которой возникает участок *S*-образного сопротивления, определяются величиной W_b/L и эффективностью инжекции на границах блокирующей базы. (В модели из работы [23] эффективность инжекции описывается величинами токов насыщения соответствующих переходов j_{sn} и j_{sp}).

На рис. 4 показана рассчитанная статическая вольт-амперная характеристика тиристора, переходные характеристики которого показаны на рис. 3.

Как показано в работе [23], участок отрицательного дифференциального сопротивления при большом отношении W_b/L возникает при достаточно большой плотности тока вследствие нарушения нейтральности. С дальнейшим ростом тока режим квазинейтральности может восстанавливаться. При этом дифференциальное сопротивление вновь становится положительным. Важно подчеркнуть, что этот эффект не может наблюдаться в структурах с базой *p*-типа [23], что полностью соответствует экспериментальным данным по исследованию высоковольтных SiC тиристоров с базой *p*-типа [3,4,10].

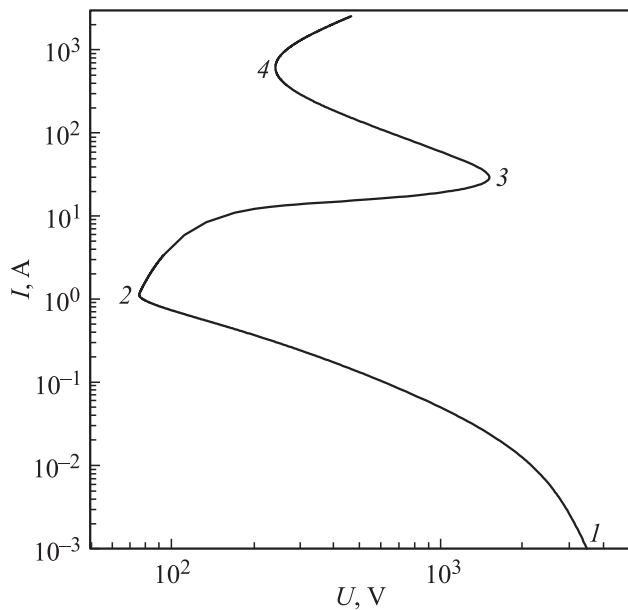


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика тиристора, кривые включения которого показаны на рис. 3. Характеристика рассчитана при „бесконечно большом“ последовательном сопротивлении нагрузки. Тиристор включается „по катоду“ в точке 1 при катодном напряжении $U_c \approx 3.6$ кВ. Минимальное остаточное напряжение достигается в точке 2 при токе $I = 1$ А (плотность тока $j \approx 65$ А/см²). При плотностях тока $j \geq 1300$ А/см² возникает участок S-образного отрицательного дифференциального сопротивления (точка 3). При плотностях тока $j \geq 4.2 \cdot 10^4$ А/см² (точка 4) дифференциальное сопротивление прибора вновь становится положительным [23].

В соответствии с постановкой задачи, сформулированной во Введении, важно выяснить, как повлияет на свойства высоковольтных тиристорных структур с блокирующей базой *n*-типа существенное увеличение времени жизни неравновесных носителей в базах. На рис. 5 показана рассчитанная вольт-амперная характеристика тиристора с базой *n*-типа для случая, когда времена жизни в блокирующей *n*-базе и в тонкой *p*-базе существенно увеличены и составляют 12 мкс и 100 нс соответственно (ср. с таблицей). Увеличение времени жизни в блокирующей *n*-базе уменьшает величину W_b/L . Рост времени жизни в тонкой *p*-базе позволяет заметно улучшить эффективность инжекции неравновесных электронов в *n*-базу. Ожидалось, что такие изменения позволят компенсировать низкий коэффициент инжекции перехода p^{++} -эмиттер–*n*⁺-стоп-слой.

