

Высоковольтные (900 В) 4H-SiC диоды Шоттки с охранным $p-n$ -переходом, изготовленным имплантацией бора

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

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

(Получена 3 мая 2007 г. Принята к печати 14 мая 2007 г.)

Изготовлены и исследованы высоковольтные (900 В) 4H-SiC диоды Шоттки с охранным $p-n$ -переходом. Охранный переход формировался имплантацией бора при комнатной температуре с последующим высокотемпературным отжигом. Благодаря неравновесной диффузии бора во время отжига глубина залегания охранный $p-n$ -перехода составляет около 1.7 мкм, что приблизительно на 1 мкм больше пробега ионов ^{11}B в 4H-SiC. Максимальное обратное напряжение изготовленных 4H-SiC диодов Шоттки ограничено лавинным пробоем планарного охранный $p-n$ -перехода; величина пробивного напряжения, равная 910 В, близка к теоретической для концентрации примесей в n -слое $N = 2.5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, толщины n -слоя $d = 12.5 \text{ мкм}$ и глубины залегания $p-n$ -перехода $r_j = 1.7 \text{ мкм}$. Сопротивление диодов в прямом направлении, $3.7 \text{ мОм} \cdot \text{см}^2$, определяется сопротивлением эпитаксиального n -слоя. Заряд обратного восстановления, около 1.3 нКл, численно равен заряду основных носителей, выносимых из эпитаксиального слоя при переключении диода Шоттки из открытого в запертое состояние.

PACS: 72.20.-i

1. Введение

В настоящее время высоковольтные (300–1200 В) 4H-SiC диоды Шоттки (ДШ) выпускаются на коммерческой основе несколькими западными фирмами под маркой „zero recovery diodes“ (см., например, <http://www.cree.com/products/power.asp>). Они предназначаются для применения в схемах импульсных преобразователей напряжения для увеличения частоты коммутации, выходной мощности и повышения КПД устройств.

Для высоковольтных 4H-SiC приборов остается актуальной проблема повышения напряжения пробоя, ограниченного краевыми эффектами. Для 4H-SiC ДШ наиболее эффективной считается охранный система JTE (junction termination extension) [1] — слабо легированное кольцо p -типа проводимости на периферии шоттки-контакта, которое полностью обедняется при напряжении, несколько меньшем напряжения пробоя. JTE-кольца формируют, как правило, с помощью ионной имплантации алюминия при повышенной температуре (500°C и более), чем достигается точный контроль дозы электрически активных акцепторных примесей [2,3]. В настоящей работе мы сообщаем о свойствах 4H-SiC ДШ, в которых вместо JTE-системы применен охранный $p-n$ -переход, сформированный имплантацией бора при комнатной температуре. Ранее с помощью вторичной ионной масс-спектрометрии было показано, что при термическом отжиге слоев 4H-SiC, имплантированных бором при комнатной температуре, происходит заметная диффузионная разгонка внедренных имплантацией атомов бора уже при температурах 1600–1700°C [4,5]. Было установлено, что механизм диффузии из имплантированного источника — существенно неравновесный (transient enhanced

diffusion, TED), стимулированный радиационными нарушениями. Благодаря TED-механизму имплантированный бором $p-n$ -переход в SiC может быть сформирован на большей, чем пробег ионов ^{11}B , глубине. Это позволяет, как показано в настоящей работе, формировать достаточно высоковольтные ($\sim 1 \text{ кВ}$) планарные охранные $p-n$ -переходы для 4H-SiC ДШ.

