

# Идеальный статический пробой в высоковольтных (1 кВ) диодных $p-n$ -структурах с охранными кольцами на основе $4H-SiC$

© П.А. Иванов<sup>†</sup>, И.В. Грехов, Н.Д. Ильинская, Т.П. Самсонова

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

(Получена 19 мая 2005 г. Принята к печати 1 июня 2005 г.)

Продемонстрирован практически идеальный статический высоковольтный пробой (1060 В) в  $p^+n-n^+$ -диодах с охранными кольцами на основе  $4H-SiC$ . При легировании  $n$ -базы до уровня  $1.9 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  напряженность поля пробоя в диоде составляет  $2.7 \cdot 10^6 \text{ В/см}$ . Ток утечки диодов не превышает  $5 \cdot 10^{-5} \text{ А/см}^2$  при обратном напряжении до 1000 В. Диоды выдерживают без деструкции лавинный ток  $1 \text{ А/см}^2$ , что соответствует рассеиваемой мощности  $1 \text{ кВт/см}^2$ .

В настоящее время для высоковольтных  $p-n$ -структур на основе  $4H-SiC$  остается актуальной проблема повышения напряжения пробоя, ограниченного краевыми эффектами. С целью уменьшения концентрации краевого электрического поля в структурах на основе  $SiC$  применяют различные методы, заимствованные из кремниевой технологии: полевые обкладки [1], полевые ограничительные кольца [2–4], а также методы, основанные на регулировании величины заряда в обедненной области на краю перехода — частичное вытравливание сильно легированной  $p(n)$ -области [5], введение точной дозы примесей  $p(n)$ -типа в базовую  $n(p)$ -область путем ионной имплантации [6,7] и др. Каждая из перечисленных методик в случае  $SiC$  обладает своими достоинствами и недостатками, и поиски оптимальных способов формирования требуемого краевого контура поля продолжают.

Одним из распространенных методов ограничения краевого поля в высоковольтных меза-эпитаксиальных  $p-n$ -переходах на основе  $SiC$  является формирование „плавающих“ меза-эпитаксиальных охранных колец (mesa-epitaxial guard rings — MEGRs [4,5,8]). MEGR-структуры изготавливают путем селективного травления сильно легированного эпитаксиального слоя, одновременно формируя как основной меза-эпитаксиальный переход, так и окружающие его кольца. Зазор между основным переходом и первым кольцом подбирается таким образом, чтобы области пространственного заряда (ОПЗ) основного и охранных  $p-n$ -переходов смыкались до того момента, когда электрическое поле в структуре достигнет критической величины. В присутствии нескольких охранных колец толщина результирующей ОПЗ плавно уменьшается к краю структуры, снижая концентрацию поля в области основного перехода.

В структурах с плавающими охранными кольцами на основе  $SiC$  напряжение пробоя очень чувствительно к расстоянию между основным переходом и первым кольцом, к расстоянию между кольцами, к ширине каждого кольца и к общему числу колец. Важно отметить, что по причине очень высокой напряженности поля

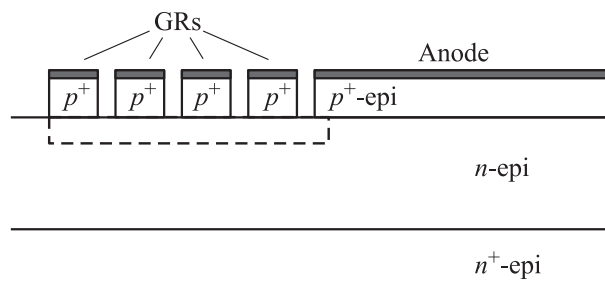
лавинного пробоя в  $SiC$  и, соответственно, небольшой толщины ОПЗ при пробое, зазоры между кольцами должны быть очень узкими. В частности, в работе [4] для MEGR-диодов на основе  $SiC$  с уровнем легирования базы  $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  (напряжение пробоя  $\sim 1 \text{ кВ}$ ) расстояние между кольцами было выбрано равным 2 мкм. При этом наилучшую блокирующую способность (1100 В) диоды показали при использовании 12 (!) охранных колец.

