

P13-2004-24

Ю. Б. Гуров¹, К. Н. Гусев, С. Л. Катулина, М. Митура-Новак²,
Б. Райхель², В. Г. Сандуковский, Я. Юрковски²

ИМПЛАНТИРОВАННЫЕ HPGe-ДЕТЕКТОРЫ
ДЛЯ МНОГОСЛОЙНЫХ СПЕКТРОМЕТРОВ ЗАРЯЖЕННЫХ
ЧАСТИЦ

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

¹Московский инженерно-физический институт, Москва

²Институт ядерной физики Польской академии наук, Краков, Польша

Гуров Ю. Б. и др.
Имплантированные HPGe-детекторы
для многослойных спектрометров заряженных частиц

P13-2004-24

Представлены результаты разработки планарных детекторов из HPGe с тонкими входными окнами ($< 0,1$ мкм), полученными с помощью ионной имплантации бора и фосфора. Показано, что созданные детекторы обладают хорошими электрическими и спектрометрическими параметрами. Детекторы такого типа предназначены для развития и модернизации существующих многослойных спектрометров, используемых для изучения редких ядерных процессов и поиска глубоколежащих состояний пионных атомов ксенона.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2004

Перевод авторов

Gurov Yu. B. et al.
Ion-Implanted HPGe Detectors
for Multilayer Spectrometers of Charged Particles

P13-2004-24

The results of development of planar HPGe detectors with the thin entrance windows (< 0.1 μm) made by boron and phosphorus ion implantation are presented. It is shown that these detectors have good electric and spectrometric parameters. The same detectors are intended for modernization of actual multilayer spectrometers used for investigation of rare nuclear processes and search for deep states of xenon pionic atoms.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2004

Многослойные полупроводниковые спектрометры (ППД-телескопы), состоящие из последовательно расположенных планарных Si- и/или Ge-детекторов, как правило, используются в двух направлениях экспериментальной ядерной физики. Первое — спектрометрия частиц в режиме совпадения, например спектрометр TGV для изучения редких ядерных процессов (двойной бета-распад, двойной электронный захват) [1, 2]. Исследуемые изотопы находятся в нем в виде тонких источников электронов между детекторами из сверхчистого германия (HPGe). Второе — идентификация и спектрометрия длиннопробежных заряженных частиц. Примерами второго направления могут служить ППД-телескопы из HPGe, предназначенные для мечения реакций π^- , η -рождения в экспериментах по изучению редких мод распада мезонов и поиска глубокосвязанных состояний пионных атомов ксенона [3, 4].

HPGe-телескопы обладают энергетическим разрешением, сравнимым с разрешением магнитных спектрометров. В отличие от магнитных, они позволяют выполнять прецизионное измерение энергии и идентификацию частиц в широком интервале энергий (от нескольких до сотен мегаэлектронвольт) и масс (от пионов до многозарядных ионов) без изменения в настройке спектрометра, что существенно для скорости набора статистики и минимизации систематических ошибок. При этом, как показано в [4, 5], и в первом и во втором случае использования ППД-телескопов их прецизионность растет с уменьшением толщин нечувствительных слоев (входных окон) детекторов с фронтальной и тыльной стороны (n^+ - и p^+ -контактов). Кроме этого, важным фактором, влияющим на точность измерений, является постоянство величины входного окна во времени.

Разработанные в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ HPGe-детекторы для вышеотмеченных экспериментов [1–4] были созданы по традиционной технологии [6], которая включает в себя термодиффузию лития в германий p -типа проводимости для образования n - p -перехода. В таком подходе глубина залегания n - p -перехода (толщина входного окна) составляет значительную величину — $600 \div 1000$ мкм. При этом аномально большой коэффициент диффузии лития ведет к увеличению толщины входного окна, особенно в процессе термоциклирования (охлаждения и нагревания при тестовых измерениях) детекторов. В связи с этим необходимо, чтобы детекторы постоянно находились при температуре жидкого азота (77 К), что не всегда выполнимо в процессе подготовки и реализации экспериментов.

