

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 621.376.234

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ДЕТЕКТОРОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ
ГЕТЕРОСТРУКТУР p -Si/ n -InP

© 2026 г. С. А. Раджапов^{a, **}, А. С. Сайдов^a, Ш. Н. Усмонов^a, Б. С. Раджапов^{a,*}

^aФизико-технический институт Академии наук Республики Узбекистан,
Узбекистан, 100084, Ташкент, ул. Чингиза Айтматова 2Б

*e-mail: ftibekjan@gmail.com

**e-mail: rsafti@mail.ru

Поступила в редакцию 16.07.2025 г.

После доработки 03.10.2025 г.

Принята к публикации 17.11.2025 г.

Представлены результаты разработки и исследования полупроводниковых детекторов ионизирующего излучения на основе гетероструктур p -Si/ n -InP. Рассмотрены конструктивные и технологические особенности изготовления, а также приведены результаты электрофизических и радиометрических измерений. Показано, что использование гетероперехода p -Si/ n -InP обеспечивает высокую чувствительность при низком уровне шумов и обратного тока. Разработанная гетероструктура демонстрирует новые возможности для эффективного детектирования в условиях повышенной радиационной нагрузки, что особенно актуально для экспериментов на ускорителях элементарных частиц. Изготовленные детекторы с большой площадью активной области предназначены для регистрации малоинтенсивных потоков ионизирующих излучений, что подтверждает их перспективность для применения в ядерной физике, радиационном контроле и системах экологического мониторинга.

1. ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые детекторы ионизирующего излучения находят широкое применение в ядерной физике, медицине и экологическом мониторинге благодаря высокой чувствительности, компактности и стабильности работы. Наибольшее распространение получили кремниевые детекторы, которые обеспечивают хорошее энергетическое разрешение и

технологичность изготовления [1–3]. Однако их эксплуатация в условиях повышенной радиационной нагрузки ограничена вследствие относительно узкой запрещенной зоны и склонности к деградации характеристик.

В последние годы становятся более популярными исследования гибридных гетероструктур, сочетающих свойства различных полупроводниковых материалов. Перспективным решением является использование фосфида индия (InP), обладающего высокой шириной запрещенной зоны (около 1.34 эВ), хорошей радиационной стойкостью, большой подвижностью носителей и низким уровнем собственных шумов [4].

Выбор гетероструктуры *p*-Si/*n*-InP обусловлен возможностью объединить преимущества обоих материалов. Кремний обеспечивает чувствительный объем и высокое качество кристаллической основы, а тонкий слой InP выполняет стабилизирующую функцию: снижает токи утечки, улучшает шумовые характеристики и повышает радиационную стойкость. Таким образом, конструкция Al/*n*-InP/*p*-Si/Ni рассматривается как перспективная основа для создания детекторов нового поколения, способных эффективно функционировать в условиях интенсивного радиационного воздействия.

Целями настоящей работы являются разработка и исследование гетероструктурного детектора на основе *n*-InP/*p*-Si, включая анализ его электрофизических параметров и спектрометрических характеристик при регистрации ионизирующего излучения.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Работа посвящена разработке технологии изготовления и исследованию электрофизических и радиометрических характеристик полупроводникового детектора (ППД), выполненного на основе гетероструктуры Al/*n*-InP/*p*-Si/Ni.

Детектор изготавливался по кремниевой поверхностно-барьерной технологии [5]. В качестве подложки использовался высокоомный *p*-кремний с удельным сопротивлением 6–8 кОм · см и временем жизни неосновных носителей порядка 1000 мкс. Кремниевые подложки имели толщину около 400 мкм, диаметр чувствительной области составлял примерно 20 мм.

Для формирования гетероперехода на поверхность *p*-Si методом вакуумного напыления при остаточном давлении $3 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. наносились последовательно тонкие пленки *n*-InP (толщиной около 200 Å) и алюминия (толщиной около 300 Å). На тыльную сторону наносился контактный слой никеля толщиной около 200 Å. Затем готовые детекторные структуры помещали в корпуса.

Морфология поверхности исследовалась с использованием сканирующего зондового микроскопа SPM-9700НТ в режимах топографии и фазоконтраста. Это позволило оценить однородность структуры, распределение зерен, а также выявить возможные микродефекты на границе InP/Si, критически важные для формирования *p*–*n*-перехода.

Электрофизические параметры изучались методом вольт-амперных характеристик (ВАХ) и емкостно-частотных (*C*–*V*) измерений. Анализ проводился при различных частотах и обратных напряжениях с использованием прецизионного оборудования. Определялись уровень темнового тока, емкость перехода и сопротивление смещения.