Как известно, устранить влияние краевых эффектов на пробой диодов помогает увеличение толщины обедненного слоя под краем анода (см., например, [9]). Очевидно, что улучшить эффективность работы плавающих охранных колец также можно, если сделать их более высоковольтными по отношению к основному переходу. В данной работе с использованием такого подхода изготовлены диодные структуры на основе  $4H-SiC$  с 4 охранными кольцами с напряжением пробоя 1 кВ, обладающие почти идеальными свойствами с точки зрения характера электрического пробоя.

Изготавливались  $p^+n_0-n^+$ -диоды на основе коммерческого эпитаксиального материала  $4H-SiC$ , выращенного в фирме Cree Inc (Durham, NC) и предоставленного для исследований американской лабораторией AFRL (Kirtland, NM). Согласно спецификации материала, концентрация доноров (азот) в  $n_0$ -слое толщиной 20 мкм составляет  $N = (1.9-2) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ; концентрации алюминия и азота в эмиттерных  $p^+$ - и  $n^+$ -слоях —  $3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  и  $10^{18} \text{ см}^{-3}$  соответственно, а толщины эмиттерных слоев — около 1 мкм.

На рис. 1 показана MEGR-структура изготовленных диодов. Для увеличения толщины обедненной области охранных  $p-n$ -переходов в периферийную область основного перехода была предварительно проведена локальная диффузия бора. Диффузия осуществлялась из имплантированного источника: ионы бора внедрялись непосредственно в  $p^+$ -слой при комнатной температуре (доза —  $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ; энергия — 100 кэВ). Маской при имплантации служил слой алюминия толщиной 1 мкм, в котором с помощью фотолитографии были сформированы окна — кольца шириной 50 мкм и внутренним диаметром 350 мкм. Диффузионная разгонка внедренной примеси проводилась при температуре 1700°C в атмосфере аргона в течение 20 мин. Как было показано ранее

<sup>†</sup> E-mail: Pavel.Ivanov@mail.ioffe.ru



**Рис. 1.** MEGR-структура  $p^+-n-n^+$ -диодов, изготовленных на основе  $4H$ -SiC. Пунктиром показана область, в которой доноры частично скомпенсированы атомами бора.

