

Высоковольтные (3.3 кВ) JBS-диоды на основе 4H-SiC

© П.А. Иванов[†], И.В. Грехов, Н.Д. Ильинская, О.И. Коньков, А.С. Потапов,
Т.П. Самсонова, О.Ю. Серебренникова

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

(Получена 1 ноября 2010 г. Принята к печати 8 ноября 2010 г.)

Изготовлены и исследованы высоковольтные 4H-SiC диоды, имеющие интегрированную шоттки-(*p-n*)-структуру (Junction Barrier Schottky, JBS). Рабочая площадь диодов (площадь анодного контакта) — 1.44 мм². В диапазоне токов от 10⁻¹¹ до 1.5 А прямая ВАХ описывается по модели термоэлектронной эмиссии с учетом влияния последовательного сопротивления диода: высота барьера Шоттки $\Phi_B = 1.16$ эВ, фактор идеальности $n = 1.01$, последовательное сопротивление $R_s = 2.2$ Ом (32 мОм · см²). Величина R_s задается сопротивлением блокирующей эпитаксиальной *n*-базы (концентрация примесей $N = 9 \cdot 10^{14}$ см⁻³, толщина *n*-слоя $d = 34$ мкм). В обратном направлении диоды блокируют напряжение по меньшей мере 3.3 кВ (при обратном напряжении 3.3 кВ ток утечки при комнатной температуре составляет величину порядка одного микроампера). Выдвинуто предположение, что механизм утечки связан с дефектами кристаллической структуры SiC — дислокациями. Показано, что характеристики обратного восстановления диодов задаются протеканием чисто емкостного обратного тока.

1. Введение

Силовая полупроводниковая электроника, основанная главным образом на кремниевых приборах, постепенно перестает удовлетворять нарастающим требованиям по функциональным возможностям, массе, объему, ресурсу работы и надежности преобразовательных устройств. Поэтому одним из наиболее перспективных направлений их развития становится освоение широкозонных полупроводниковых материалов, в частности карбида кремния 4H-политипа (4H-SiC). В настоящее время на массовый рынок уже вышли мощные высоковольтные диоды Шоттки (ДШ) на основе 4H-SiC. Применение 4H-SiC ДШ в активных корректорах коэффициента мощности вместо кремниевых быстродействующих диодов (БВД) обеспечивает увеличение КПД на 2% [1]. 4H-SiC ДШ идеально подходят для применения в качестве антипараллельных диодов в силовых модулях совместно с кремниевыми IGBT-ключами (по сравнению с БВД их применение позволяет уменьшать суммарные потери более чем вдвое [2]). Начинается промышленное использование 4H-SiC ДШ в DC-AC инверторах систем регенеративного электропитания, базирующихся на солнечных батареях и топливных элементах.

Существующие коммерческие 4H-SiC ДШ рассчитаны на обратное напряжение 300, 600, 1200 и 1700 В [3]. Однако есть потребность и в более высоковольтных быстродействующих диодах, способных блокировать напряжения вплоть до 10 кВ (например, силовые IGBT-модули для промышленных систем электропривода производятся на напряжения до 6.5 кВ).

В настоящей работе сообщается об изготовлении и исследованиях 4H-SiC ДШ, которые блокируют в обратном направлении напряжение 3.3 кВ и имеют дифференциальное сопротивление в открытом состоянии 32 мОм · см².

2. Диодные чипы

Современные ДШ на основе 4H-SiC конструктивно представляют собой интегрированные шоттки-(*p-n*) (JBS, Junction Barrier Schottky) структуры, в которых шоттки-области перемежаются с локальными имплантированными *p*-областями. В прямом направлении ток протекает через шоттки-области, так что сопротивление такого диода в открытом состоянии определяется характеристиками шоттки-контакта. В то же время зазор между *p*-областями делают таким узким, чтобы при включении диода в обратном направлении области пространственного заряда (ОПЗ) от соседних *p-n*-переходов смыкались при некотором напряжении. В результате система *p*-областей действует как экранирующая сетка: силовые линии поля частично замыкаются не на шоттки-металле, а на *p*-областях. Благодаря эффекту экранирования область максимального поля в диоде с JBS-структурой находится, в отличие от обычного диода ДШ, не в плоскости раздела металл-полупроводник, а несколько отодвинута от поверхности в объем, что способствует уменьшению обратного тока до значений, характерных для *p-n*-перехода.