Сравнение рис. 4 с рис. 5 ясно показывает, что даже очень существенное увеличение времен жизни носителей заряда в базах тиристора не приводит к желаемому результату. S-образный участок на прямой вольт-амперной характеристике структуры сохраняется, несмотря на вполне приемлемое с точки зрения Si-тиристорных отношение $W_b/L \approx 2$. Причина состоит в очень низкой инжектирующей способности перехода p^{++} -эмиттер–*n*⁺-стоп-слой. Такой вывод надежно под-

тверждается результатами моделирования структуры, полностью аналогичной структуре, данные для которой представлены на рис. 5, но с отсутствующим стоп-слоем (рис. 6).

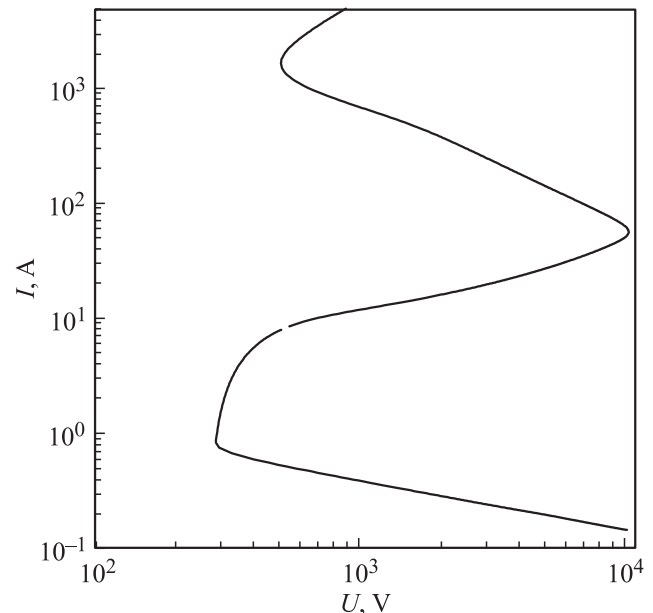


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика тиристора с увеличенными значениями времени жизни носителей в блокирующей *n*-базе и в тонкой *p*-базе. Толщина *p*-базы равняется 3 мкм. Тиристор включается „по катоду“ при катодном напряжении $U_c \geq 10$ кВ.

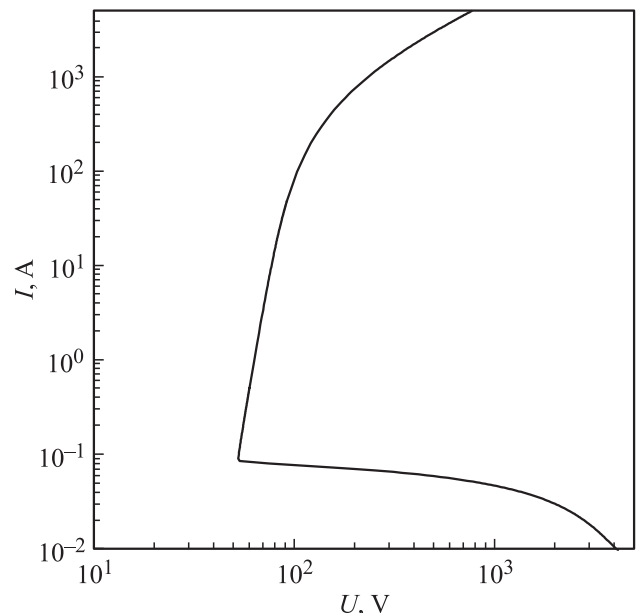


Рис. 6. Вольт-амперная характеристика тиристора с увеличенными значениями времени жизни носителей в блокирующей *n*-базе и в тонкой *p*-базе, аналогичная структуре, данные для которой представлены на рис. 5, но при отсутствии стоп-слоя. Тиристор включается „по катоду“ при катодном напряжении $U_c \geq 4$ кВ. Участок S-образного сопротивления отсутствует.

