

*Иванов П.А., Потапов А.С., Кудояров М.Ф.,  
Самсонова Т.П., Козловский М.А.  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе*

## **Влияние протонного облучения на статические и динамические характеристики $p^+ - n^- - n^+$ -диодов на основе 4H-SiC**

*Проведено экспериментальное исследование влияния низкодозного протонного облучения (энергия протонов 1.8 MeV, доза облучения  $10^{10} - 1.8 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ) на прямые вольтамперные характеристики и характеристики обратного восстановления 4H-SiC  $p^+ - n^- - n^+$ -диодов со слаболегированной ( $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ )  $n^-$ -базой. Полученные экспериментальные результаты - увеличение сопротивления диодов в открытом состоянии и уменьшение заряда обратного восстановления - объясняются влиянием облучения как на концентрацию основных носителей (электронов) в  $n^-$ -базе, так и на время жизни инжектированных неосновных носителей.*

**Ключевые слова:** Карбид кремния, протонное облучение, полупроводниковый диод, обратное восстановление.

### **1. Введение**

Облучение высокоэнергетическими частицами (электронами, альфа-частицами, протонами) широко применяется для коррекции динамических характеристик  $p-n$ -диодов на основе кремния [1]. (Облучение высокоэнергетичными частицами позволяет изменять профиль времени жизни инжектированных неосновных носителей в диодах и тем самым регулировать характеристики обратного восстановления). Что касается карбида кремния, то до настоящего времени экспериментальных работ в этом направлении не проводилось. В работе [2] было численно промоделировано (в среде SILVACO TCAD) влияние облучения протонами с энергией 670 keV на статические и динамические характеристики 1700-В  $p^+ - n^- - n^+$ -диодов на основе 4H-SiC. В этой теоретической работе доминирующими рекомбинационными ловушками были приняты известные центры Z1/Z2, концентрация которых увеличивается при облучении протонами [3]. Моделирование показало, что характеристики обратного восстановления 4H-SiC  $p-i-n$ -диодов должны быть чувствительны к малым дозам облучения, начиная от  $10^{10} \text{ см}^{-2}$ . В настоящей работе нами проведены экспериментальные исследования влияния низкодозного ( $10^{10} - 1.8 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ) протонного облучения на статические и динамические характеристики 4H-SiC  $p^+ - n^- - n^+$ -диодов.

### **2. Образцы**

Для изготовления диодов была использована коммерческая эпитаксиальная пластина со структурой  $p^+ - n^- - n^+ - n_s$  (подложка). Концентрации акцепторов и доноров в эмиттерных  $p^+$ - и  $n^+$ -слоях составляют  $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$  и  $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , соответственно. Толщины  $p^+$ - и  $n^+$ -слоев  $\sim 1 \text{ мкм}$ , толщина базового эпитаксиального  $n^-$ -слоя около 100  $\mu\text{м}$ . Концентрация доноров в базовом  $n^-$ -слое составляет  $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Низкий уровень легирования в базе был выбран из тех соображений, чтобы повысить чувствительность характеристик диодов к облучению.

Диоды изготавливались в следующей последовательности. Вначале на обратной стороне пластины был сформирован омический контакт из напыленного и термически

вожденного слоя никеля толщиной 0.1  $\mu\text{m}$ . Затем на поверхности эпитаксиальной структуры был сформированы омические контакты площадью 1  $\text{mm}^2$  из напыленного и термически обработанного слоя алюминия (0.07  $\mu\text{m}$ ) и титана (0.03  $\mu\text{m}$ ). Поверх титана был нанесен слой алюминия толщиной 1  $\mu\text{m}$ . Далее на обратную сторону пластины был нанесен слой никеля толщиной 1  $\mu\text{m}$ . Диоды были выполнены в виде меза-структур, сформированных сухим селективным травлением 4H-SiC на глубину 10  $\mu\text{m}$ . Пластина с дискретными диодами разрезалась на отдельные чипы.

Контрольные диоды (чипы N1) облучению не подвергались. Протонное облучение диодов проводилось на УНУ "Циклотрон ФТИ". Энергия протонов 1.8 МэВ была выбрана исходя из того, чтобы пробег протонов составил около одной трети толщины  $n$ -слоя. (Протоны с энергией 1.8 МэВ проникают в карбид кремния на глубину около 30  $\mu\text{m}$  (рис. 1)). Диоды облучались со стороны  $p^+$ -слоя. Доза облучения варьировалась:  $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$  (чипы N2),  $6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$  (чипы N3) и  $1.8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  (чипы N4). После облучения диоды температурной обработке не подвергались.

