

P13-2014-23

Л. Грубчин<sup>1,2</sup>, Ю. Б. Гуров<sup>1,3</sup>, Б. Затько<sup>2</sup>,  
С. В. Розов<sup>1</sup>, В. Г. Сандуковский<sup>1</sup>, Е. А. Якушев<sup>1</sup>

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТЕКТОРОВ  
НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ**

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

---

<sup>1</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>2</sup> Электротехнический институт, Словацкая академия наук, Братислава

<sup>3</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
Москва

Грубчин Л. и др.

P13-2014-23

Характеристики детекторов на основе карбида кремния

Представлены основные характеристики детекторов, изготовленных на основе высокочистых эпитаксиальных слоев политипа 4H-SiC. Показано, что разработанные детекторы обладают хорошими спектрометрическими характеристиками при регистрации  $\alpha$ -частиц и рентгеновского излучения.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В.П.Джелепова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2014

Hrubčín L. et al.

P13-2014-23

Characteristics of Silicon Carbide Detectors

The main characteristics of the detectors fabricated on the basis of high-purity epitaxial layers of 4H-SiC-polytype are presented. It is shown that the SiC-detectors have good spectrometric characteristics at  $\alpha$ -particle and X-ray registration.

The investigation has been performed at the Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2014

## ВВЕДЕНИЕ

Карбид кремния (SiC), обладая рядом уникальных свойств, является перспективным полупроводниковым материалом для изготовления полупроводниковых детекторов (п. п. д.) ядерных излучений с качественно новыми параметрами.

В настоящее время известно более 150 структурных политипов карбида кремния [1], однако только два из них доступны для серийного изготовления полупроводниковых приборов — 4H-SiC и 6H-SiC. Наибольший интерес привлекает политип 4H-SiC. Этот материал превосходит кремний по всей совокупности электрофизических, тепловых и физико-химических свойств. Достоинствами 4H-SiC являются: широкая запрещенная зона (в 3 раза больше, чем у кремния (Si)), высокая напряженность поля лавинного пробоя (в 10 раз больше, чем у Si), высокая теплопроводность (в 4 раза больше, чем у Si), механическая прочность (по твердости уступает только алмазу и карбиду бора), химическая инертность и высокая пороговая энергия дефектообразования [2] (в 2 раза больше, чем у Si). Важно также указать, что детекторы на основе такого материала могут изготавливаться с применением планарной технологии [1], при этом их генерационный ток при комнатной температуре будет на несколько порядков меньше по сравнению с Si-п. п. д.

Перечисленные свойства позволяют использовать карбид кремния для создания детекторов, обладающих высокой радиационной стойкостью [2, 3] и возможностью их эксплуатации при повышенных температурах  $> 300\text{ }^{\circ}\text{C}$  [4]. Представляется перспективным применение таких детекторов для контроля работы ядерных реакторов, сильноточных ускорителей, а также для диагностики горячей плазмы.

В последние годы был достигнут прогресс в создании высокоомных эпитаксиальных слоев 4H-SiC толщиной порядка 100 мкм с малым количеством глубоких центров, высоким удельным сопротивлением, низкой разностной концентрацией примесей и достаточно высоким временем жизни. Детекторы, созданные на основе такого чистого материала, интенсивно исследуются с целью их широкого применения для спектроскопии различных ядерных излучений [5–7]. В работе изучены характеристики детекторов, изготовленных на основе высокочистого политипа карбида кремния 4H-SiC, которые использовались для спектрометрии  $\alpha$ -частиц и рентгеновского излучения.

## 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 3'', толщина 350 мкм, а концентрация примеси  $\sim 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Созданные таким способом слои имели толщину 100 мкм с концентрацией донорной примеси  $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . На рис. 1 показана структура изготовленных детекторов. Выпрямляющие контакты диаметром 0,9 мм (детектор №1) и 1,4 мм (детектор №2) создавались вакуумным напылением двойного слоя из Ni (толщиной  $W = 40 \text{ нм}$ ) и Au ( $W = 80 \text{ нм}$ ). Омический контакт был выполнен аналогичным образом, при этом напыление проводилось на всю заднюю поверхность детектора. Перед напылением образцы обрабатывались ацетоном, изопропиловым спиртом и промывались в деионизованной воде [8].

