ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2019, № 3, с. 12–16

# = ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА =

УДК 539.1.074.8

# ДЕТЕКТОРЫ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ ПОВЕРХНОСТНО-БАРЬЕРНЫХ GaAs-CEHCOPOB С КОНВЕРТЕРОМ ИЗ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

© 2019 г. С. В. Черных<sup>*a*,\*</sup>, А. В. Черных<sup>*a*</sup>, Г. И. Бритвич<sup>*a*,*b*</sup>, А. П. Чубенко<sup>*a*,*c*</sup>, Н. Буртебаев<sup>*d*</sup>, Д. М. Зазулин<sup>*d*</sup>, Д. Мусаев<sup>*e*</sup>, Р. Ходжаев<sup>*f*</sup>, В. В. Чердынцев<sup>*a*</sup>, Ф. С. Сенатов<sup>*a*</sup>, С. И. Диденко<sup>*a*</sup>

<sup>а</sup> Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС" Россия, 119049, Москва, Ленинский просп., 4 <sup>b</sup> Институт физики высоких энергий им. А.А. Логунова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт" Россия, 142281, Московская область, Протвино, пл. Науки, 1 <sup>с</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53 <sup>*d*</sup> Институт ядерной физики Министерства энергетики Республики Казахстан Республика Казахстан, 050032, Алматы, ул. Ибрагимова, 1 <sup>е</sup> Казахский национальный университет им. аль-Фараби Республика Казахстан, 050040, Алматы, просп. аль-Фараби, 71 <sup>f</sup> Южно-Казахстанский государственный университет им. М. Ауезова Республика Казахстан, 160012, Шымкент, просп. Тауке хана, 5 \*e-mail: chsv 84@mail.ru Поступила в редакцию 18.01.2018 г. После доработки 24.11.2018 г. Принята к публикации 03.12.2018 г.

Поверхностно-барьерные структуры на основе тонких высокочистых эпитаксиальных слоев GaAs с конвертером из сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) испытаны в качестве детекторов быстрых нейтронов. Представлены результаты измерений спектров  $\alpha$ -частиц, а также отклика к быстрым нейтронам при облучении от источника <sup>241</sup>Am-Be. Детекторы продемонстрировали высокую эффективность детектирования нейтронов,  $1.22 \cdot 10^{-3}$  импульсов/нейтрон, и приемлемое отношение сигнал/ү-фон, на уровне 40. Показана возможность эксплуатации таких детекторов при температурах до  $120^{\circ}$ С.

**DOI:** 10.1134/S0032816219030145

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Детекторы нейтронов на объемном SI GaAs (SI – semi-insulating) с различными конвертерами зарекомендовали себя как эффективные устройства для обнаружения быстрых или тепловых нейтронов благодаря высокой радиационной стойкости, хорошим детекторным характеристикам и низкой себестоимости материала [1–4]. Такие детекторы используются как при рабочем смещении (порядка 1 В на микрон толщины активной области), так и в режиме неполного обеднения для снижения чувствительности к γ-излучению [5].

В работах [6, 7] для регистрации быстрых нейтронов было предложено использовать в качестве сенсора протонов отдачи поверхностно-барьерные структуры на основе тонких (не более 50 мкм) эпитаксиальных слоев GaAs. Это позволило снизить порог регистрации протонов отдачи и увеличить соотношение сигнал/ $\gamma$ -фон, а также повысить рабочие температуры в сравнении с кремнием и SI GaAs.

Настоящая статья является продолжением этих исследований. Целью работы является увеличение температурного диапазона эксплуатации таких детекторов. Для этого в качестве конвертера предлагается использовать сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) [8]. СВМПЭ имеет высокую плотность (>0.94 г/см<sup>3</sup>), температура его плавления выше, чем у полиэтиленов других типов, и составляет 135–150°С. Для сравнения, температура плавления полиэтилена низкой плотности (ПЭНП) составляет 100–120°С, а



**Рис. 1.** Фотографии поверхностно-барьерного VPE GaAs-сенсора: **a** – двухдюймовой подложки GaAs со сформированными приборными структурами, **б** – отдельного чипа (размер 6 × 6 мм, активная область 5 × 5 мм).

высокой плотности (ПЭВП) – 120–135°С. Кроме этого, СВМПЭ отличается высокой химической инертностью и стойкостью к воздействию агрессивных сред. Все это позволяет надеяться на успешное использование данного материала в качестве конвертера для детекторов быстрых нейтронов, предназначенных для работы в жестких условиях эксплуатации.