### 3. Экспериментальные результаты

#### 3.1. Прямые вольтамперные характеристики

На рис. 1 показаны типичные вольтамперные характеристики (ВАХ) изготовленных диодных чипов, измеренные в диапазоне токов  $10^{-9}$  -  $10^{-2}$  А и построенные в полулогарифмическом масштабе.

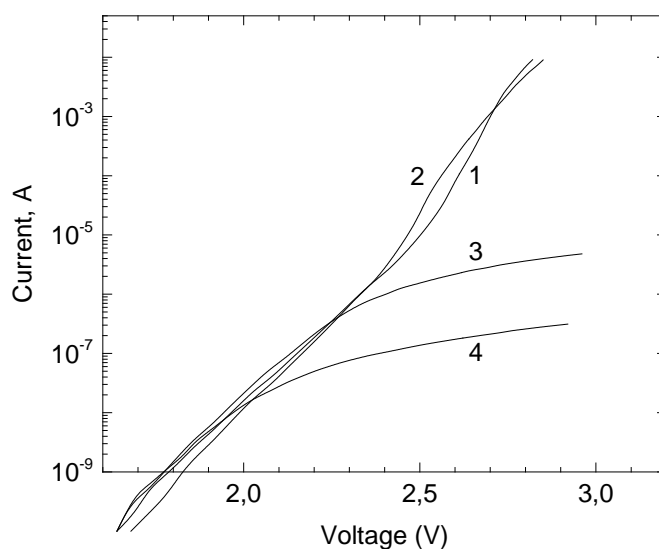


Рис. 1. ВАХ изготовленных диодов (чипы 1-4), измеренные при токах  $10^{-9}$  -  $10^{-2}$  А и построенные в полулогарифмическом масштабе.

ВАХ диодов N1 представляет собой обычную диодную характеристику, состоящую из трех участков: 1) экспоненциального участка, описывающего рекомбинационный ток в области пространственного заряда (ОПЗ), 2) экспоненциального участка, описывающего диффузионный ток в нейтральной части базы и 3) участка перехода к режиму ограничения тока последовательным сопротивлением базы [4]. ВАХ диодов N2 незначительно отличается от ВАХ необлученных диодов. Наблюдается некоторое увеличение диффузионной компоненты тока, обусловленное, по всей видимости, уменьшением времени жизни дырок в  $n$ -базе и более раннее ограничение тока последовательным сопротивлением базы вследствие увеличения ее сопротивления. ВАХ диодов N3 и N4

сильно отличаются от ВАХ необлученных чипов. Вид этих ВАХ свидетельствует о резком увеличении последовательного сопротивления базы при увеличении дозы облучения.

На рис. 2 показаны ВАХ диодов, измеренные с помощью характериографа Л2-100. Как видно, ВАХ диодов N1 и N2 незначительно отличаются друг от друга и представляют собой обычную диодную характеристику. Напряжение открывания этих диодов, 2.7 V, составляет величину, приблизительно равную контактной разности потенциалов 4H-SiC *p-n*-перехода. Диоды N3 и N4 показали необычные S-образные ВАХ, похожие на ВАХ полупроводникового динистора. Напряжение "переключения" (по динисторной терминологии) этих диодов намного превышает контактную разность потенциалов и составляет 4 и 11 V, соответственно.

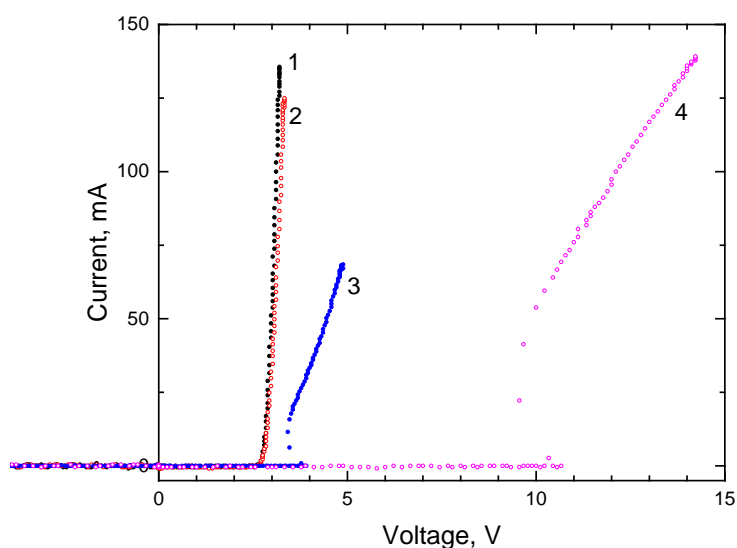


Рис. 2. ВАХ изготовленных диодов (чипы 1-4), измеренные с помощью характериографа Л2-100.