2. Изготовление диодов

Диоды Шоттки изготавливались на основе коммерческих эпитаксиальных 4H-SiC $n-n^+$ -структур: концентрация доноров в n -слое $N = (2-3) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, толщина n -слоя $d = 12-13 \text{ мкм}$. Схематически структура диодного чипа показана на рис. 1, а. Для формирования охранных $p-n$ -переходов в периферийную область шоттки-контактов была предварительно проведена локальная имплантация бора. Для формирования ступенчатого профиля легирования ионы ^{11}B внедрялись в n -слой двумя дозами с разной энергией (при комнатной температуре): 1) энергия — 350 кэВ, доза — $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ и 2) энергия — 200 кэВ, доза — $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Маской при имплантации служил слой фоторезиста, в котором с помощью фотолитографии были сформированы окна в виде колец. Отжиг имплантированных бором слоев проводился при температуре 1550°C в атмосфере аргона в течение 30 мин. Далее поверхность карбида кремния в местах выхода на нее планарного $p-n$ -перехода была пассивирована слоем термического окисла SiO_2 . Омическим контактом к подложке служил никель, нанесенный ионным распылением и отожженный в вакууме при температуре 950°C в течение 15 мин. Поверх контактного металла был нанесен слой серебра толщиной 1 мкм. Шоттки-контакты площадью $2.8 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ формировались магнетронным распылением титана с последующим отжигом при температуре 400°C в течение часа. Поверх

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

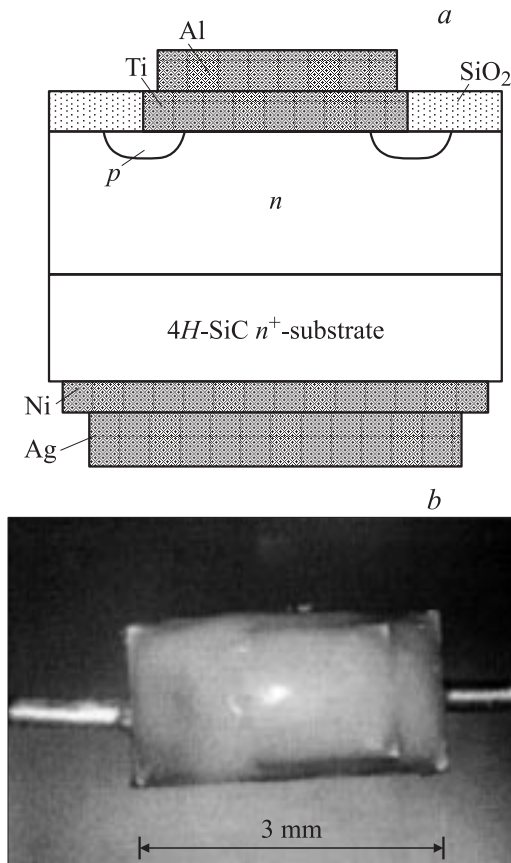


Рис. 1. 4H-SiC ДШ с имплантированным охранным p - n -переходом.

титана был нанесен слой алюминия толщиной 2 мкм. Диодные чипы были напаяны на специальные кристаллодержатели из металлизированного AlN. К анодному контакту приваривались несколько алюминиевых проволочек. На рис. 1, b показан бескорпусной чип-диод, залитый специальным компаундом.

3. Характеристики диодов

Прямые вольт-амперные характеристики (ВАХ) 4H-SiC ДШ в открытом состоянии измерялись на импульсах (длительность 10 мкс, частота повторения 10 Гц) до тока 3 А (плотность тока 1000 A/cm^2). На рис. 2 показана типичная ВАХ, измеренная при комнатной температуре. Как видно, напряжение открывания диода составляет около 1 В, что соответствует высоте Ti-барьера Шоттки на 4H-SiC ($\Phi_B = 1-1.2 \text{ эВ}$) [6,7]. Дифференциальное сопротивление диода в открытом состоянии составляет около $4 \text{ мОм} \cdot \text{см}^2$. Расчетное сопротивление эпитаксиального n -слоя

$$r_{\text{on}} = \rho L = \frac{d}{q\mu n} \quad (1)$$

составляет $3.7 \text{ мОм} \cdot \text{см}^2$ (q — элементарный заряд, ρ — удельное сопротивление n -слоя, $n = 2.5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ —

усредненная концентрация доноров в n -слое, $\mu = 850 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ [8] — подвижность электронов в n -слое, $d = 12.5 \text{ мкм}$ — толщина n -слоя). Таким образом, сопротивление ДШ в открытом состоянии определяется сопротивлением эпитаксиального n -слоя.