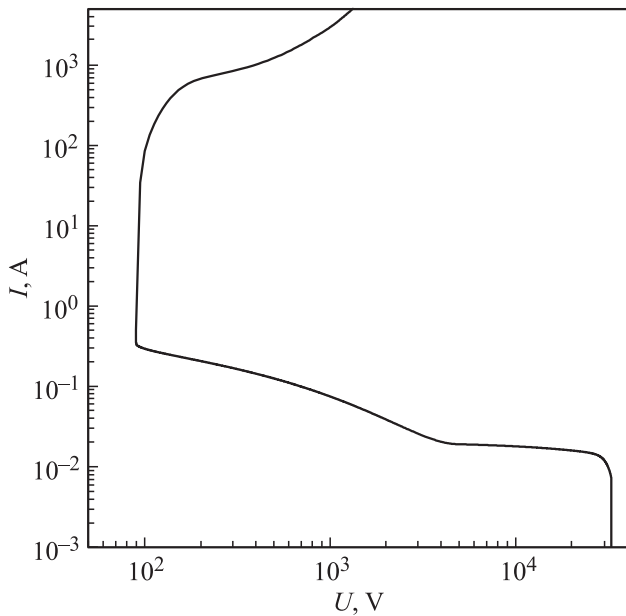


Рис. 7. Вольт-амперная характеристика тиристора с блокирующей n -базой при наличии стоп-слоя при температуре окружающей среды 150°C . Параметры тиристора полностью аналогичны параметрам тиристора, данные для которого при комнатной температуре приведены на рис. 5: толщина блокирующей n -базы $W_n = 160$ мкм, толщина p^+ -базы $W_p = 3$ мкм, толщина стоп-слоя $W_{sp} = 5$ мкм, уровень легирования стоп-слоя $N_{sp} = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, время жизни неравновесных носителей в блокирующей базе $\tau_n = 12$ нс, время жизни неравновесных носителей в p^+ -базе $\tau_p = 100$ нс.

Одним из главных преимуществ мощных SiC приборов является их способность работать при весьма высокой температуре окружающей среды. При повышении температуры уровень ионизации акцепторного центра (Al) в p^+ -эмиттере резко возрастает, концентрация дырок в этом слое увеличивается, и коэффициент инжекции перехода p^+ -эмиттер– n^+ -стоп-слой существенно улучшается. Так, например, при температуре окружающей среды 150°C расчетные вольт-амперные характеристики тиристора с блокирующей базой n -базой становятся вполне удовлетворительными и при наличии стоп-слоя (рис. 7).

Как видно из рис. 7, участок S -образного отрицательного сопротивления на вольт-амперной характеристике отсутствует. В диапазоне плотностей токов $0.3 \text{ A} \leq I \leq 100 \text{ A}$, соответствующем диапазону плотностей тока $20 \text{ A/cm}^2 \leq j \leq 6500 \text{ A/cm}^2$, дифференциальное сопротивление тиристора остается достаточно малым.

Отметим, что при $T = 150^\circ\text{C}$ тиристор способен блокировать напряжение $U \geq 30 \text{ кВ}$, тогда как при комнатной температуре максимальное значение блокируемого напряжения не превосходит $\sim 16 \text{ кВ}$. Это обстоятельство обусловлено хорошо известным фактом снижения скоростей ударной ионизации электронов и дырок с повышением температуры [24].

Существенным недостатком структуры с блокирующей n -базой даже при повышенной температуре является большое минимальное остаточное напряжение ($\sim 90 \text{ В}$, рис. 7). Такой результат является прямым следствием наличия в структуре „дополнительного“ перехода n^+ -подложка– p^+ -эмиттер, который при протекании через структуру прямого тока оказывается смещенным в обратном направлении. Следует заметить, однако, что при современном уровне технологии структура с собственной толщиной ~ 170 мкм (рис. 1) может быть изготовлена без подложки [25]. В этом случае тиристор с блокирующей базой n -типа при повышенных температурах ($\geq 150^\circ\text{C}$) будет обладать уникальными свойствами за счет существенно более высоких, чем в аналогичной тиристорной структуре с базой p -типа, времен жизни в блокирующей базе.

