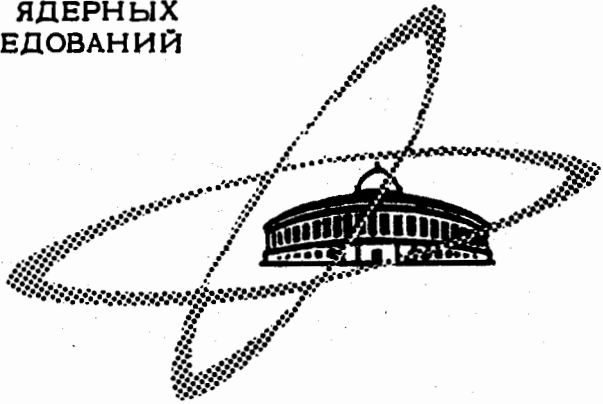


6578

ЭКЗ. ЧИТ. ЗАЛА

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна.



P13 - 6578

В.Ф.Кушнирук, Р.А.Никитина, Ю.П.Харитонов

ПОВЕРХНОСТНО-БАРЬЕРНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ
ИЗ КРЕМНИЯ p -ТИПА
(Способ изготовления и характеристики)

P13 - 6578

В.Ф.Кушнирук, Р.А.Никитина, Ю.П.Харитонов

**ПОВЕРХНОСТНО-БАРЬЕРНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ
ИЗ КРЕМНИЯ p -ТИПА
(Способ изготовления и характеристики)**

Направлено в журнал "Физика и техника полупроводников"

Введение

Поверхностно-барьерные детекторы из кремния p -типа не нашли пока широкого применения для регистрации ядерных излучений из-за того, что нет достаточно простой и надежной методики их изготовления. Между тем, p -кремний обычно лучше очищен от примесей, более однороден по диаметру слитка и, наконец, дешевле кремния n -типа.

В поверхностно-барьерных детекторах из p -кремния можно обеспечить более высокую напряженность собирающего электрического поля, чем в аналогичных детекторах из n -кремния, а это существенно при спектрометрии сильно ионизирующих частиц, таких, например, как осколки деления и тяжелые ионы.

Кроме того, исследование выпрямляющих свойств на поверхности кремния p -типа должно способствовать более глубокому пониманию процессов выпрямления поверхностными барьерами.

Обзор и выбор методики

В работах /1-8,9/ сделаны попытки использовать положительные свойства p -кремния для получения поверхностно-барьерных детекторов высокого качества. Различные способы изготовления таких детекторов сводятся, по существу, к следующим трем:

а) напыление пленки металла на предварительно протравленную поверхность кремния /1-3/;

б) окисление поверхности кремния в концентрированной азотной кислоте ^{/3,4,9/} или в разряде кислорода ^{/5/} с последующим напылением металла;

в) адсорбция молекул вещества, содержащих аминные группы ^{/3,6/}. Самые хорошие результаты получены Мэтью и др. ^{/4/} Авторы использовали методику, основанную на окислении поверхности кремния в концентрированной азотной кислоте и выдержке в деионизованной воде с последующим напылением пленки алюминия. Помимо хороших спектральных свойств (детектор с площадью 20 мм^2 имел разрешение -30 кэВ для α -частиц с энергией $5,5 \text{ МэВ}$) эти детекторы обладали стабильностью в течение длительного времени.

Недостатком предложенной Мэтью и др. методики является сложность многоступенчатой процедуры травления и окисления, а также большой расход химических реактивов высокой чистоты.

Наиболее простой способ получения выпрямляющих структур на поверхности р-кремния заключается в нанесении пленки металла, имеющего меньшую, по сравнению с кремнием, работу выхода. В этом случае переход электронов из металла в кремний способствует образованию барьера на границе раздела. Подходящим металлом для этой цели является алюминий, применение которого в качестве выпрямляющего контакта имеет еще ряд преимуществ, связанных с другими свойствами этого металла ^{/4/}: меньшая тормозная способность, а следовательно, меньшие потери энергии и меньшие флуктуации потерь во входном окне; меньшая, по сравнению с золотом, светопроницаемость; лучшее сцепление пленки с кремнием; устойчивость к ртутным парам и др.

