

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.07

ВЛИЯНИЕ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ SiC- И Si-ДЕТЕКТОРОВ

©2024 г. Ю. Б. Гуров^{a,b,*}, М. С. Довбненко^a, С. А. Евсеев^a, Н. И. Замятин^a,
Ю. А. Копылов^a, С. В. Розов^a, Е. А. Стрелецкая^a, Б. А. Чернышев^b, Л. Грубчин^c, Б. Затько^c

^a Объединенный институт ядерных исследований
Россия, 141980, Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6
^b Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”
Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31
^c Institute of Electrical Engineering, Slovak Academy of Science
Slovakia, 841 04, Bratislava, Dubravska cesta, 9
*e-mail: gurov54@mail.ru

Поступила в редакцию 04.03.2024 г.

После доработки 13.05.2024 г.

Принята к публикации 02.07.2024 г.

Представлены характеристики детекторов на основе кремния (Si) и карбида кремния (SiC), которые были облучены интегральными потоками нейтронов $\Phi = 5.1 \cdot 10^{13}$, $5.4 \cdot 10^{14}$ и $3.4 \cdot 10^{15}$ н/см² (1 МэВ/Si). Обнаружено, что для всех облученных образцов проводимость чувствительной области становится близкой к собственной. С помощью α -частиц было установлено, что для Si-детекторов, облученных минимальным потоком $5.1 \cdot 10^{13}$ н/см², эффективность собирания заряда η не превышает 1.5%. Для SiC-детекторов, облученных аналогичным потоком, $\eta = 96\%$, а при облучении средним и максимальным потоками η уменьшилась до 70 и 1.5% соответственно. Таким образом, показано, что ухудшение работоспособности SiC-детекторов наступает при существенно более высоких дозовых нагрузках, чем при использовании Si-приборов.

DOI: 10.31857/S0032816224060045 EDN: ELSYMR

1. ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые детекторы (ППД), которые широко используются на ускорительных комплексах высокой светимости, подвергаются высоким радиационным нагрузкам. Это делает требования к радиационной стойкости ППД чрезвычайно важными, а задачу по ее определению актуальной при создании и применении таких приборов.

Под действием частиц в материале детектора возникают нарушения кристаллической решетки, обусловленные смещением и выбиванием атомов из узлов решетки. При этом в результате ядерных реакций происходит изменение изо-

топного состава исходного полупроводника. Эти процессы приводят к образованию центров захвата и рекомбинации носителей заряда, а также к изменению их эффективной (донорной, акцепторной) концентрации. Большие дозы облучения ППД приводят к заметному ухудшению энергетического разрешения и уменьшению амплитуды сигнала. Эти эффекты обусловлены, соответственно, уменьшением времени жизни носителей заряда и их неполным собиранием.

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

запрещенной зоны (Si — 1.2 эВ, SiC — 3.1 эВ) и пороговой энергии дефектообразования (около 15 эВ для Si и примерно 30 эВ для SiC). Важно также отметить, что SiC-ППД могут изготавливаться с применением планарной технологии [2], при этом их генерационный ток при комнатной температуре будет более чем на порядок меньше по сравнению с кремниевыми приборами. В последние годы был достигнут прогресс в создании высокочистых эпитаксиальных слоев SiC толщиной около 100 мкм с малым количеством глубоких центров, высоким удельным сопротивлением и достаточно большим временем жизни носителей заряда. Детекторы, созданные на основе такого материала с низким содержанием электроактивных примесей, интенсивно исследуются с целью их применения в спектроскопии ядерных излучений [2, 3].

В настоящей работе исследовались характеристики детекторов на основе кремния (Si) и поли-типа карбида кремния 4H-SiC после облучения быстрыми нейтронами. Si-ППД использовались как для сравнения радиационной стойкости, так и в качестве калибровочных мониторов для определения эквивалентного 1 МэВ потока быстрых нейтронов [4].

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСХОДНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Для исследований использовались по четыре детектора на основе Si и SiC. Кремниевые структуры изготавливались по планарной технологии [5] из Si с проводимостью *n*-типа (удельное сопротивление $\rho \approx 6$ кОм·см). Выпрямляющий и омический контакты формировались имплантацией бора и фосфора (толщина “мертвого” слоя со стороны *p-n*-перехода составляет около 0.05 мкм). Чувствительные размеры Si-детекторов: площадь 4×4 мм², толщина 300 мкм.

