P13-2014-23

Л. Грубчин^{1,2}, Ю. Б. Гуров^{1,3}, Б. Затько²,
С. В. Розов¹, В. Г. Сандуковский¹, Е. А. Якушев¹

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

² Электротехнический институт, Словацкая академия наук, Братислава

³ 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 α -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 α -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 α -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 (η) от напряжения смещения. Указанная зависимость определялась при облучении изготовленных детекторов α -источниками ^{148}Cd ($E_\alpha = 3182,8 \text{ кэВ}$) и ^{226}Ra , имеющего четыре α -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}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}Cd и ^{226}Ra также было определено энергетическое разрешение и исследована линейность отклика изготовленных детекторов при регистрации α -частиц различных энергий. Энергетическое разрешение, полученное на α -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 α -частиц, регистрируемых детектором № 2. Следует указать, что в эти данные были введены поправки, учитывающие потери энергии α -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 α -частиц в широком энергетическом диапазоне.

Изготовленные детекторы были также использованы для регистрации γ -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 γ -квантов источника ^{241}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 α -частиц, регистрируемых детектором № 2

Рис. 4. Спектр γ -квантов ^{241}Am , измеренный с помощью детектора № 1

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

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены методика изготовления и исследования параметров детекторов (диаметром $\sim 1 \text{ мм}$, толщиной $0,1 \text{ мм}$) на основе высокочистых эпитаксиальных слоев политипа 4H-SiC. Разработанные детекторы обладают хорошими спектрометрическими характеристиками при регистрации α -частиц в широком диапазоне энергий. Показано, что для улучшения параметров описанных детекторов при регистрации γ -квантов низких энергий необходимо усовершенствовать технологию их изготовления, а также использовать предусилитель 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

www.jinr.ru/publish/