В поисках подходящей простой методики нами было изготовлено 15 детекторов путем испарения алюминия в вакууме на протравленную в смеси кислот ($1 \text{ HF} : 3 \text{ HNO}_3$) поверхность кремния. Как и следовало ожидать, алюминий в контакте с кремнием дал хорошие выпрямляющие

характеристики, и детекторы имели хорошее разрешение. Однако полученные таким образом структуры оказались нестабильными во времени при хранении их на воздухе в лабораторных условиях. Это видно из рис. 1.

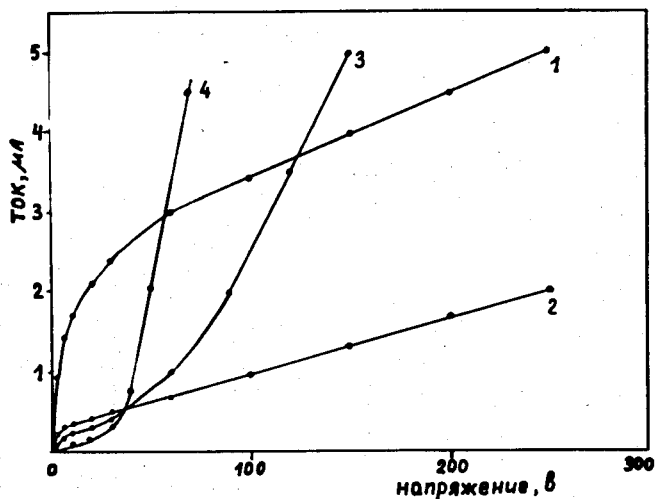


Рис. 1. Изменение со временем вольт-амперных характеристик детектора, изготовленного напылением алюминия на поверхность кремния без защиты: 1 - сразу после изготовления, 2 - спустя 2 суток, 3 - спустя 10 суток, 4 - спустя 20 суток.

Через 2-3 дня после изготовления качество перехода заметно улучшается. Однако через 8-10 дней вид характеристики меняется: вместе с уменьшением обратного тока на начальном участке резко уменьшается напряжение пробоя, и детектор становится непригодным для использования.

Такое поведение детекторов можно объяснить тем, что при хранении их в результате адсорбции атомов и молекул из окружающей среды поверхностный слой кремния приобретает дырочную проводимость. Это приводит к появлению на границе между металлическим электродом и открытой поверхностью кремния сильного электрического поля, способ-

ствующего поверхностному пробою^{/7/}. Предположение о дырочной проводимости поверхностного слоя хорошо согласуется с результатами, полученными на поверхностно-барьерных детекторах из n -кремния^{/8/}.

Таким образом, простой способ напыления алюминия в качестве выпрямляющего контакта без дополнительной обработки поверхности p -кремния также имеет существенный недостаток - слишком короткое (2-3 недели) "время жизни" детекторов.

Разработанный нами способ изготовления детекторов сочетает достоинства обеих описанных выше методик. Он прост, обеспечивает высокую разрешающую способность и длительную стабильность характеристик.

Методика изготовления детекторов

Для изготовления детекторов использовались пластины кремния с удельным сопротивлением от 300 до 25000 ом-см, толщиной 1-2 мм, вырезанные параллельно плоскости [111].

Пластины шлифовались с обеих сторон на порошке окиси алюминия с размером зерна 7 мкм. Омический контакт наносился химическим осаждением никеля на шлифованную поверхность (для толстых пластин) или термическим испарением золота в вакууме на протравленную поверхность (для тонких пластин).

Травление проводилось обычным способом в смеси кислот ($1 HF$: $3 HNO_3$) в течение 2-3 минут. Затем травитель разбавлялся деионизованной водой, и в ее потоке образец окончательно промывался.

После промывки пластины осушались фильтровальной бумагой, и сразу же на протравленную поверхность заготовки напылялся слой кремния толщиной $15-20 \text{ мкг/см}^2$. Напыление производилось с вольфрамовой спирали в вакууме $\sim 5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. В дальнейшем на напыленную пленку кремния наносился таким же способом слой алюминия толщиной

15–20 мкг/см², но несколько меньшей площади, чем площадь кремниевой пленки. Контактные выводы из медных проволочек приклеивались к обоим электродам с помощью проводящей серебряной пасты.

Структура, которая получается в результате всех операций, схематически изображена на рисунке 2.

