

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,1}, Б. Затько^{c,2}

^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 сбора 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.

1. ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые детекторы (ППД), которые широко используются на ускорительных комплексах высокой светимости, подвергаются высоким радиационным нагрузкам. Это делает

¹ L. Hrubcin

² B. Zat'ko

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 изотопного 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 сборением.

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 политипа 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 $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Созданные таким способом эпитаксиальные слои имели толщину 50 мкм с концентрацией донорной примеси $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Образцы, на которых создавались детекторные структуры, имели размеры $6 \times 6 \text{ мм}^2$. 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_o) равно 50 В, а для SiC-ППД $U_o = 130 \text{ В}$. 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 ($E \approx 5.5 \text{ МэВ}$), не превышало 25 кэВ. При этом разброс в значениях коэффициента (эффективности) собирания 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 ($E_n \sim 0.5 \text{ эВ} - 14 \text{ МэВ}$) с интегральными потоками $\Phi = 5.1 \cdot 10^{13}$, $5.4 \cdot 10^{14}$ и $3.4 \cdot 10^{15} \text{ н/см}^2$ (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 ($E_\alpha \approx 4.8, 5.5, 6.0, 7.7 \text{ МэВ}$). Контроль за стабильностью шкалы спектрометрического тракта осуществлялся с помощью генератора точной амплитуды ORTEC 419 (погрешность менее $3 \cdot 10^{-5}$). Измерения характеристик исследуемых детекторов выполнялось при $T \approx 21 \text{ }^\circ\text{C}$.

Измерения показали, что, если для SiC-ППД при максимальном потоке $\Phi = 3.4 \cdot 10^{15} \text{ н/см}^2$ наблюдается существенная деградация их спектрометрических свойств, то для кремниевых детекторов аналогичный эффект проявляется при $\Phi = 5.1 \cdot 10^{13} \text{ н/см}^2$. При этом Si-детекторы, облученные потоком $\Phi = 5.4 \cdot 10^{14} \text{ н/см}^2$, 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} .

Рис. 1. Зависимости емкости C (1–4) и параметра C^{-2} (5–8) от приложенного напряжения для SiC-детекторов

Рис. 2. Зависимости емкости C (1, 2) и параметра C^{-2} (3, 4) от приложенного напряжения для Si-детекторов

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.

Рис. 3. Спектры ^{226}Ra , измеренные с помощью SiC-детекторов

Рис. 4. Спектры ^{226}Ra , измеренные с помощью Si-детекторов

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

Рис. 5. Зависимость энергетического разрешения от приложенного напряжения для SiC-детекторов

Рис. 6. Зависимость энергетического разрешения (1, 3, правая ось) и эффективности сбора заряда (2, 4, левая ось) от приложенного напряжения для Si-детекторов

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 значения 25 кэВ. Для Si-ППД при минимальном потоке $5.1 \cdot 10^{13}$ н/см² 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.

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 эффективность сбора 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 сбора 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. Полученный 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 кремниевого 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.

Рис. 7. Зависимость эффективности сбора заряда от приложенного напряжения для SiC-детекторов

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 сбора 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 сбора заряда ($\Delta E \approx 220$ кэВ, $\eta = 70$ %). При этом Si-детекторы, облученные аналогичным потоком,

полностью теряют спектрометрические характеристик 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., Konjgov 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. *Hrubčín 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., Hartjesc 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>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Зависимости емкости C (1–4), измеренной при $F = 1$ МГц, 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), измеренной при $F = 1$ МГц, 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.
- Рис. 3.** Спектры ²²⁶Ra, 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/см².
- Рис. 4.** Спектры ²²⁶Ra, измеренные с помощью Si-детекторов: а – необлученный образец, б – детектор, облученный нейтронным потоком $\Phi = 5.1 \cdot 10^{13}$ н/см².
- 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/см² (левая ось).
- Рис. 6.** Зависимость энергетического разрешения (1, 3, правая ось) и эффективности сбора 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/см².
- Рис. 7.** Зависимость эффективности сбора 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.

