

РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ SiC-ДЕТЕКТОРОВ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ НЕЙТРОНАМИ

*Ю. Б. Гуров^{а,б}, С. А. Евсеев^{а,1}, Н. И. Замятин^а, Ю. А. Копылов^а,
С. В. Розов^а, В. Г. Сандуковский^а, Е. А. Стрелецкая^а, Л. Грубчин^{а,б},
Б. Затько^б, П. Бохачек^б*

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

^б Электротехнический институт, Словацкая академия наук, Братислава

Представлены характеристики детекторов на основе карбида кремния (SiC) до и после облучения интегральными потоками нейтронов $5,11 \cdot 10^{13}$ и $5,39 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. На образцах, облученных максимальным флюенсом, с помощью альфа-частиц показано ухудшение энергетического разрешения на порядок и уменьшение эффективности собирания заряда на $\sim 25\%$.

The characteristics of detectors based on silicon carbide (SiC) before and after irradiation with integral neutron fluxes of $5.11 \cdot 10^{13}$ and $5.39 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ are presented. On samples irradiated with maximum fluence, using alpha particles, a deterioration in the energy resolution by an order of magnitude and a decrease in the efficiency of charge collection by $\sim 25\%$ are shown.

PACS: 29.30.–h; 29.40.Wk

ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые детекторы (ППД), которые широко используются в физике низких и высоких энергий, достаточно чувствительны к радиационным повреждениям. При прохождении регистрируемой частицы в материале детектора возникают дефекты кристаллической решетки, вызванные смещением и выбиванием атомов из узлов решетки, а также происходит изменение изотопного состава в результате ядерных реакций. Данные процессы приводят к образованию центров захвата и изменению исходной концентрации носителей в материале. Большие дозы облучения ППД приводят к заметному ухудшению их энергетического разрешения и уменьшению амплитуды сигнала от регистрируемой частицы, что, соответственно, обусловлено уменьшением времени жизни носителей и неполным собиранием образованного заряда.

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

¹E-mail: evseevsa@jinr.ru

зоны (в 3 раза) и пороговой энергии дефектообразования (в 2 раза). Важно также отметить, что SiC-детекторы могут изготавливаться с применением планарной технологии [1], при этом их генерационный ток ($\sim 10^{-10}$ А/см³) при комнатной температуре будет на порядок меньше по сравнению с Si-ППД ($\sim 10^{-9}$ А/см³).

В работе исследовались характеристики детекторов на основе карбида кремния 4H-SiC после облучения быстрыми нейтронами.

МЕТОДИКА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТЕКТОРОВ

Детекторы изготавливались на основе эпитаксиального слоя 4H-SiC *n*-типа проводимости, который был получен методом эпитаксиального выращивания из жидкой фазы на проводящих *n*⁺-подложках 4H-SiC фирмы L. P. E. (Италия). Диаметр исходной подложки 4", толщина составляла 350 мкм, а концентрация донорной примеси $\sim 2 \cdot 10^{18}$ см⁻³.

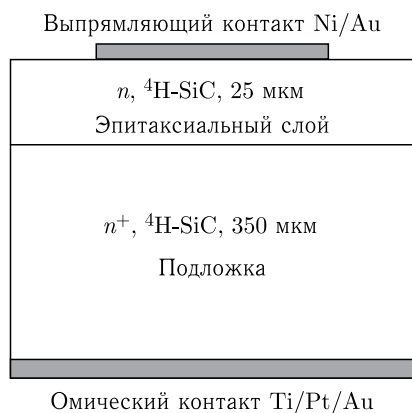


Рис. 1. Структура SiC-детектора

Созданные таким способом слои имели толщину 25 мкм (паспортные данные) с концентрацией донорной примеси $1 \cdot 10^{14}$ см⁻³. Образцы, на которых создавались детекторные структуры, имели размеры 5×5 мм. На рис. 1 показана структура изготовленных детекторов.

Выпрямляющие контакты диаметром 3,6 мм создавались вакуумным напылением двойного слоя из Ni и Au толщиной соответственно 10 и 30 нм. Омический контакт был изготовлен напылением на всю заднюю поверхность тройного слоя из Ti/Pt/Au толщиной соответственно 10, 30, 90 нм. Перед нанесением контактов поверхность образцов последовательно промывалась ацетоном, изопропиловым спиртом и деионизованной водой [4].

Перед нанесением контактов поверхность образцов последовательно промывалась ацетоном, изопропиловым спиртом и деионизованной водой [4].

