

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, 1.2 и 3.1 эВ, соответственно, Si и SiC) и пороговой энергии дефектообразования (в 2 раза, ~ 15 и ~ 30 эВ, соответственно, Si и SiC). Важно также отметить, что SiC-детекторы могут изготавливаться с применением планарной технологии [1], при этом их генерационный ток (~ 10<sup>-10</sup> А/см<sup>2</sup>) при комнатной температуре будет на порядок меньше по сравнению с Si-ППД (~ 10<sup>-9</sup> А/см<sup>2</sup>). В последние годы был достигнут прогресс в создании высокочистых эпитаксиальных слоев SiC толщиной ~ 50 мкм с малым количеством глубоких центров, высоким удельным сопротивлением и достаточно большим временем жизни носителей заряда. Детекторы, созданные на основе такого чистого материала, интенсивно исследуются с целью их применения в спектроскопии различных ядерных излучений [3, 4].

В работе исследовались характеристики детекторов на основе высокочистого политипа 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*<sup>+</sup>-подложках 4H-SiC фирмы L.P.E. (Италия). Диаметр исходной подложки 4", толщина составляла 350 мкм, а концентрация донорной примеси ~ 2·10<sup>18</sup> см<sup>-3</sup>. Созданные таким способом слои имели толщину 50 мкм с концентрацией донорной примеси 1·10<sup>14</sup> см<sup>-3</sup>. Образцы на которых создавались детекторные структуры имели размеры 5 мм × 5 мм. На рис. 1 показана структура изготовленных детекторов.