Для определения глубины залегания p - n -перехода (r_j) была измерена вольт-фарадная характеристика (ВФХ) тестового планарного p - n -перехода. На рис. 3 показана рассчитанная из ВФХ координатная зависимость плотности доноров в базовой области p - n -диода при отсчете от его металлургической границы. Как видно, толщина области пространственного заряда (ОПЗ), при которой происходит „прокол“ базы, $d' = 10.8 \text{ мкм}$. Таким образом, глубина p - n -перехода $r_j = d - d' = 1.7 \text{ мкм}$. Известно, что ионы бора с энергией 350 кэВ проникают в 4H-SiC до глубины около 0.8 мкм [9]. Отсюда можно заключить, что при отжиге имплантированного слоя происходит дополнительная разгонка бора (за счет неравновесной диффузии) на глу-

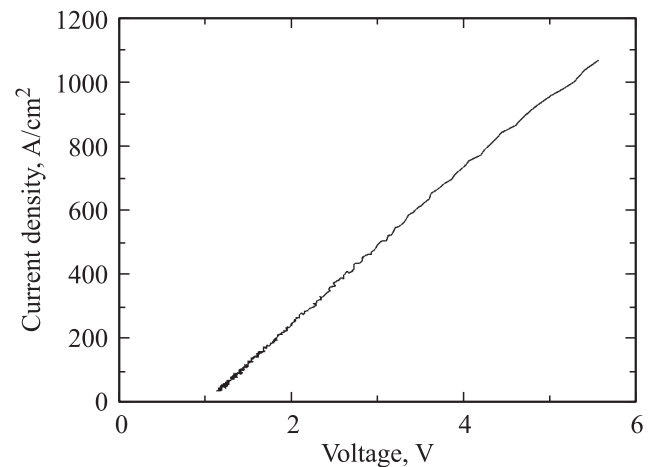


Рис. 2. Прямая ВАХ 4H-SiC ДШ, измеренная на импульсах при комнатной температуре.

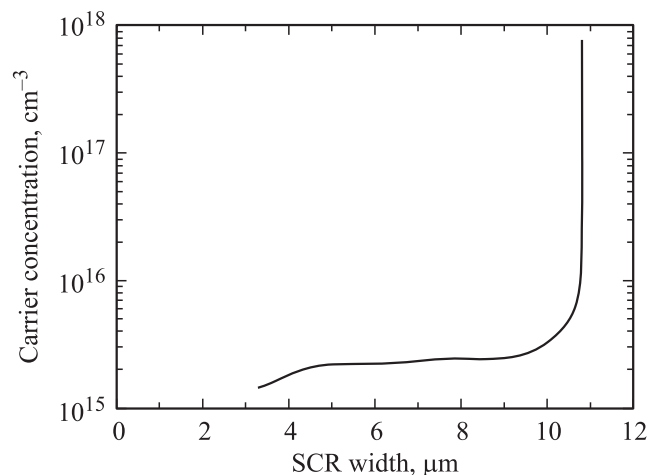


Рис. 3. Профиль распределения некомпенсированных доноров в базе тестового p - n -перехода при отсчете от металлургической границы.