4. Заключение

Анализ возможных параметров высоковольтных тиристорных SiC структур с блокирующей базой n -типа показал, что структура, созданная как „аналог“ современной тиристорной структуры с блокирующей базой p -типа, т.е. с сохранением толщин слоев структуры и заменой типа легирования (доноры вместо акцепторов и наоборот), неработоспособна. Такая структура не может быть включена ни при каком уровне входного сигнала. Причиной является очень низкий коэффициент инжекции перехода p^+ -эмиттер– n^+ -стоп-слой, обусловленный большой энергией ионизации Al в SiC ($0.24\text{--}0.26 \text{ эВ}$). Структура с приемлемыми параметрами при использовании блокирующей базы n -типа может быть реализована при отсутствии стоп-слоя. В этом случае, однако, блокируемое структурой максимальное напряжение будет приблизительно в 2 раза ниже, чем напряжение, блокируемое тиристором с блокирующей базой p -типа с той же толщиной блокирующей базы.

Уровень ионизации акцепторного уровня (Al) в p^+ -эмиттере резко возрастает при повышении внешней температуры. При этом концентрация дырок в этом слое увеличивается, и коэффициент инжекции перехода p^+ -эмиттер– n^+ -стоп-слой существенно улучшается. При температуре окружающей среды $\geq 150^\circ\text{C}$ вольт-амперные характеристики тиристора с блокирующей базой n -типа становятся вполне удовлетворительными и при наличии стоп-слоя. В случае реализации высоковольтной тиристорной SiC структуры с блокирующей базой n -типа без подложки такая структура при повышенных температурах может обладать уникальными свойствами за счет существенно более высоких, чем в аналогичной тиристорной структуре с базой p -типа, времен жизни в блокирующей базе.

Работа выполнена при поддержке CREE Res. Inc. и Российского фонда фундаментальных исследований.