Спектроскопические измерения чувствительности детектора к альфа-излучению выполнялись с использованием стандартных источников ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{333}U , ^{226}Rn и его продуктов распада. Измерения проводились при комнатной температуре без охлаждения. Детектор подключался к зарядочувствительному усилителю и аналого-цифровому преобразователю (АЦП), а регистрация спектров проводилась с помощью специализированного программного обеспечения.

Структура и внешний вид детектора представлены на рис. 1.

Рис. 1. а – Структура полупроводникового детектора ионизирующего излучения на основе гетероперехода *p*-Si/*n*-InP с металлическими контактами Al и Ni; **б** – внешний вид изготовленных детекторов

Наше исследование поверхности образца *p*-Si/*n*-InP проводилось на сканирующем зондовом микроскопе SPM 9700НТ в контактном режиме, для этого был выбран участок образца размером $500 \times 500 \text{ нм}^2$.

Результаты исследования двухмерного и трехмерного изображений поверхности образца *p*-Si/*n*-InP приведены на рис. 2.

Рис. 2. Двумерное и трехмерное изображения поверхности образца *p*-Si/*n*-InP.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 представлены обратные ветви вольт-амперной и вольт-фарадной характеристик гетероструктур Al/*n*-InP/*p*-Si/Ni диаметром 20 мм.

Рис. 3. Характеристики полупроводникового детектора на основе гетероструктуры Al/*n*-InP/*p*-Si/Ni диаметром 20 мм: **а** – вольт-фарадная; **б** – вольт-амперная

На рис. 4 представлены энергетические спектры α -излучения, зарегистрированные детектором на основе структуры Al/*n*-InP/*p*-Si/Ni:

Рис. 4. Энергетические спектры α -излучения: **а** – смеси ^{238}Pu , ^{239}Pu и ^{333}U ; **б** – ^{239}Pu ; **в** – ^{226}Rn и продукты его распада

Экспериментально полученные электрофизические и радиометрические характеристики изготовленных детекторов ($n = 5$ образцов) демонстрируют воспроизводимость следующих характеристик: рабочее напряжение $U_{\text{раб}}=(15–80)$ В ($\sigma=\pm 5$ В), обратный ток $I_{\text{обр}}=(0.5–1)$ мА, $C=(700–1800)$ пФ, $E_{\text{ш}}=(48–75)$ кэВ, энергетическое разрешение для ^{226}Ra $R_a=(60–65)$ кэВ ($\sigma=\pm 2$ кэВ, $E_a=7.68$ МэВ), потери на входном окне $\Delta E_{\text{вх}}=(10\pm 5)$ кэВ, потери на выходном окне $\Delta E_{\text{вых}}=(20\pm 5)$ кэВ. Анализ вольт-амперных характеристик выявил экспоненциальный рост обратного тока с выходом на участок насыщения, что подтверждает барьерную природу перехода. Низкие значения токов утечки свидетельствуют о высоком качестве контактов и правильности формирования гетероперехода.

Вольт-фарадные измерения показали линейный участок зависимости $C^{-2}(V)$, что указывает на формирование обедненной области в кремнии. Такое поведение подтверждает корректный механизм работы структуры и ее пригодность для регистрации ионизирующих частиц.

Спектрометрические исследования продемонстрировали наличие четко выраженных пиков в энергетическом спектре α -частиц. Полученные значения энергетического разрешения сопоставимы с параметрами кремниевых детекторов, при этом структура продемонстрировала устойчивость и стабильность характеристик. Отсутствие различий в спектрах при облучении с разных сторон указывает на равномерное распределение обедненной зоны.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований и технологических разработок была предложена и реализована схема изготовления полупроводникового детектора на основе гетероструктуры $\text{Al}/n\text{-InP}/p\text{-Si}/\text{Ni}$. Оптимизация технологических режимов позволила получить устройства с воспроизводимыми параметрами. Были изучены электрофизические и радиометрические характеристики детекторов при комнатной температуре, что подтвердило их работоспособность и стабильность. Изготовленные детекторы с большой площадью активной области предназначены для регистрации малоинтенсивных ионизирующих излучений, что делает их перспективными для применения в ядерной физике, для экспериментов на коллайдерах, в медицине и экологическом мониторинге.

