

Изотермические вольт-амперные характеристики высоковольтных 4H-SiC JBS-диодов Шоттки

© М.Е. Левинштейн*, П.А. Иванов*, Q.J. Zhang⁺, 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

E-mail: melev@nimis.ioffe.ru

(Получена 20 октября 2015 г. Принята к печати 26 октября 2015 г.)

Прямые импульсные изотермические вольт-амперные характеристики 4H-SiC JBS с номинальным блокирующим напряжением 1700 В измерены в температурном диапазоне от -80°C до $+90^{\circ}\text{C}$ (193–363 К) вплоть до значений плотностей тока $j \sim 5600 \text{ A}/\text{cm}^2$ при -80°C и $3000 \text{ A}/\text{cm}^2$ при $+90^{\circ}\text{C}$. При этих измерениях перегрев структуры по отношению к температуре окружающей среды ΔT не превышал нескольких градусов. При больших значениях плотности тока наблюдается эффективная инжекция неосновных носителей (дырок) в базу структуры, сопровождающаяся появлением S-образного дифференциального сопротивления. Измерены также импульсные изотермические вольт-амперные характеристики при температуре 77 К.

1. Введение

Диоды Шоттки (ДШ) в настоящее время нашли применение в самых разнообразных приборах и устройствах современной электроники. Высокочастотные ДШ широко используются в умножителях частоты (вплоть до частот терагерцового диапазона), смесителях, детекторах и нелинейных элементах. Мощные ДШ нашли применение в автомобильной электронике, коммутаторах мощных солнечных батарей большой площади, системах компенсации реактивной мощности. Основными преимуществами ДШ перед приборами с $p-n$ -переходом служат исключительно высокое быстродействие, малое прямое падение напряжения на потенциальном барьере и малые потери при переключении. Эти преимущества обусловлены тем, что ДШ являются приборами на основных носителях: при протекании прямого тока неосновные носители не накапливаются в базе прибора.

В высоковольтных приборах, однако, приходится считаться с тем, что при протекании прямого тока не происходит модуляции сопротивления базы. Это приводит к большим падениям напряжения на базе при больших плотностях тока и к положительному температурному коэффициенту прямого падения напряжения. Оба эти фактора ограничивают способность ДШ выдерживать значительные токи перегрузки (ударные токи) [1,2]. Устранить этот недостаток при сохранении основного преимущества ДШ — быстродействия призваны предложенные в 1987 г. так называемые ДШ, совмещенные с $p-n$ -переходами, (Merged $p-i-n$ /Schottky (MPS) или JBS) [3]. MPS (JBS) представляют собой интегрированные структуры, в которых области с барьером Шоттки чередуются с локальными $p-n$ -областями (см., например, [4,5]). При номинальных плотностях прямого тока ток протекает только через барьеры Шоттки, поскольку напряжение отсечки у них существенно ниже, чем у $p-n$ -переходов. Однако при достаточно большой плотности тока, существенно превышающей номинальные

значения, напряжение на приборе становится достаточно большим, чтобы возникла инжекция неосновных носителей (дырок) из p -областей в базу прибора.

Инжекция неосновных носителей приводит к модуляции сопротивления базы, существенно уменьшает прямое падение напряжения и улучшает устойчивость к токам перегрузки (см., например, [5–7]). При этом, однако, накопление неосновных носителей в базе приводит к резкому уменьшению быстродействия прибора. Таким образом, оптимизация JBS требует компромисса между площадью, занятой $p-n$ -переходами, и устойчивостью к перегрузкам.

Критическим параметром, определяющим работоспособность прибора, является температура перехода (барьера Шоттки или $p-n$ -перехода), достигаемая в том или ином режиме. Расчет перегрева ΔT над температурой окружающей среды может быть проделан численно для любого режима работы (например, методом итераций), если известны изотермические вольт-амперные ($I-U$) характеристики прибора в широком диапазоне температур [8].

Измерению и интерпретации $I-U$ -характеристик 4H-SiC ДШ и JBS посвящено довольно много работ (см., например, [9–12]). Однако во всех этих работах условия весьма далеки от изотермических. Недавно в работе [13] изотермические $I-U$ -характеристики были измерены в области повышенных температур.