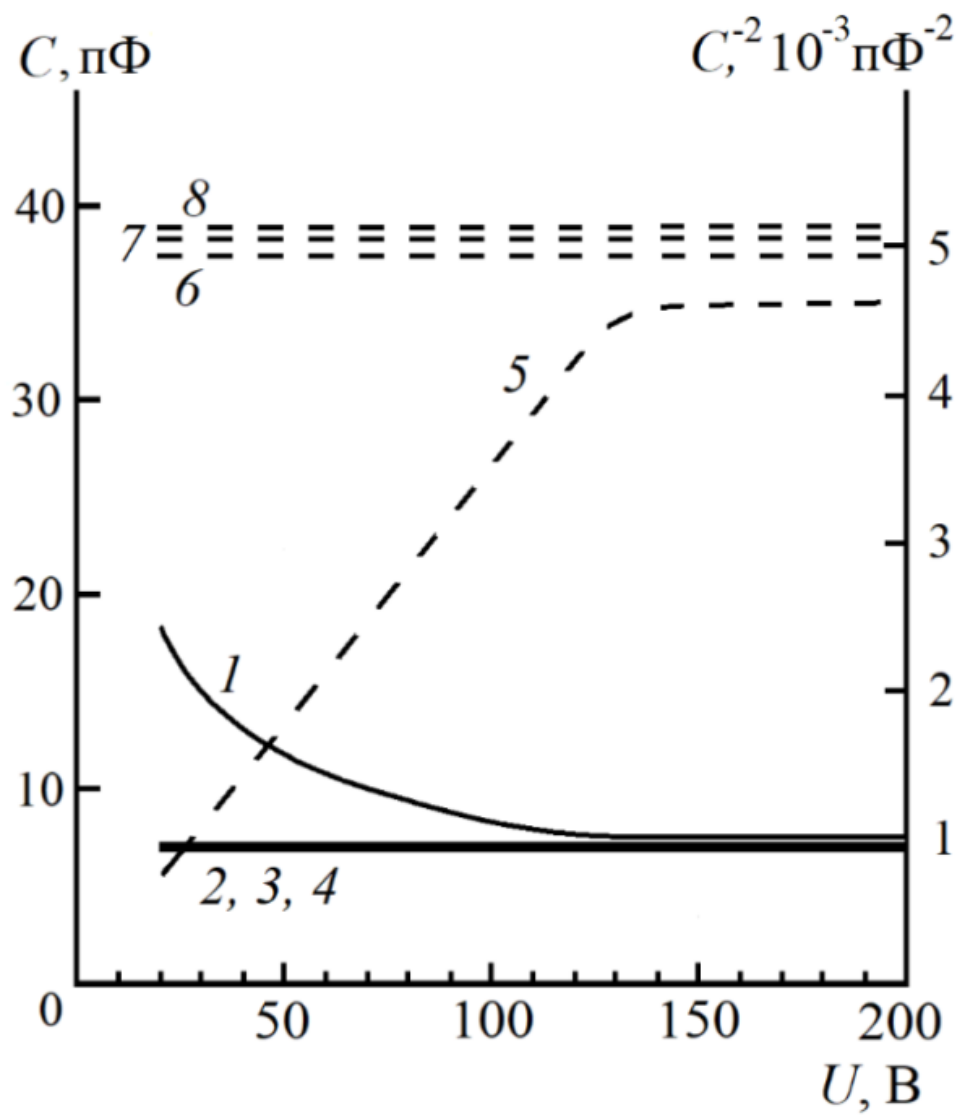


Рис. 1

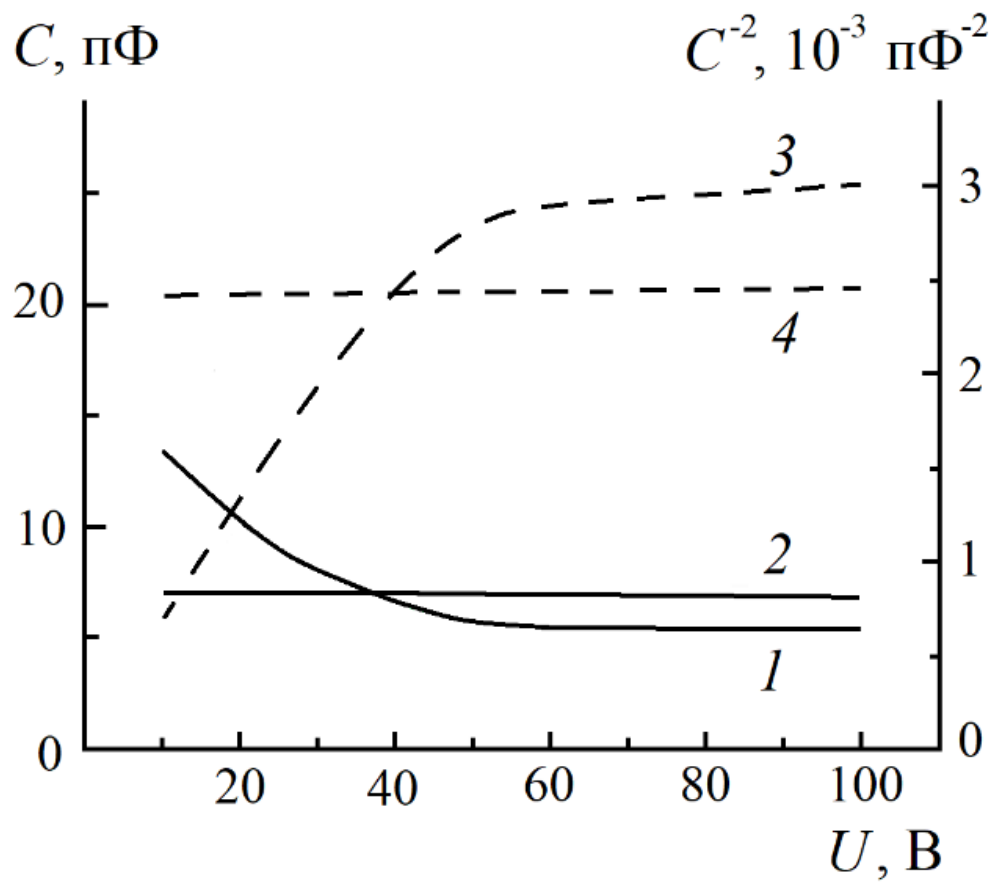


Рис. 2

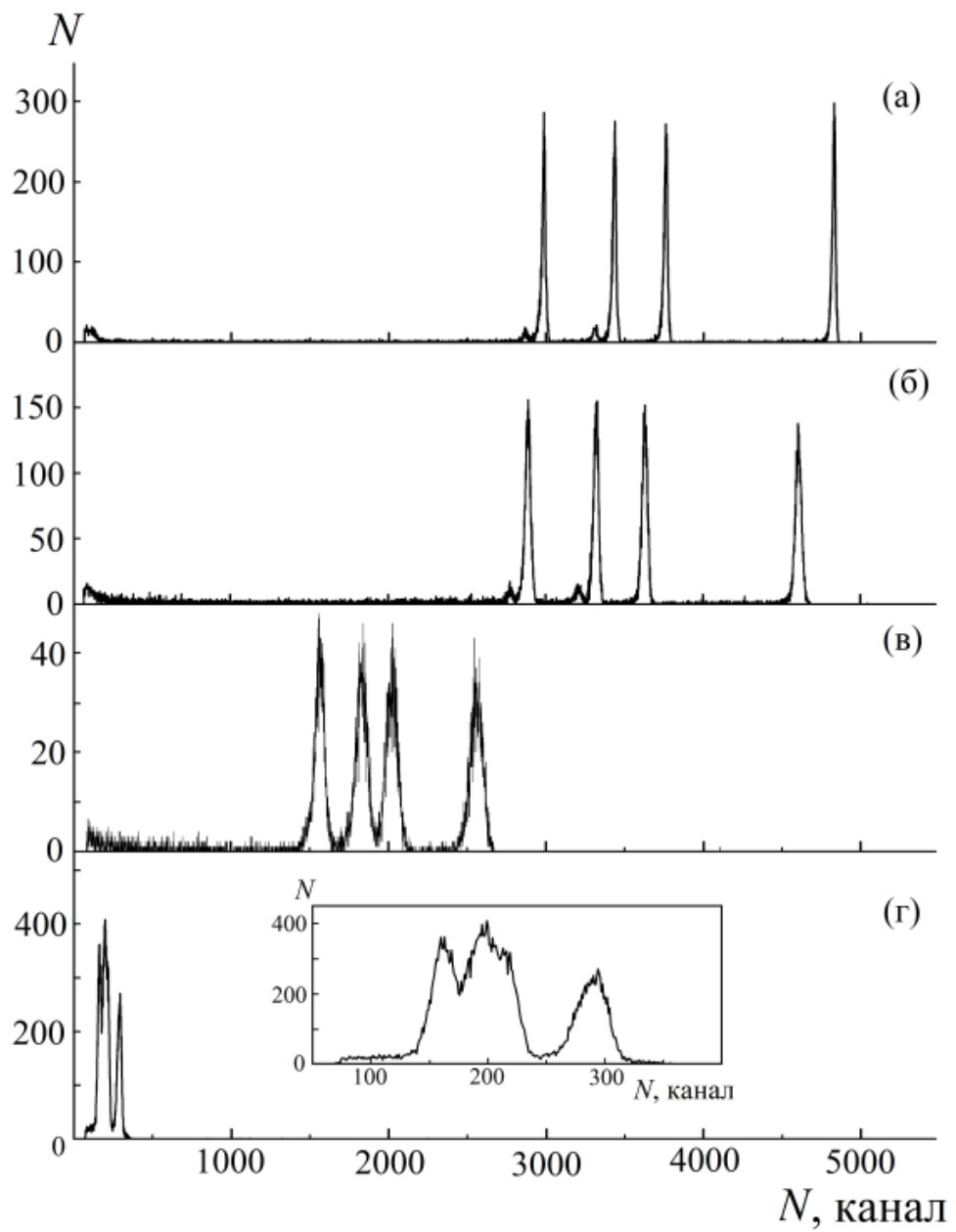


Рис. 3

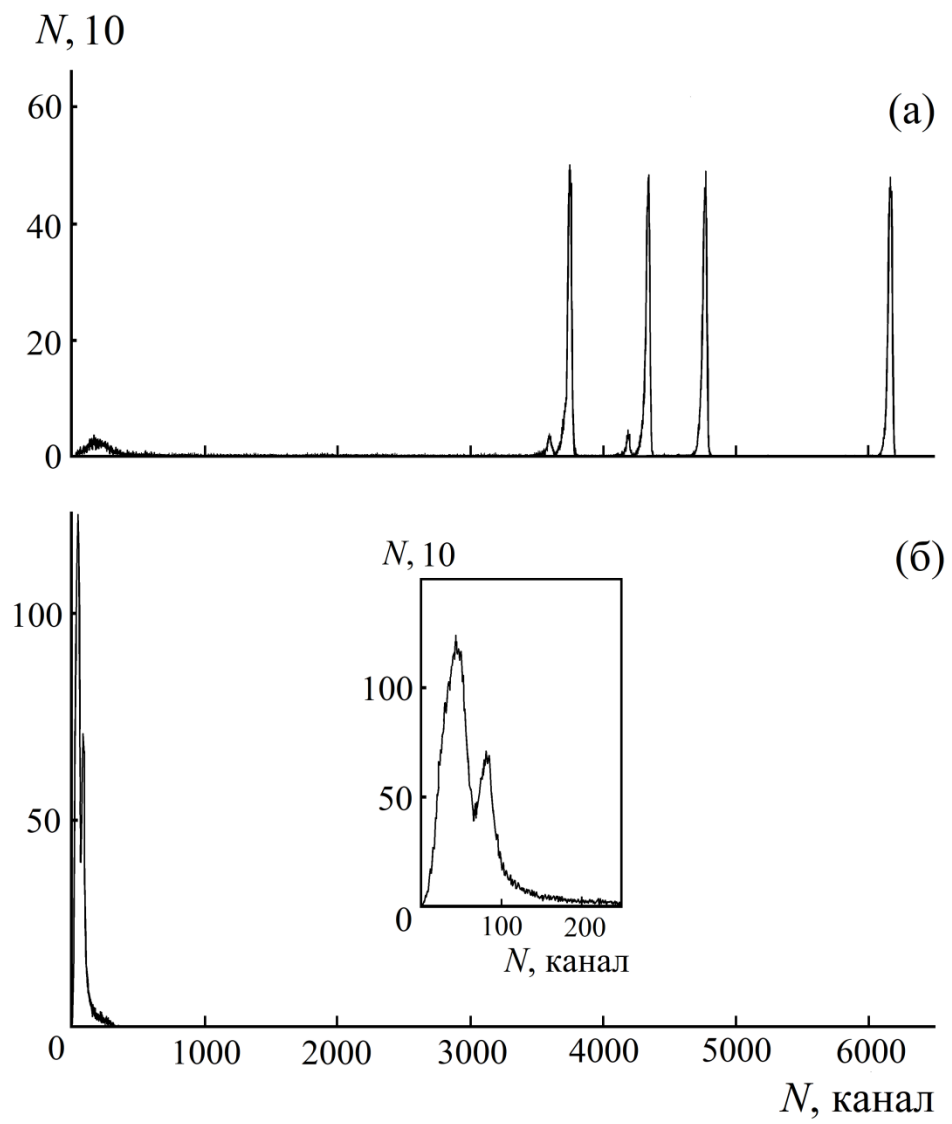


Рис. 4

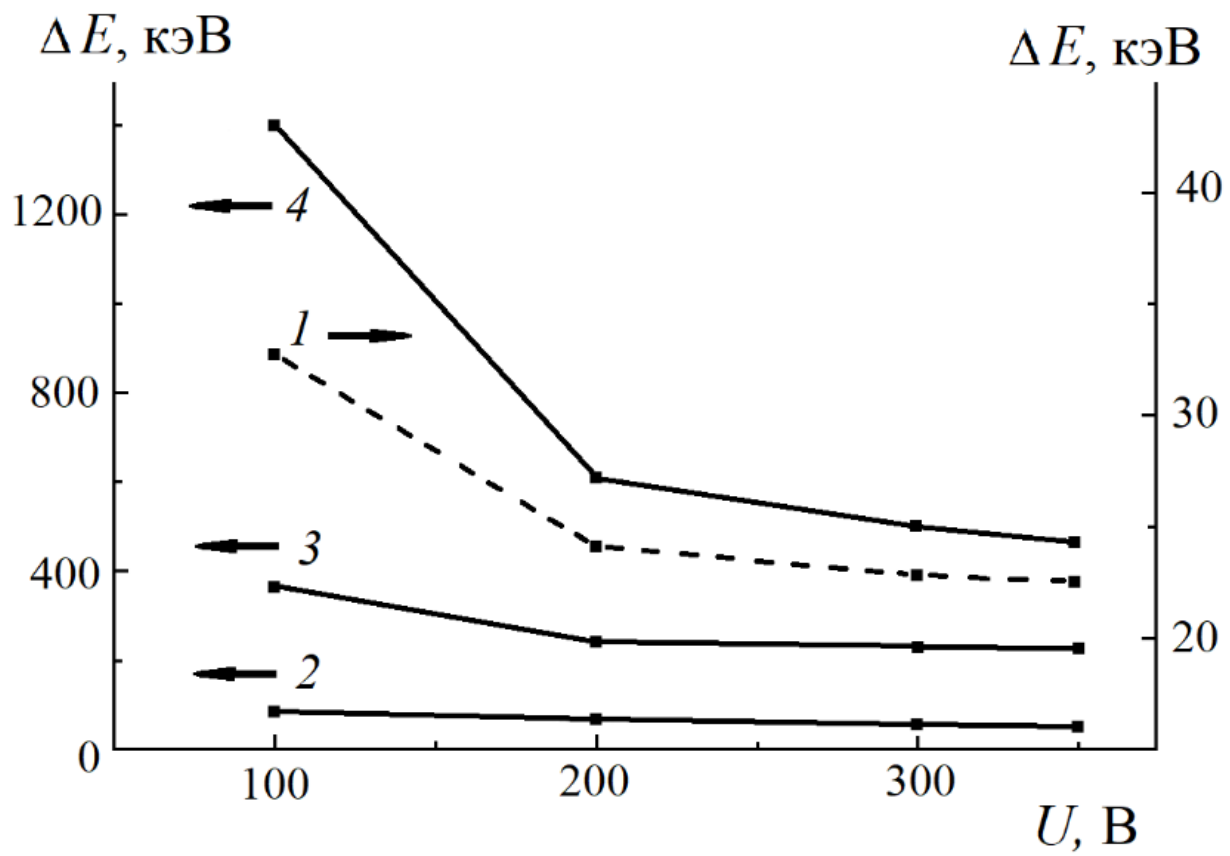