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

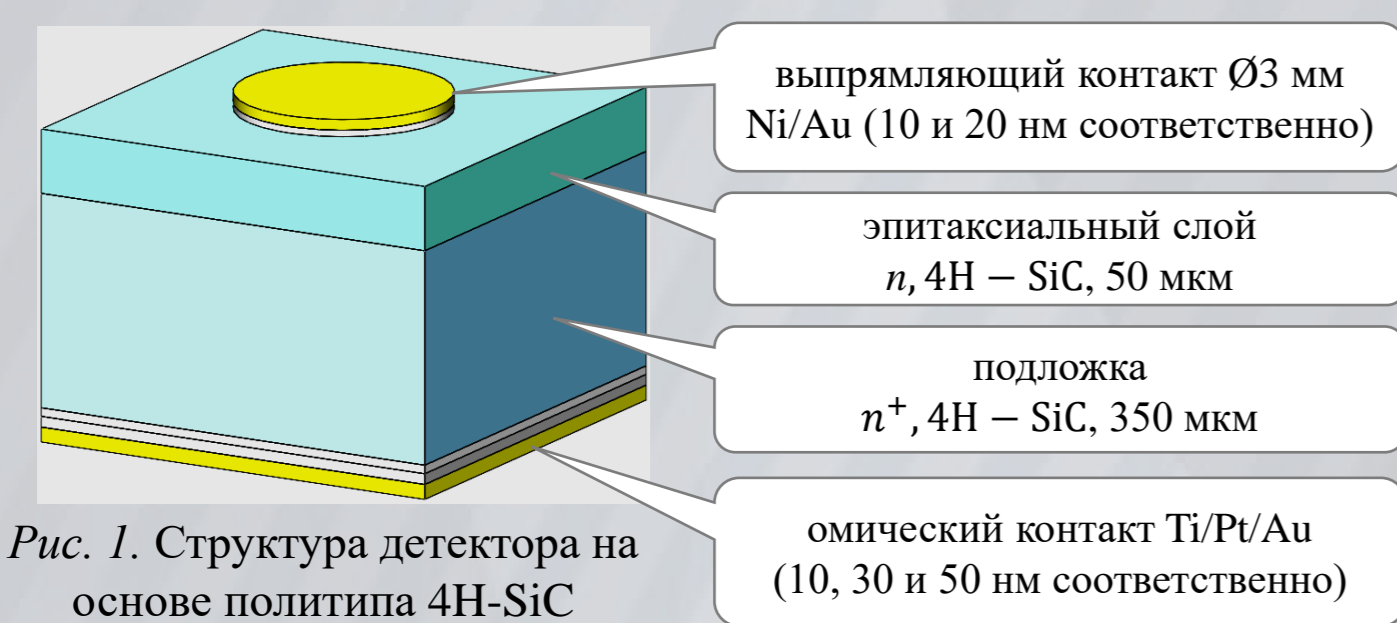


Рис. 1. Структура детектора на основе политипа 4H-SiC

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

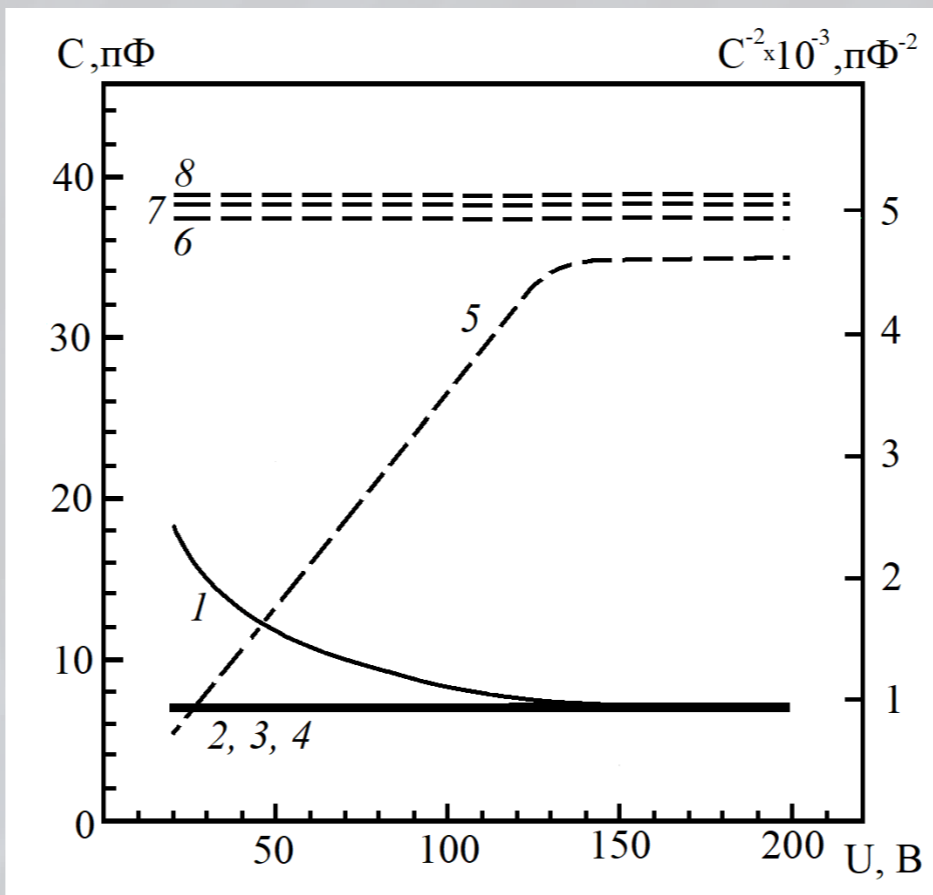


Рис. 2. Зависимости емкости *C* (1– 4) и параметра *C*<sup>-2</sup> (5 – 8) от приложенного напряжения для SiC- детекторов: 1, 5 – необлученные образцы; 2, 6 – детектор, облученный флюенсом нейтронов  $\Phi = 5.11 \cdot 10^{13}$  н/см<sup>2</sup>; 3, 7 – детектор, облученный  $\Phi = 5.39 \cdot 10^{14}$  н/см<sup>2</sup>, 4, 8 – детектор, облученный  $\Phi = 3.41 \cdot 10^{15}$  н/см<sup>2</sup>.