В изготовленных в настоящей работе 4H-SiC диодах *p*-области в JBS-структуре изготавливались с помощью неравновесной диффузии бора из имплантированного источника. Для подавления преждевременного краевого пробоя в структуре диодов использована охранная система из „плавающих“ охранных *p*-колец, также формируемых неравновесной диффузией бора из имплантированного источника. Использовался коммерческий эпитаксиальный материал фирмы Stee, Inc: концентрация доноров в базовом *n*-слое $N = 9 \cdot 10^{14}$ см⁻³, толщина *n*-слоя $d = 34$ мкм. Технология изготовления диодов описана нами ранее в работах [4–8]. Схематическое поперечное сечение диодного чипа показано на рис. 1. На поверхности базового эпитаксиального *n*-слоя сформирован шоттки-контакт размером 1.2×1.2 мм из напы-

[†] E-mail: Pavel.Ivanov@mail.ioffe.ru

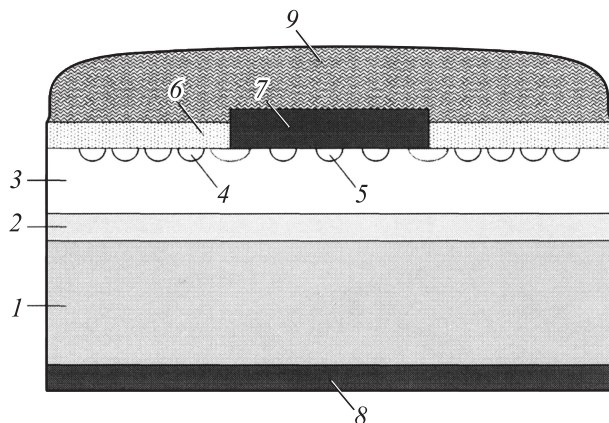


Рис. 1. Схематическое поперечное сечение 4H-SiC ДШ с JBS-структурой: 1 — подложка n -типа проводимости (удельное сопротивление $0.02 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, толщина 370 мкм), 2 — буферный эпитаксиальный n -слой (концентрация доноров $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, толщина 8 мкм), 3 — базовый эпитаксиальный n -слой (концентрация доноров $9 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, толщина 34 мкм), 4 — „плавающие“ охраняющие p -кольца, 5 — локальные p -области JBS-структуры, 6 — пассивирующий окисел, 7 — металл шоттки-контакта (анод), 8 — металл омического контакта (катод), 9 — силиконовый гель.

ленного никеля. Поверх никеля нанесен слой алюминия. На обратной стороне структуры сформирован омический контакт из напыленного и термически вожденного слоя никеля. Поверх контактного металла нанесен слой серебра. JBS-структура состоит из перемежающихся шоттки- и p -областей в соотношении площадей 4:1 соответственно. Поверхность базового эпитаксиального n -слоя пассивирована термическим окислом SiO_2 . Чип залит силиконовым гелем.

Вольт-фарадные характеристики (ВФХ) измерялись на частоте 1 кГц с помощью емкостного моста Е8-2. Прямые вольт-амперные характеристики (ВАХ) измерялись на постоянном токе и на импульсах от релаксационного генератора. Обратные ВАХ измерялись на постоянном токе с помощью DC-DC преобразователя SpellMan UM4*20, а также с помощью специально сконструированного высоковольтного (до 5 кВ) характеристикографа. Характеристики обратного восстановления измерялись с помощью специально сконструированной двухключевой схемы, позволяющей переключать диоды с прямого тока в несколько ампер на обратное напряжение до 500 В .