SiC-детекторы изготавливались на основе высокочистого слоя 4H-SiC с проводимостью *n*-типа, который был получен методом эпитаксиального выращивания из жидкой фазы на проводящих *n*⁺-подложках 4H-SiC фирмы L.P.E. (Италия). Диаметр исходной подложки 4 дюйма, толщина 350 мкм, а концентрация донорной примеси равна примерно $2 \cdot 10^{18}$ см⁻³. Созданные таким способом эпитаксиальные слои имели толщину 50 мкм с концентрацией донорной примеси $1 \cdot 10^{14}$ см⁻³. Образцы, на которых создавались детекторные структуры, имели

размеры 6×6 мм². Выпрямляющие контакты диаметром 3.6 мм создавались вакуумным напылением двойного слоя Ni (толщиной 10 нм) и Au (толщиной 30 нм). Тыльный омический контакт был изготовлен напылением на всю заднюю поверхность тройного слоя Ti/Pt/Au толщинами 10, 30, 90 нм соответственно. Перед нанесением контактов поверхность образцов последовательно промывалась ацетоном, изопропиловым спиртом и деионизованной водой [6, 7].

Измеренные вольт-фарадные характеристики (ВФХ) показали, что напряжение полного обеднения для Si-ППД (U_0) равно 50 В, а для SiC-ППД $U_0 = 130$ В. При этом из зависимостей энергетического разрешения ($\Delta E = \text{FWHM}$) от приложенного напряжения было установлено, что рабочее напряжение составляет для Si- и SiC-детекторов соответственно 100 и 350 В. Для всех исходных (необлученных) детекторов энергетическое разрешение, измеренное при рабочих напряжениях с помощью α -источника ^{239}Pu ($E \approx 5.5$ МэВ), не превышало 25 кэВ. При этом разброс в значениях коэффициента (эффективности) сбора заряда η при указанных напряжениях не превышал 1%.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПОСЛЕ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

Облучение образцов проводилось на реакторе ИБР-2 ОИЯИ [8] пучком нейтронов ($E_n \sim 0.5$ эВ–14 МэВ) с интегральными потоками $\Phi = 5.1 \cdot 10^{13}$, $5.4 \cdot 10^{14}$ и $3.4 \cdot 10^{15}$ н/см² (1 МэВ/Si [4]). Для исследований до и после облучения использовались по одному детектору на основе Si и SiC. Спектрометрические характеристики исследуемых детекторов определялись с помощью α -источника ^{226}Ra ($E_a \approx 4.8, 5.5, 6.0, 7.7$ МэВ). Контроль за стабильностью шкалы спектрометрического тракта осуществлялся с помощью генератора точной амплитуды ORTEC 419 (погрешность менее $3 \cdot 10^{-5}$). Измерения характеристик исследуемых детекторов выполнялись при $T \approx 21^\circ\text{C}$.

Измерения показали, что если для SiC-ППД при максимальном потоке $\Phi = 3.4 \cdot 10^{15}$ н/см² наблюдается существенная деградация их спектрометрических свойств, то для кремниевых детекторов аналогичный эффект проявляется при $\Phi = 5.1 \cdot 10^{13}$ н/см². При этом Si-детекторы, облученные потоком $\Phi = 5.4 \cdot 10^{14}$ н/см², полностью теряли счетную способность при регистрации α -частиц.

На рис. 1 и 2 показаны зависимости емкости C и параметра C^{-2} от приложенного напряжения, которые были измерены на исходных и облученных SiC- и Si-образцах. Измерения емкости выполнялись на частотах $F = 0.1$ МГц и $F = 1$ МГц, при этом полученные результаты совпали с высокой точностью. Измерение ВФХ выполнялось с помощью анализатора параметров Keithley 4200A-SCS в автоматическом режиме с шагом 1 В, при этом значение емкости определялось с погрешностью 10^{-6} .