В настоящей работе изотермические прямые вольт-амперные $I-U$ -характеристики высоковольтных (1700 В) 4H-SiC JBS исследованы в температурном диапазоне $-80^{\circ}\text{C} - +90^{\circ}\text{C}$ (193–363 К). Кроме того, исследованы изотермические прямые вольт-амперные $I-U$ -характеристики при температуре 77 К. Исследованию поведения SiC приборов при криогенных температурах в последнее время уделяется значительное внимание в связи с возможностью их использования при температурах, близких к критическим температурам высокотемпературных сверхпроводников [14,15].

2. Условия эксперимента

Образцы 4H-SiC JBS с площадью анодного контакта $S = 8 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$ и толщиной базы $W \approx 18 \text{ мкм}$ изготавливались на основе коммерческих JBS структур CPW3-1700S010 (блокирующее напряжение 1700 В) фирмы Сте, Inc. [16]. Импульсные $I-U$ -характеристики измерялись в режиме генератора тока: сопротивление подключенного последовательно с исследуемой структурой высокочастотного резистора $R = 50 \text{ Ом}$ во всех случаях было много больше, чем сопротивление прибора. Длительность переднего фронта импульса составляла 80 нс. Измерения проводились в режиме одиночных импульсов.

При относительно малых амплитудах импульса, когда инжекция неосновных носителей (дырок) отсутствовала, длительность переходного процесса включения не превышала 120 нс. В этом случае напряжение на структуре измерялось через 200 нс после приложения импульса (рис. 1).

При относительно больших напряжениях смещения, когда возникает инжекция дырок, длительность переходного процесса существенно возрастает. Особенности измерений в таких режимах будут описаны далее.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 2 показаны импульсные вольт-амперные характеристики исследуемых JBS, измеренные при различных температурах в диапазоне $-80^\circ\text{C} - +90^\circ\text{C}$. Инжекция неосновных носителей отсутствует вплоть до максимальных значений напряжений, представленных на рисунке.

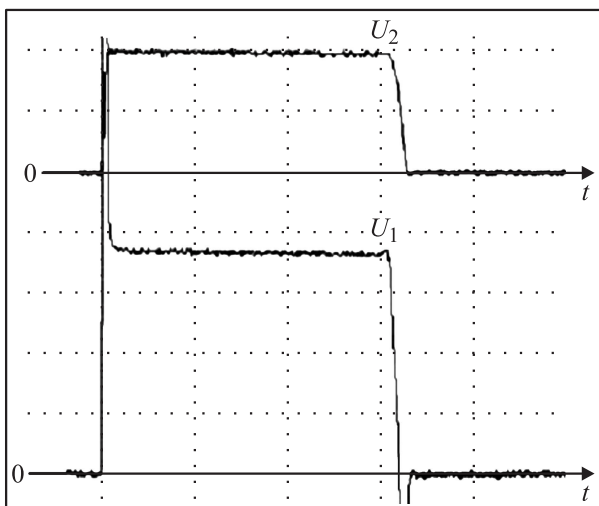


Рис. 1. Пример осциллограмм сигналов U_1 и U_2 при относительно малых напряжениях смещения: U_1 — напряжение на исследуемом JBS; U_2 — сумма напряжений U_1 и падения напряжения на последовательно включенном с прибором сопротивлении $R_1 = 50 \text{ Ом}$. Шкала по горизонтали 1 мкс/дел; шкала по вертикали: для U_1 — 2 В/дел, для U_2 — 50 В/дел. Температура $T = 243 \text{ К}$ (-30°C).