3. Вольт-фарадные характеристики

На рис. 2, *a* показана типичная ВФХ, измеренная при комнатной температуре и построенная в координатах $C^{-2}-V$. При обратных напряжениях $V < V_1 \approx -10 \text{ В}$ эта характеристика линейна, а ее наклон соответствует заявленной производителем концентрации нескомпенсированных доноров в n -слое $N_D - N_A = 9 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

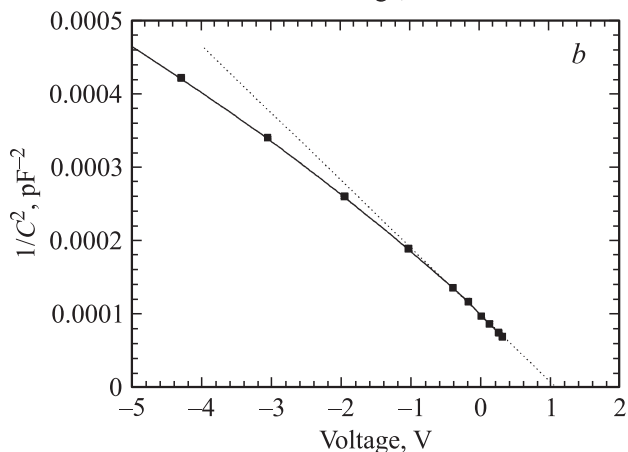
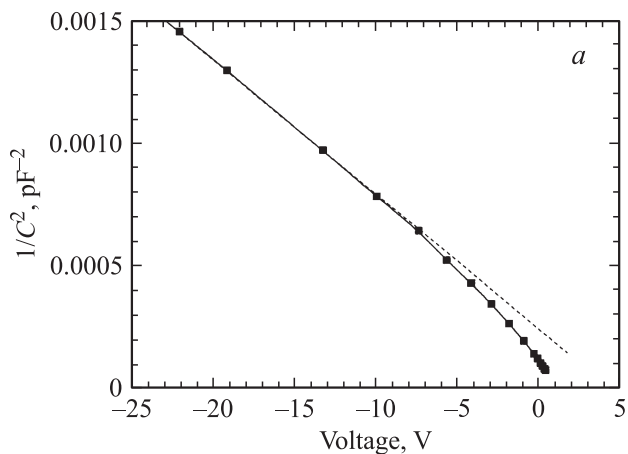


Рис. 2. Вольт-фарадная характеристика (ВФХ) 4H-SiC JBS-диода.

При изменении обратного напряжения от V_1 до нуля крутизна ВФХ постепенно нарастает, что связано с влиянием на результат измерений суммарной емкости имплантированных локальных $p-n$ -переходов JBS-структуры. Очевидно, что напряжение отсечки V_0 , определяемое экстраполяцией ВФХ к $C^{-2} = 0$ ($C = \infty$), должно задаваться высотой барьера металл-полупроводник. Как видно из рис. 2, *b*, $V_0 \approx 1.1 \text{ В}$. Отметим, что напряжение V_1 — это то напряжение, при котором области пространственного заряда (ОПЗ) от соседних $p-n$ -переходов уже оказываются сомкнутыми, так что расширение ОПЗ в глубь n -области становится квазиодномерным.

4. Вольт-амперные характеристики

Прямые ВАХ. На рис. 3 точками показана типичная прямая ВАХ диода, находящегося в открытом состоянии. Измерения проводились на импульсах длительностью 2 мкс с частотой повторения 2 Гц , при комнатной температуре. Как видно, напряжение открывания диода составляет около 0.8 В , а дифференциальное сопротивление в открытом состоянии $R_s = 2.2 \text{ Ом}$ ($r_s = 32 \text{ мОм} \cdot \text{см}^2$). Это сопротивление включает в себя