Видно, что значение емкости, измеренное на облученных образцах, постоянно и практически совпадает по величине с данной характеристикой на исходных детекторах при напряжении полного обеднения U_0 . В этом случае обеспечивается растяжка чувствительной области на полную толщину Si-образца и эпитаксиального слоя SiC-детектора. Данный эффект обусловлен тем, что в результате нейтронного облучения в полупроводниковых кристаллах образуются радиационные повреждения (точечные дефекты, кластеры), которые выполняют роль акцепторных примесей. За счет этих дефектов происходит изменение эффективной концентрации легирования (компенсация) исходного материала. В результате проводимость чувствительного слоя SiC-детекторов становится близкой к собственной [9, 10], а в Si-образцах происходит инверсия проводимости от n -типа к высокоомному p -типу [11].

На рис. 3, 4 представлены спектры источника ^{226}Ra , полученные на исходных (до облучения) образцах и облученных детекторах, изготовленных соответственно из SiC и Si. Измерения проводились при напряжениях 350 В (рис. 3) и 100 В (рис. 4). Врезки на рис. 3г, 4б более детально демонстрируют измеренные спектры при соответствующих потоках. Как отмечалось выше, на рис. 4 не показаны спектры для Si-ППД, облученных потоками $5.4 \cdot 10^{14}$ и $3.4 \cdot 10^{15}$ н/см², так как эти образцы сильно деградировали.

На рис. 5 и 6 показаны зависимости энергетического разрешения от приложенного напряжения для исследуемых SiC- и Si-детекторов. Разрешение определялось по α -пику с энергией $E_\alpha \approx 7.7$ МэВ. Постоянная времени формирования сигнала составляла $\tau = 1$ мкс.

Необходимо указать, что для Si-детекторов облучение α -частицами выполнялось со стороны переднего (p^+) и заднего (n^+) контактов. При

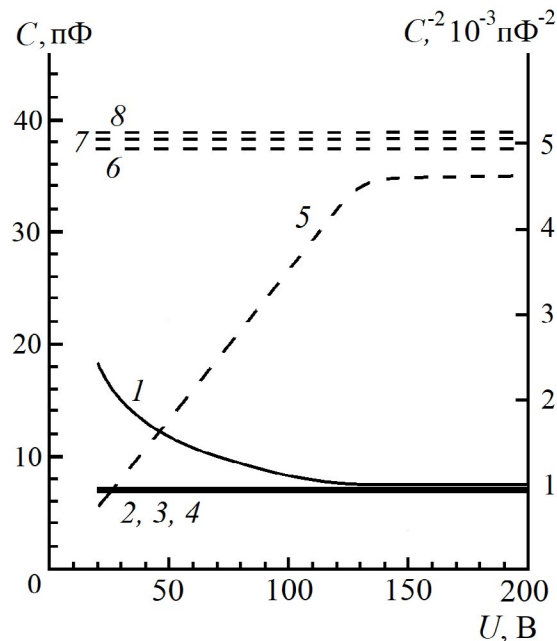


Рис. 1. Зависимости емкости C (1–4) и параметра C^{-2} (5–8) от приложенного напряжения для SiC-детекторов: 1, 5 – необлученный образец; 2, 6 – детектор, облученный потоком $\Phi = 5.1 \cdot 10^{13}$ н/см²; 3, 7 – $\Phi = 5.4 \cdot 10^{14}$ н/см²; 4, 8 – $\Phi = 3.4 \cdot 10^{15}$ н/см².

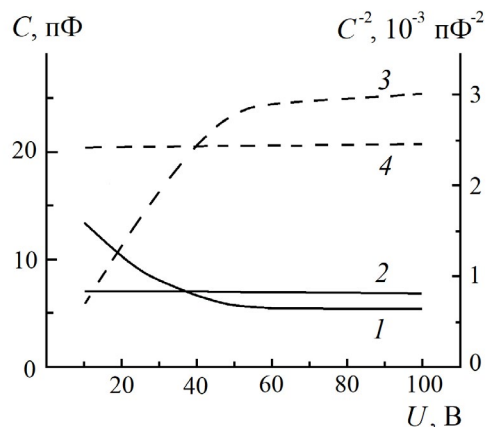


Рис. 2. Зависимости емкости C (1, 2) и параметра C^{-2} (3, 4) от приложенного напряжения для Si-детекторов: 1, 3 – необлученный образец; 2, 4 – детектор, облученный потоком $\Phi = 5.1 \cdot 10^{13}$ н/см².