## ΔE, кэВ

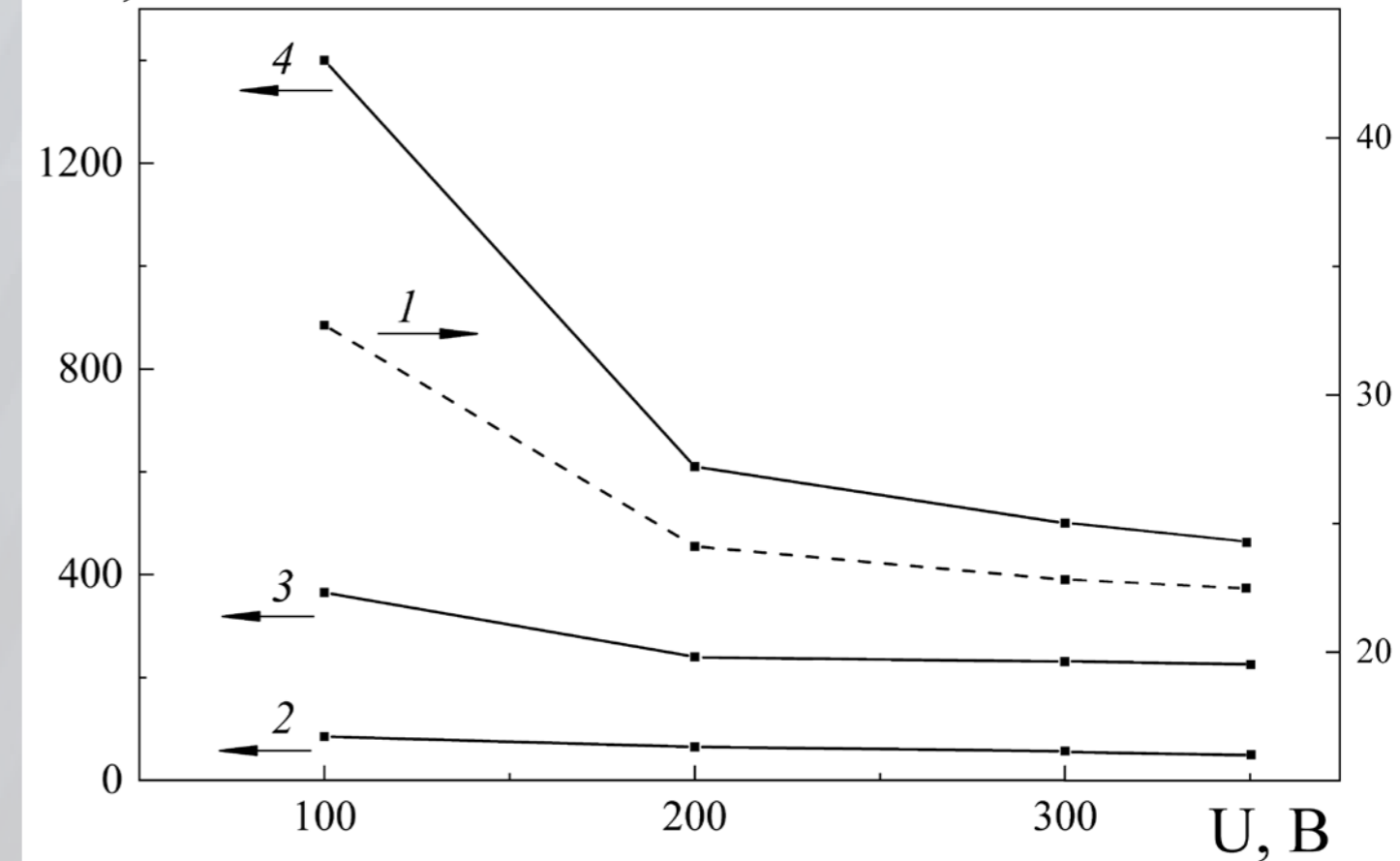


Рис. 4. Зависимость энергетического разрешения от приложенного напряжения для SiC-детекторов: 1 – исходный (необлученный) образец, 2, 3, 4 – ППД облученные, соответственно, флюенсами 5.11·10<sup>13</sup>, 5.39·10<sup>14</sup> и 3.41·10<sup>15</sup> н/см<sup>2</sup>.

