

# Гальванические и емкостные эффекты при компенсации проводимости $n$ -SiC радиационными дефектами

© В.В. Козловский<sup>1</sup>, А.А. Лебедев<sup>2,3</sup>, К.С. Давыдовская<sup>2</sup>, Ю.В. Любимова<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет, „ЛЭТИ“ им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376 Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup> Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 197101 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: Shura.Lebe@mail.ioffe.ru

(Получена 15 мая 2018 г. Принята к печати 21 мая 2018 г.)

Проведено исследование JBS диодов на основе  $4H$ -SiC, облученных электронами и протонами. Исследования проводились методами вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик. Сделан вывод, что при обоих типах облучения происходит образование глубоких центров в верхней половине запрещенной зоны карбида кремния. Это приводит к резкому уменьшению концентрации ионизованных носителей заряда в зоне проводимости и экспоненциальному росту сопротивления базовых областей исследованных структур.

DOI: 10.21883/FTP.2018.12.46770.8914

## 1. Введение

Несмотря на стремительное развитие технологии карбида кремния (SiC) и начало выпуска полупроводниковых приборов на его основе, многие аспекты использования данных приборов изучены недостаточно полно. Это прежде всего касается вопросов радиационной стойкости карбида кремния. Было выполнено большое число работ, в которых исследовались результаты воздействия тех или иных заряженных частиц на SiC-приборы или эпитаксиальные слои [1–9]. Однако в рамках одной работы не проводились сравнения результатов, полученных при облучении SiC гальваническими и емкостными методами.

Цель настоящей работы — изучение процессов дефектообразования в промышленно выпускаемых  $4H$ -диодах Шоттки (ДШ) методами вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик.

## 2. Условия эксперимента

В ходе работы проводилось облучение коммерческих диодов Шоттки производства компании CREE (CPW4-1200S002B) [10]. Площадь образцов ( $S = 10^{-2} \text{ см}^2$ ), напряжение пробоя 1200 В, толщина базовой области ( $L = 15 \text{ мкм}$ ), исходная концентрация некомпенсированной примеси  $N_d - N_a \sim 4.5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

Облучение электронами с энергией 0.9 МэВ проводилось на импульсном ускорителе Resonant Transformer Accelerator (частота импульсов 490 Гц, длительность импульса 330 нс) на охлаждаемой проточной водой мишени. Пробег электронов с энергией 0.9 МэВ составляет  $\sim 1.0 \text{ мм}$  в SiC. Средняя плотность тока пучка

электронов составляла  $12.5 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$ . Можно считать, что при электронном облучении дефекты вводились равномерно по объему образцов, поскольку толщина облучаемых образцов SiC была значительно меньше длины пробега электронов. Максимальная доза облучения составляла  $\sim 7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ .

Облучение протонами выполнялось на циклотроне МГЦ-20. Использовались протоны с энергией 15 МэВ с максимальной дозой облучения ( $D$ )  $\sim 1.0 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ . Концентрации некомпенсированных акцепторов ( $N_a - N_d$ ) в исходных и облученных образцах определялись из вольт-фарадных характеристик ( $C-U$ ) на стандартной установке с параллельной схемой замещения и синусоидальной частотой 10 кГц при комнатной температуре. Также проводилось измерение вольт-фарадных характеристик, как исходных образцов, так и после каждой дозы облучения.

## 3. Результаты и обсуждение

### 3.1. Вольт-фарадные характеристики

На рис. 1 и 2 представлены зависимости изменения профиля распределения  $N_d - N_a$  в исследуемых ДШ от дозы облучения электронами и протонами. Как видно из рисунков, наблюдалось в целом монотонное снижение концентрации  $N_d - N_a$  с увеличением дозы облучения. Тем не менее с увеличением степени компенсации образца стал более заметен профиль распределения примеси — увеличение концентрации при движении в глубь образца. Скорее всего, это связано с тем, что изначально присутствующий в образце небольшой профиль распределения концентрации стал более заметен при

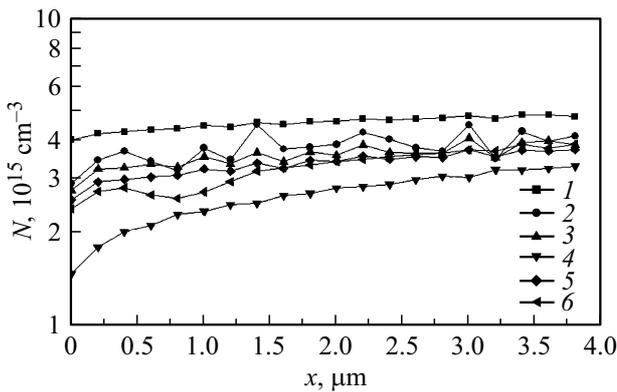


Рис. 1. Зависимость измеряемой величины  $N_d-N_a$  в исследуемых диодах от дозы облучения  $D$  [ $10^{16} \text{ см}^{-2}$ ] электронами с энергией 0.9 МэВ: 1 — исходный образец, 2 — 0.2, 3 — 0.5, 4 — 1, 5 — 1.5, 6 — 3.