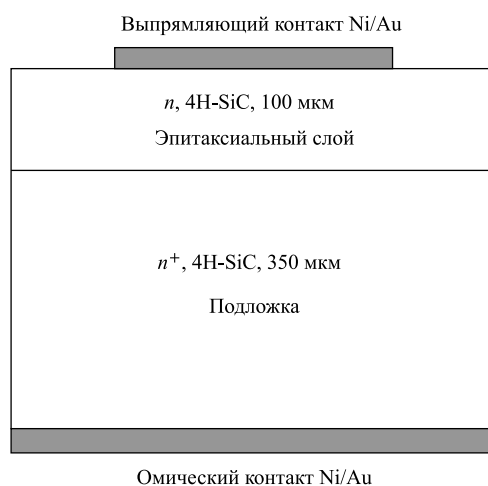


Рис. 1. Структура детекторов, изготовленных на основе политипа 4H-SiC

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТЕКТОРОВ

Основными показателями качества SiC-детектора являются его вольт-амперная характеристика (ВАХ) и зависимость эффективности собирания заряда ( $\eta$ ) от напряжения смещения. Указанная зависимость определялась при облучении изготовленных детекторов  $\alpha$ -источниками  $^{148}\text{Cd}$  ( $E_\alpha = 3182,8 \text{ кэВ}$ ) и  $^{226}\text{Ra}$ , имеющего четыре  $\alpha$ -линии с энергиями: 4785,4, 5489,7, 6002,6 и

7687,1 кэВ. Детекторы облучались через коллиматор диаметром 1,5 мм и длиной 3 мм. На рис. 2 представлены ВАХ (1) и зависимость  $\eta(U)$  (2) для детектора № 1. Видно что, зависимость 2 (измерения с помощью  $^{148}\text{Cd}$ ) выходит на плато насыщения при напряжении  $\sim 80\text{--}100$  В. В качестве рабочего напряжения выбрано  $U = 100$  В, при котором значение «темнового» тока не превышает  $5 \cdot 10^{-11}$  А (1).

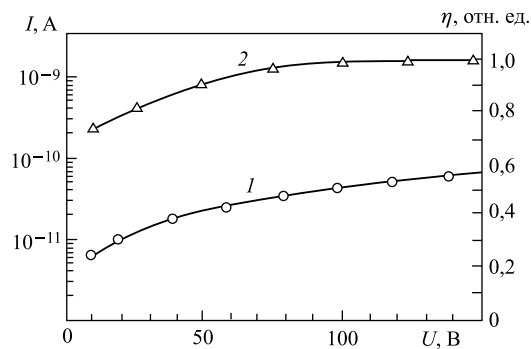


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика (1) и зависимость эффективности собирания заряда (2) от напряжения смещения, измеренные для детектора № 1

С помощью источников  $^{148}\text{Cd}$  и  $^{226}\text{Ra}$  также было определено энергетическое разрешение и исследована линейность отклика изготовленных детекторов при регистрации  $\alpha$ -частиц различных энергий. Энергетическое разрешение, полученное на  $\alpha$ -линии с энергией  $E_\alpha = 3182,8$  кэВ, составило  $\text{FWHM}_\alpha = 21$  кэВ, что согласуется с результатами работы [5]. На рис. 3 представлена зависимость амплитуды импульса (номера канала) от энергии  $\alpha$ -частиц, регистрируемых детектором № 2. Следует указать, что в эти данные были введены поправки, учитывающие потери энергии  $\alpha$ -частиц в «мертвых» слоях — выходном окне источника и входном окне детектора [9]. Расчет показал, что все точки находятся на прямой  $E_\alpha = 104,07 + 2,3101N_k$  ( $N_k$  — номер канала), а коэффициент корреляции составляет  $r = 0,99997$ . Следовательно, изготовленные детекторы обладают хорошим разрешением и высокой степенью линейности при регистрации  $\alpha$ -частиц в широком энергетическом диапазоне.

Изготовленные детекторы были также использованы для регистрации  $\gamma$ -квантов рентгеновского диапазона. Для этих измерений был установлен преусилитель с уровнем собственного шума  $\text{FWHM}_{\text{пу}} \approx 0,9$  кэВ. Рис. 4 демонстрирует спектр  $\gamma$ -квантов источника  $^{241}\text{Am}$ , полученный при облучении детектора № 1. Представленные результаты показывают, что энергетическое разрешение в этих измерениях составляет  $\text{FWHM}_\gamma = 1,9$  кэВ. Следовательно, основной вклад в разрешение вносят шумы детектора. Улучшить