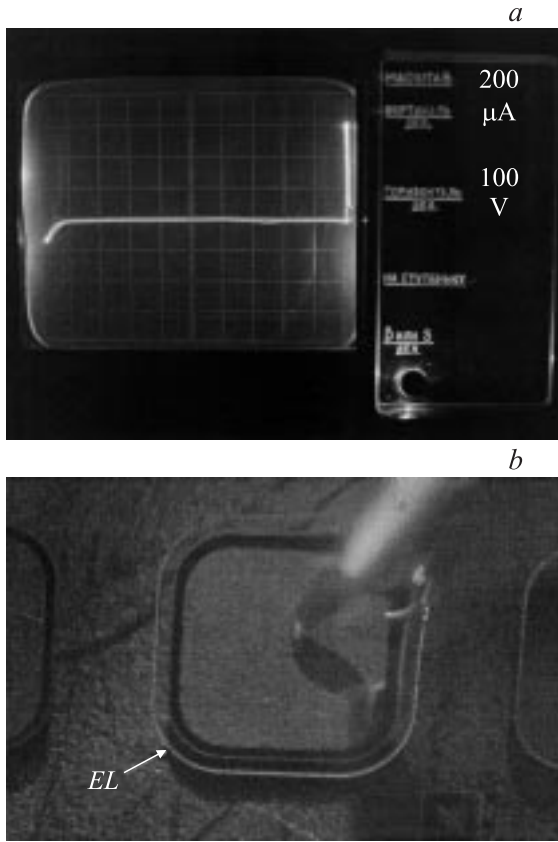


Рис. 4. *a* — ВАХ 4H-SiC ДШ, демонстрирующая пробой охранный перехода при напряжении 910 В; *b* — электролюминесценция (EL) на краю охранный p-n-перехода в режиме пробоя.

бину около 1 мкм. Из формулы $l_d = \sqrt{D\Delta t}$ (где l_d — глубина диффузии, Δt — время отжига) можно оценить коэффициент неравновесной диффузии D . Полагая $l_d = 1$ мкм и $\Delta t = 1800$ с, получаем $D = 5 \cdot 10^{-12}$ см² (ср. с величиной $7 \cdot 10^{-12}$ см² из работы [4]).

На рис. 4, *a* показана ВАХ 4H-SiC ДШ, снятая с экрана характеристикографа Л2-56. Как видно, пробой происходит при напряжении 910 В (отметим, что тестовые ДШ без охраны показывали напряжение пробоя не более 100 В). Пробой происходит на краю планарного p-n-перехода (в его цилиндрической части, где концентрируется электрическое поле) и обусловлен ударной ионизацией. Об этом свидетельствует рекомбинационное свечение в виде тонкого однородно светящегося кольца, отделенного от края шоттки-контакта (рис. 4, *b*).

В работе [10] предложена аналитическая модель, позволяющая рассчитывать напряжение пробоя планарного p-n-перехода (V_{Bcy1}) для того случая, когда база „прокалывается“ (punch-through) областью пространственного заряда при напряжении, меньшем напряжения пробоя:

$$V_{Bcy1} = F_1 V_{Bpp} - F_2 V_P, \quad (2)$$

$$V_P = \frac{qN(d - r_j)^2}{2\epsilon}, \quad (3)$$

$$F_1 = 6^{1/7} \left(\frac{r_j}{d} \right)^{6/7} \cdot \ln \left(1 + \frac{w}{r_j} \right);$$

$$F_2 = \left[\frac{r_j}{d} \left(1 + \frac{w}{r_j} \right) \right]^2 \cdot \ln \left(1 + \frac{w}{r_j} \right) - 1, \quad (4)$$

$$\left(\frac{d}{r_j} \right)^2 = \left(1 + \frac{w}{r_j} \right)^2 \cdot \ln \left(1 + \frac{w}{r_j} \right) - \frac{1}{2} \left[\left(1 + \frac{w}{r_j} \right)^2 - 1 \right]. \quad (5)$$

Здесь V_{Bpp} — расчетное напряжение пробоя плоскопараллельного p-n-перехода, V_P — напряжение „прокола“ базовой области, ϵ — диэлектрическая проницаемость полупроводника, r_j — глубина залегания p-n-перехода, w — максимальная ширина ОПЗ в цилиндрической части p-n-перехода (формулы (2)–(5) получены в предположении, что после прокола базы дальнейшего расширения ОПЗ в латеральном направлении не происходит). Величина w связана с толщиной эпитаксиального n-слоя d и радиусом кривизны p-n-перехода r_j уравнением (5).