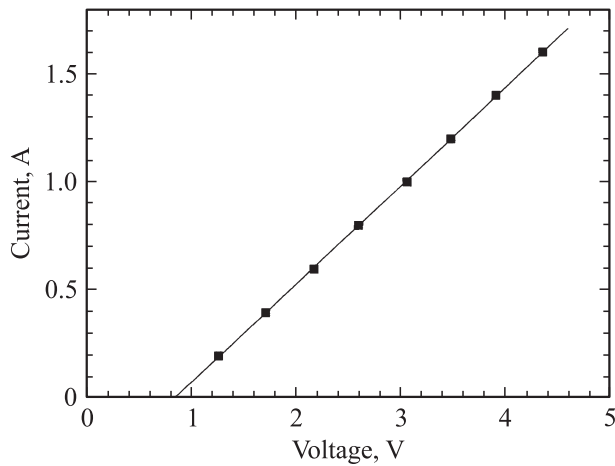


Рис. 3. Импульсная прямая ВАХ JBS-диода, находящегося в открытом состоянии.

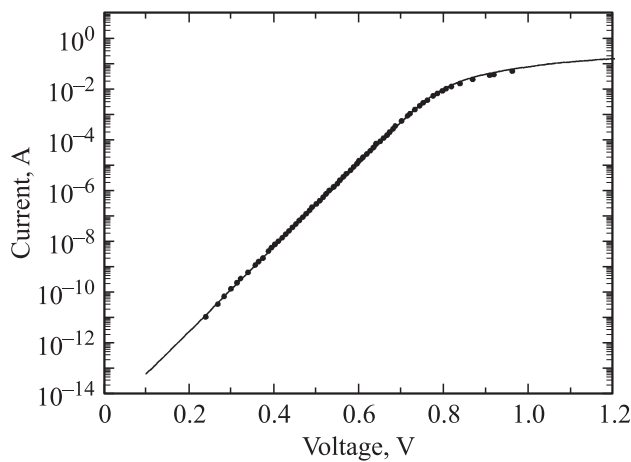


Рис. 4. Прямая ВАХ 4H-SiC JBS-диода: точки — эксперимент, сплошная линия — аппроксимация по формулам (2) и (3).

сопротивление эпитаксиальной n -базы, сопротивление подложки и сопротивление омического контакта к подложке. Расчетное сопротивление эпитаксиального n -слоя

$$r_n = \frac{d}{qn\mu} \quad (1)$$

составляет $28 \text{ мОм} \cdot \text{см}^2$ ($n = 9 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ — концентрация доноров в n -слое; $\mu = 850 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ [9] — подвижность электронов в n -слое; $d = 34 \text{ мкм}$ — толщина n -слоя). Таким образом, сопротивление диода в открытом состоянии по сути задается сопротивлением эпитаксиального n -слоя.

На рис. 4 точками показана прямая ВАХ, измеренная на постоянном токе в диапазоне $10^{-11} - 10^{-1} \text{ А}$. В диапазоне токов от 10^{-11} до 10^{-3} А ВАХ представляет собой чисто экспоненциальную зависимость тока I от напряжения V . При дальнейшем увеличении тока дифференциальное сопротивление диода сравнивается с последовательным сопротивлением R_s и ВАХ отклоняется от экспоненциальной.

На рис. 4 сплошной линией показана ВАХ, полученная аппроксимацией экспериментальных данных по модели термоэлектронной эмиссии из полупроводника в металл с учетом влияния последовательного сопротивления диода R_s :

$$I = S_{\text{Sch}} A^* T^2 \exp\left(-\frac{\Phi_B}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV_{\text{SCR}}}{nkT}\right), \quad (2)$$

$$V = V_{\text{SCR}} + IR_s, \quad (3)$$

где q — элементарный заряд, S_{Sch} — суммарная площадь шоттки-областей ($S_{\text{Sch}} = 1.15 \text{ см}^2$), A^* — эффективная константа Ричардсона ($A^* = 35 \text{ А}/\text{см}^2\text{К}^2$ [10]), Φ_B — высота барьера, V_{SCR} — падение напряжения на обедненном слое контакта Шоттки, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, n — фактор идеальности. Полученные в результате аппроксимации значения подгоночных параметров следующие: высота барьера $\Phi_B = 1.16 \text{ эВ}$, фактор идеальности $n = 1.01$.

