

P13-2006-4

О. Ф. Вихлянцев¹, С. А. Голубков¹, Ю. Б. Гуров, К. Н. Гусев,
Н. Н. Егоров¹, Н. И. Замятин, Ю. Ф. Козлов¹, К. А. Коньков¹,
В. С. Пантуев¹, В. Г. Сандуковский, А. И. Сидоров¹,
А. С. Старостин, Я. Юрковски²

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА
ВНУТРЕННЕГО УСИЛЕНИЯ
НА ПЛАНАРНЫХ СТРУКТУРАХ ИЗ *p*-КРЕМНИЯ

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

¹Научно-исследовательский институт материаловедения, Зеленоград,
Россия

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

Вихлянцев О. Ф. и др.
Исследование эффекта внутреннего усиления
на планарных структурах из *p*-кремния

P13-2006-4

Представлены результаты исследований специальных детекторов из кремния *p*-типа. Показано, что в детекторах реализуется эффект внутреннего усиления сигнала с сохранением свойств детектора как спектрометрического прибора. Коэффициент усиления достигает 20. Продемонстрировано эффективное понижение энергетического порога регистрации ионизирующего излучения.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2006

Vihlyantsev O. F. et al.
Investigation of Internal Amplification Effect
at Planar Structures Made from *p*-Silicon

P13-2006-4

The results of investigations of special detectors of *p*-type silicon are presented. It is shown that the internal amplification effect is realized with the conservation of spectrometric quality of these detectors. The achieved amplification coefficient was about 20. The effective reduction of energy registration threshold is demonstrated.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2006

ВВЕДЕНИЕ

Для решения некоторых исследовательских задач, например поиска темной материи [1] и определения магнитного момента нейтрино [2], требуются спектрометры с экстремально низким энергетическим порогом регистрации. Одним из путей снижения порога является создание полупроводниковых детекторов (п. п. д.) с внутренним пропорциональным усилением сигнала [3]. Такие приборы существуют [4–10], однако имеют определенные недостатки. Краткий обзор имеющихся приборов, а также результаты исследования кремниевых п. п. д. из материала n -типа проводимости изложены в нашей предыдущей публикации [11]. Ниже рассматриваются результаты исследований детекторов из кремния p -типа проводимости.

Для более эффективной реализации усиления сигнала в кремнии p -типа проводимости целесообразны структуры $n^{++}p^{+}pp^{+}$, поскольку у них в область лавинного размножения заряда попадают электроны, подвижность которых при комнатной температуре в три раза больше подвижности дырок. Перед n^{++} -областью создается p^{+} -слой, в котором количество внедряемых акцепторов выбирается таким образом, чтобы при приложении к структуре обратного напряжения в нем создавалось электрическое поле, способное вызвать лавинное размножение заряда.

Пример исследованных детекторных структур представлен на рис. 1. Детекторы были изготовлены в НИИМВ (г. Зеленоград) по планарной технологии. На кремниевой пластине с удельным сопротивлением ~ 100 Ом·см, толщиной 300 мкм и размером 20×20 мм размещены четыре квадранта. В каждом квадранте расположены группы из девяти детекторов: в квадрантах I и II — детекторы с диаметром активной области 30 мкм, в квадранте III — с диаметром 100 мкм, в квадранте IV — с диаметром 1000 мкм. Каждый детектор окружен системой охранных колец. Были исследованы детекторы трех типов. В детекторах первого типа непосредственно под n^{++} -областью круглого пикселя находится p^{+} -область умножения носителей ($n^{++}p^{+}pp^{+}$ -структура). Детекторы второго типа отличались от первого тем, что периметр n^{++} -области имел дополнительное более глубокое легирование, чем глубина легирования p^{+} -области. Предполагалось, что это должно было воспрепятствовать возможному периферическому пробое. Ширина такого «кольца» составила порядка 10 мкм. В дальнейшем будем называть такую структуру

