

P13-2006-143

Ю. Б. Гуров¹, К. Н. Гусев¹, С. Л. Катулина¹,
В. Г. Сандуковский¹, Д. Борович^{1,2}, Я. Юрковски^{1,2}

СЕКЦИОНИРОВАННЫЕ HPGe-ДЕТЕКТОРЫ

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

²Институт ядерной физики им. Х.Неводничанского ПАН,
Краков, Польша

В ряде экспериментальных задач ядерной физики требуется разбиение полупроводникового детектора на отдельные регистрирующие элементы. В статье представлены результаты разработки секционированных планарных детекторов из HPGe. Разделение $p-n$ -перехода на отдельные элементы выполнено с помощью ионной имплантации бора (n -тип германия) и механической вырезки диффузионного слоя лития (p -тип германия). Исследованы электрофизические и спектрометрические характеристики отдельных секций и взаимное влияние секций друг на друга. Применение специальной пассивации поверхности кристаллов показало заметное повышение надежности их работы.

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

Segmentation of semiconductor detectors is required in some experimental tasks of nuclear physics. In this paper the results of development of segmented planar HPGe detectors are presented. Segmentation of $p-n$ junction was made by boron implantation (in the case of n -type germanium) and mechanical grooving of lithium diffusion layer (for p -type). Electric and spectrometric characteristics of each separate segment and interactions between them are investigated. Special passivation of crystal surfaces improved the reliability and stability of detectors.

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

Экспериментальный поиск двойного безнейтринного бета-распада ($2\beta_{0\nu}$) ведется во многих научных центрах мира. Наиболее важные причины интереса к этому процессу связаны со следующими проблемами: есть ли масса покоя у нейтрино, нарушается ли закон сохранения лептонного числа, какова природа нейтрино (дираковская или майорановская) [1, 2]. Обнаружение $2\beta_{0\nu}$ будет означать необходимость пересмотра положений стандартной модели электрослабых взаимодействий. В настоящее время наиболее значимые результаты по поиску $2\beta_{0\nu}$ -распада были получены в экспериментах с использованием сверхчистых германиевых детекторов (HPGe-п. п. д.), изготовленных из обогащенного изотопа ^{76}Ge (см., например, [3]). Необходимо указать, что при крайне малой вероятности указанного процесса очень важное значение приобретает проблема подавления, идентификации и контроля радиоактивного фона. Одним из возможных способов снижения фона в планируемых экспериментах с использованием HPGe-п. п. д. большого объема ($\sim 200 \text{ см}^3$) является разбиение этих детекторов на отдельные чувствительные элементы [4]. Расчеты показывают, что такое методическое решение и возможность идентификации частиц по форме импульса позволят понизить фон на порядок. В данной работе описывается методика изготовления планарных секционированных германиевых детекторов.

СЕКЦИОНИРОВАНИЕ ИМПЛАНТИРОВАННОГО *p-n*-ПЕРЕХОДА

Методика создания имплантированного *p-n*-перехода на HPGe-п. п. д. изложена в нашей работе [5]. Исходным материалом для изготовления двух детекторов служил монокристаллический германий *n*-типа проводимости с разностной концентрацией примесей $|N_a - N_d| = 0,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Геометрические размеры образцов представлены на рис. 1. Для секционирования детекторов процесс имплантации бора производился через крестообразную маску, что позволило получить переход, состоящий из четырех секторов (рис. 1). Расстояние между соседними секторами было 2,0 мм. Изготовленные детекторы различались только омическими контактами. У первого детектора этот контакт был сделан ионной имплантацией фосфора, а у второго — диффузией лития. Вольт-амперная и вольт-фарадная характеристики одного из сегментов детектора № 1 представлены на рис. 2. Указанные характеристики для

других секторов этого п.п.д., а также секций детектора №2 имеют аналогичный вид. Следует отметить, что напряжение полного обеднения для этих детекторов составляет 60 В.