### 3.2. Характеристики обратного восстановления

Характеристики обратного восстановления (ОВ) изготовленных диодов (рис. 3) измерялись при их переключении с прямого направления (ток 3 А) на обратное (напряжение 500 В). Перед тем как сравнивать эти характеристики, оценим полный заряд  $Q_n$  основных носителей, выносимых из *n*-базы необлученных диодов чисто емкостным током:

$$Q_n = qnWS = 2.7nC \quad (1)$$

где  $q$  - элементарный заряд,  $W = 33 \mu\text{m}$  - ширина ОПЗ в *n*-базе при обратном напряжении 500 В.

Заряд ОВ необлученных диодов N1 равен 170 нС, что больше  $Q_n$  в 62 раза (вследствие эффективной модуляции проводимости *n*-базы инжектированными носителями). С ростом дозы облучения заряд ОВ диодов уменьшается, достигая 29 нС у диодов N4.

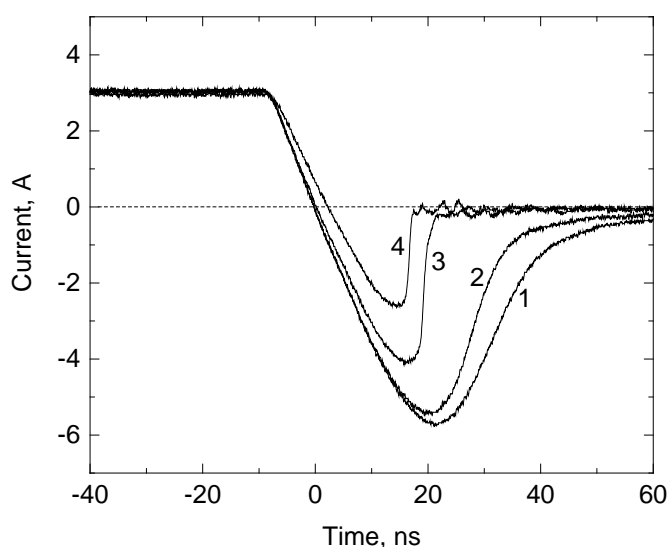


Рис. 3. Характеристики обратного восстановления изготовленных диодов (чипы 1-4). Прямой ток 3 А, обратное напряжение 500 В.

Кроме того, существенным образом изменяется характер ОВ: если необлученные диоды показывают "мягкое" восстановление (обрыв обратного тока происходит за время около 40 ns), то при увеличении дозы облучения наблюдается все более "жесткое" восстановление (при максимальной дозе облучения время обрыва обратного тока укорачивается до 0.8 ns).

#### 4. Обсуждение результатов

Ранее в целом ряде работ было показано, что под действием облучения высокоэнергетичными частицами (в том числе протонами) в *n*-4H-SiC происходит образование глубоких акцепторных центров (см., например, [5]). В наших экспериментах с 4H-SiC *p*<sup>+</sup>-*n*<sup>-</sup>-*n*<sup>+</sup>-диодами образованные протонным облучением акцепторные центры могут, в принципе, играть роль как компенсирующих центров в *n*<sup>-</sup>-базе, так и рекомбинационных центров, снижающих время жизни неравновесных носителей.

