

Импульсный пробой диодов Шоттки на основе 4H-SiC с охранным $p-n$ -переходом, изготовленным имплантацией бора

© П.А. Иванов[¶], И.В. Грехов, А.С. Потапов, Т.П. Самсонова

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

(Получена 12 ноября 2007 г. Принята к печати 26 ноября 2007 г.)

Измерены импульсные обратные вольт-амперные характеристики (на участке пробоя) для 4H-SiC-диодов Шоттки на 1 кВ с охранным $p-n$ -переходом, изготовленным имплантацией бора. Показано, что динамическое напряжение пробоя диодов увеличивается при уменьшении длительности импульсов. Благодаря однородному лавинообразованию на крае охранного $p-n$ -перехода и большому дифференциальному сопротивлению на участке пробоя диоды выдерживают без деградации импульсное обратное напряжение, значительно превышающее порог статического пробоя. Особенности импульсного пробоя рассматриваются в связи со специфическими свойствами имплантированного бором планарного охранного $p-n$ -перехода.

PACS: 73.30.+y, 73.40.Cg, 73.40.Lq, 85.30.Kk

1. Введение

Формирование охранных колец для диодов Шоттки на основе 4H-SiC с помощью имплантации бора исследовалось ранее в нескольких работах [1–5]. В частности, в нашей работе [5] были представлены 4H-SiC-диоды, в которых максимальное статическое обратное напряжение, ~ 910 В, ограничено квазиоднородным лавинным пробоем планарного $p-n$ -перехода в его краевой цилиндрической части (рис. 1). В данной работе представлены результаты дальнейших исследований пробоя изготовленных 4H-SiC-диодов Шоттки. В частности, впервые в режиме пробоя измерены динамические вольт-амперные характеристики (ВАХ) на импульсах разной длительности в микросекундном диапазоне. Оказалось, что динамическое напряжение пробоя заметно увеличится при уменьшении длительности импульсов. Кроме того, диоды показали хорошую устойчивость к импульсной перегрузке в обратном направлении — они оказались способными выдерживать напряжение по меньшей мере 1600 В, что почти вдвое выше порога статического пробоя. В работе наблюдаемые особенности импульсного пробоя объясняются на качественном уровне специфическими свойствами имплантированного бором планарного $p-n$ -перехода в 4H-SiC.

2. Образцы и методика измерений

Диоды (рис. 2, *a*) изготавливались на основе коммерческих эпитаксиальных $n-n^+$ -структур из 4H-SiC: концентрация доноров в базовом n -слое составляла $N_D = (2-3) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, толщина n -слоя $d = 12-13$ мкм. Технология изготовления диодов детально описана в работе [5]. Суммарная доза внедренных атомов бора в p -области охранного $p-n$ -перехода составляла

$9 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Степень электрической активации внедренных акцепторов мы оцениваем величиной $\sim 5\%$. Глубина залегания охранного $p-n$ -перехода, определенная в работе [5] с помощью вольт-фарядных измерений, составляла ~ 1.7 мкм.

Импульсные измерения проводились с помощью схемы, показанной на рис. 2, *b*. Схема работает следующим