На основе измеренных вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик (рис. 2, 3) было установлено, что напряжение полного обеднения на SiC-детекторах составля-

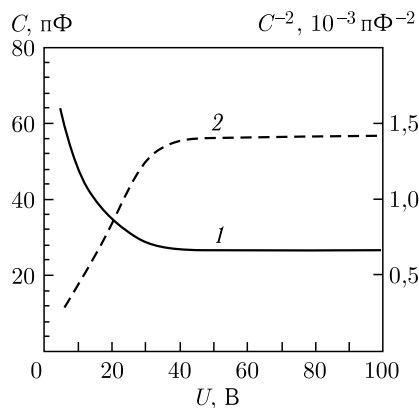


Рис. 2. Зависимости емкости (1) и C^{-2} (2) от приложенного напряжения для SiC-детекторов

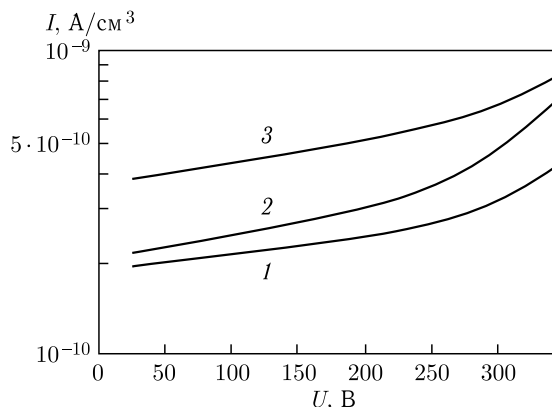


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики SiC-детекторов: 1 — исходный образец (без облучения); 2 — детектор, облученный нейтронным флюенсом $5,11 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$; 3 — детектор, облученный флюенсом $5,39 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$

ло 40 В, а максимальное напряжение — 300 В, после которого начинался существенный рост обратных токов. До указанного значения напряжения обратный ток не превышал $3 \cdot 10^{-10} \text{ А/см}^3$. Из рис. 2 видно, что при напряжении полного обеднения емкость выходит на плато и составляет 26 пФ. Из формулы $C [\text{пФ}] \approx 0,87S [\text{см}^2]/W [\text{см}]$, где C — емкость SiC-детектора, S и W — площадь и толщина рабочей области ППД [1], следует, что реальная толщина составляет 34 мкм, а не 25 мкм (паспортные данные).

Энергетическое разрешение ΔE (FWHM) необлученных детекторов для α -частиц ($E_\alpha \approx 5,5 \text{ МэВ}$) составило 23 кэВ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Облучение образцов проводилось на реакторе ИБР-2 ОИЯИ [5] пучком нейтронов с интегральными потоками $5,11 \cdot 10^{13}$ и $5,39 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (1 МэВ/Si [6]).

Вольт-амперные характеристики (см. рис. 3), измеренные на облученных образцах, показали, что значения обратных токов ухудшились (по сравнению с исходными) с $3 \cdot 10^{-10}$ до $7 \cdot 10^{-10} \text{ А/см}^3$ при напряжении 300 В. Полученное значение обратного тока значительно меньше (10^{-8} – 10^{-7} А/см^3), чем у кремниевых детекторов после нейтронных облучений аналогичными потоками [7].

Спектрометрические характеристики детекторов до и после облучения исследовались с помощью α -источника ^{226}Ra ($E_\alpha \approx 4,8, 5,5, 6,0, 7,7 \text{ МэВ}$).

В измерениях использовался коллиматор диаметром 2,5 мм и толщиной 6 мм. При этом расстояние между коллиматором и детектором составляло 1 мм.

На рис. 4 показаны спектры ^{226}Ra , полученные на исходном (без облучения) образце и детекторах, облученных нейтронами. На рис. 4, а и б также видны два малоинтенсивных пика с энергиями 4,6 и 5,3 МэВ. Измерения проводились при напряжении 300 В. На рис. 4 для детекторов с чувствительной толщиной (эпитаксиальный слой) 34 мкм не наблюдается пика полного поглощения от α -частицы с энергией 7,7 МэВ. Это обусловлено тем, что пробег α -частиц с указанной энергией в карбиде кремния составляет 47 мкм, а толщина чувствительной области SiC-детектора равна 34 мкм.