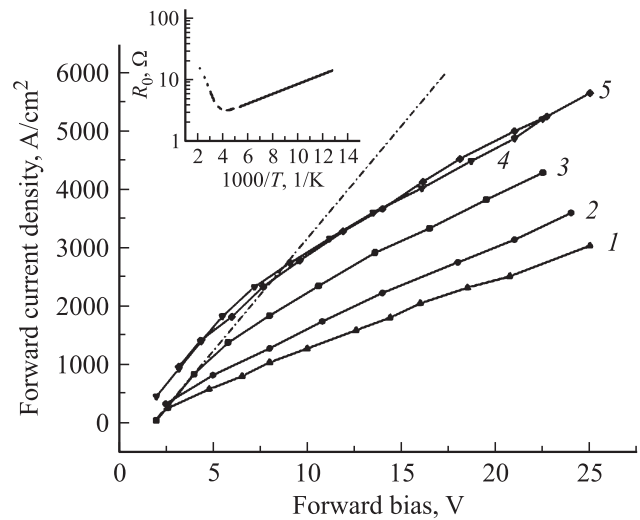


Рис. 2. Зависимости плотности тока j от прямого напряжения U_1 для исследуемых 4H-SiC JBS в отсутствие инжекции дырок при различных температурах T (К): 1 — 363 К ($+90^\circ\text{C}$), 2 — 334 К ($+61^\circ\text{C}$), 3 — 297 К ($+24^\circ\text{C}$), 4 — 243 К (-30°C), 5 — 193 К (-80°C). Пунктиром для кривой 3 показан наклон кривой $j(U)$ в области малых смещений в условиях, когда сопротивление диода R_0 определяется падением напряжения на базе. На вставке показана зависимость R_0 от обратной температуры.

Необходимо отметить, что эффективная инжекция дырок из прямосмещенного SiC $p-n$ -перехода начинается при значениях прямого напряжения на переходе $U \geq 3-5 \text{ В}$. В высоковольтных мощных SiC JBS, однако, применяются специальные конструктивные решения с тем, чтобы ограничить инжекцию неосновных носителей и сохранить быстродействие JBS вплоть до достаточно больших значений плотности прямого тока.

Интересно отметить, что зависимости $j(U)$ для температур -30 и -80°C практически совпадают. С понижением температуры от максимального значения $+90^\circ\text{C}$ сопротивление базы прибора R_0 сначала падает вследствие роста подвижности электронов [17]. Однако при дальнейшем охлаждении сопротивление начинает возрастать за счет вымораживания электронов на наиболее глубокий уровень азота (энергия ионизации $\Delta E_2 = 0.102 \text{ эВ}$ [18]). Именно поэтому значения R_0 практически одинаковы при $T = -30$ и -80°C (см. вставку на рис. 2).

Легко убедиться, что представленные на рис. 2 $j(U)$ характеристики действительно являются изотермическими. Считая, что все выделившееся за время импульса тепло уходит на нагрев прибора, максимальное значение перегрева ΔT над температурой окружающей среды легко оценить по формуле

$$\Delta T \approx \frac{4}{C(T)\rho[W + L_T(T)]\pi[a/2 + L_T(T)]^2}, \quad (1)$$

где $A = I \cdot U \cdot t_0$ — полная энергия, выделившаяся в приборе за время импульса, I — ток, U — падение

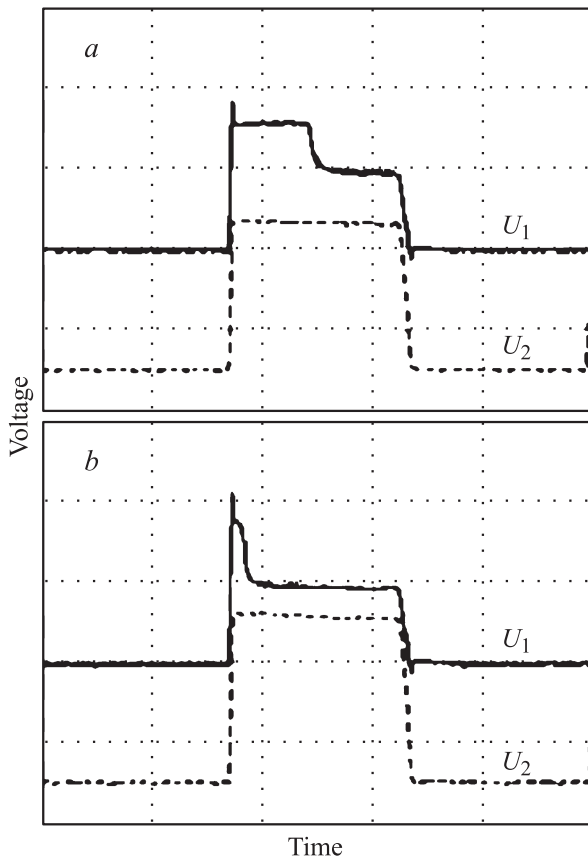


Рис. 3. Примеры временных зависимостей сигналов U_1 и U_2 (присутствует инжекция дырок, $U_1 \geq U_{th} \approx 23$ В). U_1 — напряжение на диоде. Шкала по горизонтали 2 мкс/дел; шкала по вертикали: для U_1 — 20 В/дел, для U_2 — 100 В/дел. Температура $T = 297$ К (24°C). Стационарное значение тока (при $t = 3$ мкс) (A): a — 3.34, b — 3.84.