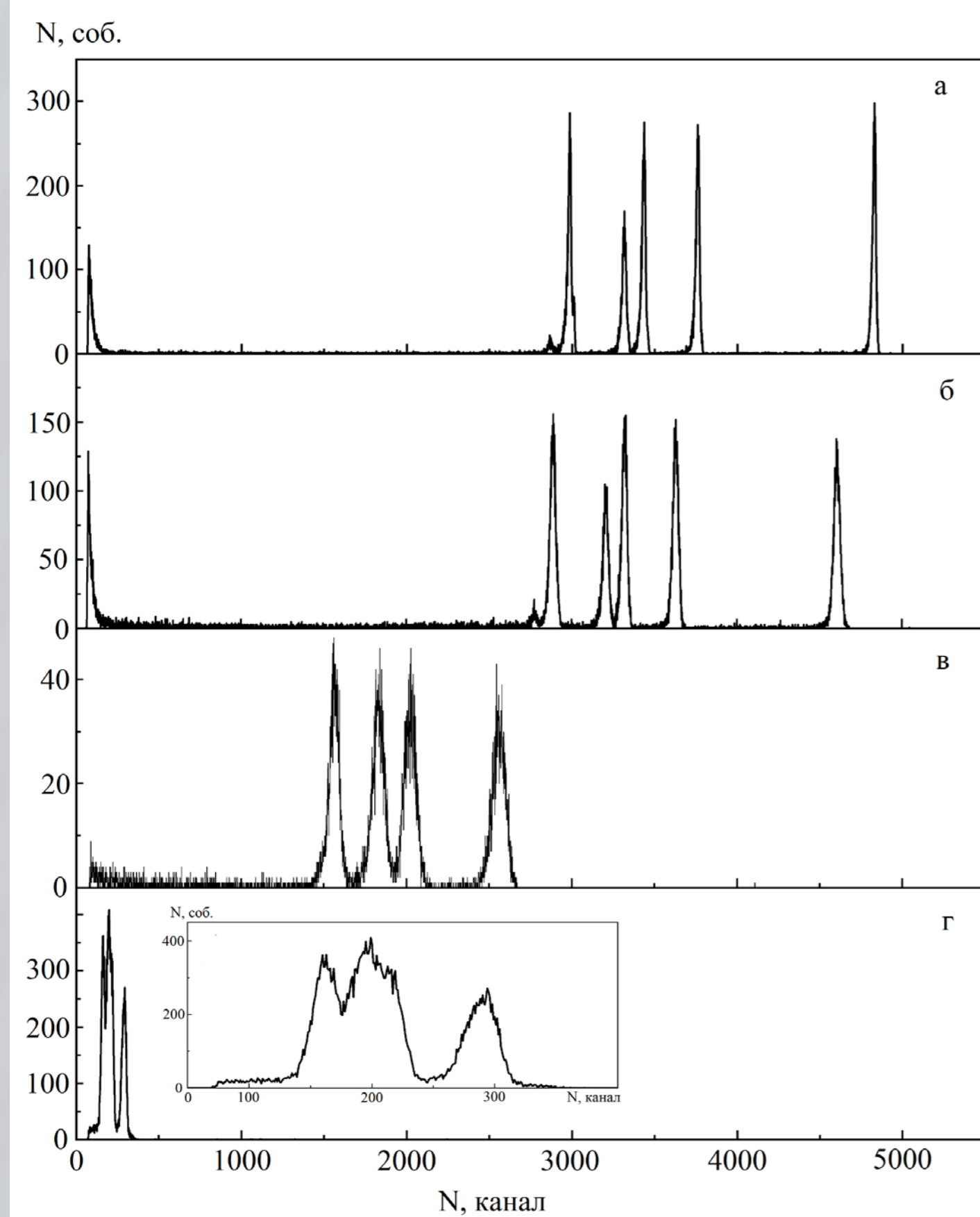


Рис. 3. Спектры <sup>226</sup>Ra, измеренные SiC-детекторами: а – исходный образец (до облучения), б, в, г – детекторы, облученные, соответственно, флюенсами  $\Phi = 5.11 \cdot 10^{13}$ ,  $5.39 \cdot 10^{14}$  и  $3.41 \cdot 10^{15}$  н/см<sup>2</sup>.