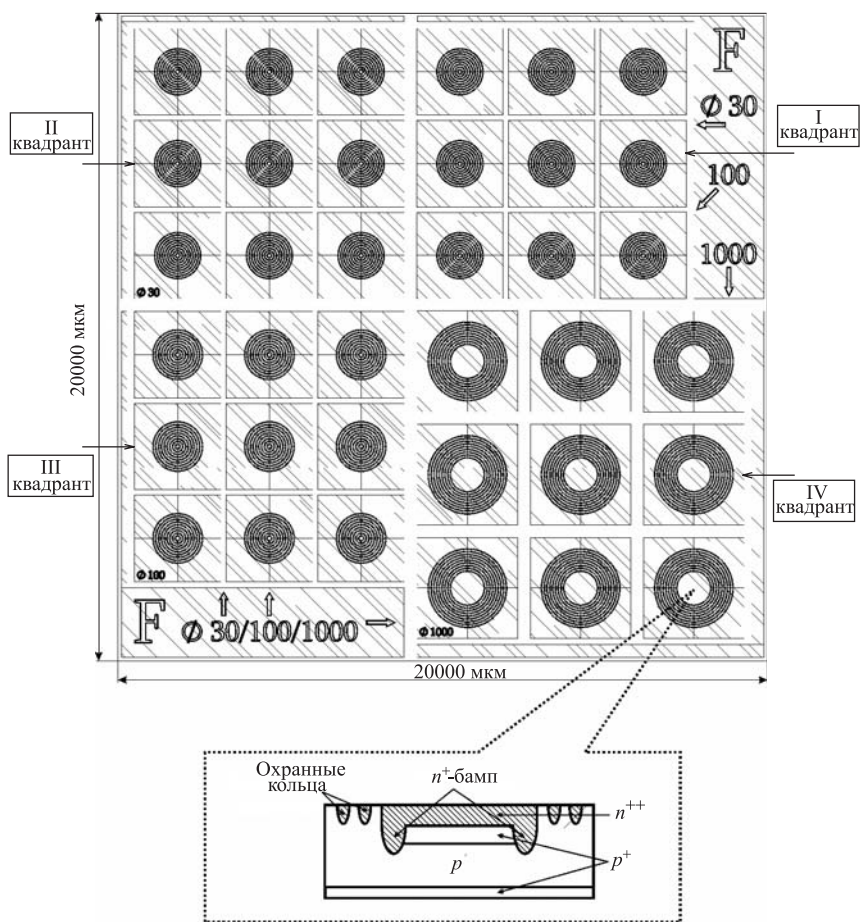


Рис. 1. Структура поверхности исследованных детекторов с n^+ -бампом

n^+ -бампом (рис. 1). Детекторы третьего типа представляют собой n^{+++} -структуры без области лавинного размножения.

Для изучения процессов усиления использовались источник α -частиц ^{238}Pu ($E_\alpha = 5,5$ МэВ) и γ -источник ^{55}Fe ($E_\gamma = 5,9$ кэВ). Измерения проводились при комнатной температуре и при охлаждении детекторов до температуры ~ 90 К.

Измерения вольт-фарадных характеристик детекторов показали, что максимально возможное напряжение на детекторе недостаточно для достижения его полного обеднения. Поэтому исследование спектрометрических характеристик проводилось при облучении детекторов со стороны n^+ -контакта.

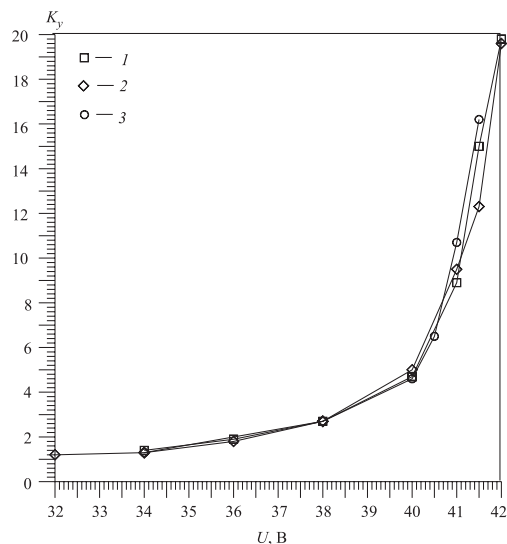


Рис. 2. Зависимость коэффициента усиления от приложенного напряжения для детекторов различных типов

Эффект усиления сигнала от α -частиц наблюдался начиная с 32 В. На рис. 2 показана зависимость коэффициента усиления (K_y) от приложенного напряжения для детектора, относящегося к первому типу (кривая 1), и двух детекторов второго типа (кривые 2 и 3). Отметим, что детекторы, дающие кривые 1 и 2, имеют совершенно идентичную структуру охранных колец, отличающуюся от детектора, имеющего кривую 3. Наиболее резкий рост коэффициента усиления происходил в очень узком диапазоне напряжений от 40 до 42 В (рис. 2 и 3). Выше 42 В начинался процесс «генерации» [11], исключавший спектрометрические возможности детекторов. Максимальный достигнутый коэффициент усиления $K_y \sim 20$.