Рис. 5

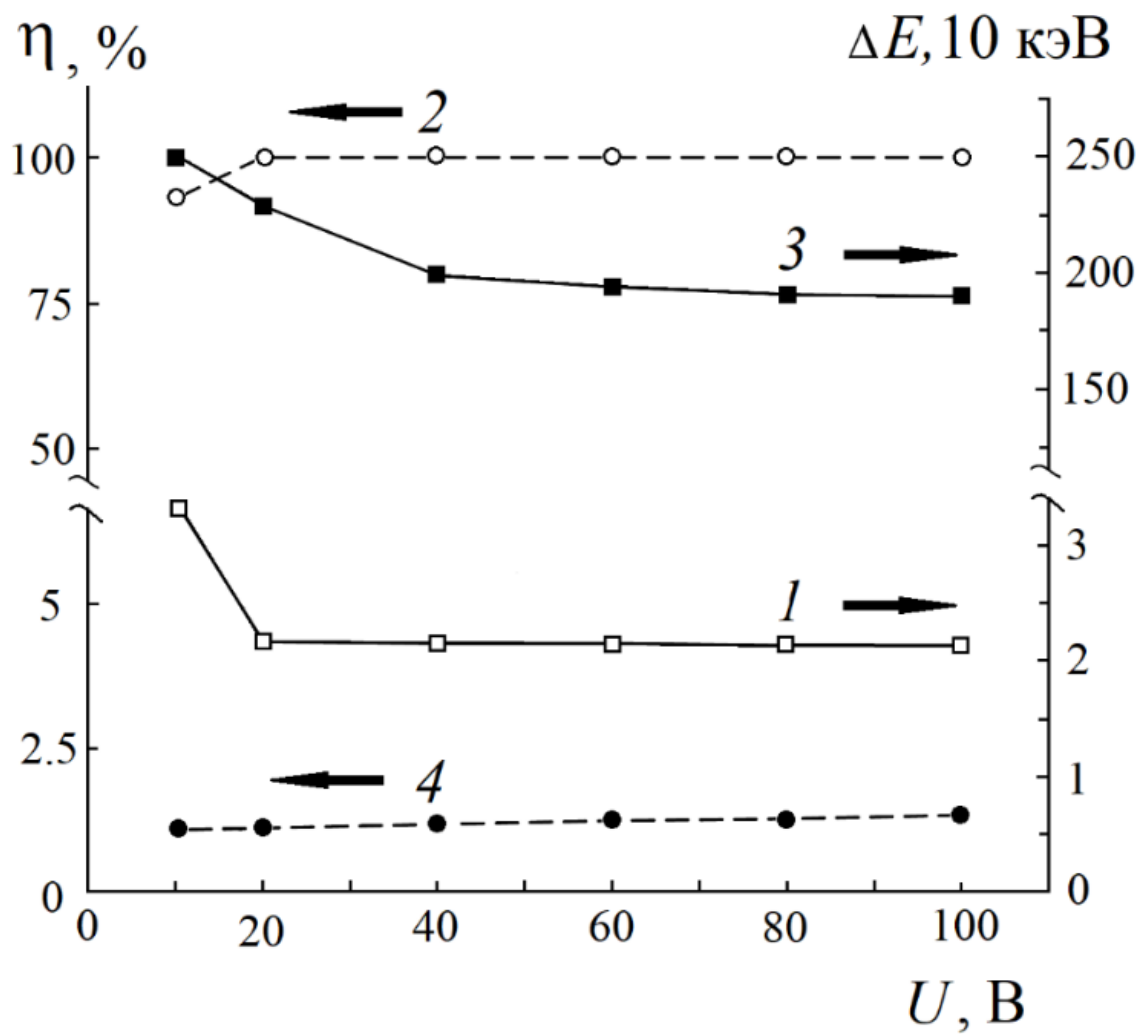


Рис. 6

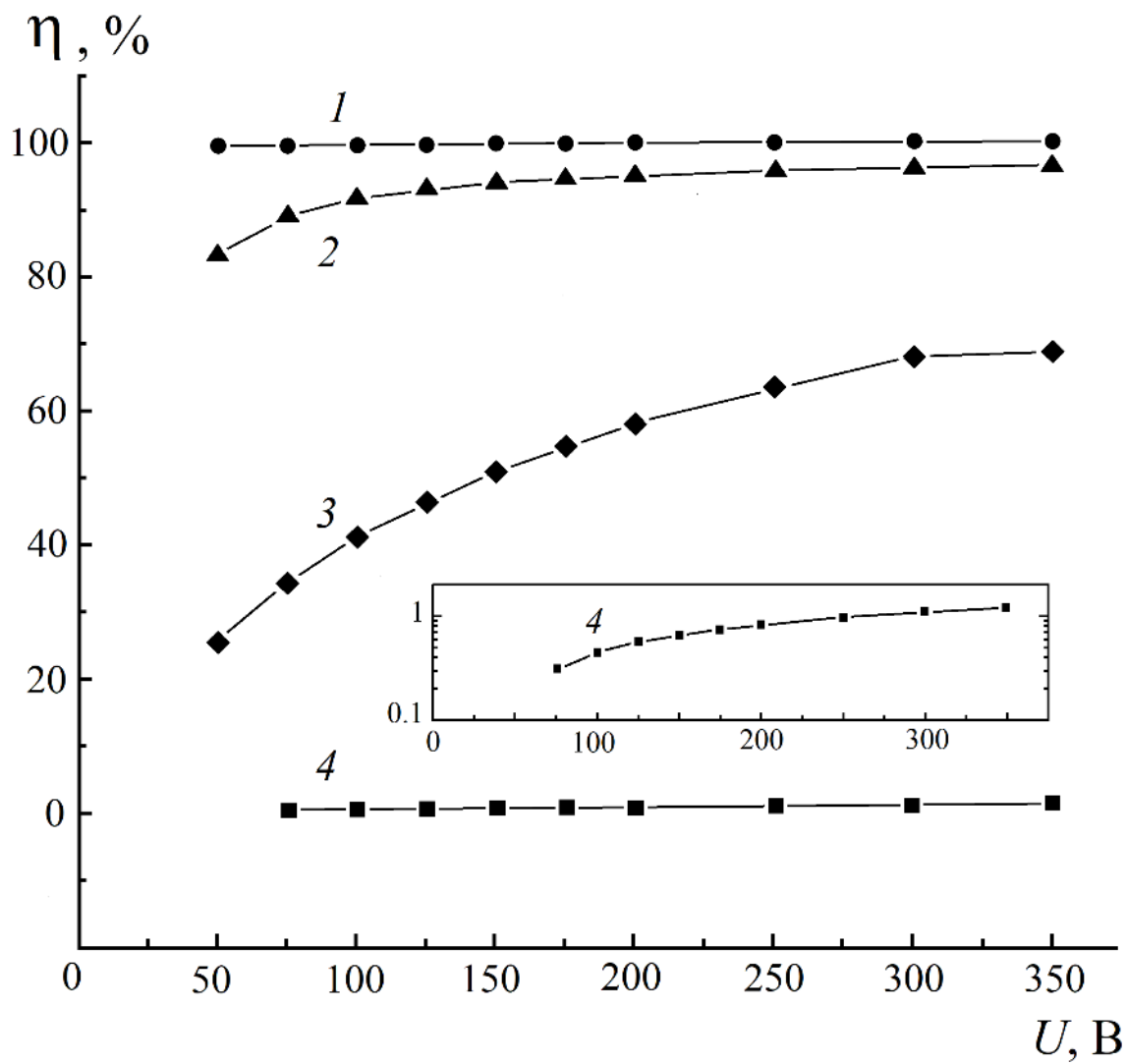


Рис. 7

Для связи с авторами:

Гуров Юрий Борисович
Тел.: 8-916-966-58-03 (моб.)
E-mail: gurov54@mail.ru
E-mail: gurov@mephi.ru

~~Для переводчика:~~

~~Effect of Neutron Irradiation on the Characteristics of SiC and Si Detectors~~

~~The characteristics of detectors based on silicon (Si) and silicon carbide (SiC), which were irradiated with integral neutron fluxes $F = 5.1 \times 10^{13}$, 5.4×10^{14} and 3.4×10^{15} n/cm² (1 MeV/Si), are presented. It was found that for all irradiated samples, the conductivity of the sensitive region becomes close to its own. Using alfa particles, it was found that for Si detectors irradiated with a minimum flux of 5.1×10^{13} n/cm², the charge collection efficiency (η) does not exceed 1.5%. For SiC detectors irradiated with a similar flux, $\eta = 96\%$, and when irradiated with average and maximum fluxes, η decreased to 70 and 1.5%, respectively. Thus, it is shown that the deterioration in the performance of SiC detectors occurs at significantly higher dose loads than when using Si devices~~