этом как значения энергетического разрешения, так и формы спектров для этих измерений полностью совпали.

На рис. 3–6 видно, что с увеличением нейтронного потока ухудшается энергетическое разрешение. Для SiC-ППД энергетическое разрешение составило $\Delta E \approx 480$ кэВ ($U = 350$ В) при максимальном потоке $3.4 \cdot 10^{15}$ н/см², что приблизительно в 20 раз больше исходного

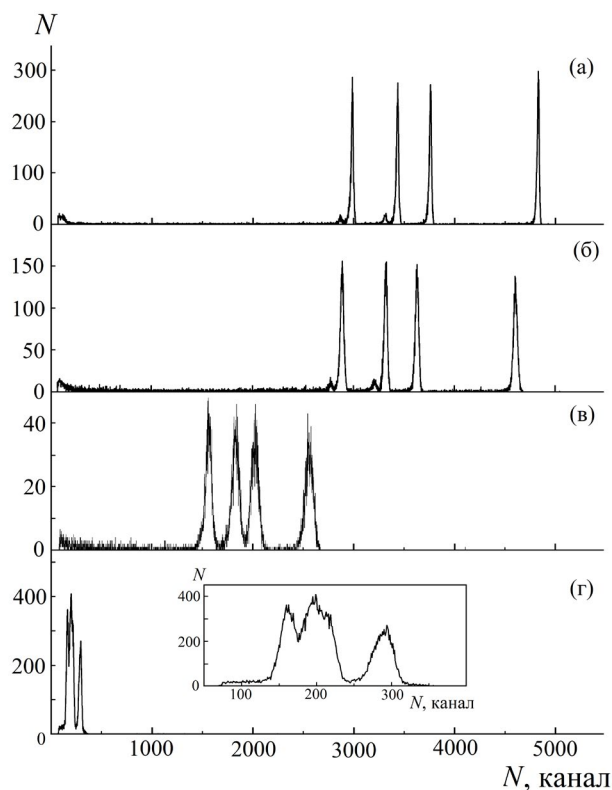


Рис. 3. Спектры ^{226}Ra , измеренные с помощью SiC-детекторов: **а** — необлученный образец; **б, в, г** — детекторы, облученные соответственно нейтронными потоками $\Phi = 5.1 \cdot 10^{13}$, $5.4 \cdot 10^{14}$ и $3.4 \cdot 10^{15}$ н/см 2 .

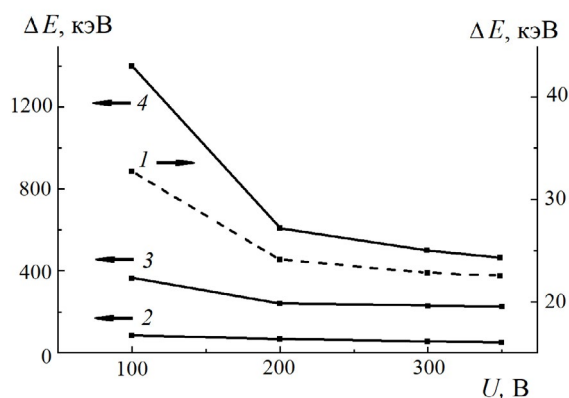


Рис. 5. Зависимость энергетического разрешения от приложенного напряжения для SiC-детекторов: **1** — необлученный образец (правая ось), **2, 3, 4** — детекторы, облученные соответственно нейтронными потоками $5.1 \cdot 10^{13}$, $5.4 \cdot 10^{14}$ и $3.4 \cdot 10^{15}$ н/см 2 (левая ось).

значения 25 кэВ. Для Si-ППД при минимальном потоке $5.1 \cdot 10^{13}$ н/см 2 разрешение оказалось на уровне примерно 1900 кэВ ($U = 100$ В), что практически в 80 раз превышает значение указанного параметра на необлученном образце, равное 25 кэВ.