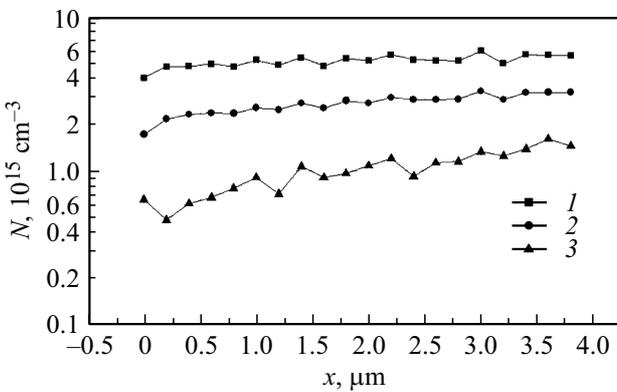


Рис. 2. Зависимость измеряемой величины  $N_d-N_a$  в исследуемых диодах от дозы облучения  $D$ , [ $10^{13} \text{ см}^{-2}$ ] протонами с энергией 15 МэВ: 1 — исходный образец, 2 — 5, 3 — 10.

общем снижении величины  $N_d-N_a$ . Возможно также, что в приповерхностном слое одна из образующихся компонент пар Френкеля (например, междуузлия) уходит на поверхность, что приводит к снижению скорости рекомбинации компонент и увеличению вероятности образования компенсирующих дефектов вакансионной природы.

### 3.2. Вольт-амперные характеристики

В работах [7–9] проведено исследование ВАХ ДШ, облученных электронами и протонами. Показано, что наиболее заметное влияние облучение оказывает на участки  $I-V$ -характеристик при больших и малых смещениях. При больших смещениях участки „насыщения“ соответствуют линейным зависимостям тока от напряжения, наклон которых определяется сопротивлением базы структуры. Сопротивление базы монотонно возрастает с ростом  $D$ . Характер изменения вольт-амперных характеристик под влиянием облучения протонами качественно сходен с изменениями в вольт-

амперных характеристиках аналогичных ДШ под воздействием электронного облучения. Облучение оказывает относительно слабое влияние на экспоненциальный участок  $I-U$ -характеристик. В области больших прямых смещений облучение приводит к резкому возрастанию сопротивления базы прибора  $R_b$ .

Сопротивление ДШ в прямом направлении можно записать как

$$R_b = \rho L / S = L / (en\mu S), \quad (1)$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление SiC,  $L$  — толщина базовой области,  $S$  — площадь диода,  $n$  — концентрация носителей,  $\mu$  — подвижность электронов,  $e$  — заряд электрона.

С использованием данных работ [7–9], формул и полученных профилей распределения  $N_d-N_a$  была построена зависимость сопротивления образцов от измеряемой концентрации  $N_d-N_a$  до и после облучения электронами и протонами (рис. 3).

Как видно из рис. 3, зависимость  $R_b = F(N_d-N_a)$  разбивается на два участка. При малых дозах облучения, когда величина  $N_d-N_a$  составляет  $\geq 50\%$  от исходной, сопротивление растет практически линейно. Этот рост можно объяснить уменьшением величины  $N_d-N_a$  за счет образующихся компенсирующих дефектов. При больших дозах облучения, как в случае электронов, так и в случае протонов, наблюдается экспоненциальный рост величины  $R_b$  (при том что величина  $N_d-N_a$  по-прежнему линейно уменьшается с увеличением дозы облучения). Очевидно, что величина  $R_b$  определяется произведением  $n\mu$ . Можно предположить, что при больших дозах облучения происходит значительное уменьшение подвижности носителей. Однако при облучении образцов Si с примерно таким же уровнем исходного легирования этого не наблюдается [11,12].

Другим возможным объяснением резкого увеличения сопротивления базы может быть снижение концентра-

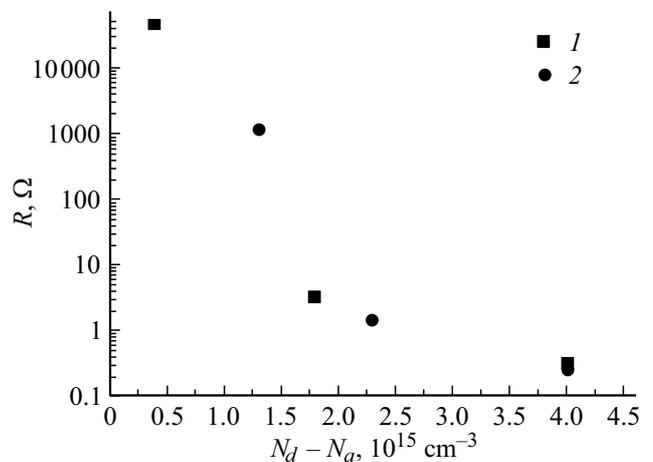


Рис. 3. Зависимость сопротивления  $R_b$  от измеряемой величины  $N_d-N_a$  в исследуемых ДШ до и после облучения: 1 — облучение протонами, 2 — облучение электронами.