Надо отметить, что помимо усиленного пика от α -частиц наблюдался и неусиленный пик, для которого энергетическое разрешение (FWHM) составляло 2–3% у всех трех типов детекторов. При $K_y \sim 10$ разрешение усиленных пиков было $\sim 5\%$, а в режимах максимального усиления ($K_y \sim 20$) $\text{FWHM} \geq 10\%$ для всех детекторов.

Перераспределения интенсивности между усиленным и неусиленным пиками не происходит. Суммарная интенсивность равна количеству частиц, попадающих в активную область детектора. Этот параметр был определен при измерениях детектора аналогичного диаметра, но не имеющего области усиления, в идентичной геометрии «источник–детектор». Следовательно, можно утверждать, что часть носителей заряда собирается не в область лавинного

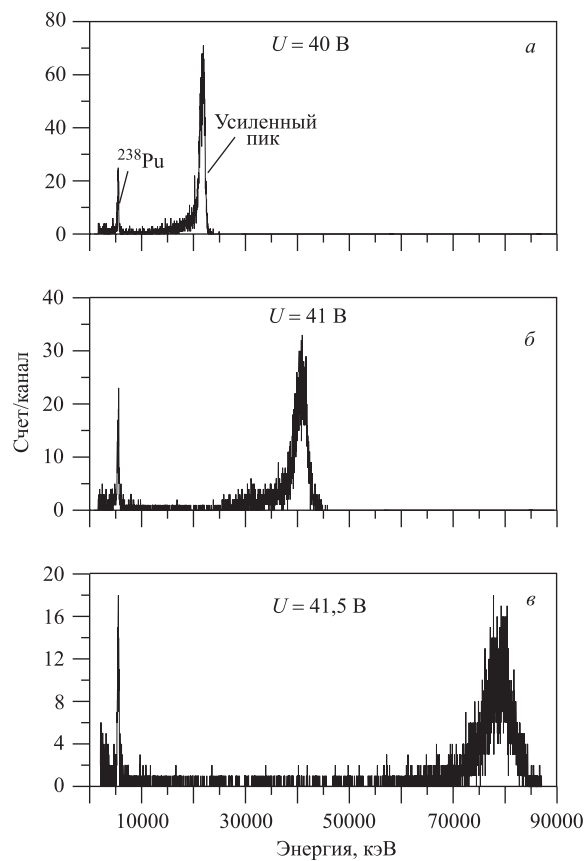


Рис. 3. Спектры α -частиц ^{238}Pu , полученные при различных напряжениях на одном из детекторов с внутренним усилением

размножения, т. е. в детекторе существует область обычного np -перехода. Сравнение значений интенсивностей обычных и усиленных пиков для детекторов, отличающихся друг от друга только наличием n^+ -бампа, показывает следующее. У детектора с n^+ -бампом интенсивность обычных α -пиков от источника ^{238}Pu составила 11% от общего числа зарегистрированных частиц, а у детектора без n^+ -бампа — 7%. Число отсчетов под усиленными пиками у детектора без n^+ -бампа соответственно больше на 4%. Следовательно, наличие n^+ -бампа уменьшает величину полезного (усиленного) сигнала при одинаковых активных поверхностях детекторов.

Наиболее интересные результаты получены при измерениях рентгеновского излучения от источника ^{55}Fe (энергия 5,9 кэВ). Регистрация излучения

такой энергии стандартными планарными (толщиной ~ 300 мкм) детекторами из n -кремния при комнатной температуре практически невозможна, так как порог регистрации значительно выше, чем измеряемая энергия. Так, у детектора фирмы CANBERRA толщиной 300 мкм и площадью $0,2$ см², имеющего энергетическое разрешение FWHM = 10 кэВ для $E_{\alpha} = 5,5$ МэВ и FWHM ~ 4 кэВ для $E_{\gamma} = 60$ кэВ, порог составил ~ 20 кэВ. Однако применение данного детектора обеспечило нам калибровку энергетической шкалы (рис. 4, *a*). Использовать эту калибровку для исследуемых детекторов позволило то, что амплитуда сигнала от зарядочувствительного преусили-