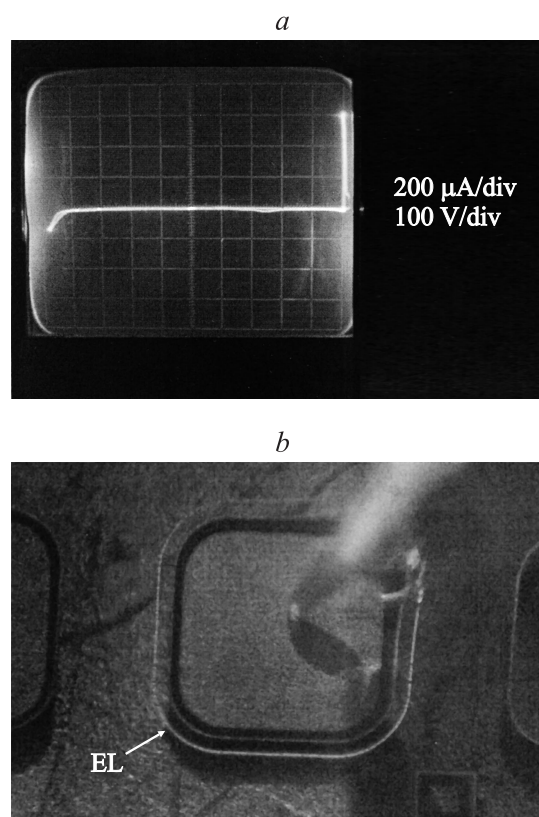


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика 4H-SiC-диода Шоттки с пробоем охранного $p-n$ -перехода при напряжении 910 В (*a*) и электролюминесценция (EL) на крае охранного $p-n$ -перехода в режиме пробоя (*b*).

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

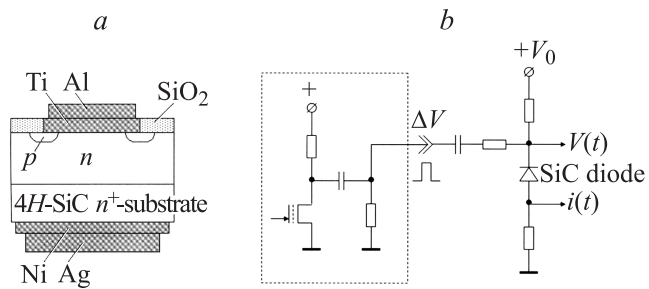


Рис. 2. Структура 4H-SiC-диода Шоттки с имплантированным охранным p-n-переходом (a) и схема измерений импульсных вольт-амперных характеристик (b).

образом. Для уменьшения барьерной емкости к диоду прикладывается постоянное обратное смещение V_0 , несколько меньшее порога статического пробоя V_B^{st} . Дополнительно к постоянному смещению на испытуемый диод могут подаваться импульсы разной амплитуды ΔV и длительности Δt , формируемые релаксационным генератором. Осциллограммы тока через диод $i(t)$ и напряжения на нем $v(t)$ измеряются с помощью двухканального цифрового осциллографа.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 3 для примера показаны осциллограммы тока через диод и напряжения на нем, измеренные при следующих условиях: $V_0 = 660$ В, $\Delta V = 840$ В, $\Delta t = 2$ мкс. В сумме напряжения $V_0 + \Delta V = 1500$ В намного превышают порог статического пробоя $V_B^{st} = 910$ В. Как видно, после подачи импульса имеет место всплеск тока через диод (это ток смещения, перезаряжающий барьерную емкость), который затем падает до некоторого квазистационарного лавинного тока проводимости i , соответствующего приложенному к диоду обратному напряжению $v = V_0 + \Delta V$. Изменяя амплитуду импульсов ΔV , можно построить динамическую (импульсную) ВАХ диода $i(v)$ в режиме пробоя.

На рис. 4 показаны измеренные таким способом ВАХ для двух значений длительности импульсов — 80 и 2 мкс. Приведенные ВАХ имеют следующие отличительные особенности.

1. Как видно из рис. 4, дифференциальное сопротивление диода Шоттки в режиме пробоя (R_d) довольно велико, 200 кОм. Вследствие этого на участке пробоя диоды выдерживают без деградации импульсное обратное напряжение, значительно превышающее порог статического пробоя p-n-перехода, — по меньшей мере 1600 В.

Как мы полагаем, основной вклад в общее сопротивление на участке пробоя вносит последовательное сопротивление имплантированной p-области на участке от края p-n-перехода до края металлического контакта Шоттки. Если степень активации внедренных атомов бора положить равной 5%, а толщину p-слоя (r_j) принять равной 1.7 мкм, то внедренной дозе бора $9 \cdot 10^{13}$ см $^{-2}$

будет соответствовать концентрация электрически активных атомов $N_A = 3 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$. Далее, полагая энергию ионизации бора в 4H-SiC равной 0.3 эВ [6], можно рассчитать концентрацию свободных дырок в электро-нейтральной части p-области: $p = 1.4 \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$. Словесное сопротивление имплантированного бором слоя $R_{sh} = (qpr\mu_p r_j)^{-1}$ составит 1–5 МОм/□ (q — заряд электрона, подвижность дырок $\mu_p \approx 5–20$ см 2 /В·с). В изготовленных диодах расстояние между краем p-n-перехода и краем металлического контакта Шоттки $L = 50$ мкм, а диаметр контакта Шоттки $D = 600$ мкм. Тогда последовательное сопротивление имплантированного слоя, рассчитанное как $R_s = R_{sh}(L/\pi D)$, составит 100–400 кОм. Рассчитанная величина хорошо соотносится с экспериментальным значением дифференциального сопротивления 200 кОм. Таким образом, можно заключить, что большое дифференциальное сопротивление диодов на участке пробоя обусловлено, по всей

