

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ Si- и SiC-ДЕТЕКТОРОВ НА ПУЧКЕ ИОНОВ Хе

© 2018 г. Л. Hrubčín<sup>a,b</sup>, Ю. Б. Гуров<sup>a,c</sup>, В. Zafko<sup>b</sup>, О. М. Иванов<sup>a</sup>, С. В. Митрофанов<sup>a</sup>,  
С. В. Розов<sup>a,\*</sup>, В. Г. Сандуковский<sup>a</sup>, В. А. Семин<sup>a</sup>, В. А. Скуратов<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Объединенный институт ядерных исследований  
Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

<sup>b</sup> Institute of Electrical Engineering, Slovak Academy of Sciences,  
Bratislava, Slovakia

<sup>c</sup> Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”,  
Россия, Москва

\* e-mail: rozovs@jinr.ru

Поступила в редакцию 05.12.2017 г.

Представлены результаты исследования характеристик детекторов на основе кремния (Si) и карбида кремния (4H-SiC) при облучении различными интегральными потоками ионов ксенона (Xe). Облучения выполнялись на циклотроне IC-100 Лаборатории ядерной реакции им. Г.Н. Флерова ОИЯИ. Показано, что ухудшение работоспособности полупроводникового детектора на основе SiC наступает при более высоких дозовых нагрузках по сравнению с Si-детектором.

DOI: 10.1134/S003281621806023X

### ВВЕДЕНИЕ

Кремниевые полупроводниковые детекторы (Si-п.п.д.), которые широко используются в физике низких и высоких энергий, достаточно чувствительны к радиационным повреждениям. При прохождении ионизирующей частицы в базовом материале могут возникать нарушения кристаллической решетки: смещения и выбивания атомов из узлов решетки, изменение изотопного состава в результате ядерных реакций. Данные процессы приводят к образованию центров захвата и рекомбинации носителей заряда, а также к изменению их эффективной (донорной, акцепторной) концентрации. Большие дозы облучения п.п.д. заметно ухудшают энергетическое разрешение и уменьшают амплитуду сигнала, что обусловлено соответственно уменьшением времени жизни носителей и неполным сбором заряда.

В последние годы для создания радиационно стойких приборов активно применяется карбид кремния (политип 4H-SiC) [1, 2]. Это обусловлено тем, что данный материал по сравнению с кремнием имеет большие значения ширины запрещенной зоны (в 3 раза) и пороговой энергии дефектообразования (в 2 раза).

В работе исследовались характеристики детекторов на основе кремния (Si) и карбида кремния (4H-SiC) при облучении различными интегральными потоками ионов ксенона (Xe). Облучения

выполнялись на циклотроне IC-100 Лаборатории ядерной реакции им. Г.Н. Флерова ОИЯИ [3].

### ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТЕКТОРОВ

Для измерений использовалось по два детектора на основе Si и SiC.

Si-детекторы изготовлены по планарной технологии [4] из кремния *n*-типа (удельное сопротивление  $\rho \approx 6 \text{ кОм} \cdot \text{см}$ ). Выпрямляющие и омические контакты формировались имплантацией бора и фосфора (толщина “мертвого” слоя со стороны *p-n*-перехода 60 нм). Детекторы имели активную площадь  $8 \times 8 \text{ мм}^2$  и толщину 300 мкм.

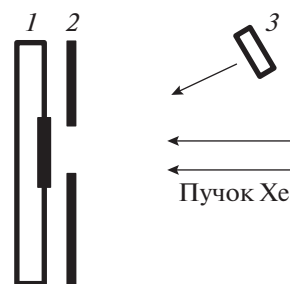


Рис. 1. Схема измерений. 1 – детектор, 2 – коллиматор, 3 –  $\alpha$ -источник  $^{226}\text{Ra}$ .