## ССЕ, %

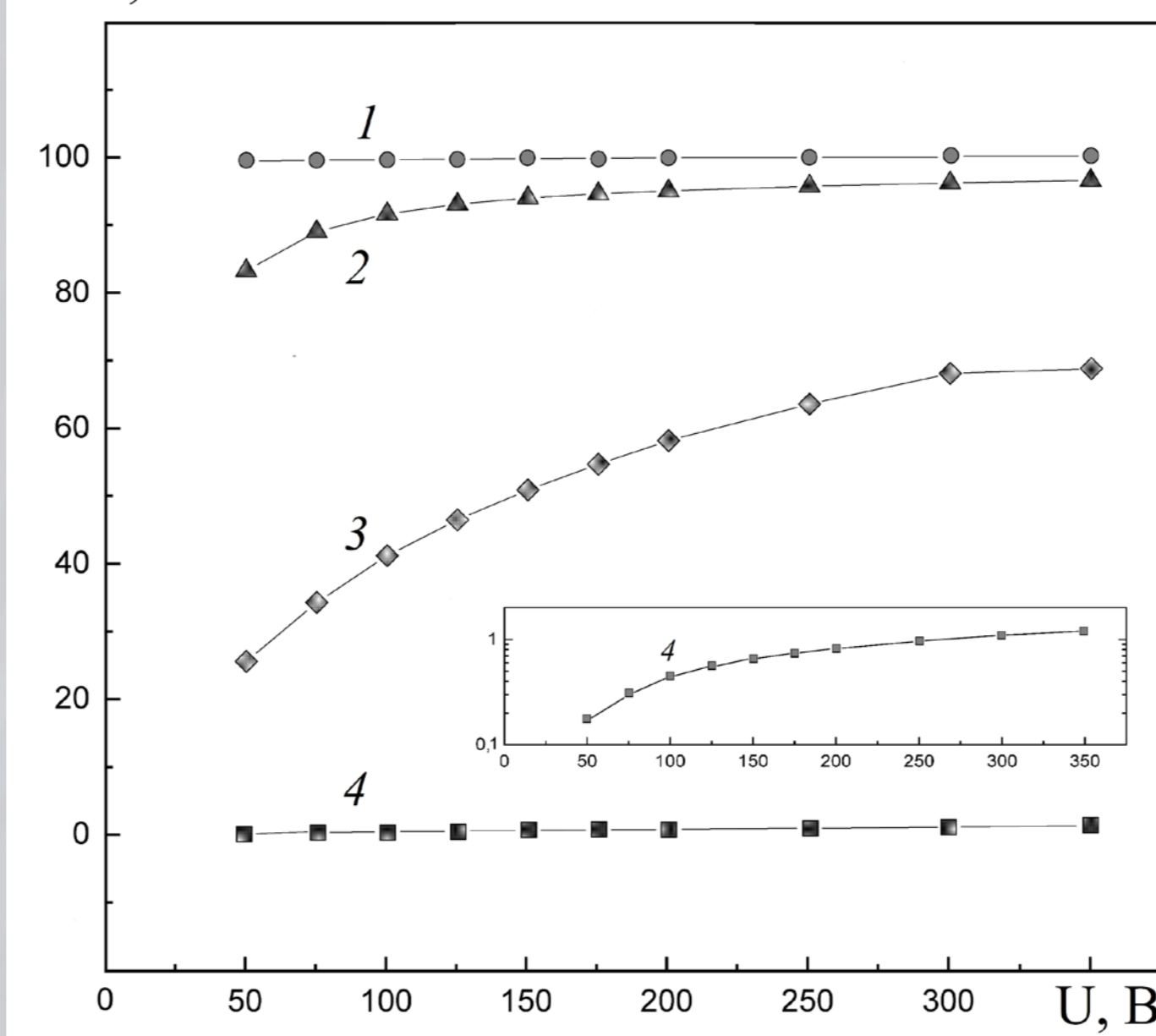


Рис. 5. Зависимость эффективности сбора заряда от приложенного напряжения для SiC-детекторов: 1 – исходный образец, 2, 3, 4 – детекторы, облученные, соответственно, флюенсами 5.11·10<sup>13</sup>, 5.39·10<sup>14</sup> и 3.41·10<sup>15</sup> н/см<sup>2</sup>.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Следует отметить, что полученные нами данные согласуются с результатами работы [11], в которой облучение SiC-детекторов (эпитаксиальный слой 20 мкм, размеры 1 мм × 5 мм) выполнялось быстрыми нейтронами ( $E \sim 14$  МэВ) флюенсами 1.31·10<sup>14</sup> и 7.29·10<sup>14</sup> н/см<sup>2</sup>. Эффективность сбора заряда (напряжение 300 В) для указанных условий облучения составила 92 и 77%, соответственно.

Представлены характеристики детекторов карбида кремния, которые облучались интегральными потоками нейтронов 5.11·10<sup>13</sup>, 5.39·10<sup>14</sup> и 3.41·10<sup>15</sup> н/см<sup>2</sup>. Показано, что по сравнению с исходными образцами значения обратных токов на облученных детекторах ухудшились с 3·10<sup>-10</sup> до 10<sup>-8</sup> А/см<sup>2</sup> ( $U = 300$  В). Показано, что начиная с дозы 5.11·10<sup>13</sup> н/см<sup>2</sup> емкость облученных детекторов не изменяется с увеличением напряжения, т.е. при облучении нейтронами происходит его компенсация и проводимость исходного материала становится собственной.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Sadow S. E., Agarwal A. Advances in Silicon Carbide Processing and Applications. Boston, London: Artech House. Inc. 2004. Norwood, MA 02062. 212 P.
- 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.