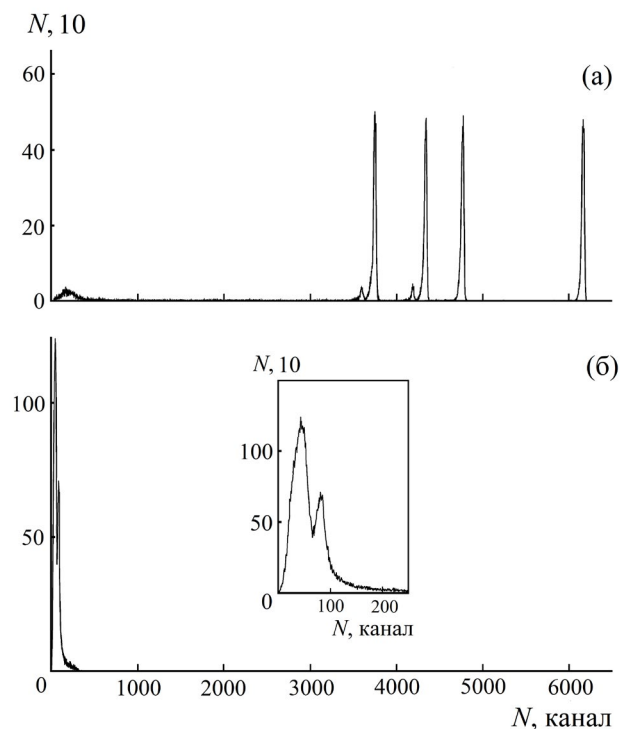


Рис. 4. Спектры ^{226}Ra , измеренные с помощью Si-детекторов: **а** — необлученный образец, **б** — детектор, облученный нейтронным потоком $\Phi = 5.1 \cdot 10^{13}$ н/см 2 .

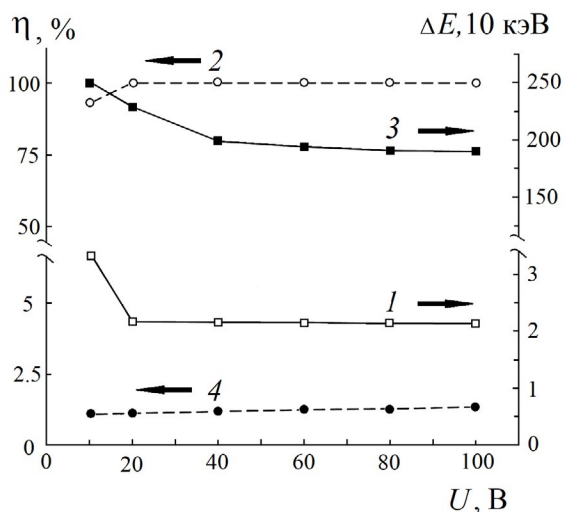


Рис. 6. Зависимость энергетического разрешения (**1, 3**, правая ось) и эффективности собирания заряда (**2, 4**, левая ось) от приложенного напряжения для Si-детекторов: **1, 2** — необлученный образец, **3, 4** — детектор, облученный потоком $5.1 \cdot 10^{13}$ н/см 2 .

При этом с увеличением дозы облучения пики от регистрируемых α -частиц смещаются в сторону меньших каналов, что указывает на уменьшение амплитуды сигнала. На рис. 6, 7 показаны зависимости эффективности собирания заряда η [12] при регистрации α -частиц с $E \approx 7.7$ МэВ

от приложенного напряжения на исследуемых образцах. За $\eta = 100\%$ принято значение, полученное на исходных Si- и SiC-детекторах при напряжениях 100 и 350 В.

Необходимо указать, что погрешности в определении энергетического разрешения и эффективности собирания заряда, зависимости которых от напряжения представлены на рис. 5–7, составляют не более 2 и 1% соответственно. Поэтому размеры значков экспериментальных точек на этих рисунках превышают указанные погрешности.