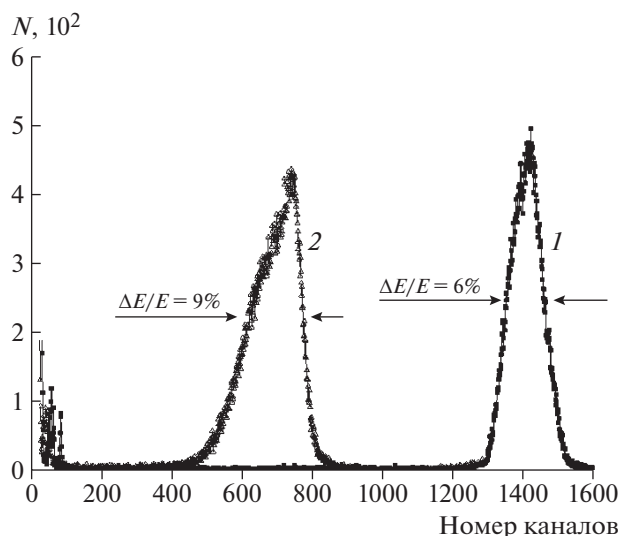


Рис. 2. Спектры ионов Хе, измеренные Si-п.п.д. при дозах  $3.5 \cdot 10^6$  (1) и  $2.6 \cdot 10^7$   $\text{см}^{-2}$  (2).

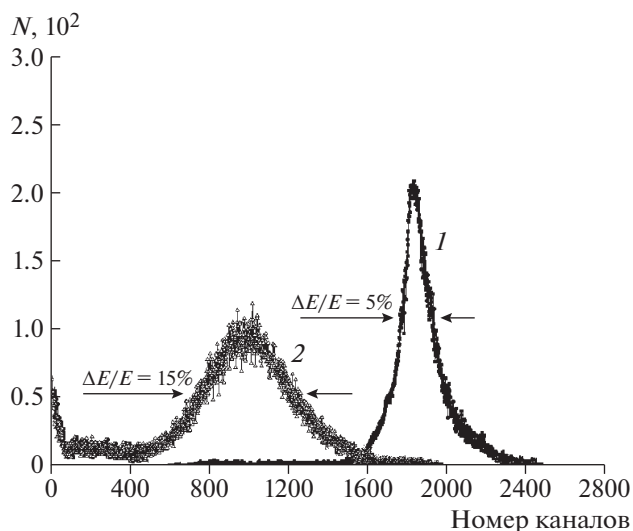


Рис. 3. Спектры ионов Хе, измеренные SiC-п.п.д. при дозах  $1.9 \cdot 10^7$   $\text{см}^{-2}$  (1) и  $2.3 \cdot 10^9$   $\text{см}^{-2}$  (2).

SiC-детекторы [5, 6] были изготовлены в Электротехническом институте (Словацкая академия наук, Братислава) на основе эпитаксиального слоя 4H-SiC *n*-типа проводимости, который был получен методом эпитаксиального выращивания из жидкой фазы на проводящих *n*<sup>+</sup>-подложках 4H-SiC фирмы “L.P.E.” (Италия). Диаметр исходной подложки 3", толщина 350 мкм, концентрация примеси  $\sim 2 \cdot 10^{18}$   $\text{см}^{-3}$ . Созданные эпитаксиальные слои имели толщину 102 мкм и концентрацию донорной (азотной) примеси  $2 \cdot 10^{14}$   $\text{см}^{-3}$ . Детекторы изготавливались на образцах размером  $6 \times 6$  мм. Выпрямляющие контакты  $\varnothing 1.4$  мм создавались вакуумным напылением двойного слоя из Ni и Au толщиной соответственно 40 и 80 нм. Омический контакт изготавливался аналогичным образом, при этом напыление проводилось на всю заднюю поверхность образца.

На основе измеренных вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик было установлено, что рабочее напряжение на Si- и SiC-детекторах составляет соответственно 40 и 120 В. Для всех детекторов исходное энергетическое разрешение, измеренное для  $\alpha$ -частиц с энергией  $E \approx 5.5$  МэВ, не превышало 25 кэВ.

## МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Облучение образцов проводилось пучком ионов  $^{132}\text{Xe}_{26+}$  с энергией 165 МэВ. Схема измерений для определения радиационной стойкости детекторов представлена на рис. 1. Детекторы размещались в вакуумной камере. Пучок ионов попадал на них через коллиматор  $\varnothing 6$  мм. В каме-

ре в достаточном удалении от траектории пучка также размещался  $\alpha$ -источник  $^{226}\text{Ra}$  ( $E_\alpha \approx 4.8, 5.5, 6.0, 7.7$  МэВ), который использовался для постоянного тестирования стабильности характеристик исследуемых детекторов.