Одним из способов уменьшения толщины нечувствительного литиевого слоя (до 20–50 мкм) является импульсная термодиффузия в сильном градиенте температуры от поверхности в глубь образца [7]. Однако проблема временной нестабильности литиевого слоя остается. Наиболее предпочтительно использование метода ионной имплантации для изготовления выпрямляющих и омических контактов толщиной $0,05 \div 0,3$ мкм.

В настоящем сообщении представлены результаты разработки планарных детекторов из HPGe с тонкими входными окнами ($< 0,1$ мкм), полученными с помощью ионной имплантации бора и фосфора.

МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ ДЕТЕКТОРОВ

Исходным материалом для изготовления детекторов служил монокристаллический германий p - и n -типа проводимости производства фирмы НОВО-КЕН (Бельгия) с разностной концентрацией легированных примесей: $|N_a - N_d| = 0,7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ для p -типа и $|N_a - N_d| = 0,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ для n -типа. Размеры образцов: диаметр 26 мм, толщина 3 мм (p -тип) и 6 мм (n -тип). Плоскости образцов ориентированы перпендикулярно кристаллографической оси [100]. Перед имплантацией проводилась механическая и химическая подготовка образцов, которая включала следующие этапы: вырезку охранных колец (канавок глубиной $2/3$ толщины образца), последовательную шлифовку поверхностей на микропорошках M20 \div M7, травление в смеси кислот HF:HNO₃ (1:3), обезжиривание и отмывку в деионизованной воде.

Внедрение ионов фосфора (P) и бора (B) в качестве n^+ - и p^+ -контактов проводилось на имплантаторе Института ядерной физики ПАН (г. Краков). Структуры детекторов показаны на рис. 1. Непосредственно перед имплантацией кристаллы подвергались кратковременному травлению в смеси HF:HNO₃. Параметры ионного внедрения были следующими. Имплантация ионов фосфора выполнена последовательно при значениях энергии 35 и 25 кэВ, величинах внедренных доз 10^{13} и 10^{14} см^{-2} соответственно. Значение тока ионного пучка составляло 0,3 мкА. Имплантация ионов бора проводилась при значениях энергии 25 и 17 кэВ, величины внедренных доз составили 10^{13} и $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ соответственно. Значение тока пучка ионов бора было $0,15 \div 0,2$ мкА. Размер пучка в плоскости имплантации: ширина 10 мм (неоднородность $\leq 1\%$), высота 120 мм (неоднородность $\leq 10\%$). Для получения однородности распределения дозы по поверхности осуществлялось сканирование пучка за счет постоянного механического движения образцов в процессе имплантации. Для исключения эффектов каналирования кристаллы располагались так, что угол между направлением пучка и кристаллографической осью [100] был 8° .

Отметим, что сначала проводилось внедрение фосфора в образцы как p -, так и n -типа проводимости. В одном случае создавался n^+n - p -переход, в

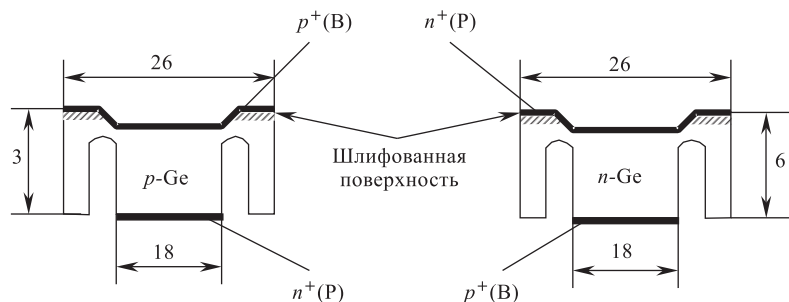


Рис. 1. Структуры имплантированных детекторов

другом — омический n^+ -контакт. После имплантации образцы помещались в водный раствор плавиковой кислоты $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ (1:7) на 15 мин для снятия окисной пленки. Отжиг радиационных дефектов выполнялся в вакууме при температуре 300°C в течение 30 мин. Скорость охлаждения образцов после отжига поддерживалась на уровне $2,5^\circ\text{C}/\text{мин}$.

