

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

© И.В. Грехов, П.А. Иванов<sup>✉</sup>, 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  $^{11}\text{B}$  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 предназначены 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  $^{11}\text{B}$ , 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  $^{11}\text{B}$  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 оксида  $\text{SiO}_2$ . 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

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

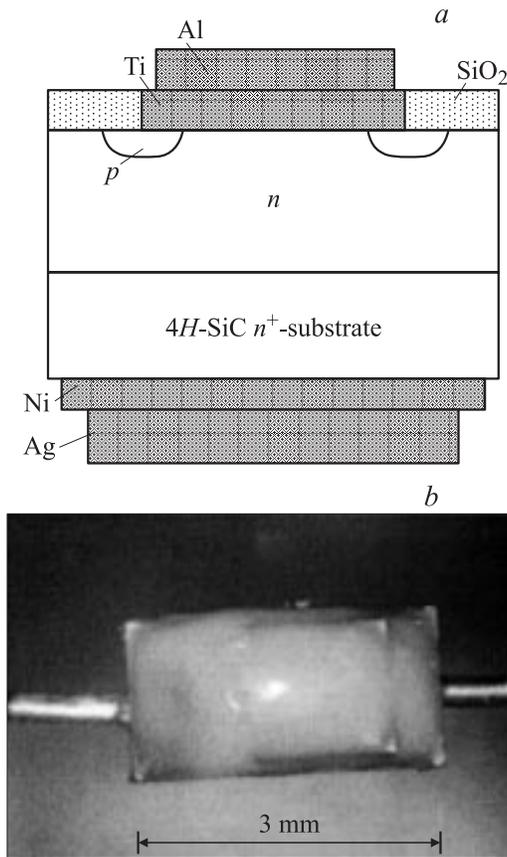


Рис. 1. 4H-SiC ДШ с имплантированным охраняющим  $p$ - $n$ -переходом.

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  $1000 \text{ A/cm}^2$ ). 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,  $\rho$  — 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-

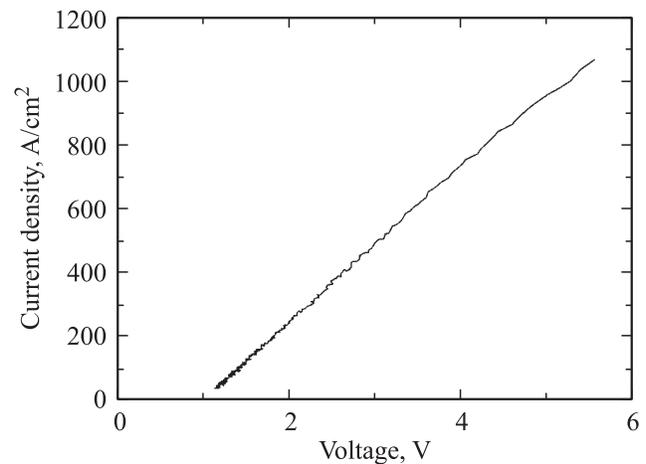


Рис. 2. Прямая ВАХ 4H-SiC ДШ, измеренная на импульсах при комнатной температуре.