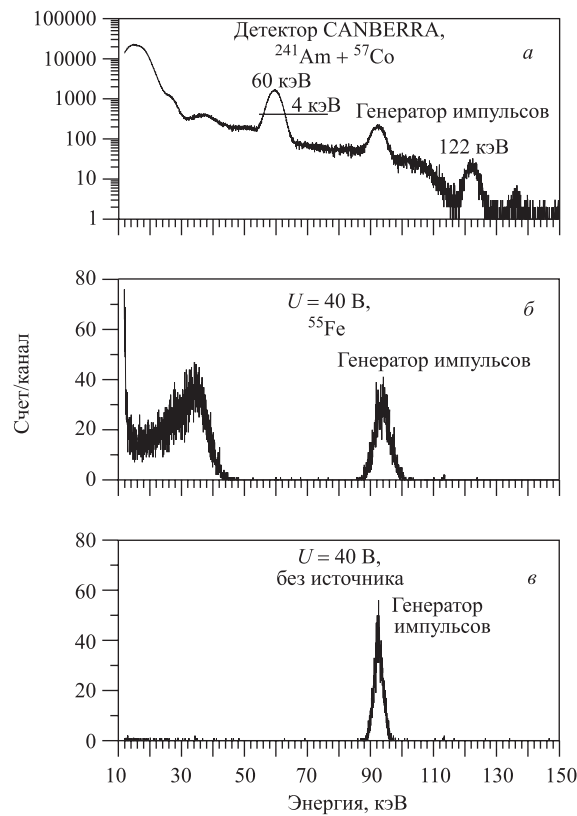


Рис. 4. Калибровочный спектр от источников γ -излучения ^{241}Am и ^{57}Co , полученный с помощью планарного детектора CANBERRA (*a*) и спектр γ -излучения (5,9 кэВ) от источника ^{55}Fe , полученный с помощью детектора с усилением (*б*). Для сравнения приведен спектр в отсутствие источника (*в*). Измерения выполнены при комнатной температуре

теля слабо зависит от емкости детектора. Кроме того, для контроля временной стабильности аппаратуры применялся генератор точной амплитуды. Как видно из рис. 4, б, детектор с внутренним усилением позволил выделить полезный сигнал для энергии γ -квантов 5,9 кэВ при комнатной температуре. Следовательно, в данном случае имеет место эффективное понижение энергетического порога регистрации излучения.

Охлаждение детекторов привело к уменьшению диапазона рабочих напряжений, улучшению энергетического разрешения, но не дало результатов по усилению, заметно отличающихся от полученных при комнатной температуре.

Таким образом, в детекторах на основе специальных структур ($n^{++}p^{+}pp^{+}$) из низкоомного p -кремния возможна реализация эффекта внутреннего усиления сигнала с коэффициентом усиления до 20 и сохранением их спектрометрических свойств. Наиболее важным результатом исследования явилось эффективное снижение энергетического порога регистрации ионизирующего излучения в условиях комнатной температуры, продемонстрированное на примере измерений с источником ^{55}Fe .

ЛИТЕРАТУРА

1. *Morales A.* // Nucl. Phys. Proc. Suppl. 2002. V. 110. P.39;
2. *Bergstrom L.* // Rep. Prog. Phys. 2000. V. 63. P. 793.
3. *Беда А.Г. и др.* // ЯФ. 1998. Т. 61, № 1. С. 66;
4. *Неганов Б.С., Трофимов В.Н., Юхимчук А.А.* // ЯФ. 2001. Т. 64, № 11. С. 1948.
5. *Беда А.Г., Старостин А.С.* // ЯФ. 2000. Т. 63, № 7. С. 1370.
6. *Huth G. C.* // Proc. of the Gatlinburg Conference. Washington: National Academy of Sciences, 1969. P. 323.
7. *Moszynski M. et al.* // IEEE Trans. 2001. V. NS-48, № 1. P. 1205.
8. *Shah K. S. et al.* // IEEE Trans. 2001. V. NS-48, № 6. P. 2352.
9. *Madden T. C., Miller G. L.* // Proc. of the Gatlinburg Conference. Washington: National Academy of Sciences, 1969. P. 314.
10. *Lutz G.* // Nucl. Instr. and Meth. 2003. V. A501. P. 288.
11. *Ripamonti G. et al.* // Nucl. Instr. and Meth. 1990. V. A288. P. 99.
12. *Бурбаев Т.М. и др.* // Краткие сообщения по физике ФИАН. 1992. № 3, 4. С. 34.
13. *Голубков С.А. и др.* // ПТЭ. 2004. № 6. С. 85.

Получено 23 января 2006 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 7.04.2006.

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

Усл. печ. л. 0,37. Уч.-изд. л. 0,47. Тираж 325 экз. Заказ № 55302.

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/