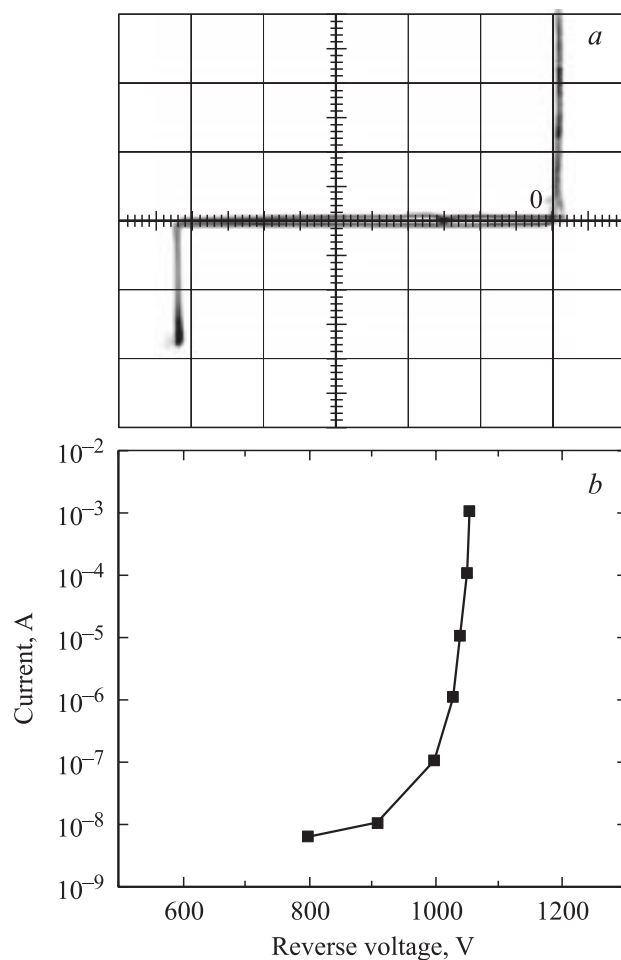
в работе [10], имплантированный бор относительно легко диффундирует в материале  $p$ -типа проводимости. Концентрация атомов бора слабо изменяется на расстояниях вплоть до нескольких микрометров от поверхности  $p$ -слоя (исключая очень тонкую приповерхностную область, где она резко падает за счет обратной диффузии) и составляет величину порядка  $10^{16}-10^{17} \text{ см}^{-3}$ . При переходе атомов бора в  $n$ -материал коэффициент их диффузии существенно уменьшается, и в  $n$ -слое формируется спадающий концентрационный профиль бора. В нашем случае можно было ожидать, что доноры в  $n$ -слое будут частично скомпенсированы продиффундировавшими атомами бора, так что  $p-n$ -переход в охранных кольцах будет иметь несколько большую ширину ОПЗ по сравнению с основным переходом. Требуемая MEGR-структура формировалась путем селективного травления  $p$ -слоя методом реактивного ионного травления в плазме  $\text{SF}_6$ . Маской при травлении служил слой никеля толщиной  $0.12 \text{ мкм}$ , в котором с помощью взрывной фотолитографии были сформированы 4 кольца шириной  $2 \text{ мкм}$  и расстоянием от основного перехода до первого кольца (и между кольцами)  $1.5 \text{ мкм}$  (диаметр основного перехода —  $410 \text{ мкм}$ , а его площадь —  $1.3 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ ). Омическим контактом как к  $p^+$ -области диодов, так и к тыльной  $n$ -области служил слой никеля толщиной около  $1.5 \text{ мкм}$ , нанесенный ионным распылением и отожженный в вакууме при температуре  $800^\circ\text{C}$  в течение 10 мин.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) изготовленных таким образом диодных структур измерялись с помощью микрозондовой установки (без использования специального теплоотвода). На время измерений пластина  $4H$ -SiC погружалась в специальную диэлектрическую жидкость Fluorinert. На рис. 2, *a* показана типичная обратная ВАХ, демонстрирующая очень резкий пробой диода при напряжении свыше  $1000 \text{ В}$ . Как видно из рис. 2, *b*, на котором показана ВАХ в полулогарифмическом масштабе, вплоть до напряжения  $900 \text{ В}$  ток утечки диода не превышает  $10 \text{ нА}$ . Резкий рост лавинного тока происходит при напряжении  $V_b$  около  $1060 \text{ В}$ . На лавинном участке ВАХ приращение обратного напряжения на  $10 \text{ В}$  вызывает рост тока приблизительно на порядок величины.

Максимальная напряженность поля в  $p^+-n$ -переходе ( $E_b$ ), рассчитанная по формуле

$$V_b = \frac{\varepsilon E_b^2}{2qN} \quad (1)$$

( $q$  — элементарный заряд,  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость  $4H$ -SiC), равна  $2.7 \cdot 10^6 \text{ В/см}$ . Эта величина фактически составляет теоретический предел для плоскостного  $p^+-n$ -диода на основе  $4H$ -SiC при легировании базы на уровне  $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  [11]. В режиме лавинного пробоя диоды выдерживали без разрушения обратный ток не менее  $2 \text{ мА}$ , что соответствует рассеиваемой мощности около  $1 \text{ кВт/см}^2$ . Таким образом, изготовленные высоковольтные диодные структуры показали близкий к „идеальному“ характер электрического пробоя по крайней мере в квазистатических условиях. В дальнейшем мы планируем провести экспериментальную проверку влияния диффузии бора на эффективность охранных колец и исследовать импульсный пробой диодов в режимах, характерных для возбуждения сверхбыстрых ударно-ионизационных фронтов.