# 2. СВМПЭ-КОНВЕРТЕР

Для изготовления пленок СВМПЭ использовался порошок марки GUR4113 производства Ticona (Германия) с молекулярной массой 3.9 · 10<sup>6</sup> г/моль (плотность более 0.94 г/см<sup>3</sup>). Исходный порошок СВМПЭ подвергался механоактивационной обработке в режимах, описанных ранее [9, 10]. Термопрессование порошка СВМПЭ в пленочную заготовку проводилось с помощью вулканизационного пресса 40 ТЕСАР АПВМ-904. Предварительно проводился нагрев до 160°С в течение 40 мин с последующей выдержкой при этой температуре в течение 30 мин для равномерного прогрева плит. Затем проводилось горячее прессование с нагрузкой 90 кгс/см<sup>2</sup> и дальнейшее охлаждение под давлением в течение 3 ч для снижения влияния термических напряжений. Порошковый композит помещался в уже нагретую пресс-форму. Полученные пленочные заготовки СВМПЭ были прокатаны на разогретых вальцах при температуре 90°С. Полученные пленки имели среднюю толщину 100-300 мкм.

#### 3. ПОВЕРХНОСТНО-БАРЬЕРНЫЙ СЕНСОР

Поверхностно-барьерный сенсор протонов отдачи был изготовлен на основе высокочистых эпитаксиальных слоев GaAs толщиной 42 мкм с концентрацией носителей заряда на уровне 3 · 10<sup>11</sup> см<sup>-3</sup>.

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА № 3 2019

Пленки выращивались методом хлоридной газофазной эпитаксии на двухдюймовых  $n^{++}$ -GaAsподложках, легированных кремнием до концентрации  $2 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>.

Сплошной барьер Шоттки площадью  $5 \times 5 \text{ мм}^2$  был изготовлен с использованием системы металлизации Pt/TiN/Au [11], в качестве омического контакта к  $n^{++}$ -подложке была использована система Ni/AuGe/Au. Меза-структура защищалась полиимидом. Внешний вид сенсора представлен на рис. 1.

Изготовленные поверхностно-барьерные структуры имели низкие темновые токи: при обратных смещениях 50 и 100 В токи утечки составили 0.6 и 0.8 нА соответственно. Емкость структур не зависела от смещения и в среднем по пластине составила 70 пФ. Подробное описание параметров эпитаксиальных слоев, технологии изготовления и электрофизических характеристик поверхностно-барьерных сенсоров можно найти в работах [6, 7].

### 4. ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНО-БАРЬЕРНОГО СЕНСОРА НА ИСТОЧНИКЕ АЛЬФА-ЧАСТИЦ

Измерения спектров  $\alpha$ -частиц проводились при комнатной температуре с использованием стандартной схемы. Сенсоры через малошумящий зарядочувствительный предусилитель и усилитель-формирователь подключались к 8192-канальному анализатору на базе комплекса  $\Delta E$ -Eметодики Института ядерной физики МЭ РК. Облучение проводилось коллимированным пучком  $\alpha$ -частиц от источника <sup>226</sup>Ra при остаточном давлении 1.33 Па.

На первом этапе была исследована эффективность сбора заряда в зависимости от подаваемого на сенсор напряжения смещения. Для всех иссле-



**Рис. 2.** Амплитудный спектр  $\alpha$ -частиц от источника <sup>226</sup> Ra (энергия  $\alpha$ -частиц 4784, 5489, 6002 и 7687 кэВ). Напряжение смещения -65 B.

дуемых сенсоров эффективность сбора заряда от самых длиннопробежных частиц (7.687 МэВ) выходила на максимум при обратном напряжении смещения  $\geq 60$  В, что обусловило выбор рабочей величины  $\geq 65-75$  В.

На рис. 2 приведен измеренный при этом значении напряжения смещения амплитудный спектр  $\alpha$ -частиц от источника <sup>226</sup>Ra. Энергетическая калибровка измерительного тракта представлена на рис. 3. Как видно, отклик сенсора в высшей степени линеен. Результаты измерения энергетического разрешения приведены в табл. 1. Отметим, что оно определялось в основном шумами электроники съема, а также разбросом потерь энергии  $\alpha$ -частиц в защитном покрытии источника.

При измерениях спектральных характеристик сенсоров в зависимости от температуры по различным причинам высокого вакуума достичь не удалось: остаточное давление было выше, чем при спектрометрических измерениях, — около 100 Па. Источник питания, мультиметр и предусилитель были вынесены за пределы вакуумной камеры и соединялись с нагревательным резистором, термопарой и детектором посредством высоковакуумных разъемов. Для поддержания постоянной температуры установка была оснащена системой автоматического включения и отключения тока.