Разработанные детекторы на основе $p\text{-Si}/n\text{-InP}$ демонстрируют конкурентоспособные характеристики для применения в физике высоких энергий. Перспективным направлением является оптимизация эпитаксиального роста для снижения плотности дефектов на границе Si/InP , а также интеграция детекторов в многоканальные системы регистрации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Акимов Ю.К., Игнатьев О.В., Калинин А.И., Кушнирук В.Ф.* Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике. / Под ред. Ю.К. Акимова. Москва: Энергоатомиздат, 1989.
2. *Акимов Ю.К.* // ПТЭ. 2007. №: 1. Р. 5. <https://elibrary.ru/item.asp?id=9465448>
[Akimov Y.K. // IET. 2007. V. 50. P. 1.]
3. *Knoll, G.F.* Radiation Detection and Measurement. John Wiley & Sons, 2010.
4. *Pelfer P.G., Dubecký F., Fornari R., Pikna M., Gombia E., Darmo J., Krempaský M., Sekáčová M.* Nucl. Instrum. Meth. A. 2001. V. 458. P. 400.
[https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(00\)00932-3](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(00)00932-3)
5. *Раджапов С.А., Раджапов Б.С., Рахимов Р.Х.* // Computational nanotechnology. 2018. № 1. С. 151. <https://elibrary.ru/item.asp?id=32775199>

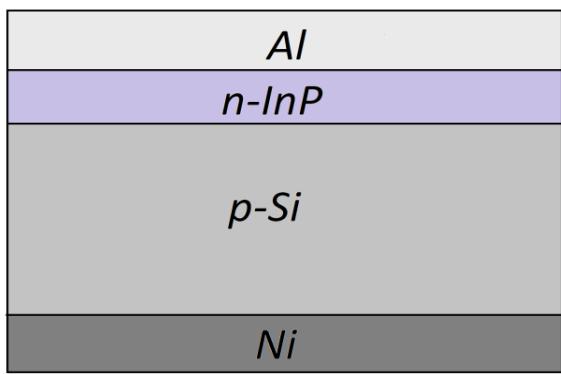
ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. **а** – Структура полупроводникового детектора ионизирующего излучения на основе гетероперехода p -Si/ n -InP с металлическими контактами Al и Ni, **б** – внешний вид изготовленных детекторов.

Рис. 2. Двумерное и трехмерное изображения поверхности образца p -Si/ n -InP.

Рис. 3. Характеристики полупроводникового детектора на основе гетероструктуры Al/ n -InP/ p -Si/Ni диаметром 20 мм: **а** – вольт-фарадная; **б** – вольт-амперная.

Рис. 4. Энергетические спектры α -излучения: **а** – смеси ^{238}Pu , ^{239}Pu и ^{333}U ; **б** – ^{239}Pu ; **в** – ^{226}Rn и продуктов его распада.



(a)



(б)

Рис. 1.

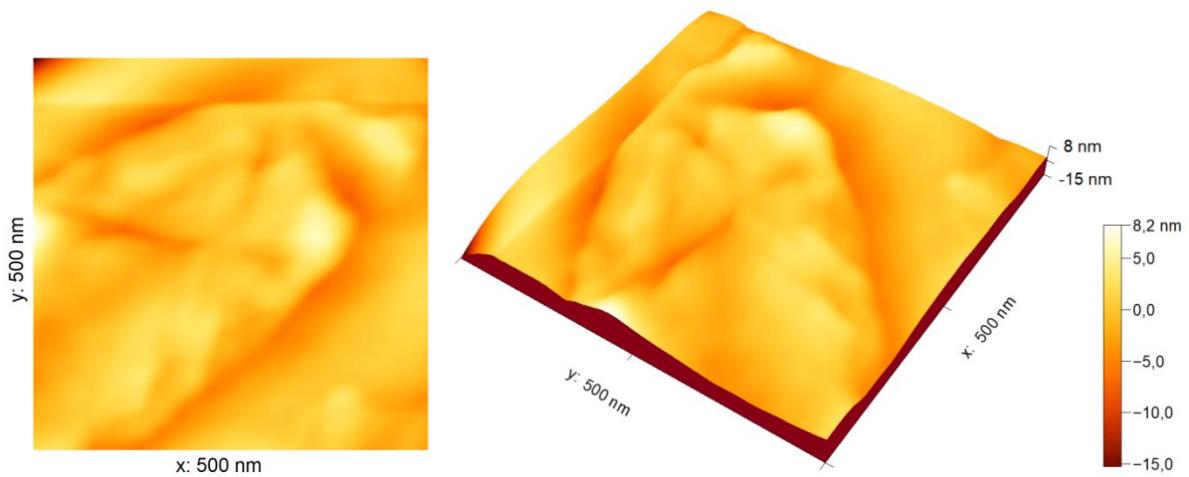
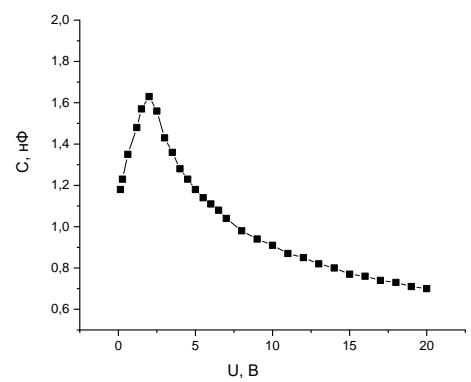
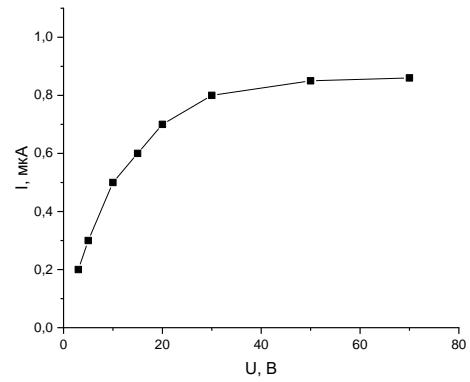