Для расчета напряжения пробоя плоскопараллельного p-n-перехода (V_{Bpp}) вначале определялась критическая напряженность поля пробоя (E_c) из условия равенства единице ионизационного интеграла:

$$\int_0^d a_n \cdot \exp \left[- \int_x^d (\alpha_n - \alpha_p) dx' \right] dx = 1, \quad (6)$$

где α_n и α_p — коэффициенты ионизации электронов и дырок. В 4H-SiC коэффициенты ионизации экспоненциальным образом зависят от обратного поля:

$$\alpha_n = \alpha_{n0} \cdot \exp \left(- \frac{E_n}{E} \right), \quad (7)$$

$$\alpha_p = \alpha_{p0} \cdot \exp \left(- \frac{E_p}{E} \right), \quad (8)$$

где $\alpha_{n0} = 1.76 \cdot 10^8$ см⁻¹, $\alpha_{p0} = 3.41 \cdot 10^8$ см⁻¹, $E_n = 3.3 \cdot 10^7$ В/см, $E_p = 2.5 \cdot 10^7$ В/см [11]. При подстановке выражений (7) и (8) в формулу (6) получаем следующее интегральное уравнение относительно E_c :

$$\int_0^d a_{n0} \exp \left(- \frac{E_n}{E_c - \frac{q}{\epsilon} Nx} \right) \times \exp \left\{ - \int_0^d \left[\alpha_{n0} \exp \left(- \frac{E_n}{E_c - \frac{q}{\epsilon} Nx} \right) - \alpha_{p0} \exp \left(- \frac{E_p}{E_c - \frac{q}{\epsilon} Nx} \right) \right] dx' \right\} dx = 1. \quad (9)$$

После численного решения уравнения (9) напряжение пробоя V_{Bpp} вычисляется по формуле

$$V_{Bpp} = E_c d - \frac{qNd^2}{2\epsilon}. \quad (10)$$

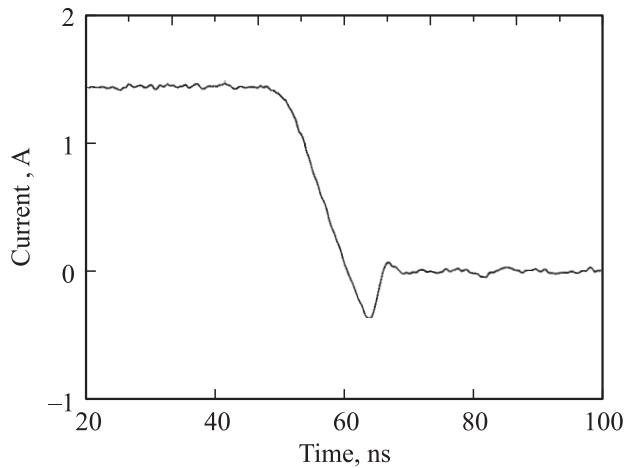


Рис. 5. Осциллограмма тока при переключении диода с прямого тока 1.3 А на обратное напряжение 200 В.

В нашем случае $N = 2.5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $d = 12.5 \text{ мкм}$, $V_{\text{Впр}} = 2.5 \text{ кВ}$. Рассчитанное по формулам (2)–(5) напряжение пробоя $V_{\text{Вср}}$ составляет 990 В ($r_j = 1.7 \text{ мкм}$). Экспериментально измеренное напряжение пробоя составляет 910 В. Расхождение расчета и эксперимента невелико и может быть отнесено к неточности модели [10], в которой не учитывается расширение ОПЗ в цилиндрической части планарного перехода после прокола базы, а также не рассматривается возможное влияние на пробой поверхностного заряда.

Характеристики обратного восстановления изготовленных 4H-SiC ДШ измерялись с помощью специальной импульсной схемы. На рис. 5 показана типичная осциллограмма тока при переключении диода с прямого тока 1.3 А на обратное напряжение 200 В. Обратный ток достигает пиковой величины $I_{\text{тп}} = 0.36 \text{ В}$, а время восстановления $\Delta t_{\text{тп}}$ составляет около 7 нс. Таким образом, заряд обратного восстановления $Q_{\text{тп}} \approx I_{\text{тп}} \Delta t_{\text{тп}} / 2 = 1.3 \text{ нКл}$. В идеальном ДШ обратный ток — это ток смещения, который выводит основные носители из базовой области диода. В нашем случае выводимый заряд $Q_n = qNdS = 1.4 \text{ нКл}$, что практически совпадает с величиной заряда $Q_{\text{тп}}$.