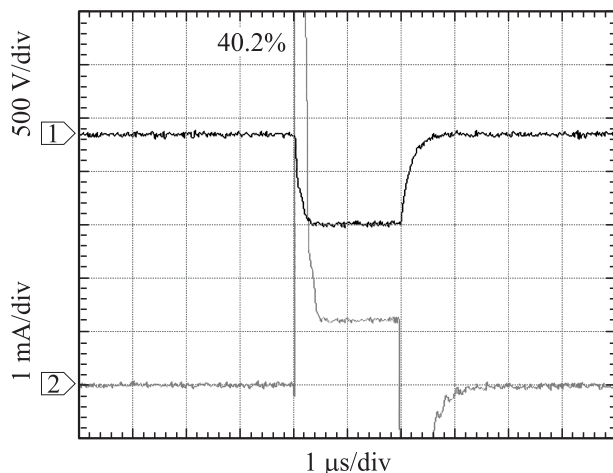


Рис. 3. Осциллограммы тока (канал 2) и напряжения (канал 1): $V_0 = 660$ В, $\Delta V = 840$ В, $\Delta t = 2$ мкс.

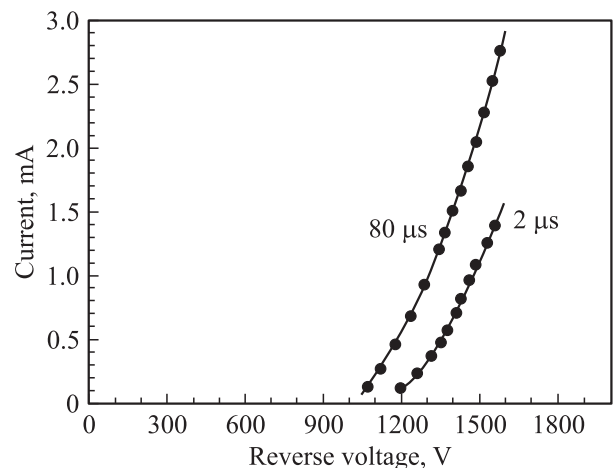


Рис. 4. Импульсные вольт-амперные характеристики 4H-SiC-диода Шоттки при длительностях импульса 2 и 80 мкс. $V_0 = 660$ В.

видимости, большим последовательным сопротивлением высокоомного p -слоя.

2. Как видно из рис. 4, динамические ВАХ, измеренные в режиме импульсного пробоя при разных длительностях импульсов, отличаются друг от друга: чем короче импульсы, тем выше напряжение при фиксированном токе. Это можно интерпретировать как увеличение динамического напряжения пробоя V_B^{pulse} . Такое поведение диодов можно объяснить следующим образом.

Мы полагаем, что наблюдаемая разница в импульсном напряжении пробоя диода Шоттки связана с динамикой расширения области пространственного заряда в