Перед имплантацией бора кристаллы снова кратковременно травились. При этом имплантированные фосфором поверхности защищались кислотостойкой пленкой. В результате внедрения ионов бора формировался p^+p -переход на n -типе и омический p^+ -контакт на p -типе. Отжиг дефектов после внедрения бора не проводился.

Завершающий этап изготовления детекторов включал в себя кратковременное травление охранных колец, тщательную промывку в деионизованной воде и метиловом спирте. Образцы упаковывались в капсулы с прижимными электрическими контактами, позволяющими выполнять измерения электрических и спектрометрических характеристик детекторов при охлаждении до температуры жидкого азота.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТЕКТОРОВ

Первоначальными показателями качества полупроводникового детектора являются его вольт-амперная и вольт-фарадная характеристики, представленные на рис. 2. Видно, что полное обеднение для детекторов из p -типа наступает при $V_{\text{дет}} = 30\text{ В}$, а для детекторов из n -типа — при $V_{\text{дет}} = 65\text{ В}$. Как показали последующие измерения, детекторы выдерживают напряжения, значительно превышающие напряжения полного обеднения (в 3 раза для p -типа и в 5 раз для n -типа), без заметного ухудшения спектрометрических параметров. Это немаловажный факт для экспериментов, где требуются хорошие временные свойства детектора.

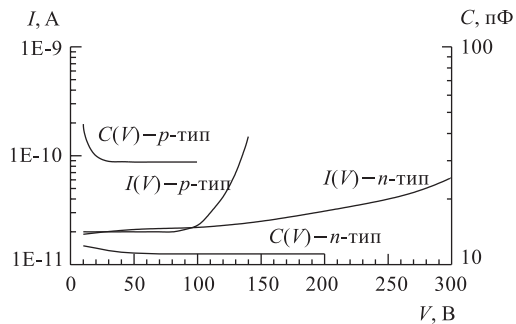


Рис. 2. Зависимости обратных токов и емкости детекторов от приложенного напряжения. $I(V)$ — вольт-амперная характеристика, $C(V)$ — вольт-фарадная

Оценка величин входных окон детекторов была сделана из измерений спектров α -частиц Pu-238 ($E_\alpha = 5,5$ МэВ). Облучение α -частицами проводилось со стороны p - n -переходов и со стороны омических контактов детекторов. Отметим, что пробег α -частиц Pu-238 в германии составляет 16 мкм. Расчетные оценки глубины залегания имплантированных ионов, сделанные согласно теории Линдхарда и др. (см., например, [8]), дают величины, равные 0,04 мкм для фосфора и 0,05 мкм для бора. Измерения с α -частицами показали, что толщина входных окон исследованных детекторов

равны 0,04 мкм для фосфора и 0,05 мкм для бора. Измерения с α -частицами показали, что толщина входных окон исследованных детекторов

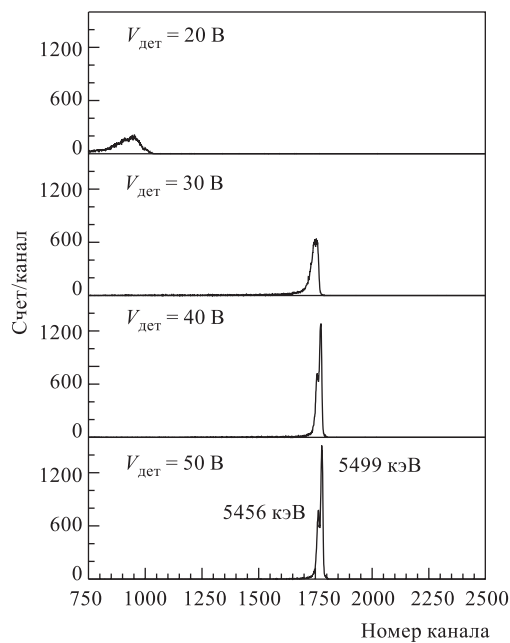


Рис. 3. Спектры α -частиц Pu-238, полученные для различных напряжений на детекторе из p -типа при облучении со стороны омического контакта

