

07

## Исследование воздействия электронного и протонного облучения на приборные структуры на основе 4H-SiC

© А.А. Лебедев<sup>1</sup>, К.С. Давыдовская<sup>1</sup>, А.Н. Якименко<sup>2</sup>,  
А.М. Стрельчук<sup>1</sup>, В.В. Козловский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

E-mail: shura.lebe@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 16 июня 2017 г.

Исследовано изменение вольт-амперных характеристик и величины нескомпенсированной донорной примеси ( $N_d - N_a$ ) в базе диодов Шоттки и JBS-диодов на основе 4H-SiC при их облучении электронами с энергией 0.9 MeV и протонами с энергией 15 MeV. Скорость удаления носителей при облучении электронами составила  $0.07 - 0.15 \text{ cm}^{-1}$ , а при облучении протонами  $50 - 70 \text{ cm}^{-1}$ . Показано, что исследованные приборы сохраняли выпрямляющие вольт-амперные характеристики вплоть до доз электронного облучения  $\sim 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ . Показано, что радиационная стойкость исследованных приборов на основе SiC существенно превосходит радиационную стойкость кремниевых  $p-i-n$ -диодов с аналогичными напряжениями пробоя.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.22.45262.16921

Ранее было показано, что карбид кремния (SiC) имеет большие перспективы для разработки на его основе приборов высоковольтной и силовой электроники [1–3]. В настоящее время на основе 4H-SiC осуществляется коммерческий выпуск диодов Шоттки, JBS-диодов и MOSFET-транзисторов. По сравнению с  $p-i-n$ -диодами на основе кремния SiC-диоды Шоттки обладают большим быстродействием (как прибор на основных носителях заряда) и меньшими обратными токами при комнатной температуре (из-за большей величины запрещенной зоны) при примерно такой же высоте потенциального барьера при прямом напряжении и таком же напряжении пробоя. Первые работы по исследованию радиационных дефектов в карбиде кремния, проведенные в 1950–1960 гг., подтверждали высокую радиационную стойкость этого

Скорости удаления носителей в приборах на основе SiC и Si

Параметр	ДШ 600 V	ДШ 1200 V	JBS 1700 V	Si
$N_d - N_a$ в базе, $\text{cm}^{-3}$	$6.5 \cdot 10^{15}$	$4.5 \cdot 10^{15}$	$3.5 \cdot 10^{15}$	$\sim 10^{15}$
$V_d$ , электроны (0.9 MeV), $\text{cm}^{-1}$	0.095[11]	0.073[11]	0.15*	0.23–2[12]
$V_d$ , протоны (15 MeV) $\text{cm}^{-1}$	63*	50*	54*	110[13]

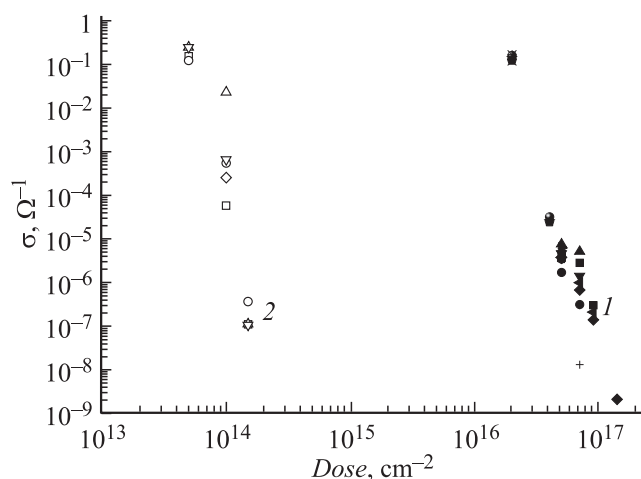
\* Данные настоящей работы.

материала [4]. Однако в последнее время появились публикации, в которых утверждается, что детекторы на основе SiC не только не превосходят детекторы на основе кремния по радиационной стойкости, но даже уступают им по ряду параметров [5–8].