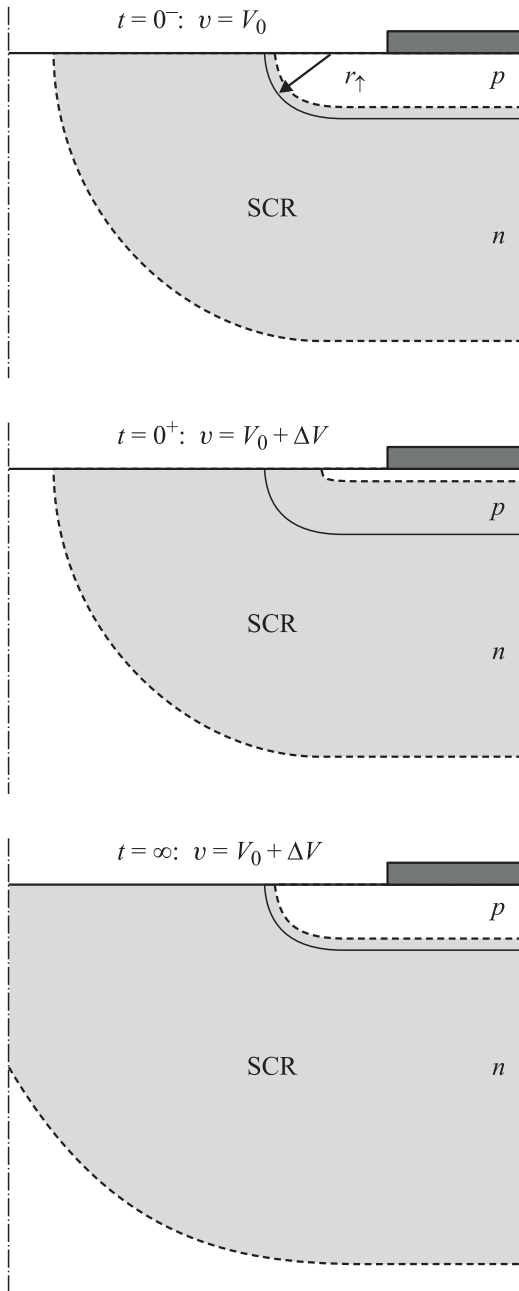


Рис. 5. Динамика расширения ОПЗ (SCR) цилиндрической части охранного p - n -перехода.

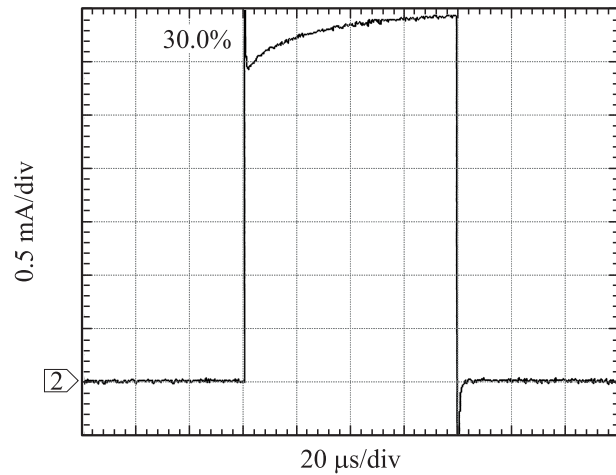


Рис. 6. Осциллограмма тока (канал 2): $V_0 = 660$ В, $\Delta V = 1000$ В, $\Delta t = 80$ мкс.

цилиндрической части охранного p - n -перехода после подачи импульса (рис. 5). В стационарных условиях при $v = V_0$ область пространственного заряда (ОПЗ) p - n -перехода сосредоточена в основном в n -области (момент времени $t = 0^-$ на рис. 5) за счет более высокой концентрации акцепторов: $N_A \gg N_D$. Однако концентрация свободных дырок в электронейтральной части имплантированной p -области ($p = 1.4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) приблизительно на порядок меньше концентрации акцепторов ($N_A = 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) из-за неполной ионизации бора в $4H$ -SiC при комнатной температуре и несколько меньше концентрации электронов в n -слое ($n = 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$). Поэтому сразу после подачи импульса напряжения при $t = 0$ ОПЗ распространяется внутрь p -области (момент времени $t = 0^+$ на рис. 5). На коротких импульсах нейтральные атомы бора в расширившейся ОПЗ не успевают ионизоваться, так что плотность заряда в ней $N_A^i = p \ll N_A$. Уже только одно это обстоятельство способствует увеличению динамического напряжения пробоя. Кроме того, расширение ОПЗ к центру кристалла (а не от центра) является дополнительным фактором, увеличивающим напряжение пробоя. Известно, что напряжение пробоя резкого асимметричного цилиндрического p - n -перехода зависит от того, в каком направлении относительно центра цилиндра расширяется область пространственного заряда [7]: если расширение ОПЗ происходит от металлургической границы к центру цилиндра, то напряжение пробоя выше, чем в противном случае, когда ОПЗ расширяется от центра.