Обратные ВАХ. Изготовленные 4H-SiC JBS-диоды оказались способными блокировать обратное напряжение по меньшей мере 3.3 кВ (см. рис. 5, на котором показана ВАХ, снятая с экрана высоковольтного характеристриографа). Как видно, при напряжении 3.3 кВ заметного обратного тока (масштаб по току — 0.5 мА/дел) еще нет.

На рис. 6 показаны обратные ВАХ трех диодов, измеренные на постоянном токе при напряжениях до 3.3 кВ в диапазоне токов от долей наноампера до нескольких микроампер. Как видно, во всех случаях при обратном напряжении $V_r = 3.3 \text{ кВ}$ ток утечки составляет $\sim 1 \text{ мкА}$. Однако вид обратных ВАХ для измеренных диодов оказался различным. Весьма примечательно то, что ВАХ могут пересекаться. Например, в диоде 2 при $V_r = 1 \text{ кВ}$

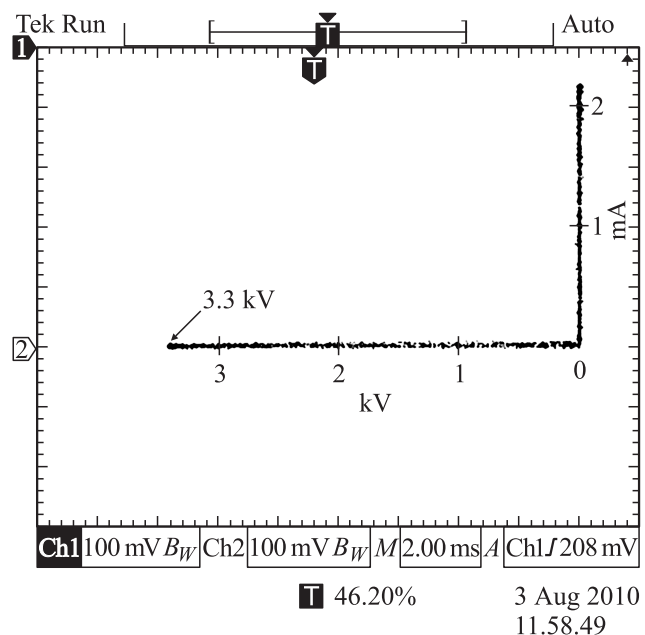


Рис. 5. ВАХ, снятая с экрана высоковольтного характеристриографа.

ток утечки по меньшей мере на полтора порядка больше по сравнению с диодом 1, однако при увеличении напряжения эта разница нивелируется и при $V_r = 3.3$ кВ утечка в диоде 2 становится уже в 2 раза меньше.

Такое поведение диодов свидетельствует о том, что механизм утечки связан с дефектами кристаллической структуры полупроводника, в частности с дислокациями. Ранее в нескольких работах была отмечена корреляция величины тока утечки с плотностью проникающих дислокаций (см., например, [11,12]). Механизм утечки с участием дислокаций был предложен нами в работе [10]. Согласно предложенной модели, ток протекает по механизму ТОПЗ за счет монополярной инжекции электронов из точечных областей, находящихся в пределах шоттки-металла (там, где проникающие дислокации выходят на поверхность) в ОПЗ полупроводника. В местах выхода дислокаций на поверхность энергетический барьер для электронов, покидающих металл, может быть понижен и отодвинут от поверхности полупроводника в его объем на некоторое расстояние. Как следствие, в приповерхностной области полупроводника образуется точечный „резервуар“ электронов. Прикладывание отрицательного потенциала к металлу вызывает монополярную инжекцию электронов из такого наномасштабного резервуара в ОПЗ полупроводника и протекание тока по механизму ТОПЗ. В формировании ВАХ исключительно важную роль играют ловушки захвата электронов. Дело в том, что все ловушки в ОПЗ первоначально опустошены и легко могут захватывать инжектированные электроны. В этом случае только часть инжектируемых в ОПЗ электронов создает ток проводимости. Очевидно, что при описанном механизме протекания обратного тока вид ВАХ может сложным образом зависеть от того, сколько дислокаций находится в пределах площади чипа, какова концентрация ловушек, окружающих дислокацию, и т.п.