Цель настоящей работы состоит в исследовании радиационной стойкости промышленно выпускаемых диодов Шоттки и JBS-диодов на основе SiC при их облучении электронами с энергией 0.9 MeV и протонами с энергией 15 MeV.

В работе исследованы диоды Шоттки (ДШ) на основе 4H-SiC производства фирмы CREE (США) [9] с напряжениями пробоя 600 и 1200 V и JBS-диоды с напряжением пробоя 1700 V. Концентрация нескомпенсированной донорной примеси ( $N_d - N_a$ ) в исходных приборах до облучения составляла  $(3.5 - 6.5) \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ .

Облучение электронами с энергией 0.9 MeV проводилось на импульсном ускорителе (resonant transformer accelerator, частота импульсов 490 Hz, длительность импульса  $330 \mu\text{s}$ ) на охлаждаемой проточной водой мишени. Пробег электронов с энергией 0.9 MeV составляет  $\sim 1.0 \text{ mm}$  в SiC. Средняя плотность тока пучка электронов равна  $12.5 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ . 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  $\sim 1.5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ . Облучение протонами выполнялось на циклотроне МГЦ-20. Использовались протоны с энергией 15 MeV с максимальной дозой облучения  $(D) \sim 1.0 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ .



**Рис. 1.** Зависимость проводимости диодов Шоттки в прямом направлении от дозы облучения электронами (1) и протонами (2).

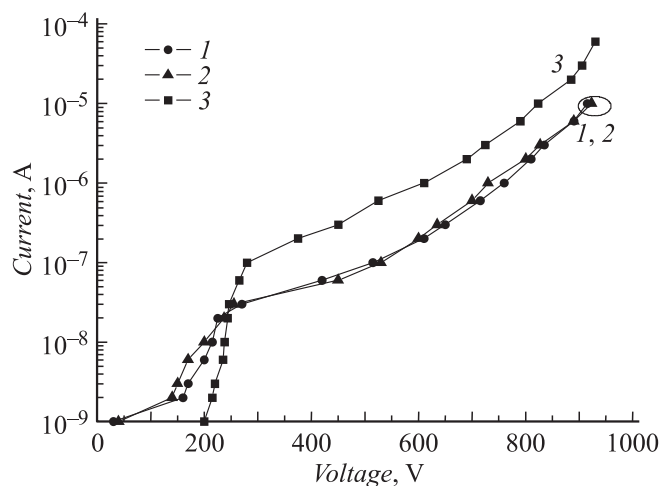
Скорость удаления носителей рассчитывалась по формуле:

$$V_d = (N_0 - N_1) / \Delta D,$$

где  $N_0$  — концентрация  $N_a - N_d$  в эпитаксиальном слое до облучения;  $N_1$  — концентрация  $N_a - N_d$  в эпитаксиальном слое после облучения,  $\Delta D$  — доза облучения.

Концентрация нескомпенсированных акцепторов ( $N_a - N_d$ ) в исходных и облученных образцах определялась по вольт-фарадным характеристикам ( $C-U$ ) на стандартной установке с параллельной схемой замещения и синусоидальной частотой 10 kHz при комнатной температуре.

В ходе проведения экспериментов наблюдалось **линейное уменьшение концентрации  $N_d - N_a$**  для всех типов приборов. Скорость удаления носителей составила  $V_d \sim 0.095 \text{ см}^{-1}$  для концентрации в базовой области диода  $6.5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ,  $V_d \sim 0.073 \text{ см}^{-1}$  для концентрации  $4.5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и  $V_d \sim 0.15 \text{ см}^{-1}$  (JBS-диоды). Эта величина приблизительно в 2 раза ниже, чем для кремния при той же концентрации  $N_d - N_a$  [10] (см. таблицу). Если же провести сравнение с кремниевым  $p-i-n$ -диодом, имеющим то же напряжение пробоя, то следует брать



**Рис. 2.** Обратные ВАХ двух диодов Шоттки до облучения (1,2) и после облучения протонами с энергией 15 MeV и дозой  $1.5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  (3).