напряжения на приборе, C — теплоемкость, ρ — плотность, W — толщина базы, a — диаметр прибора, $L_T = \sqrt{\chi t_0}$ — характерная длина диффузии тепла за время импульса t_0 . Здесь $\chi = K/\rho C$ — температуропроводность, K — теплопроводность. В рамках такой оценки предполагается, что выделившееся в приборе тепло за время импульса успевает распространиться на длину L_T .

Для комнатной температуры, например (кривая 3 на рис. 2, $T = 297$ К), максимальные значения тока I и напряжения U составляют $I = 3.4$ А, $U = 22.5$ В. При $W = 18$ мкм, $\rho = 3.21$ г/см³, $t_0 = 2 \cdot 10^{-7}$ с, $C(297 \text{ К}) = 0.69$ Дж/г К, $\chi(297 \text{ К}) = 1.7$ см²/с [17] величина ΔT составляет $\Delta T \approx 3$ К.

Из рис. 2 видно, что при комнатной и пониженных температурах протекающий через образец ток обнаруживает тенденцию к насыщению (кривые 3–5). Эта тенденция исчезает при повышении температуры (кривые 1, 2). Такое поведение зависимости $j(U)$, возможно, объясняется тенденцией к насыщению дрейфовой скорости электронов в сильных электрических полях (см. более подробный анализ в работе [13]).

Для каждого значения температуры окружающей среды T существует пороговое напряжение $U = U_{th}$, при превышении которого наблюдается эффективная инжекция дырок в базу прибора. Характер и длительность переходного процесса в этом случае кардинально изменяются. В качестве примера на рис. 3 показан переходной процесс для температуры $T = 297$ К при двух значениях протекающего через диод тока.

Как видно из рис. 3, в течение некоторого времени после приложения импульса переходной процесс полностью совпадает с процессом, показанным на рис. 1. Однако по прошествии определенного временного интервала t_0 напряжение на диоде (U_1) падает вследствие модуляции сопротивления базы инжектированными дырками, а время установления стационарного состояния резко возрастает до значения $t \approx 3$ мкс. Общая тенденция при росте тока, протекающего через диод, состоит в уменьшении значения t_0 . Однако такая тенденция реализуется только „в среднем“. Момент начала дырочной инжекции сильно флуктуирует от импульса к импульсу (джиттер) даже при неизменном значении тока. Ситуация в некоторых отношениях сходна с микроплазменным пробоем в „обратно смещенных p - n -переходах“ [19].

На рис. 4 представлены зависимости $j(U)$, измеренные при двух температурах и напряжениях $U > U_{th}$. Кривые 1 и 2 на рис. 4 совпадают с кривыми 3 и 5 рис. 2 и соответствуют значениям $U < U_{th}$. Зависимости I' и $2'$ измерены через 200 нс после подачи импульса смещения при $U > U_{th}$, т.е. в условиях, когда в какой-то момент

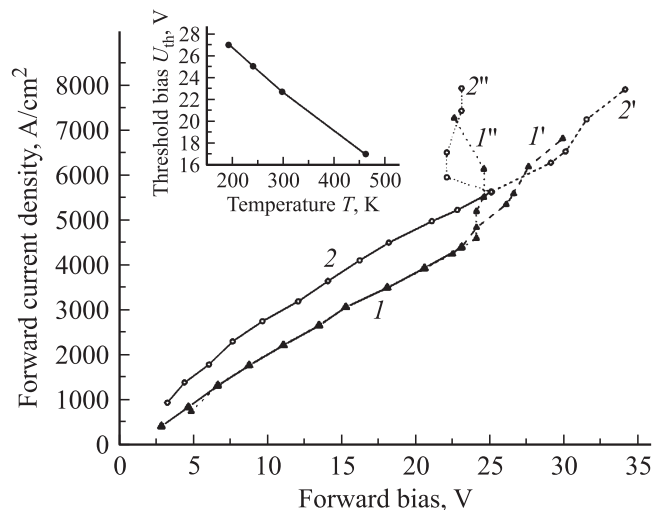


Рис. 4. Зависимости плотности тока j от прямого напряжения U для исследуемых $4H$ -SiC JBS, измеренные при двух температурах: (1, I' , I'') — 297 К ($+24^\circ\text{C}$); (2, $2'$, $2''$) — 193 К (-80°C). Кривые 1 и 2 совпадают с кривыми 3 и 5 рис. 2. Зависимости I' и $2'$ измерены через 200 нс после подачи импульса смещения при $U > U_{th}$. Зависимости I'' и $2''$ измерены через 3 мкс после подачи прямого смещения. На вставке показана температурная зависимость порогового напряжения начала инжекции дырок U_{th} .