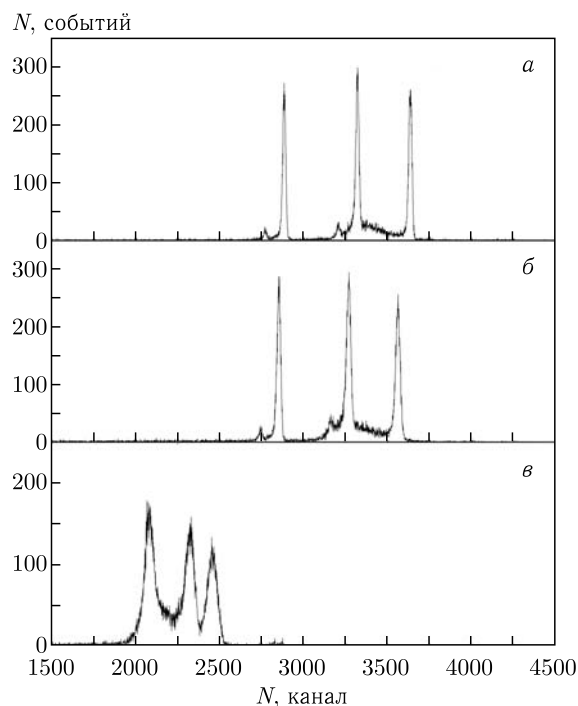


Рис. 4. Спектры ^{226}Ra , измеренные SiC-детекторами: а) исходный образец (до облучения); б) детектор, облученный флюенсом $5,11 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$; в) детектор, облученный флюенсом $5,39 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$

Из рис. 4 также видно, что имеется широкое распределение, соответствующее энергопотерям α -частиц с $E \approx 7,7$ МэВ, пролетающих насквозь детектор толщиной 34 мкм. Данное распределение для исходного образца и детектора, облученного флюенсом $5,11 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, находится в диапазоне 5,3–6 МэВ. Для детектора, облученного флюенсом $5,39 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, этот диапазон смещается в область 4,5–6 МэВ, что обусловлено ухудшением как энергетического разрешения, так и коэффициента сбора образованного заряда. Необходимо указать, что каждый образец после облучения калибровался заново.

На рис. 5 показаны зависимости энергетического разрешения от приложенного напряжения для исследуемых детекторов. Разрешение определялось по α -пику с энергией $E_\alpha \approx 6,0$ МэВ. Время формирования сигнала составляло 1 мкс.

Из рис. 4 и 5 видно, что с увеличением флюенса ухудшается энергетическое разрешение. Энергетическое разрешение, определенное с помощью α -частиц, составило $\Delta E \approx 180$ кэВ при максимальном флюенсе, что практически на порядок больше разрешения на необлученном образце — 23 кэВ. При этом после облучения пики от регистрируемых частиц смещаются в сторону меньших каналов, что указывает на уменьшение амплитуды сигнала. Следует отметить, что разрешение, определенное с помощью генератора импульсов точной амплитуды (ГИТА), изменилось незначительно. На детекторе, облученном флюенсом $5,39 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, разрешение по ГИТА ухудшилось с 12 до 24 кэВ. Указанное ухудшение разрешения полностью связано

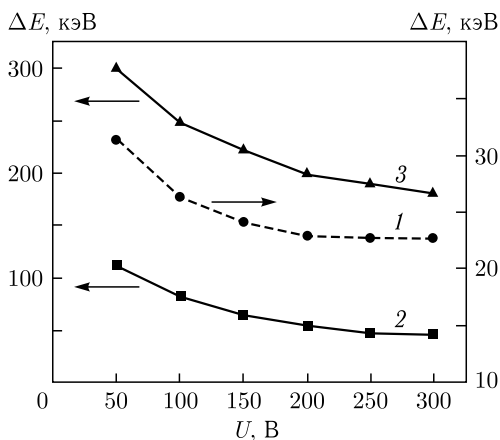


Рис. 5. Зависимость энергетического разрешения от приложенного напряжения для SiC-детекторов: 1 — исходный образец; 2, 3 — ППД, облученные соответственно флюенсами $5,11 \cdot 10^{13}$ и $5,39 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$

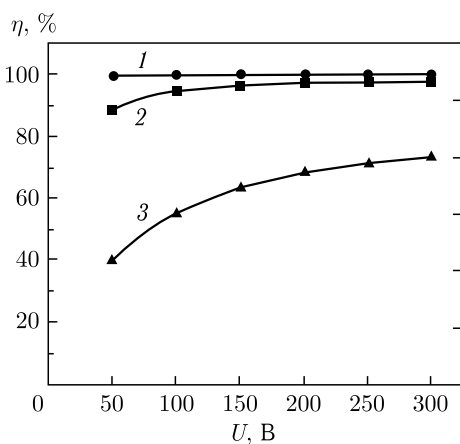


Рис. 6. Зависимость эффективности сбора заряда от приложенного напряжения для SiC-детекторов: 1 — исходный образец; 2, 3 — детекторы, облученные соответственно флюенсами $5,11 \cdot 10^{13}$ и $5,39 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$

с увеличением шумов (обратных токов) детектора. Данный факт позволяет надеяться, что SiC-детекторы толщиной ~ 200 мкм, облученные нейтронами, способны регистрировать частицы высоких энергий (MIP).