Действительно, компенсация донорной проводимости в *n*<sup>-</sup>-базе облученных диодов проявила себя уже при дозе облучения  $1 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ : диоды N2 имеют несколько большее сопротивление в открытом состоянии по сравнению с необлученными диодами N1 (ср. кривые 1 и 2 на рис. 1 и 2). Мы полагаем, что при увеличении дозы облучения до  $6 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$  и выше в *n*<sup>-</sup>-базе происходит локальная перекомпенсация доноров. Действительно, расчеты по программе SRIM показывают, что протоны теряют энергию неравномерно на длине пробега в SiC (рис. 4): потери энергии на длине пробега монотонно возрастают. Поскольку концентрационный профиль радиационных дефектов должен коррелировать с профилем потерь энергии протонов, то при увеличении дозы облучения вполне может возникнуть такая ситуация, когда на конце пробега протонов концентрация глубоких акцепторов превысит концентрацию легирующих доноров. При этом внутри *n*<sup>-</sup>-базы формируется узкая область, в которой равновесный уровень Ферми закрепляется на уровне дефектов. В результате создается узкий энергетический барьер для основных носителей (электронов), высота которого задается глубиной залегания акцепторных центров в запрещенной зоне 4H-SiC. Наличие локального барьера для электронов объясняет резкое увеличение последовательного сопротивления базы при увеличении дозы облучения (кривые 3 и 4 на рис. 2) и возникновение S-образных ВАХ, похожих на характеристику

включения полупроводникового диодистора (кривые 3 и 4 на рис. 2). При этом очевидно, что шире барьер (чем больше доза облучения), тем больше напряжение "включения" такой квазидиодистой структуры.

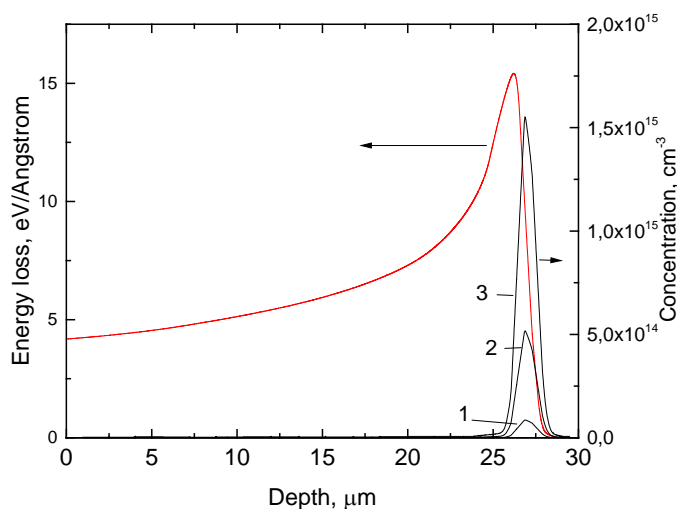


Рис. 4. Профиль распределения внедренных в SiC протонов с энергией 1.8 МэВ и профиль потерь их энергии, рассчитанные по программе SRIM. Доза облучения: 1 -  $10^{10}$   $\text{см}^{-2}$ , 2 -  $6 \times 10^{10}$   $\text{см}^{-2}$ , 3 -  $1.8 \times 10^{11}$   $\text{см}^{-2}$

Очевидно, что уменьшение заряда ОВ под действием облучения свидетельствует об изменении профиля времени жизни инжектированных носителей в базе. При этом естественно предположить, что время жизни должно уменьшаться не во всей базе, а только на одной трети ее толщины. В этом случае можно ожидать, что инжекция в прямом направлении сохранится, а заряд ОВ у диодов N4 останется больше величины  $Q_n$ , что подтверждается экспериментально. Кроме того, локальное снижение времени жизни инжектированных носителей вблизи р-п-перехода должно приводить к тому, что при увеличении дозы облучения будет иметь место все более "жесткое" обратное восстановление диодов, что также подтверждается экспериментально.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект N 14-29-00094).

#### Библиографический список

1. P. Hazdra, J. Vobecký, H. Dorschner, K. Brand. *Microelectronics Journal*, 35, 2004.- P. 249-257.
2. R.K. Sharma, P. Hazdra, S. Popelka. *Int. Journ. of Microelectr. and Computer Science*, 6, 2015.- P.59-63.
3. R.K. Sharma, S. Popelka, P. Hazdra. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 62, 2015.- P. 534-541.
4. P.A. Ivanov, M.E. Levinshtein, J.W. Palmour, S.L. Rumyantsev, and R. Singh. *Semiconductor Science and Technology*, v.15, N9, 2000. -P.908-910.
5. A. A. Lebedev, A. I. Veinger, and D. V. Davydov, V. V. Kozlovski, N. S. Savkina and A. M. Strel'chuk. *Journal of Applied Physics* 88, 2000.-P. 6265-6271.