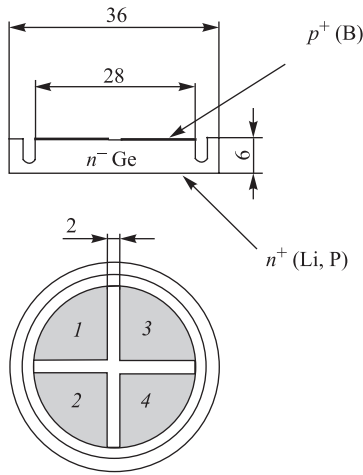


Рис. 1. Структура секционированного HPGe-детектора с имплантированным $p-n$ -переходом

Для изучения спектрометрических характеристик детекторов применялся γ -источник ^{57}Co , с помощью которого облучалась вся поверхность детектора. Первоначально отдельно на каждый сектор подавалось обратное напряжение и съем сигнала осуществлялся через четыре спектрометрических канала. Затем, не меняя геометрии источник-детектор, была произведена инверсия подключения напряжения, т.е. все секции замыкались на землю, и сигнал снимался с общего омического контакта (несекционированный режим). Время набора статистики и величина напряжения ($U = 100$ В) не изменялись в течение всех измерений. В табл. 1 для γ -линии с $E = 122$ кэВ указаны значения полного числа событий под пиком (N) и энергетического разрешения (FWHM), полученные в различных

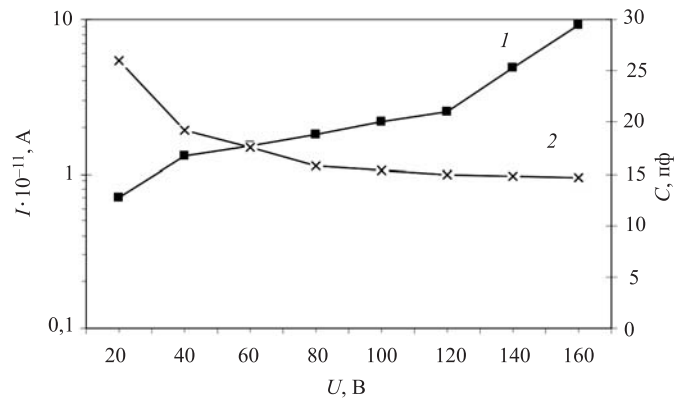


Рис. 2. Вольт-амперная и вольт-фарадная характеристики для сегмента 4 HPGe-детектора № 1, изготовленного из материала n -типа проводимости

режимах работы детектора № 1. Там же приведена сумма событий, измеренных на всех секциях (Σ_{1-4}), для сравнения с данными, измеренными при

подключении всего детектора № 1 (режим — п. п. д.). Исследования детектора № 2 продемонстрировали подобные результаты.

Таблица 1.

Режим работы	Секция 1	Секция 2	Секция 3	Секция 4	Σ_{1-4}	П. п. д.
N	1358	1460	1479	1212	5509	5608
FWHM, кэВ	1,2	1,2	1,4	1,3		2,9

Из табл. 1 видно, что число отсчетов при подключении всего детектирующего объема практически совпадает с суммой γ -квантов, зарегистрированных отдельно каждым сегментом. При этом все секции имеют достаточно высокое энергетическое разрешение. На основании полученных данных можно сделать вывод о возможности разбиения имплантированного $p-n$ -перехода на отдельные регистрирующие элементы.