На длинных импульсах нейтральные атомы бора в расширившейся ОПЗ успевают ионизоваться. При этом ширина ОПЗ в p -области уменьшается, а в n -области, напротив, увеличивается ($t \rightarrow \infty$ на рис. 5), что и приводит к уменьшению напряжения пробоя.

На рис. 6 показана осциллограмма, которая отражает динамику роста лавинного тока со временем после приложения импульса напряжения длительностью 80 мкс

(ток увеличивается по мере того как динамическое напряжение пробоя падает).

Как видно, характерное время релаксации тока составляет ~ 20 мкс. Это время хорошо соотносится с расчетным временем термической ионизации атомов бора в 4H-SiC: $\tau = (\sigma v_T N_v)^{-1} \exp(E_A/kT) = 10-100$ мкс (где $\sigma \sim 10^{-15}-10^{-14}$ см² — сечение захвата дырок, v_T — тепловая скорость дырок, N_v — эффективная плотность состояний в валентной зоне 4H-SiC, T — температура, k — постоянная Больцмана). Таким образом, наблюдаемый эффект увеличения динамического напряжения пробоя охранный p-n-перехода связан, скорее всего, с неполной ионизацией бора в карбиде кремния.

4. Заключение

Проведенные исследования имеют важное практическое значение. Высоковольтные диоды Шоттки на основе 4H-SiC предназначаются для работы в составе импульсных преобразователей напряжения. Для таких диодов наиболее эффективной считалась охранный система JTE (junction termination extension) [8]. Такая защита предусматривает создание слабо легированного кольца p-типа проводимости на периферии контакта Шоттки, которое полностью обедняется при напряжении, несколько меньшем напряжения пробоя. В карбиде кремния 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. По результатам проведенных исследований можно заключить, что охранный p-n-переход, сформированный имплантацией бора при комнатной температуре с последующим отжигом, обеспечивает надежную защиту диода Шоттки от краевого пробоя (в том числе на коротких импульсах) и может рассматриваться как достойная альтернатива методу JTE благодаря более простой и дешевой технологии.

Работа поддержана ОФНРАН (программа „Новые принципы преобразования энергии в полупроводниковых структурах“) и грантом РФФИ № 07-02-13529.

Список литературы

- [1] A. Itoh, T. Kimoto, H. Matsunami. IEEE Electron. Dev. Lett., **17** (3), 139 (1996).
- [2] O. Tekemura, T. Kimoto, H. Matsunami, T. Nakata, M. Watanabe, M. Inoue. Mater. Sci. Forum, **264–268**, 701 (1998).
- [3] S. Ortolland, M.L. Locatelli, D. Planson, J.P. Chante, A. Senes. Mater. Sci. Forum, **264–268**, 1045 (1998).
- [4] K.V. Vassilevski, A.B. Horsfall, C.M. Johnson, N.G. Wright. Mater. Sci. Forum, **457–460**, 989 (2004).
- [5] И.В. Грехов, П.А. Иванов, Н.Д. Ильинская, О.И. Коньков, А.С. Потапов, Т.П. Самсонова. ФТП, **42** (2), 211 (2008).
- [6] G. Pensil, F. Ciobanu, T. Frank. Int. J. High Speed Electron. Syst., **15** (4), 705 (2005).

[7] D.P. Kennedy, R.R. O'Brien. IBM J., **10** 213 (1966).

[8] D.C. Sheridan, G. Niu, J.D. Cressler. Sol. St. Electron., **45**, 1659 (2001).

Редактор Л.В. Шаронова

Pulse breakdown of 4H-SiC Schottky barrier diodes terminated by boron implanted p-n junction

P.A. Ivanov, I.V. Grekhov, A.S. Potapov,
T.P. Samsonova

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

Abstract Pulse reverse current–voltage characteristics of 1 kV 4H-SiC Schottky barrier diodes terminated by boron implanted p-n junction have been measured in the breakdown regime. It is shown that dynamic breakdown voltage increases with decreasing pulse duration. Due to homogeneous avalanche breakdown at the edge of the guard p-n junction and high differential resistance in the breakdown regime, the diodes under test are able to withstand without degradation very high pulse reverse voltage (essentially higher than the static breakdown voltage). The breakdown features are considered in connection with specific properties of boron implanted planar p-n junction.