С практической точки зрения, важным является то, что при обратном напряжении 3.3 кВ режим ударной ионизации еще не достигается как в объеме, так и на периферии диодов.

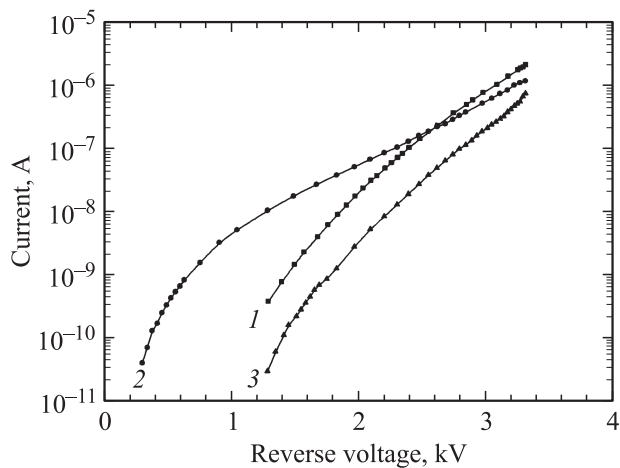


Рис. 6. Обратные ВАХ трех 4H-SiC JBS-диодов.

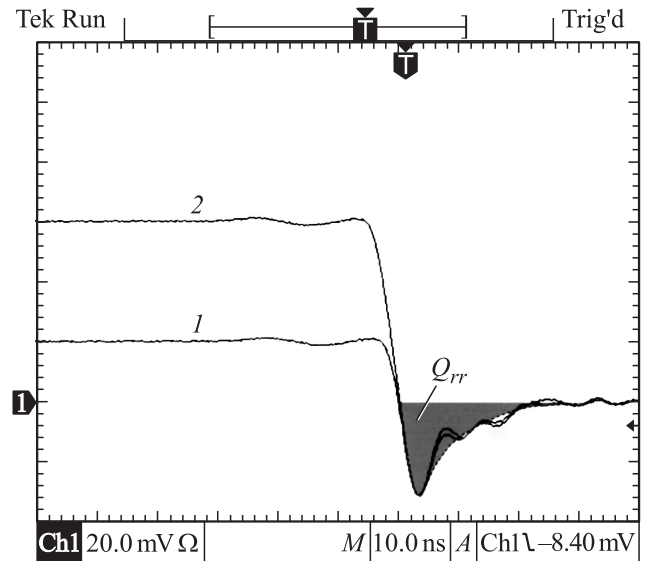


Рис. 7. Типичные характеристики обратного восстановления, измеренные при переключении диодов с прямого тока ($I = 0.4$, $2 = 1.2$ А) на обратное напряжение 500 В. Масштаб по току (вертикаль) — 0.4 А/дел, по времени (горизонталь) — 10 нс/дел.

5. Характеристики обратного восстановления

На рис. 7 показаны типичные характеристики обратного восстановления, измеренные при переключении диодов с прямого тока ($I = 0.4$, $2 = 1.2$ А) на обратное напряжение 500 В.

Отметим тот факт, что как амплитуда, так и спад обратного тока со временем совершенно не зависят от величины тока в прямом направлении. Это напрямую свидетельствует о том, что обратный ток — чисто емкостной. Амплитуда обратного тока составляет 0.6 А, а длительность протекания тока $\Delta t_r = 20$ нс. Заряд обратного восстановления, определяемый как

$$Q_{rr} = \int_0^{\Delta t_r} I_r dt, \quad (4)$$

составляет около 5 нКл. С другой стороны, заряд основных носителей (электронов), выносимый из базовой области после прикладывания обратного напряжения V_r , можно рассчитать следующим образом:

$$Q_n = S \sqrt{2q\epsilon N V_r}. \quad (5)$$

При $V_r = 500$ В рассчитанный по формуле (5) заряд $Q_n = 5.1$ нКл, что практически совпадает с зарядом Q_{rr} .