времени возникает инжекция дырок в базу прибора. Характер зависимостей, представленных кривыми I' и $2'$, ясно показывает, что на малых временах $t < t_0$ инжекция дырок отсутствует.

Зависимости I'' и $2''$ измерены через 3 мкс после подачи прямого смещения при $U > U_{th}$, когда переходной процесс, обусловленный инжекцией, закончился, и установилось стационарное состояние. Как видно из вставки рис. 4, в широком интервале температур величина U_{th} линейно уменьшается с ростом температуры. Время установления стационарного состояния определяется, по-видимому, временем жизни дырок в n -базе. Заметим, что в этом случае измеренные вольт-амперные характеристики не могут считаться изотермическими. Действительно, например, для комнатной температуры (кривая I'') при $j = 7200 \text{ A/cm}^2$, $U = 22.5 \text{ В}$, $t_0 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ оценка величины ΔT в соответствии с формулой (1) дает $\Delta T \approx 30 \text{ К}$.

Следует отметить, что в рассматриваемом случае реализуется ситуация, в которой изотермические вольт-амперные характеристики не могут быть измерены в принципе. (Такая ситуация подробно проанализирована для p - n -переходов в работе [20].) Для измерения изотермических вольт-амперных характеристик необходимо, чтобы импульс приложенного напряжения был достаточно коротким. С другой стороны, для установления стационарного состояния длительность импульса должна в 2–3 раза превышать время жизни неосновных носителей. Таким образом, если величина ΔT оказывается слишком большой при длительности импульса, равной времени жизни неосновных носителей, изотермическая вольт-амперная характеристика непосредственно не может быть измерена. В таких случаях изотермическая характеристика должна быть „восстановлена“ из результатов импульсных измерений путем сравнения таких результатов с адекватной аналитической или численной моделью. Однако для JBS (в отличие от высоковольтных p - n -переходов [20]) такой теории в настоящее время не существует.

Вольт-амперные характеристики и переходные процессы в исследуемых JBS при 77 К характеризуются рядом особенностей, обусловленных прежде всего тем обстоятельством, что значительная часть электронов при этой температуре оказывается вымороженной [18].

Прежде всего следует отметить очень высокую чувствительность сопротивления базы к саморазогреву, что объясняется тепловым выбросом электронов с уровней азота [18] по мере разогрева. На рис. 5 показаны осциллограммы сигналов U_1 и U_2 при 77 К и значении протекающего через структуру тока $I = 1 \text{ А}$. Напряжение на структуре U_1 равняется 13.5 В через 200 нс после приложения импульса и 11.5 В в конце импульса ($t = 3 \text{ мкс}$).

Видно, что к концу импульса ($t = 3 \text{ мкс}$) напряжение на образце (пропорциональное сопротивлению образца) уменьшается до $\sim 11.5 \text{ В}$ (на $\sim 15\%$). Между тем в