**Рис. 2.** Вольт-амперные характеристики  $p^+-n-n^+$ -диодов на основе  $4H$ -SiC с MEGR-структурой: *a* — в линейном масштабе (фотография с экрана характериографа Л12-56), цена деления по горизонтали —  $200 \text{ В/дел}$ , по вертикали —  $1 \text{ мА/дел}$ ; *b* — в полулогарифмическом масштабе.

Работа поддержана Фондом EOARD-CRDF (проект REO-1381-ST-03), ОЭММПУ РАН (программа „Силовая полупроводниковая электроника и импульсная техника“), ОФН РАН (программа „Проблемы радиофизики“), Российским фондом поддержки научных школ (НШ-758.2003.2).

## Список литературы

- [1] Q. Wahab, T. Kimoto, A. Ellison, C. Hallin, M. Tuominen, R. Yakimova, A. Henry, J.P. Bergman, E. Janzen. *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 445 (1998).
- [2] D.C. Sheridan, G. Niu, J.N. Merrett, J.D. Cressler, C. Ellis, C.-C. Tin. *Sol. St. Electron.*, **44**, 1367 (2000).
- [3] D.C. Sheridan, G. Niu, J.N. Merrett, J.D. Cressler, J.B. Dufrene, J.B. Casady, I. Sankin. *Proc. Int. Symp. on Power Semiconductor Devices and ICs* (Osaka, 2001) p. 191.
- [4] I. Sankin, J.B. Dufrene, J.N. Merrett, J.B. Casady. *Mater. Sci. Forum*, **433-436**, 879 (2003).
- [5] X. Li, K. Tone, L. Hui, P. Alexandrov, L. Fursin, J.H. Zhao. *Mater. Sci. Forum*, **338-342**, 1375 (2000).
- [6] D. Peters, R. Schorner, K.H. Holzlein, P. Friedrichs. *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 2996 (1997).
- [7] K.J. Schoen, J.M. Woodall, J.A. Cooper Jr., M.R. Melloc. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **ED-45**, 1595 (1998).
- [8] L. Fursin, K. Tone, P. Alexandrov, Y. Luo, L. Cao, J. Zhao, M. Weiner, M. Pan. *Mater. Sci. Forum*, **338-342**, 1399 (2000).
- [9] А. Блихер. *Физика силовых биполярных и полевых транзисторов* (Л., Энергоатомиздат, 1986).
- [10] M.K. Linnarsson, M.S. Janson, A. Shöner, A. Konstantinov, B.G. Svensson. *Mater. Sci. Forum*, **457-460**, 917 (2004).
- [11] A.O. Konstantinov, Q. Wahab, N. Nordell, U. Linderfelt. *Mater. Sci. Forum*, **264-268**, 513 (1998).

Редактор Т.А. Полянская

## An „ideal“ static breakdown in high-voltage (1 kV) 4H-SiC junction diodes with guard rings termination

P.A. Ivanov, I.V. Grekhov, N.D. Il'inskaya,  
T.P. Samsonova

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

**Abstract** Near „ideal“ static high-voltage breakdown (1060 V) in 4H-SiC junction diodes with guard rings termination is demonstrated: at background doping in the  $n$ -base of  $1.9 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  the critical breakdown field is of  $2.7 \times 10^6 \text{ V/cm}$ . The leakage current does not exceed  $5 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$  at reverse voltage below 1000 V. The diodes withstand, without degradation, avalanche current of  $1 \text{ A/cm}^2$  that corresponds to dissipated power of  $1 \text{ kW/cm}^2$ .