Влияние температуры на разрешение сенсоров проверялось в диапазоне от 30 до 150°С при различных напряжениях смещения. Проведенные температурные испытания показали, что исследуемые сенсоры полностью сохраняют спектрометрические качества до температуры около



**Рис. 3.** Калибровка амплитудного анализатора на источнике <sup>226</sup>Ra.

120°С (для всех линий FWHM находилась на уровне 135 кэВ), но для этого было необходимо увеличивать рабочее смещение до 180–190 В. Повышение температуры более 130°С приводило к катастрофическому ухудшению характеристик, однако при этом сенсор сохранял работоспособность в режиме счета.

## 5. РЕГИСТРАЦИЯ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ

При тестировании на источнике быстрых нейтронов для увеличения площади детектора до 1 см<sup>2</sup> четыре сенсора помещались в один корпус и подключались параллельно. Измерения проводились при комнатной температуре и атмосферном давлении, использовался источник быстрых нейтронов <sup>241</sup>Am-Be с активностью  $1.62 \cdot 10^6$  Бк. Пленки СВМПЭ располагались непосредственно на корпусе, на расстоянии 2–3 мм от GaAs-сенсора. Для набора необходимой толщины пленки укладывались в стопку. При этом источник нейтронов (алюминиевый цилиндр высотой H = 3.2 см и диаметром D = 2.2 см) располагался непосредственно на конвертере.

**Таблица 1.** Энергетическое разрешение сенсора на  $\alpha$ -частицах от источника <sup>226</sup>Ra

| Энергия α-частиц, МэВ | FWHM, каналы | FWHM, кэВ |
|-----------------------|--------------|-----------|
| 4.784                 | 39.86        | 44.18     |
| 5.489                 | 38.87        | 43.08     |
| 6.002                 | 41.65        | 46.16     |
| 7.687                 | 39.55        | 43.83     |
| Генератор             | 19.89        | 22.04     |



Рис. 4. Схема подключения сенсора протонов отдачи к электронике съема.

Сенсор протонов отдачи подключался через усилитель NE592D14G, буферный усилитель BUF634 к 1024-канальному анализатору спектра АЦП-1К-2М (АСПЕКТ, Россия). Преимущество используемого усилителя — наличие обратной связи по входу, а также дифференциальных входов, что позволяло при подключении по схеме, представленной на рис. 4, подавлять шумовой сигнал.

Для оптимизации чувствительности детектора быстрых нейтронов измерялась зависимость числа зарегистрированных нейтронов от толщины конвертера в диапазоне от 100 до 2400 мкм, спектры набирались в течение 1000 с. Рабочее напряжение смещения было выбрано —24 В. Предварительные измерения показали, что форма получаемых спектров протонов отдачи, а также число регистрируемых событий практически не меняются при подаче обратного смещения более этой величины.



Рис. 5. Энергетические спектры протонов отдачи, измеренные для различных толщин СВМПЭ-конвертера.

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА № 3 2019

Полученные амплитудные спектры протонов отдачи для толщин СВМПЭ 100 и 960 мкм, а также спектр без конвертера представлены на рис. 5. Спектр без конвертера соответствует шумам измерительного тракта и регистрации γ-квантов от источника. Порог регистрации протонов отдачи при измерениях скорости счета был выбран 0.5 МэВ. Скорость счета протонов отдачи резко возрастала с увеличением толщины СВМПЭ и при толщине >700 мкм достигала максимума (7.8 событий/с), после чего плавно уменьшалась. Наблюдаемое снижение скорости счета связано с геометрией измерений, как показано в [7]. Максимальное отношение сигнал/γ-фон при оптимальной толщине конвертера было на уровне 40.

Эффективность регистрации быстрых нейтронов определялась аналогично работе [6], для чего строилась зависимость числа зарегистрирован-



Рис. 6. Зависимость числа зарегистрированных протонов отдачи от обратного квадрата эффективного расстояния.



**Рис.** 7. Зависимость эффективности регистрации быстрых нейтронов от толщины СВМПЭ-конвертера.

ных протонов отдачи от обратного квадрата эффективного расстояния:

$$N_n = N_0 \eta = \frac{ASt}{4\pi R_{a\phi\phi}^2} \eta,$$

где  $N_n$  — число зарегистрированных сенсором событий;  $N_0$  — число нейтронов, попадающих в детектор; A — активность источника; S — площадь детектора; t — время измерения;  $\eta$  — эффективность регистрации быстрых нейтронов детектором;  $R_{эф\phi} = R + R_{ист}$  — эффективное расстояние от центра активной части источника до детектора (здесь R — расстояние от источника до детектора,  $R_{ист}$  — добавочное расстояние — расстояние от основания цилиндра до активной части). Полученная зависимость представлена на рис. 6.