ции свободных носителей. Ранее мы предполагали, что  $n = N_d - N_a$ . Однако в случае, если при облучении в SiC образуются уровни не только в нижней, но и в верхней половине зоны, то мелкие доноры могут быть полностью опустошены и происходит термическая ионизация с более глубоких уровней. В таком случае будет  $n \ll N_d - N_a$ . Подтверждением этого предположения служит величина энергии термической активации сопротивления базы диода, которая составила 0.57 эВ [7].

#### 4. Заключение

При обоих видах использованных облучений наблюдается сильная компенсация материала базы диодов. При малых дозах облучения сопротивление базы растет практически линейно, что связано с компенсацией радиационными дефектами исходного уровня легирования ( $n \sim N_d - N_a$ ). При больших дозах облучения происходит экспоненциальный рост величины  $R_b$ . Это связано с образованием радиационных дефектов в верхней половине запрещенной зоны, на которые происходит смещение уровня Ферми с мелких донорных уровней ( $n \ll N_d - N_a$ ).

Настоящая работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-12-10106. Авторы также благодарны М.Е. Левинштейну и С.Л. Румянцеву за обсуждения текста статьи до ее отправки в печать.

#### Список литературы

- [1] A.A. Lebedev. *Radiation Effects in Silicon Carbide* (Material Research Forum LLC, Millersville, PA 17551, USA, vol. 6, 2017).
- [2] В.В. Козловский, А.Э. Васильев, А.А. Лебедев. *Поверхность*, **3**, 22 (2015).
- [3] N. Iwamoto, B.G. Svensson. *Point Defects in Silicon Carbide*. Chap. 10 In: *Defects in Semiconductors*, ed. by L. Romano, V. Privitera, Ch. Jagadish (Ser. Semicond. Semimet., v. 91, Elsevier, 2015).
- [4] K. Danno, D. Nakamura, T. Kimoto. *APL*, **90**, 202109 (2007).
- [5] A.A. Lebedev, A.I. Veinger, D.V. Davydov, A.M. Strel'chuk, V.V. Kozlovskii, N.S. Savkina. *J. Appl. Phys.*, **88**, 6265 (2000).
- [6] M.L. David, G. Alferi, E.M. Monakhov, A. Hallen, C. Blanchard, B.G. Svensson, J.F. Barbot. *J. Appl. Phys.*, **95**, 4728 (2004).
- [7] V.V. Kozlovski, A.A. Lebedev, M.E. Levinshtein, S.L. Rummyantsev, J.W. Palmour. *APL*, **110**, 083503 (2017).
- [8] V.V. Kozlovski, A.A. Lebedev, M.E. Levinshtein, S.L. Rummyantsev, J.W. Palmour. *APL*, **110**, 133501 (2017).
- [9] V.V. Kozlovski, A.A. Lebedev, M.E. Levinshtein, S.L. Rummyantsev, J.W. Palmour. *JAP*, **123**, 024502 (2018).
- [10] <http://cree.com/> Cree Inc.: (04.04.2017).
- [11] V.V. Emtsev, N.V. Abrosimov, V.V. Kozlovskii, G.A. Oganesyan. *Semiconductors*, **48** (12), 1552 (2014).
- [12] V.V. Emtsev, N.V. Abrosimov, V.V. Kozlovskii, G.A. Oganesyan, D.S. Poloskin. *Semiconductors*, **50** (10), 1291 (2016).

Редактор Г.А. Оганесян

#### Galvanic and capacitive effects in compensating the conductivity of *n*-SiC radiation defects

V.V. Kozlovski<sup>1</sup>, A.A. Lebedev<sup>2,3</sup>, K.S. Davydovskaya<sup>2</sup>, Yu.V. Lyubimova<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 195251 St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Ioffe Institute, 194021 St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup> St. Petersburg State Electrotechnical University, „LETI“ named of the V.I. Uljanov (Lenin), 197376 St. Petersburg, Russia

<sup>4</sup> St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 197101 St. Petersburg, Russia

**Abstract** In the work, a study was made of JBS diodes based on 4H-SiC irradiated by electrons and protons. The investigations were carried out using the methods of capacitance-voltage and current-voltage characteristics. It is concluded that for both types of irradiation, deep centers are formed in the upper half of the forbidden zone of silicon carbide. This leads to a sharp decrease in the concentration of ionized charge carriers in the conduction band and an exponential growth in the resistance of the basic regions of the structures studied.