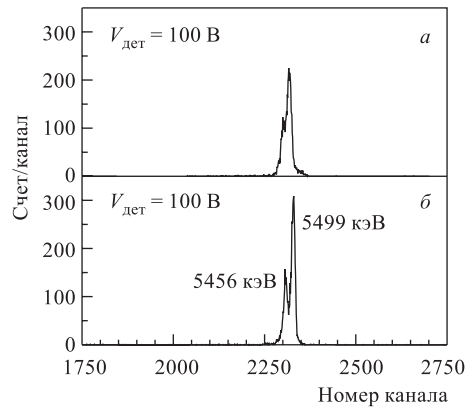


Рис. 4. Спектры α -частиц Pu-238, полученные при облучении детекторов со стороны p - n -переходов: а) детектора из p -типа, б) детектора из n -типа

не превышает 0,1 мкм. На рис. 3 представлено характерное поведение спектров α -частиц при облучении со стороны омического контакта в зависимости от приложенного к детектору напряжения. Рис. 4 демонстрирует спектры α -частиц, полученные при облучении детекторов со стороны выпрямляющего контакта.

Исследования характеристик детекторов показали, что помимо тонких входных окон они обладают хорошими спектрометрическими параметрами при измерениях с γ -квантами. В отличие от опытов с α -частицами, эти измерения проводились с предусилителем с охлаждаемым первым каскадом. Энергетическое разрешение (FWHM) имплантированных детекторов в измерениях с γ -квантами показано в таблице.

Источник	Am-241	Co-57	Co-60
Энергия γ -квантов (кэВ)	59,5	122,1	1332,5
FWHM (кэВ), p -тип	0,75	0,82	1,73
FWHM (кэВ), n -тип	0,79	0,87	1,9

Представленные в настоящей статье результаты позволяют надеяться на получение широкоапертурных (с активной площадью до 30 см²) планарных HPCe-детекторов с тонкими входными окнами, необходимых для развития и модернизации существующих многослойных спектрометров, которые предназначены для исследования редких ядерных процессов и изучения глубокосвязанных состояний пионных атомов ксенона.

Авторы выражают благодарности сотрудникам ЛЯП ОИЯИ Н. Н. Калининой, А. В. Ревенко и Т. В. Трофимову за помощь в подготовке германиевых образцов к имплантации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Briancon Ch. et al.* // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. 1996. V. A372. P. 222.
2. *Бруданин В. Б. и др.* // Известия РАН. Сер. физ. 2003. Т. 67. № 5. С. 618.
3. *Горнов М. Г. и др.* // ПТЭ. 1999. № 4. С. 65.
4. *Гребенев В. Н. и др.* Сообщение ОИЯИ Р13-2003-117. Дубна, 2003.
5. *Вылов Ц. и др.* Сообщение ОИЯИ Р6-84-554. Дубна, 1984.
6. *Голиков В. М. и др.* Сообщение ОИЯИ 13-83-669. Дубна, 1983.
7. *Вылов Ц. и др.* Сообщение ОИЯИ 13-85-677. Дубна, 1985.
8. *Мейер Д., Эрикссон Л., Дэвис Д.* Ионное легирование полупроводников. М.: Мир, 1973. С. 31.

Получено 1 марта 2004 г.

Редактор *О. Г. Андреева*
Макет *Е. В. Сабеевой*

Подписано в печать 02.04.2004.
Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 0,5. Уч.-изд. л. 0,61. Тираж 310 экз. Заказ № 54372.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.
E-mail: publish@pds.jinr.ru
www.jinr.ru/publish/