Для толщины конвертера 960 мкм было получено значение эффективности регистрации быстрых нейтронов  $1.22 \cdot 10^{-3}$  импульсов/нейтрон. Зависимость эффективности регистрации для сборки 4 × 25 мм от толщины СВМПЭ-конвертера представлена на рис. 7.

#### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено тестирование детекторов быстрых нейтронов на основе поверхностно-барьерных VPE GaAs-сенсоров с СВМПЭ-конвертером. Измеренная эффективность регистрации быстрых нейтронов от источника <sup>241</sup>Am-Ве составила 1.22 · 10<sup>-3</sup> импульсов/нейтрон при толщине конвертера 960 мкм. Полученный результат находится на уровне лучших кремниевых детекторов с полиэтиленовым конвертером [12], однако диапазон эксплуатации представленного детектора значительно шире. Сочетание характеристик СВМПЭ и результаты проведенных температурных измерений спектральных характеристик сенсоров позволяют рассчитывать на возможность использования таких детекторов при температурах до 120°С.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Государственного задания вузу № 3.2794.2017/4.6.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Šagátová-Perd'ochová A., Dubecký F., Zaťko B., Chodák I., Ladzianský M., Nečas V. // Nucl. Instrum. and Methods in Physics Research. 2007. V. A576. P. 56. doi 10.1016/j.nima.2007.01.120
- Zaťko B., Sedlačková K., Dubecký F., Boháček P., Sekáčová M., Nečas V. // Journal of Instrumentation. 2011. V. 6. P. C12047. doi 10.1088/1748-0221/6/12/ C12047
- Šagátová A., Zaťko B., Sedlačková K., Nečas V., Dubecký F., Boháček P., Chodák I. // Journal of Instrumentation. 2013. V. 8. P. C03016. doi 10.1088/1748-0221/ 8/03/C03016
- Šagátová A., Kubanda D., Zaťko B., Sedlačková K., Nečas V., Solar M., Granja C. // Journal of Instrumentation. 2016. V. 11. P. C12002. doi 10.1088/1748-0221/11/12/C12002
- McGregor D.S., Klann R.T., Gersch H.K., Yang Y.H. // Nucl. Instrum. and Methods in Physics Research. 2001. V. A466. P. 126.
- Chernykh A.V., Chernykh S.V., Didenko S.I., Koltsov G.I., Baryshnikov F.M., Britvich G.I., Kostin M.Yu., Chubenko A.P., Guly V.G., Sveshnikov Yu.N., Burtebayev N., Burtebayeva J.T. // Journal of Instrumentation. 2015. V. 10. P. C01021. doi 10.1088/1748-0221/10/01/ C01021
- Chernykh A.V., Chernykh S.V., Baryshnikov F.M., Didenko S.I., Burtebayev N., Britvich G.I., Kostin M.Yu., Chubenko A.P., Nassurlla Marzhan, Nassurlla Maulen, Kerimkulov Zh., Zholdybayev T., Glybin Yu.N., Sadykov T.Kh. // Journal of Instrumentation. 2016. V. 11. P. C12005. doi 10.1088/1748-0221/11/12/C12005
- 8. ISO 115421: 2001. Plastics. Ultra-high-molecularweight polyethylene (PE-UHMW) moulding and extrusion materials. Part 1: Designation system and basis for specifications.
- Senatov F.S., Gorshenkov M.V., Tcherdyntsev V.V., Kaloshkin S.D., Sudarchikov V.A. // Composites: Part B. 2014. V. 56. P. 869. doi 10.1016/j.compositesb.2013.08. 083
- Senatov F.S., Baranov A.A., Muratov D.S., Gorshenkov M.V., Kaloshkin S.D., Tcherdyntsev V.V. // Journal of Alloys and Compounds. 2014. V. 615. P. S573. doi 10.1016/ j.jallcom.2013.12.175
- Кольцов Г.И., Диденко С.И., Черных А.В., Черных С.В., Чубенко А.П., Свешников Ю.Н. // Физика и техника полупроводников. 2012. Т. 46. Вып. 8. С. 1088.
- Greiffenberg D., Fiederle M., Vykydal Z., Král V., Jakůbek J., Holý T., Pospíšil S., Maneuski D., O'Shea V., Suk M., Králík M., Lebel C., Leroy C. // Nucl. Instrum. and Methods in Physics Research. 2009. V. A607. P. 38. doi 10.1016/j.nima.2009.03.103