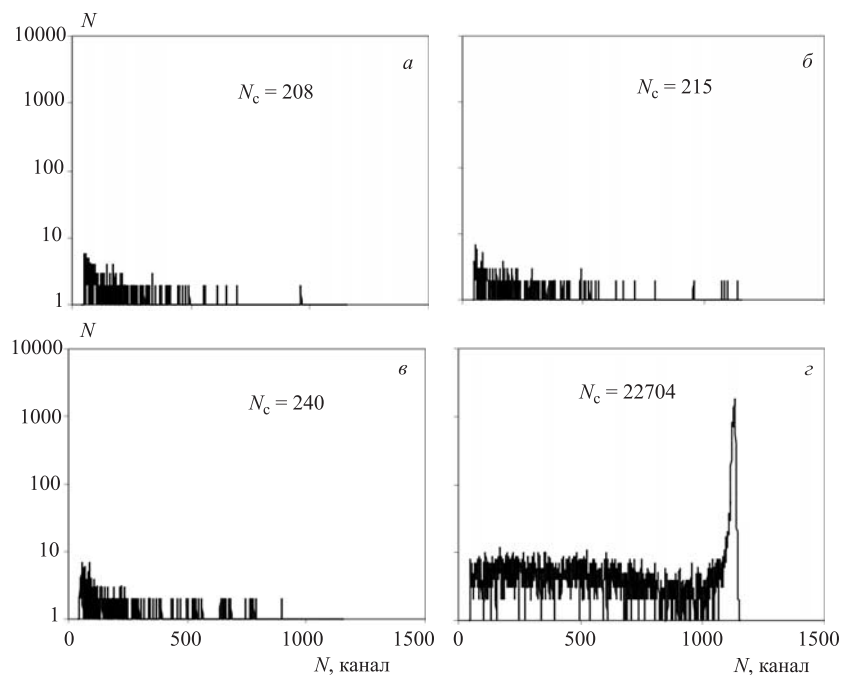


Рис. 3. Спектры, полученные при облучении α -частицами ^{238}Pu различных секций HPGe-детектора № 2 с имплантированным $p-n$ -переходом. Цифры на рисунках обозначают номер секции

При секционировании п. п. д. важно определить влияние отдельных регистрирующих элементов друг на друга. Для решения этой задачи использовался детектор № 2, α -источник ^{238}Pu и коллиматор, позволяющий осуществить точное позиционирование источника над одной из секций. На рис. 3 показаны спектры со всех сегментов детектора № 2, когда источник располагался над сегментом 4 (N_c — число событий в спектре). Затем источник убирался и выполнялись фоновые измерения, которые показали, что для всех секций число фоновых событий составляет ≈ 200 . Следовательно, эффект наведенного сигнала для изготовленной структуры практически полностью отсутствует. Аналогичные данные были получены при измерениях с α -источником, находящимся над другими секторами п. п. д. № 2, а также для детектора № 1.

СЕКЦИОНИРОВАНИЕ ДИФФУЗИОННОГО p - n -ПЕРЕХОДА

Для изготовления детектора с литиевым диффузионным контактом [5] использовался сверхчистый германий p -типа проводимости с $|N_a - N_d| = 1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Разбиение п. п. д. на две секции осуществлялось с помощью канавок, которые вырезались со стороны диффузионного слоя на глубину $\sim 2/3$ толщины образца. Структура изготовленного детектора представлена на рис. 4. Для каждой секции были измерены вольт-амперные (кривые 1 и 2 на рис. 5) и вольт-фарадные характеристики, которые показали, что напряжение полного обеднения для этого детектора составляет 100 В.

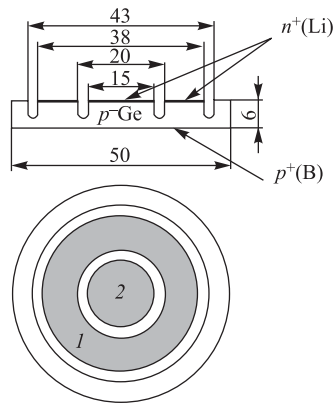


Рис. 4. Структура секционированного HPGe-детектора с диффузионным p - n -переходом

Исследования с помощью коллимированного α -источника показали отсутствие взаимного влияния кольцевых секций друг на друга.