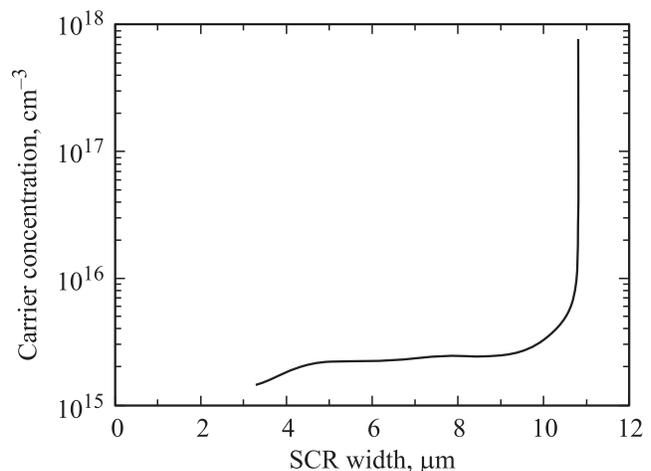
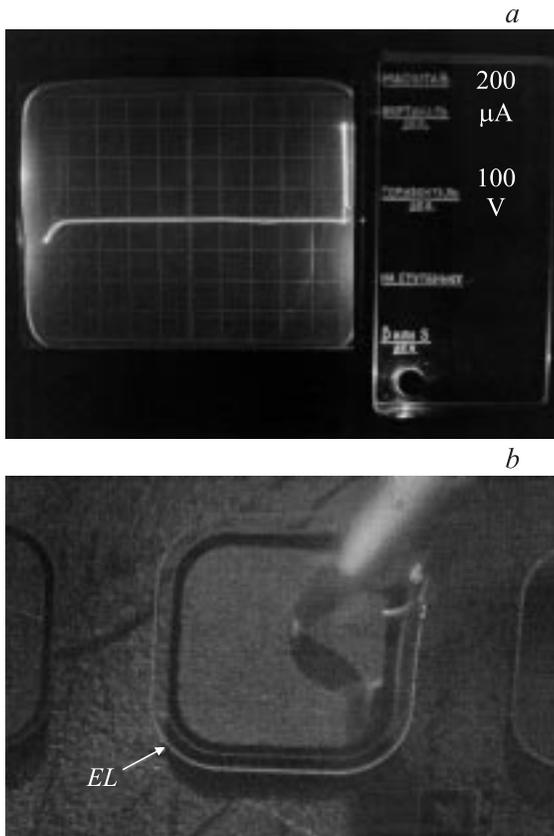


Рис. 3. Профиль распределения некомпенсированных доноров в базе тестового  $p$ - $n$ -перехода при отсчете от металлургической границы.



**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,  $\Delta t$  — время отжига) можно оценить коэффициент неравновесной диффузии  $D$ . Полагая  $l_d = 1$  мкм и  $\Delta t = 1800$  с, получаем  $D = 5 \cdot 10^{-12}$  см<sup>2</sup> (ср. с величиной  $7 \cdot 10^{-12}$  см<sup>2</sup> 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,  $\epsilon$  — 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  $\alpha_n$  и  $\alpha_p$  — 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<sup>-1</sup>,  $\alpha_{p0} = 3.41 \cdot 10^8$  см<sup>-1</sup>,  $E_n = 3.3 \cdot 10^7$  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

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

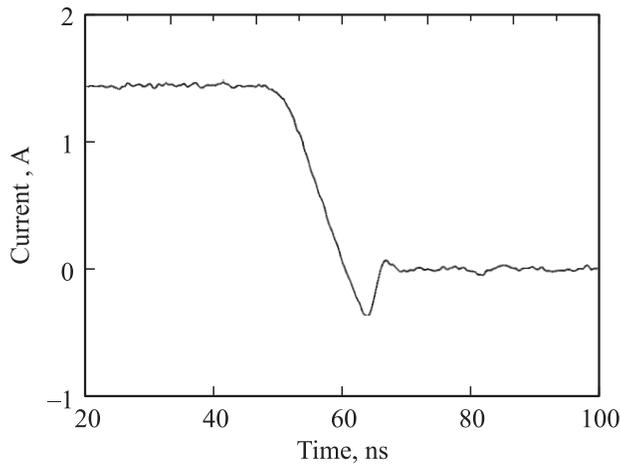


Рис. 5. Осциллограмма тока при переключении диода с прямого тока 1.3 А на обратное напряжение 200 В.

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  $V_{\text{Всч}}$  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  $I_{\text{гм}} = 0.36 \text{ В}$ , а время восстановления  $\Delta t_{\text{г}}$  составляет около 7 нс. Таким образом, заряд обратного восстановления  $Q_{\text{г}} \approx I_{\text{гм}} \Delta t_{\text{г}} / 2 = 1.3 \text{ нКл}$ . 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  $Q_{\text{г}}$ .

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  $^{11}\text{B}$  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.