Список литературы

- [1] V.A. Dmitriev, M.E. Levinshtein, S.E. Vainshtein, V.E. Chelnokov. *Electron. Lett.*, **24**, 1031 (1988).
- [2] M.E. Levinshtein, S.L. Rumyantsev, T.T. Mnatsakanov, A.K. Agarwal, J.W. Palmour. In: *SiC Materials and Devices*, ed. by M. Shur, S. Rumyantsev, M. Levinshtein (World Scientific, Singapore–New Jersey–London–Hong Kong, 2006) v. 1.
- [3] S.L. Rumyantsev, M.E. Levinshtein, M.S. Shur, L. Cheng, A.K. Agarwal, J.W. Palmour. *Semicond. Sci. Technol.*, **28**, 125 017 (2013).
- [4] T.T. Mnatsakanov, S.N. Yurkov, M.E. Levinshtein, L. Cheng, J.W. Palmour. *Semicond. Sci. Technol.*, **29**, 055 005 (2014).
- [5] H. O'Brien, W. Shaheen, A. Ogunniyi, C.J. Scozzie, Q.J. Zhang, A. Agarwal, V. Temple. *Mater. Sci. Forum*, **717–720**, 1155 (2012).
- [6] T. Miyazawa, M. Ito, H. Tsuchida. *Appl. Phys. Lett.*, **97**, 202 106 (2010).
- [7] P.B. Klein. *Mater. Sci. Forum*, **717–720**, 279 (2012).
- [8] T. Hayashi, K. Asano, J. Suda, T. Kimoto. *J. Appl. Phys.*, **112**, 064 503 (2012).
- [9] G. Alfieri, T. Kimoto. *Appl. Phys. Lett.*, **104**, 092 105 (2014).
- [10] M.E. Levinshtein, S.L. Rumyantsev, M.S. Shur, T.T. Mnatsakanov, S.N. Yurkov, Q.J. Zhang, A.K. Agarwal, L. Cheng, J.W. Palmour. *Semicond. Sci. Technol.*, **28**, 015 008 (2013).
- [11] T. Mnatsakanov, I. Rostovtsev, N. Philatov. *Sol. St. Electron.*, **30**, 579 (1987).
- [12] M.E. Levinshtein, T.T. Mnatsakanov, P.A. Ivanov, J.W. Palmour, S.L. Rumyantsev, R. Singh, S.N. Yurkov. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **48**, 1703 (2001).
- [13] П.А. Иванов, М.Е. Левинштейн, Т.Т. Мнацаканов, J.W. Palmour, A.K. Agarwal. *ФТП*, **39**, 897 (2005).
- [14] T.T. Mnatsakanov, M.E. Levinshtein, L.I. Pomortseva, J.W. Palmour. *Semicond. Sci. Technol.*, **24**, 125 010 (2009).
- [15] S.N. Yurkov, T.T. Mnatsakanov, M.E. Levinshtein, L. Cheng, J.W. Palmour. *Semicond. Sci. Technol.*, **29**, 125 012 (2014).
- [16] U. Lindefelt. *J. Appl. Phys.*, **84**, 2628 (1998).
- [17] A. Galeskas, J. Linnros, B. Breitholtz. *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 3398 (1999).
- [18] Yu.A. Goldberg, M. Levinshtein, S.L. Rumyantsev. In: *Properties of Advanced Semiconductor Materials: GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe* (John Wiley & Sons, Inc., N. Y.–Chichester–Singapore–Toronto, 2001) Chap. 5 (Silicon Carbide).
- [19] T.T. Mnatsakanov, M. Levinshtein, S.N. Yurkov. *Semicond. Sci. Technol.*, **17**, 974 (2002).
- [20] M.E. Levinshtein, J.W. Palmour, S.L. Rumyantsev, R. Singh. *IEEE Trans. on ED*, **45**, 307 (1998).
- [21] T.T. Mnatsakanov, M. Levinshtein, P.A. Ivanov, J.W. Palmour, A.G. Tandoev, S.N. Yurkov. *J. Appl. Phys.*, **93**, 1095 (2003).
- [22] <http://www.google.ru/#newwindow=1&q=cree+research+substrates>
- [23] Т.Т. Мнацаканов, А.Г. Тандоев, М.Е. Левинштейн, С.Н. Юрков, J.W. Palmour. *ФТП*, **47**, 302 (2013).
- [24] S.M. Sze. *Physics of Semiconductor Devices* (John Wiley & Sons, N. Y., 1981).
- [25] M. Briindel, U. Scholz, F. Haag, E. Graf, T. Braun, K.-F. Becker. *Electronics Packaging Techn. Conf. (EPTC)*, Dec. 5–7, Singapore, 441 (2012).

Редактор А.Н. Смирнов

High voltage silicon carbide thyristors with *n*-type blocking base

M.E. Levinshtein*, T.T. Mnatsakanov⁺, S.N. Yurkov⁺, A.G. Tandoev⁺, Sei-Hyung Ryu[•], J.W. Palmour[•]

* Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia
+ All-Russian Electrotechnical Institute,
111250 Moscow, Russia
• Cree Inc., 4600 Silicon Dr.,
Durham NC 27703, USA

Abstract The possibility of creating a high-voltage SiC thyristor with *n*-type blocking base was analyzed on the basis of numerical simulation. It is shown that the thyristor structure created as an „analog“ of actual thyristor structure with a *p*-type blocking base, i.e. with the same thickness of the layers and the replacement of the doping type (donors instead acceptors, and vice versa) is inoperative at room temperature. Such structure cannot be switched-on at any intensity of input signal. At room temperature, high voltage SiC thyristor with *n*-type blocking base with acceptable parameters can be realized only in the absence of a stop-layer. In this case, however, the maximum blocking voltage is approximately two times lower than that for thyristor with *p*-type blocking base of the same thickness. A part of *S*-shape negative differential resistance appears on forward current-voltage characteristic of a thyristor with *n*-type blocking base. This effect is due violation and subsequent recovery of neutrality. At ambient temperature $T \geq 150^\circ\text{C}$, current-voltage characteristics of the thyristor with *n*-type blocking base could be quite acceptable even in the presence of a stop layer.