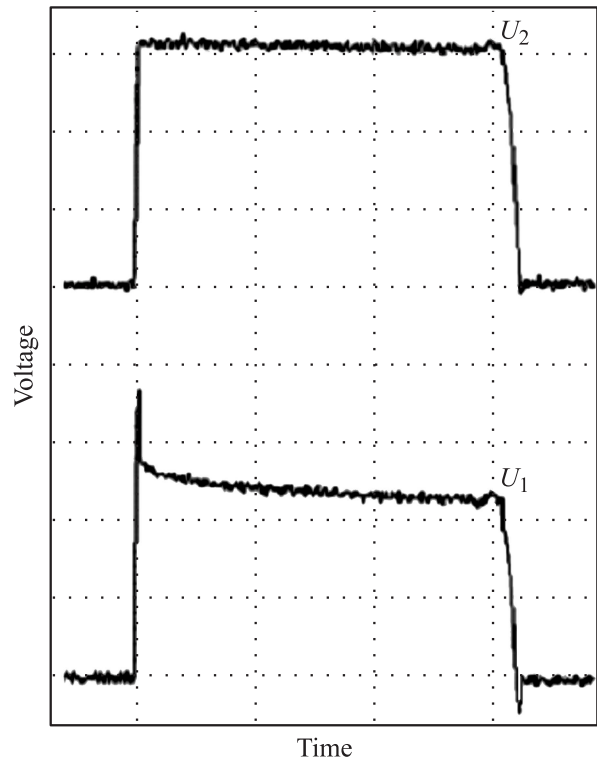


Рис. 5. Осциллограммы сигналов U_1 и U_2 при малых напряжениях смещения: U_1 — напряжение на исследуемом приборе, U_2 — сумма напряжения U_1 и падения напряжения на последовательно включенном с прибором сопротивлении $R_l = 50 \text{ Ом}$. Шкала по горизонтали 1 мкс/дел; шкала по вертикали: для U_1 — 5 В/дел, для U_2 — 20 В/дел. Температура $T = 77 \text{ К}$. Амплитуда протекающего тока $I = 1 \text{ А}$.

диапазоне температур 193–363 К изменение сопротивления образца за счет саморазогрева при аналогичных условиях было пренебрежимо малым (см. рис. 1). С ростом протекающего через образец тока изменение сопротивления во время импульса возрастает. При максимальном значении тока $I \approx 4.1 \text{ А}$, предшествующем наступлению инжекции неосновных носителей, изменение сопротивления во время импульса составляет $\sim 40\%$ (рис. 6, *a*).

При значении протекающего через диод тока $I \approx 4.5 \text{ А}$ (рис. 6, *b*), возникает интенсивная инжекция дырок в базу диода (ср. с рис. 3, *b*). Как и в области температур 193–363 К, наблюдаются значительный джиттер при неизменном токе через диод и заметное уменьшение с ростом тока („в среднем“) времени t_0 , при котором возникает инжекция дырок. Инжекция возникает при напряжении U_1 , равном $\approx 68 \text{ В}$ через 200 нс после подачи импульса смещения. При этом величина U_1 в стационарном состоянии, через 3 мкс после подачи импульса составляет $\approx 25.5 \text{ В}$ (рис. 6, *b*).

С дальнейшим ростом тока через диод время t_0 продолжает уменьшаться, и при $I \approx 5.1 \text{ А}$ инжекция наступает непосредственно на фронте импульса (рис. 6, *c*).

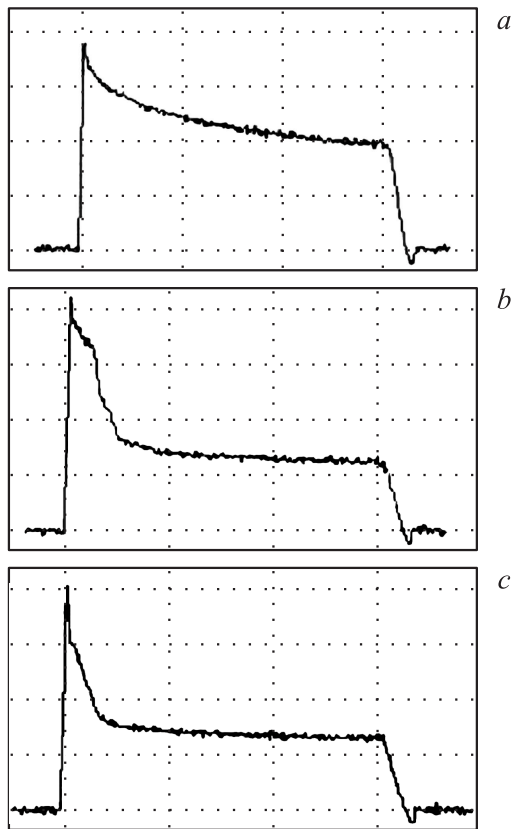


Рис. 6. Осциллограммы напряжения на диоде, U_1 при различных значениях протекающего через диод тока I (А): a — 4.1, b — 4.5, c — 5.1. Шкала по горизонтали 1 мкс/дел, шкала по вертикали 20 В/дел. $T = 77$ К.