6. Заключение

В заключение необходимо отметить следующее. Характеристики диодов в прямом направлении и характеристики их обратного восстановления близки к тем,

которые можно было ожидать, исходя из параметров эпитаксиального материала, использованного в работе. Достигнутое обратное напряжение 3.3 кВ ограничивается, по-видимому, дефектностью эпитаксиального материала и не является предельным для эпитаксиальных пленок с уровнем легирования порядка 10^{15} см⁻³ и толщиной свыше 30 мкм. Разработанная технология 4H-SiC JBS-диодов может быть адаптирована к производственным условиям на российских предприятиях электронной промышленности.

Работа выполнена при частичной поддержке администрации Санкт-Петербурга по программе субсидий молодым ученым, молодым кандидатам наук вузов и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга.

Список литературы

- [1] А. Слабухин. Компоненты и технологии, N 2, 114 (2005).
- [2] А. Полищук. Силовая электрон., N 1, 34 (2006).
- [3] http://www.cree.com/products/power_docs2.asp
- [4] И.В. Грехов, П.А. Иванов, Н.Д. Ильинская, О.И. Коньков, А.С. Потапов, Т.П. Самсонова. ФТП, **42**, 211 (2008).
- [5] П.А. Иванов, И.В. Грехов, Н.Д. Ильинская, Т.П. Самсонова, А.С. Потапов. ФТП, **43**, 527 (2009).
- [6] П.А. Иванов, И.В. Грехов, А.С. Потапов, Н.Д. Ильинская, Т.П. Самсонова, О.И. Коньков. ФТП, **43**, 1249 (2009).
- [7] И.В. Грехов, П.А. Иванов, А.С. Потапов, Т.П. Самсонова, О.И. Коньков, Н.Д. Ильинская. Патент РФ N 2390880. Приоритет изобретения 25 мая 2009 г.
- [8] И.В. Грехов, П.А. Иванов, А.С. Потапов, Т.П. Самсонова, О.И. Коньков, Н.Д. Ильинская. Патент РФ N 2395868. Приоритет изобретения 5 июня 2009 г.
- [9] G. Pensl, F. Ciobanu, T. Frank. Int. J. High Speed Electron. Syst., **15** (4), 705 (2005).
- [10] П.А. Иванов, И.В. Грехов, А.С. Потапов, Т.П. Самсонова, Н.Д. Ильинская, О.И. Коньков, О.Ю. Серебренникова. ФТП, **44**, 680 (2010).
- [11] Q. Wahab, A. Ellison, A. Henry, E. Janzen, C. Hallin, J. Di Persio, R. Martinez. Appl. Phys. Lett., **76**, 2725 (2000).
- [12] B. Hull, J. Sumakeris, M. O'Loughlin, J. Zhang, J. Richmond, A. Powell, M. Paisley, V. Tsvetkov, A. Hefner, A. Rivera. Mater. Sci. Forum, **600–603**, 931 (2009).

Редактор Л.В. Беляков

High voltage (3.3 kV) JBS diodes based on 4H-SiC

P.A. Ivanov, I.V. Grekhov, N.D. Il'inskaya, O.I. Kon'kov, A.S. Potapov, T.P. Samsonova, O.U. Serebrennikova

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

Abstract High voltage 4H-SiC JBS-rectifiers were fabricated and investigated. The active diode area (the area of anode electrode) is 1.44 cm². In the current range from 10⁻¹¹ to 1.5 A, the forward current-voltage characteristic is well described by thermionic emission with taking into account the influence of the diode series resistance: the Schottky barrier height $\Phi_B = 1.16$ eV, the ideality factor $n = 1.01$, the series resistance $R_s = 2.2$ Ohm (32 mOhm · cm²). The R_s value is determined by specific resistance of the epitaxial blocking n -base (the donor density $N = 9 \cdot 10^{14}$ cm⁻³, the base thickness $d = 34$ μm). The diodes are able to block at least 3.3 kV reverse voltage, with room temperature leakage current being of about 1 μA. Defects like dislocations are probably responsible for the leakage current flow. It is shown that the diode reverse recovery characteristics is determined by flowing of pure capacitive current.