Si-детекторы облучались ионами Хе с интегральными дозами от  $1.2 \cdot 10^6$  до  $2.6 \cdot 10^7$   $\text{см}^{-2}$ . На рис. 2 показаны спектры ионов Хе, измеренные одним из Si-п.п.д. при внедренных дозах  $3.5 \cdot 10^6$  и  $2.6 \cdot 10^7$   $\text{см}^{-2}$ . В первых каналах спектров наблюдаются  $\alpha$ -пики от тестового источника  $^{226}\text{Ra}$ . Видно, что с увеличением дозы облучения происходит ухудшение энергетического разрешения ( $\Delta E/E$ , где  $\Delta E$  — полная ширина на половине высоты (ПШПВ),  $E$  — энергия) и уменьшение амплитуды сигнала на Si-детекторах. В табл. 1 показаны усредненные характеристики этих детекторов, определенные с помощью ионов Хе и  $\alpha$ -частиц ( $E_\alpha \approx 7.7$  МэВ) для разных доз облучения.

SiC-детекторы облучались ионами Хе с интегральными дозами от  $1.9 \cdot 10^7$  до  $2.3 \cdot 10^9$   $\text{см}^{-2}$ . Следует отметить, что максимальное значение дозы на два порядка больше, чем при облучении кремниевых детекторов. Это было обусловлено повышенной радиационной стойкостью этих приборов. На рис. 3 показаны спектры ионов Хе, измеренные одним из SiC-п.п.д. при внедренных дозах  $1.9 \cdot 10^7$  и  $2.3 \cdot 10^9$   $\text{см}^{-2}$ . Как и для кремниевых счетчиков, наблюдается деградация характеристик SiC-детекторов, но при более высоких дозовых нагрузках. В табл. 2 показаны усредненные характеристики SiC-детекторов, определенные с помощью ионов Хе и  $\alpha$ -частиц ( $E_\alpha \approx 7.7$  МэВ) для различных доз облучения.

**Таблица 1.** Характеристики Si-детекторов, полученные при облучении ионами Хе с различными дозами

Доза, см <sup>-2</sup>	Энергетическое разрешение ( $\Delta E/E$ ), %		Уменьшение амплитуды сигнала, %	
	ионы Хе	$\alpha$ -частицы	ионы Хе	$\alpha$ -частицы
$1.2 \cdot 10^6$	6	0.9	5	2
$3.5 \cdot 10^6$	7	1.1	18	8
$2.6 \cdot 10^7$	9	1.4	50	30

**Таблица 2.** Характеристики SiC-детекторов, полученные при облучении ионами Хе

Доза, см <sup>-2</sup>	Энергетическое разрешение ( $\Delta E/E$ ), %		Уменьшение амплитуды сигнала, %	
	ионы Хе	$\alpha$ -частицы	ионы Хе	$\alpha$ -частицы
$1.9 \cdot 10^7$	5	1.1	6	3
$2.3 \cdot 10^9$	15	2.9	37	32

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные характеристики детекторов на основе кремния и карбида кремния, которые облучались ионами Хе ( $E = 165$  МэВ) с различными интегральными потоками, показывают, что радиационная стойкость SiC-п.п.д. значительно выше, чем Si-детекторов. Следовательно, SiC-детекторы могут быть использованы для длительного мониторинга пучков тяжелых ионов в прикладных задачах [3].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bruzzi M., Sadrozinskib H.F.-W., Seiden A.* // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. 2007. V. A579. P. 754. doi 10.1016/j.nima.2007.05.326
2. *Kalinina E.V.* // Semiconductors. 2007. V. 41. 745. doi 10.1134/S1063782607070019
3. *Gikal B.N., Gulbekyan G.G., Dmitriev S.N., Bogomolov S.L., Borisov O.N., Ivanenko I.A., Kazarinov N.Y., Kazacha V.I., Kalagin I.V., Kolesov I.V., Sazonov M.N., Tikhomirov A.V., Franko J.* // Phys. Part. Nucl. Let. 2010. V. 7. P. 557. doi 10.1134/S1547477110070289
4. *Bloch P., Cheremukhin A., Golubkov S., Golutvin I., Egorov N., Konjkov K., Kozlov Y., Peisert A., Sidorov A., Zamiatin N.* // IEEE Trans. 2002. V. NS-49. P. 321. doi 10.1109/TNS.2002.998662
5. *Dubecký F., Gombia E., Ferrari C., Zat'ko B., Vanko G., Baldini M., Kovac J., Vacek D., Kovac P., Hrkut P., Necas V.* // JINST. 2012. V. 7. P. P09005. doi 10.1088/1748-0221/7/09/P09005
6. *Гуров Ю.Б., Розов С.В., Сандуковский В.Г., Якушев Е.А., Hrubcin L., Zat'ko B.* // ПТЭ. 2015. № 1. С. 29. doi 10.7868/S003281621501005X