Рис. 2.

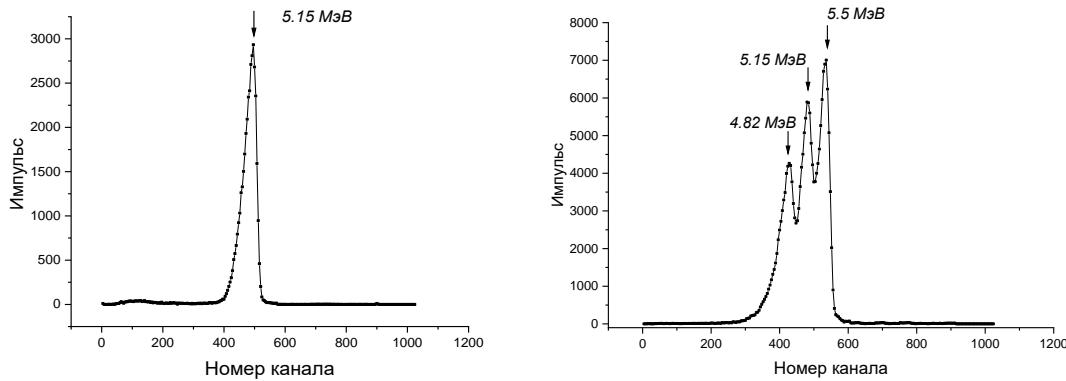


a

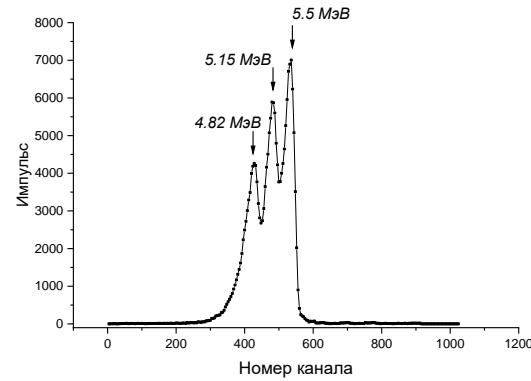


b

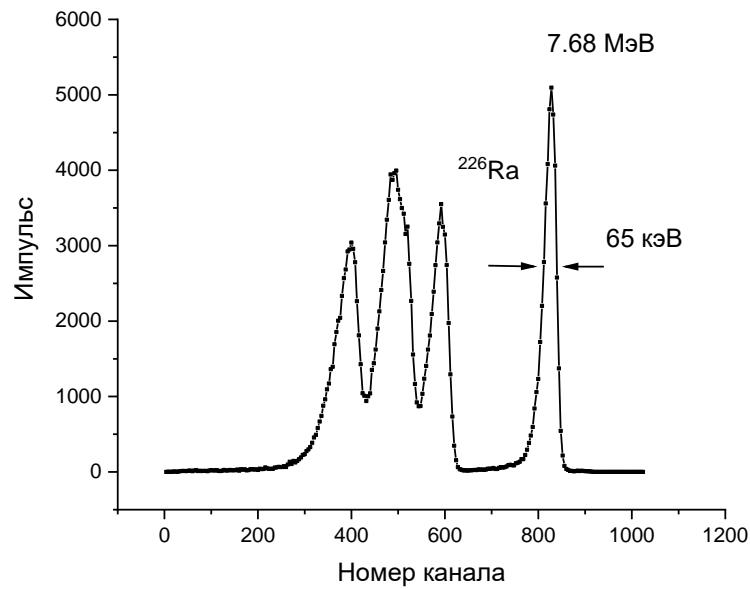
Рис. 3.



(а)



(б)



(в)

Рис. 4