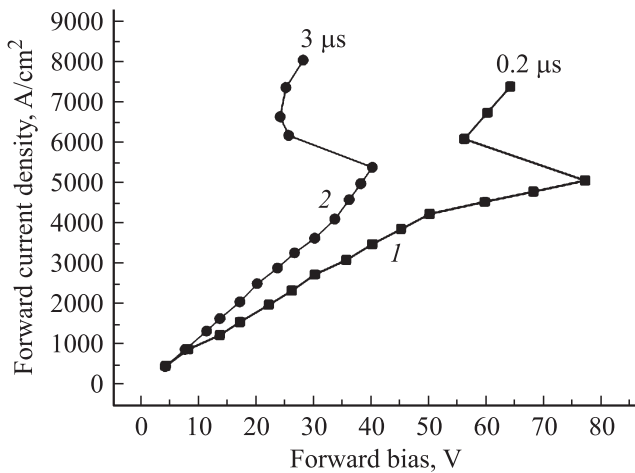


Рис. 7. Зависимости плотности тока j от прямого напряжения U для исследуемых 4H-SiC JBS при 77 К. Зависимости измерены через время после подачи импульса t (мкс): 1 — 0.2, 2 — 3.

Сравнивая рис. 6, b и c , легко заметить, что U_1 (200 нс) на рис. 6, c меньше (≈ 60 В), чем на рис. 6, b , несмотря на большее значение тока (отрицательное дифференциальное сопротивление).

На рис. 7 показаны зависимости $j(U)$, измеренные через 200 нс (кривая 1) и через 3 мкс (кривая 2) после начала импульса.

Из рис. 7 видно, что инжекция дырок и возникновение S -образного отрицательного дифференциального сопротивления в изотермических условиях (кривая 1) возникают при значении порогового напряжения $U_{th} \approx 77$ В. Оценить температуру, при которой происходит переключение, соответствующее кривой 2 на рис. 7, достаточно сложно. При 77 К теплоемкость SiC, оцененная в соответствии с моделью Дирака из экспериментальных данных [17], составляет $C(77 \text{ К}) \approx 1.6 \cdot 10^{-2}$ Дж/г К. При теплопроводности $K(77 \text{ К}) \approx 8$ Вт/см К [17] температуропроводность $\chi = K/\rho C \approx 150$ см²/с, и за время $t = 3$ мкс тепло распространяется на характерное расстояние $L_T = \sqrt{\chi t} \approx 200$ мкм. При этом справедливость формулы (1) для оценки перегрева структуры ΔT становится неочевидной.

4. Заключение

Измерены прямые изотермические вольт-амперные характеристики в 4H-SiC JBS с блокирующим напряжением 1700 В в диапазоне температур от -80°C до $+90^\circ\text{C}$ (193–363 К) вплоть до предельных плотностей тока, при которых отсутствует инжекция неосновных носителей (дырок) в базу прибора (~ 5600 А/см² при -80°C , ~ 3000 А/см² при $+90^\circ\text{C}$). Импульсные $j-U$ -характеристики измерены через 200 нс после приложения импульса прямого смещения. При этом перегрев структуры по отношению к температуре окружающей среды ΔT не превышает нескольких градусов. Величина порогового напряжения U_{th} , при котором начинается эффективная инжекция дырок, приблизительно линейно падает от ~ 27 В при $T = 193$ К до ~ 17 В при $T = 460$ К. При наличии инжекции неосновных носителей время установления стационарного состояния определяется, по-видимому, временем жизни дырок в n -базе и составляет приблизительно 3 мкс. Вольт-амперные характеристики, измеренные при длительности импульса ~ 3 мкс, не могут считаться изотермическими: перегрев ΔT в этом случае составляет несколько десятков градусов. Отмечено, что, если при длительности импульса, равного времени жизни неосновных носителей, величина ΔT не отвечает требованиям изотермичности, изотермическая вольт-амперная характеристика непосредственно не может быть измерена в принципе.

При температуре 77 К изотермические вольт-амперные характеристики измерены вплоть до значений плотности тока $j \approx 5000$ А/см². Отмечена очень высокая чувствительность сопротивления прибора к саморазогреву, объясняемая тепловым выбросом электронов, вымороженных на уровни по мере протекания тока.

Работа выполнена при поддержке Cree Res. Inc.