- Hrubcín L., Gurov Yu. B., Zai'ko V., Mitrofanov S. V., Rozov S. V., Sedláčková K., Sandukovsky V. G., Semin V. A., Nečas V., Skuratov V. A. Characteristics of Si and SiC detectors at registration of Xe ions // JINST. 2018. V. 13. P11005(1-8)
- Gurov Yu. B., Rozov S. V., Sandukovsky V. G., Yakushev E. A., Hrubcín L., Zai'ko V. Characteristics of Silicon Carbide Detectors // Instrum. Exp. Tech. 2015. V. 1. P. 22–24.
- 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. Nuclei Lett. 2015. V. 12. P. 344–348.
- Zamyatin N. I., Cheremukhin A. E., Shafronovskaya A. I. Measuring fluence of fast neutrons with planar silicon detectors // Phys. Part. Nuclei Lett. 2017. V. 14. P. 762–777.
- Sciortino S., Hartjes E., Lagomarsino S., Navad F., Brianzib M., Cindroe V., Lanzierif C., Mollg M., Vannid P. Effect of heavy proton and neutron irradiations on epitaxial 4H-SiC Schottky diodes. // NIM in Phys. Res. 2005. V. A 552. P. 138–145. DOI: 10.1016/j.nima.2005.06.017
- Castaldini A., Cavallini A., Rigutti L., Nava F. Low temperature annealing of electron irradiation induced defects in 4H-SiC // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 85. P. 3780–3782. DOI: 10.1063/1.1810627
- Bruzzi M., Sadrozinski H. F., Seiden A. Comparing radiation tolerant materials and devices for ultra rad-hard tracking detectors // NIM in Phys. Res. 2007. V. A 579. P. 754–761.
- Angelescu T., Cheremukhin A. E., Ghete V. M., Ghiordanescu N., Goluvrin 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 // NIM. in Phys. Res. 1995. V. A 357. P. 55–63.
- Liu L., Liu A., Bai S., Lv L., Jin P., Quyang X. Radiation resistance of silicon carbide Schottky diode detectors in D-T fusion neutron detection // Scientific Reports. 2017. V. 7. P.13376.