На рис. 6 показана зависимость эффективности сбора заряда [8], образованного от α -частиц с $E \approx 6,0$ МэВ, от приложенного напряжения на исследуемых образцах. За 100% принято значение, полученное на исходном детекторе при напряжении 300 В. Видно, что для флюенса $5,11 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ значение эффективности практически совпадает с величиной для исходного образца и равно 96% при напряжении 150–300 В. Также показано, что кривая 3, соответствующая флюенсу $5,39 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, медленно возрастает и при напряжении 300 В эффективность достигает 76%.

Следует отметить, что наши данные согласуются с результатами работы [9], в которой облучение SiC-детекторов (эпитаксиальный слой 20 мкм, размер 1×5 мм) выполнялось быстрыми нейтронами ($E \sim 14$ МэВ) флюенсами $1,31 \cdot 10^{14}$ и $7,29 \times 10^{14}$ см⁻². Эффективность собирания заряда (напряжение 300 В) для указанных условий облучения составила 92 и 77 % соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены характеристики детекторов карбида кремния, которые облучались интегральными потоками нейтронов $5,11 \cdot 10^{13}$ и $5,39 \cdot 10^{14}$ см⁻². Показано, что по сравнению с исходными образцами значения обратных токов на облученных детекторах ухудшились с $3 \cdot 10^{-10}$ до $7 \cdot 10^{-10}$ А/см³ ($U = 300$ В). При этом данное значение этого параметра на порядок меньше, чем у кремниевых детекторов после облучения: $\sim 5 \cdot 10^{14}$ см⁻². С помощью α -частиц установлено, что при максимальном флюенсе энергетическое разрешение облученных детекторов ухудшается с 23 до 180 кэВ. При этом разрешение по ГИТА ухудшилось с 12 до 24 кэВ, а эффективность собирания заряда уменьшилась с 100 до 76 %. Это указывает, что SiC-детекторы обладают лучшей радиационной стойкостью, чем Si-ППД.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (грант № 0723-2020-0041), словацкими агентствами по науке (контракт № 2/0084/20), исследованиям и разработкам (грант № APVV-18-0243).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Saddow S. E., Agarwal A.* Advances in Silicon Carbide Processing and Applications. Boston; London: Artech House. Inc., 2004. 212 p.
2. *Kalinina E. V.* The Effect of Irradiation on the Properties of SiC and Devices Based on This Compound // Semiconductors. 2007. V. 41. P. 745–783.
3. *Hrubčín L., Gurov Yu. B., Zat'ko B., Mitrofanov S. V., Rozov S. V., Sedlačková K., Sandukovský V. G., Semin V. A., Nečas V., Skuratov V. A.* Characteristics of Si and SiC Detectors at Registration of Xe Ions // J. Instrum. 2018. V. 13. P. 11005.
4. *Gurov Yu. B., Rozov S. V., Sandukovský V. G., Yakushev E. A., Hrubčín L., Zat'ko B.* Characteristics of Silicon Carbide Detectors // Instr. Exp. Tech. 2015. V. 1. P. 22–24.
5. *Bulavin M. V., Verkhoglyadov A. E., Kulikov S. A., Kulagin E. N., Kukhtin V. V., Cheplakov A. P., Shabalin E. P.* Irradiation Facility at the IBR-2 Reactor for Investigating Material Radiation Hardness // Phys. Part. Nucl. Lett. 2015. V. 12. P. 344–348.
6. *Zamyatin N. I., Cheremukhin A. E., Shafronovskaya A. I.* Measuring Fluence of Fast Neutrons with Planar Silicon Detectors // Phys. Part. Nucl. Lett. 2017. V. 14. P. 762–777.
7. *Bruzzi M., Sadrozinski H. F., Seiden A.* Comparing Radiation Tolerant Materials and Devices for Ultra Rad-Hard Tracking Detectors // Nucl. Instr. Meth. A. 2007. V. 579. P. 754–761.
8. *Angelescu T., Cheremukhin A. E., Ghete V. M., Ghiordanescu N., Golutvin I. A., Lazanu S., Lazanu I., Mihul A., Radu A., Susova N. Yu., Vasilescu A., Zamyatin N. I.* Radiation Hardness Studies on Silicon Detectors in Fast Neutron Fields // Nucl. Instr. Meth. A. 1995. V. 357. P. 55–63.
9. *Liu L., Liu A., Bai S., Lv L., Jin P., Ouyang X.* Radiation Resistance of Silicon Carbide Schottky Diode Detectors in D–T Fusion Neutron Detection // Sci. Rep. 2017. V. 7. P. 13376.

Получено 9 февраля 2022 г.