Работа поддержана ОФН РАН (программа „Новые принципы преобразования энергии в полупроводниковых структурах“), грантом РФФИ № 07-02-13529 и правительством Республики Мордовия в рамках Госконтракта по теме „Разработка и освоение промышленного производства приборов нового поколения на основе широкозонных полупроводниковых материалов — карбида кремния (SiC) и нитрида галлия (GaN)“.

Список литературы

- [1] D.C. Sheridan, G. Niu, J.D. Cressler. Sol. St. Electron., **45**, 1659 (2001).
- [2] R.R. Rupp, M. Treu, A. Mauder, E. Griehl, W. Werner, W. Bartsch, D. Stephani. Mater. Sci. Forum, **338–342**, 1167 (2000).

- [3] M. Treu, R.R. Rupp, C.S. Tai, P. Blaschitz, J. Hilsenbeck, H. Brunner, D. Peters, R. Elpelt, T. Reimann. Mater. Sci. Forum., **527–529**, 1155 (2006).
- [4] M.S. Janson, M.K. Linnarsson, A. Halle, B.G. Svensson. Appl. Phys. Lett., **76** (11), 1434 (2000).
- [5] I.O. Usov, A.A. Suvorova, Y.A. Kudriavsev, A.V. Suvorov. J. Appl. Phys., **96** (9), 4960 (2004).
- [6] C. Sudre, M.B. Mooney, C. Leveugle, J. O'Brien, W.A. Lane. Mater. Sci. Forum, **338–342**, 1191 (2000).
- [7] D. Stephani, R. Schoerner, D. Peters, P. Friedrichs. Mater. Sci. Forum, **527–529**, 1147 (2006).
- [8] G. Pensl, F. Ciobanu, T. Frank. Int. J. High Speed Electron. Syst., **15** (4), 705 (2005).
- [9] B.G. Svensson, A. Hallén, J. Wong-Leung, M.S. Janson, M.K. Linnarsson, A.Y. Kuznetsov, G. Alfieri, U. Grossner, E.V. Monakhov, H. K.-Nielsen, C. Jagadish, J. Grillenberger. Mater. Sci. Forum, **527–529**, 781 (2006).
- [10] V. Anantharam, K.N. Bhat. IEEE Trans. Electron. Dev. **ED-27** (5), 939 (1980).
- [11] T. Hatakeyama, T. Watanabe, T. Shinohe, K. Kojima, K. Arai, N. Sano. Appl. Phys. Lett., **85** (8), 1380 (2004).

Редактор Л.В. Беляков

High-voltage (900 V) 4H-SiC Schottky diodes with boron implanted guard $p-n$ -junction

I.V. Grekhov, P.A. Ivanov, I.D. Ilinskaya, O.I. Konkov, A.S. Potapov, T.P. Samsonova

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

Abstract High-voltage (900 V) 4H-SiC Schottky-barrier diodes (SBD) terminated with guard $p-n$ -junction were fabricated and investigated. The guard $p-n$ -junction was formed by room temperature boron implantation followed by high temperature annealing. Owing to the transient enhanced boron diffusion during anneal, the depth of guard $p-n$ -junction is equal to $1.7 \mu\text{m}$, that is approximately $1 \mu\text{m}$ deeper than the average range of ^{11}B ions in 4H-SiC. The maximum reverse voltage of SBD produced has been found to be limited by the avalanche breakdown of planar $p-n$ -junction, the value of the breakdown voltage of 910 V being close to that calculated for the dopant density $N = 2.5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, n -base thickness $d = 12.5 \mu\text{m}$ and junction depth $r_j = 1.7 \mu\text{m}$. The on-state diode resistance of $3.7 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ is determined by the resistivity of epitaxial n -layer. The recovery charge of about 1.3 nC is equal to the charge of majority carriers which are sweeping out from the epitaxial n -layer when the reverse voltage is applied.