С целью исследования параметров данного детектора как регистрирующей структуры в целом (режим — п. п. д.), так и ее отдельных частей была проведена серия измерений с помощью источников ^{57}Co и ^{238}Pu . В табл. 2 представлены результаты обработки γ -пика источника ^{57}Co с $E = 122 \text{ кэВ}$ (Σ_{1-2} — сумма событий, измеренных отдельно на секциях 1 и 2).

Видно, что при этом способе секционирования хорошие спектрометрические характеристики остаются как у всего детектора в целом, так и у его отдельных элементов. Небольшое превышение величины Σ_{1-2} над числом измеренных событий при работе в обычном режиме объясняется вкладом в Σ_{1-2} событий, зарегистрированных в области охранной канавки, расположенной между секциями 1 и 2.

Таблица 2.

Режим работы	Секция 1	Секция 2	Σ_{1-2}	П. п. д.
N	53266	15017	68283	65516
FWHM, кэВ	1,7	1,2		2,4

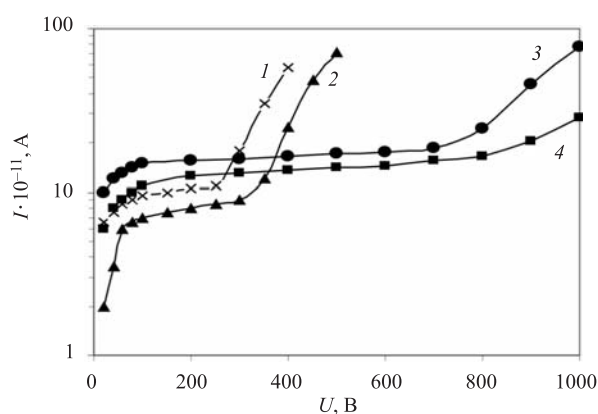


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика для секций 1 (ВАХ-С1) и 2 (ВАХ-С2) НРGe-п. п. д., изготовленного из материала p -типа проводимости. 1 — ВАХ-С1 до пассивации; 2 — ВАХ-С2 до пассивации; 3 — ВАХ-С1 после пассивации; 4 — ВАХ-С2 после пассивации

Секционированные германиевые детекторы планируется использовать в достаточно сложных экспериментальных условиях, поэтому были выполнены исследования, направленные на повышение надежности работы п. п. д. Для обработки германиевых образцов использовался метод пассивации с применением метилового спирта. Защитные свойства окисной пленки, полученной таким способом, проверялись на НРGe-детекторе с диффузионным переходом. На рис. 5 показаны вольт-амперные характеристики секций 1 и 2 до и после окисления. Видно, что после обработки в метаноле в несколько раз увеличивается диапазон рабочих напряжений. Также было установлено, что измеренные зависимости (кривые 3 и 4) и спектрометрические характеристики п. п. д. практически не меняются при многократном термоциклировании и разгерметизации криостата.

Таким образом, показана возможность создания секционированных германиевых детекторов как с имплантированными, так и диффузионными выпрямляющими контактами со специальной пассивацией поверхности, повы-

шающей надежность их работы. При этом изготовленные детекторы обладают хорошими спектрометрическими характеристиками, а эффект взаимного влияния отдельных регистрирующих элементов п. п. д. друг на друга практически полностью отсутствует.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Moe M., Vogel P.* // *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* 1994. V. 44. P. 247.
2. *Aalseth C. E. et al.* // *ЯФ.* 2000. Т.63, № 7. С.1268.
3. *Klapdor-Kleingrothaus H. V. et al.* // *Nucl. Instr. Meth.* 2004. V. A530. P. 410.
4. *Schonert S. et al.* // *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* 2005. V. 145. P. 242.
5. *Гуров Ю. Б. и др.* // *ПТЭ.* 2004. № 5. С. 34.
6. *Горнов М. Г. и др.* // *ПТЭ.* 1990. № 4. С. 83.

Получено 23 октября 2006 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 07.12.2006.

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

Усл. печ. л. 0,37. Уч.-изд. л. 0,42. Тираж 310 экз. Заказ № 55576.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/