величину  $N_d - N_a$  на два порядка меньше, чем в SiC, так как критическое поле пробоя в Si в 10 раз меньше, чем в SiC. Это означает, что для компенсации диода Шоттки на основе SiC потребуется примерно в 200 раз бóльшая доза облучения, чем для компенсации кремниевых  $p-i-n$ -диодов с тем же напряжением пробоя.

На рис. 1 представлено изменение проводимости приборов в прямом направлении в зависимости от дозы облучения. На рис. 2 показаны обратные вольт-амперные характеристики (ВАХ) исследованных приборов в зависимости от дозы облучения. Как видно из рисунков, при дозах облучения более  $1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  сохраняются выпрямляющие свойства приборов, хотя, согласно данным измерений ВАХ при этих дозах, концентрация  $N_d - N_a$  стремится к нулю. Это связано с тем, что концентрация  $N_d - N_a$  в подложке на три порядка выше, чем в базовой области и использованные дозы облучения не приводят к ее значительной компенсации. В результате после облучения исследованные приборы приобретают структуру, аналогичную структуре  $p-i-n$ -диодов. Слой объемного заряда при нулевом напряжении занимает всю базовую область, проводимость которой стремится к собствен-

ной. Полный отжиг введенных радиационных дефектов наблюдался при температуре  $\sim 1200^\circ\text{C}$  [14].

Таким образом, обнаружено, что скорость удаления носителей при облучении приборов на основе  $4H\text{-SiC}$  с концентрацией нескомпенсированных доноров  $N_d - N_a \sim 4 - 6 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  электронами с энергией  $0.9 \text{ MeV}$  составляет  $\sim 0.1 \text{ cm}^{-1}$ , а при облучении протонами с энергией  $15 \text{ MeV}$   $50 - 60 \text{ cm}^{-1}$ . Показано, что для компенсации диодов Шоттки на основе  $4H\text{-SiC}$  потребуется примерно в 200 раз большая доза облучения, чем для кремневых  $p-i-n$ -диодов с таким же напряжением пробоя.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 16-12-10106 „Радиационная стойкость карбида кремния и приборы на его основе для экстремальной электроники“).

## Список литературы

- [1] *Jonson E.O.* // RCA Rev. 1965. V. 26. P. 163–177.
- [2] *Baliga B.J.* // J. Appl. Phys. 1982. V. 53. P. 1759–1764.
- [3] *Лебедев А.А., Челноков В.Е.* // ФТП. 1999. Т. 33. В. 9. С. 1096–1099.
- [4] *Choyke W.J.* // Inst. Phys. Conf. Ser. 1977. V. 31. P. 58–69.
- [5] *Hallen A., Henry A., Pelligrino P.* et al. // Mater. Sci. Eng. B. 1999. V. 61-62. P. 378–381.
- [6] *Swensson B.G.* et al. // Mater. Sci. Forum. 2001. V. 353-356. P. 349–354.
- [7] *Casse G.* // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2009. P. 54–60.
- [8] *Metcalfe J.* // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 2011. V. 215. P. 151–153.
- [9] <http://cree.com/>
- [10] *Emtsev V.V., Ivanov A.M., Kozlovski V.V.* et al. // ФТП. 2012. Т. 46. В. 4. С. 473–481.
- [11] *Лебедев А.А., Давыдовская К.С., Стрельчук А.М., Козловский В.В.* // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2017. № 9. С. 11–13 и др.
- [12] *Козловский В.В., Емцев В.В., Емцев К.В.* и др. // ФТП. 2008. Т. 42. В. 2. С. 243–248.
- [13] *Kozlovski V.V., Strokan N.B., Ivanov A.M., Lebedev A.A., Emtsev V.V., Oganessian G.A., Poloskin D.S.* // Physica B. 2009. V. 404. P. 4752.
- [14] *Лебедев А.А., Богданова Е.В., Григорьева М.В., Лебедев С.П., Козловский В.В.* // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 19. Р. 90–94.