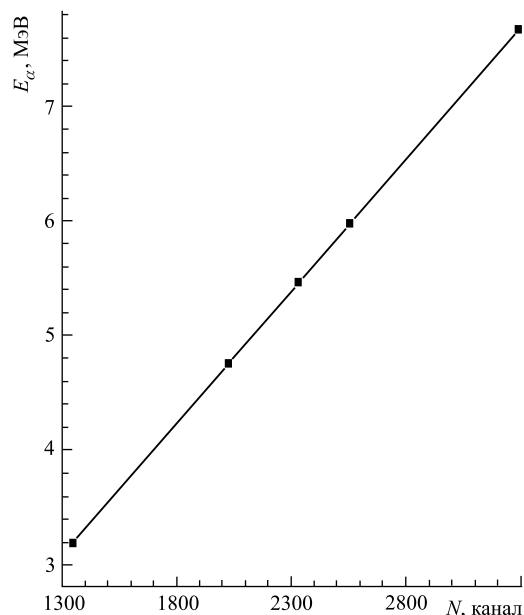


Рис. 3. Зависимость амплитуды импульса (номера канала) от энергии  $\alpha$ -частиц, регистрируемых детектором № 2

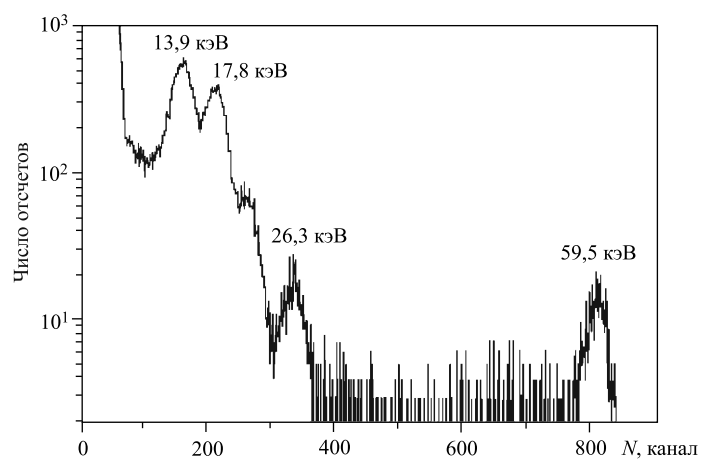


Рис. 4. Спектр  $\gamma$ -квантов  $^{241}\text{Am}$ , измеренный с помощью детектора № 1

энергетическое разрешение можно, если уменьшить «темновой» ток детектора на порядок. При этом если использовать низкошумящий предусилитель с  $\text{FWHM}_{\text{пу}} \sim 0,2 \text{ кэВ}$ , то можно ожидать получения энергетического

разрешения  $\text{FWHM}_\gamma \sim 0,3$  кэВ, что сопоставимо с разрешением HPGe-детекторов [10], работающих при температуре жидкого азота.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены методика изготовления и исследования параметров детекторов (диаметром  $\sim 1$  мм, толщиной 0,1 мм) на основе высокочистых эпитаксиальных слоев политипа 4H-SiC. Разработанные детекторы обладают хорошими спектрометрическими характеристиками при регистрации  $\alpha$ -частиц в широком диапазоне энергий. Показано, что для улучшения параметров описанных детекторов при регистрации  $\gamma$ -квантов низких энергий необходимо усовершенствовать технологию их изготовления, а также использовать преусилитель с предельно низким уровнем собственного шума.

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 14-12-00920.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Saddow S. E., Anant A.* Advances in Silicon Carbide Processing and Applications. Boston, London: Artech House Inc., 2004.
2. *Калинина Е. В.* // ФТП. 2007. Т. 41, № 7. С. 769.
3. *Ruddy F. H., Seidel J. G.* // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. 2007. V. 263. P. 163.
4. *Калинина Е. В. и др.* // Письма ЖТФ. 2008. Т. 34, № 5. С. 63.
5. *Строкан Н. Б. и др.* // ЖТФ. 2005. Т. 39, № 3. С. 382.
6. *Ruddy F. H., Flammang R. W., Seidel J. G.* // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 2009. V. 598. P. 518.
7. *Bertuccio G. et al.* // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 2011. V. 652. P. 193.
8. *Dubecký F. et al.* // JINST. 2012. V. 7. P. P09005.
9. *Гуров Ю. Б. и др.* // ПТЭ. 2006. № 1. С. 34.
10. *Бруданин В. Б. и др.* // ПТЭ. 2011. № 4. С. 27.

Получено 21 марта 2014 г.

Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 28.05.2014.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,5. Уч.-изд. л. 0,6. Тираж 245 экз. Заказ № 58269.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)