Список литературы

- [1] L.M. Hillkirk. *Sol. St. Electron.*, **48**, 2181 (2004)
- [2] M.E. Levinshtein, P.A. Ivanov, T.T. Mnatsakanov, J.W. Palmour, M.K. Das, B.A. Hull. *Sol. St. Electron.*, **52**, 1802 (2008)
- [3] J. Baliga. *IEEE Electron Dev. Lett.*, **8**, 407 (1987)
- [4] J. Wu, L. Fursin, Y. Li, P. Alexandrov, M. Weiner, J.H. Zhao, *Semicond. Sci. Technol.*, **21**, 987 (2006)
- [5] П.А. Иванов, И.В. Грехов, А.С. Потапов, О.И. Коньков, Н.Д. Ильинская, Т.П. Самсонова, О. Korol'kov, N. Sleptsuk. *ФТП*, **46**, 411 (2012)
- [6] J.D. Caldwell, R.E. Stahlbush, E.A. Imhoff, K.D. Hobart, M.J. Tadjer, Q. Zhang, A. Agarwal. *J. Appl. Phys.*, **106**, 044 504 (2009)
- [7] C. Buttay, C. Raynaud, H. Morel, G. Civrac, M.-L. Locatelli, F. Morel. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **59**, 761 (2012).
- [8] H. Carslow, J. Jager. *Conduction of Heat in Solids* (Clarendon Press, Oxford, 1959).
- [9] F. Cappelluti, F. Bonani, G. Ghione. *Proc. Int. Semicond. Dev. Res. Symp. ISDRS '09*, Dec. 9–11 (College Park, MD, USA, 2009) p. 1.
- [10] B.L. Maas, N.D. Clements, V. Rinaldi. *IEEE Trans. Magnetics*, **29**, 1017 (1993).
- [11] R. Perez, N. Mestres, M. Vellveh, P. Godignon, J. Mill. *Semicond. Sci. Technol.*, **21**, 670 (2006).
- [12] C.M. Johnson, M. Rahimo, N.G. Wright, D.A. Hinchley, A.B. Horsfall, D.J. Morrison, A. Knights. *Industry Applications Conference, 2000. Conf. Record of the 2000 IEEE*, **5**, 2941 (2000).
- [13] J.W. Palmour, M.E. Levinshtein, P.A. Ivanov, Q.J. Zhang. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **48**, 235 103 (2015).
- [14] M. Berthou, B. Asllani, P. Brosselard, P. Godignon. *Proc. 16th Int. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials, ICSCRM2014*, Dubai, UAE. Nov. 25–26. *Mater. Sci. Forum*, 821–823, 583 (2015).
- [15] T. Chailloux, C. Calvez, D. Tournier, D. Planson. *Proc. 16th Int. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials, ICSCRM2014*, Dubai, UAE, Nov. 25–26. *Mater. Sci. Forum*, 821–823, 814 (2015).
- [16] [http://www.cree.com/~media/Files/Cree/Power/Data Sheets/CPW31700S010B.pdf](http://www.cree.com/~media/Files/Cree/Power/Data%20Sheets/CPW31700S010B.pdf)
- [17] M.E. Levinshtein, S.L. Rumyantsev, M.S. Shur, eds., *Properties of Advanced Semiconductor Materials: GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe* (John Wiley & Sons, Inc. N. Y. 2001).
- [18] G. Pensl, F. Giobanu, T. Frank, M. Krieger, S. Reshanov, F. Schmid, M. Weidner. *SiC Material Properties. In: SiC Materials and Devices* (M. Shur, S. Rumyantsev, M. Levinshtein, eds (World Scientific, Singapore–New Jersey–London–Hong Kong, 2006).
- [19] И.В. Грехов, Ю.Н. Сережкин. *Лавинный пробой p–n-переходов в полупроводниках* (Л., Энергия, 1980).
- [20] M.E. Levinshtein, T.T. Mnatsakanov, P.A. Ivanov, J.W. Palmour, M.K. Das, B.A. Hull. *Semicond. Sci. Technol.*, **22**, 253 (2007).

Редактор А.Н. Смирнов

Isothermal current-voltage characteristics of high-voltage 4H-SiC junction barrier Schottky rectifiers

M.E. Levinshtein*, P.A. Ivanov*, Q.J. Zhang⁺, J.W. Palmour⁺

* Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia
⁺ Cree Inc., 4600 Silicon Dr.,
Durham NC 27703, USA

Abstract Isothermal forward current-voltage characteristics of high-voltage (1700 V) 4H-SiC JBS have been measured in the temperature range from -80°C to $+90^{\circ}\text{C}$ up to current densities $j \sim 5600 \text{ A/cm}^2$ at -80°C and 3000 A/cm^2 at $+90^{\circ}\text{C}$. At these measurements, the overheating ΔT did not exceed several degrees. At larger values of j , effective injection of minority carriers (holes) in the base of the structure occurs, which accompanies by appearance of S-type differential resistance. Isothermal forward current-voltage characteristics of JBS at 77 K have been also studied.