Согласно данным, приведенным на рис. 6, эффективность сбора заряда для Si-детектора, облученного нейтронным потоком $\Phi = 5.1 \cdot 10^{13}$ н/см², не превышает 1.5% ($U = 100$ В). Следовательно, этот детектор может работать только в счетном режиме при регистрации α -излучения. Полученные плохие спектрометрические характеристики ($\Delta E \sim 1900$ кэВ, $\eta \sim 1.5\%$) Si-образца согласуются с ранее полученными результатами большого числа исследований кремниевых детекторов, которые облучались нейтронами [11].

Из представленных распределений для SiC-образцов на рис. 7 видно, что детектор, облученный нейтронным потоком $\Phi = 5.1 \cdot 10^{13}$ н/см² имеет эффективность сбора заряда $\eta = 96\%$ (диапазон напряжения 150–350 В), т.е. практически совпадает с величиной для необлученного образца. Также показано, что кривая 3, соответствующая потоку $5.4 \cdot 10^{14}$ н/см², медленно выходит на плато при напряжении 350 В и величина η достигает приемлемого значения для спектрометрии α -излучения, равного 70%. Для SiC-детектора, облученного потоком $3.4 \cdot 10^{15}$ н/см², получено достаточно низкое значение параметра $\eta \sim 1.5\%$ при рабочем напряжении. Этот результат совпадает с величиной η для кремниево-

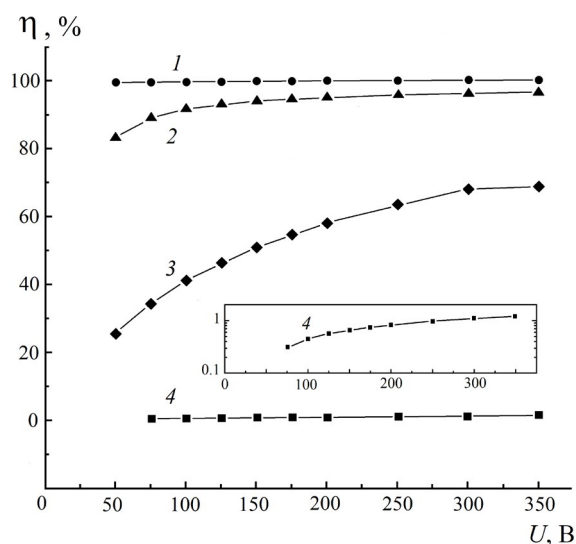


Рис. 7. Зависимость эффективности собирания заряда от приложенного напряжения для SiC-детекторов: 1 — необлученный образец, 2, 3, 4 — детекторы, облученные соответственно потоками $5.1 \cdot 10^{13}$, $5.4 \cdot 10^{14}$ и $3.4 \cdot 10^{15}$ н/см².

го детектора, облученного практически на два порядка меньшим нейтронным потоком $5.1 \cdot 10^{13}$ н/см². В табл. 1 для сравнения представлены спектрометрические характеристики исследуемых детекторов на основе кремния и карбида кремния, измеренные с помощью α -источника ²²⁶Ra.

Полученные данные по радиационной стойкости SiC-детекторов согласуются с результатами работы [13], в которой облучение карбид-кремниевых образцов (эпитаксиальный слой 20 мкм, рабочие размеры 1×5 мм²) выполнялось нейтронными потоками ($E_n \leq 14$ МэВ) $\Phi = 1.3 \cdot 10^{14}$ и $7.3 \cdot 10^{14}$ н/см². Эффективность собирания заряда при напряжении $U = 300$ В для указанных условий облучения составила 92 и 77% соответственно.

Таблица 1. Спектрометрические характеристики исследуемых Si- и SiC-детекторов

Φ , н/см ²	0	$5.1 \cdot 10^{13}$	$5.4 \cdot 10^{14}$	$3.4 \cdot 10^{15}$
ΔE , кэВ				
Si-ППД	25	1900	—	—
SiC-ППД	25	55	220	480
η , %				
Si-ППД	100	1.5	—	—
SiC-ППД	100	96	70	1.5

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены характеристики детекторов на основе SiC и Si, которые облучались потоками нейтронов $\Phi = 5.1 \cdot 10^{13}$, $5.4 \cdot 10^{14}$ и $3.4 \cdot 10^{15}$ н/см². Экспериментально установлено, что после облучения потоком $5.1 \cdot 10^{13}$ н/см² емкость всех образцов не изменяется с увеличением напряжения и совпадает по величине с этой характеристикой на необлученных детекторах, работающих в режиме полного обеднения. Этот эффект обусловлен тем, что радиационные повреждения (дефекты), возникающие при нейтронном облучении, приводят к изменению концентрации легирования полупроводника, т.е. проводимость чувствительного слоя детекторов становится близкой к собственной.

Показано, что для Si-детекторов, облученных потоком $\Phi = 5.1 \cdot 10^{13}$ н/см², наблюдается существенное ухудшение их спектрометрических характеристик при регистрации α -частиц в диапазоне энергий примерно от 4 до 8 МэВ. Аналогичный эффект для SiC-детекторов проявляется при существенно большем (практически на два порядка) нейтронном потоке $\Phi = 3.4 \cdot 10^{15}$ н/см². Установлено, что после облучения потоком $\Phi = 5.4 \cdot 10^{14}$ н/см² SiC-образцы обладают приемлемыми значениями энергетического разрешения и эффективности собирания заряда ($\Delta E \approx 220$ кэВ, $\eta = 70\%$). При этом Si-детекторы, облученные аналогичным потоком, полностью теряют спектрометрические характеристики и могут работать только в счетном (дозиметрическом) режиме при регистрации α -частиц. Таким образом, показано, что по радиационной стойкости SiC-детекторы существенно превосходят приборы на основе кремния.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект № FSWU-2023-0073.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Saddow S.E., Agarwal A.* Advances in Silicon Carbide Processing and Applications. Boston, London: Artech House. Inc. Norwood. MA, 2004.
2. *Nava F., Bertuccio G., Cavallini G., Vittone E.S.* // Meas. Sci. Technol. 2008. V. 19. P.102001. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/19/10/102001>
3. *Napoli M.D.* // Front. Phys. 2022. V. 10. P. 898833. <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.898833>
4. *Zamyatin N.I., Cheremukhin A.E., Shafronovskaya A.I.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2017. V. 14. P. 762. <https://doi.org/10.1134/S1547477117050156>
5. *Bloch P., Cheremukhin A., Golubkov S., Golutvin I., Egorov N., Konjov K., Kozlov Y., Peisert A., Sidorov A., Zamiatin N.* // IEEE Trans. 2002. V. NS-49. P. 321. <https://doi.org/10.1109/TNS.2002.998662>
6. *Gurov Yu.B., Rozov S.V., Sandukovsky V.G., Yakushev E.A., Hrubcin L., Zat'ko B.* // Instrum. Exp. Tech. 2015. V. 58. P. 22. <https://doi.org/10.1134/S0020441215010054>
7. *Hrubcin L., Gurov Yu.B., Zat'ko B., Mitrofanov S.V., Rozov S.V., Sedlačková K., Sandukovsky V.G., Semin V.A., Nečas V., Skuratov V.A.* // J. Instrum. 2018. V. 13. P11005. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/11/P11005>
8. *Bulavin M.V., Verkhoglyadov A.E., Kulikov S.A., Kulagin E.N., Kukhtin V.V., Cheplakov A.P., Shabalin E.P.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2015. V. 12. P. 344. <https://doi.org/10.1134/S1547477115020077>
9. *Sciortino S., Hartjes F., Lagomarsino S., Navad F., Brianzib M., Cindroe V., Lanzierif C., Mollg M., Vannid P.* // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A. 2005. V. 552. P. 138. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.06.017>
10. *Castaldini A., Cavallini A., Rigutti L., Nava F.* // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 85. P. 3780. <https://doi.org/10.1063/1.1810627>
11. *Bruzzi M., Sadrozinski H.F., Seiden A.* // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A. 2007. V. 579. P. 754. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2007.05.326>
12. *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.* // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A. 1995. V. 357. P. 55. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(94\)01534-1](https://doi.org/10.1016/0168-9002(94)01534-1)
13. *Liu L., Liu A., Bai S., Lv L., Jin P., Ouyang X.* // Sci. Rep. 2017. V. 7. P.13376. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-13715-3>