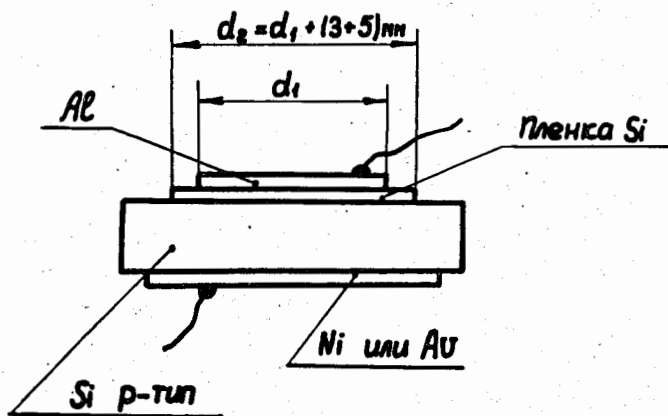


Рис. 2. Схематическая структура детектора, изготовленного по предлагаемой методике.

Характеристики детекторов

Величина обратного тока детектора и ход вольт-амперной характеристики часто определяют разрешающую способность поверхностно-барьерных детекторов при комнатной температуре.

На рис. 3 показаны типичные зависимости обратного тока изготовленных детекторов от напряжения смещения. Характерной особенностью является скачок обратного тока при малых напряжениях и большой участок насыщения, простирающийся до 300–400 вольт. Плавный ход вольт-амперных характеристик и высокие напряжения пробоя, вероятно, обусловлены инверсионным слоем под пленкой напыленного кремния, которая выступает из-под пленки металлического электрода (см. рис. 2).

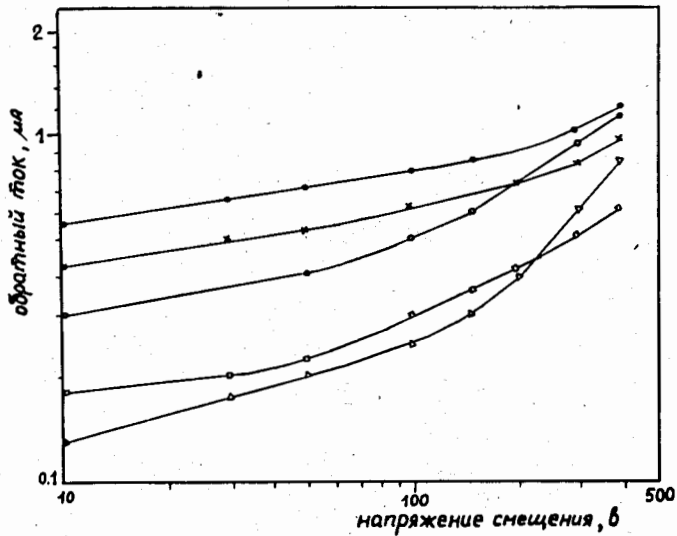


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики нескольких детекторов, имеющих структуру, изображенную на рис. 2.

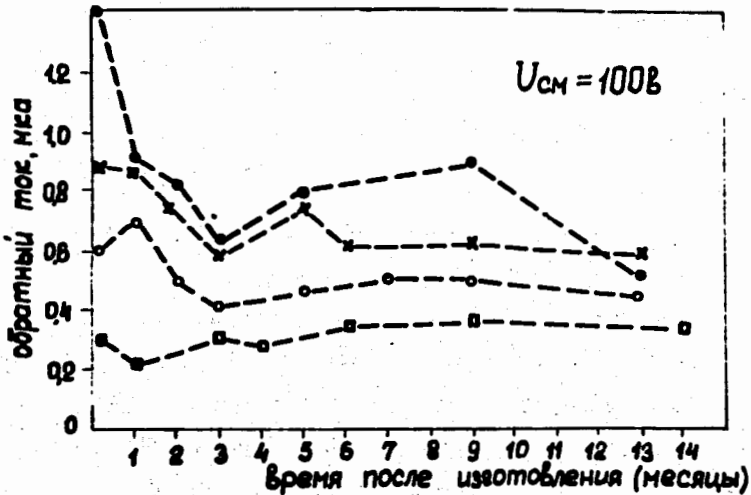


Рис. 4. Изменение со временем обратного тока изготовленных детекторов. Напряжение смещения во всех случаях - 100 вольт.

Необходимо отметить, что поведение обратного тока в детекторах из р-кремния, изготовленных по предлагаемой методике, во многом совпадает с поведением детекторов, изготовленных из кремния n-типа. Так, в обоих случаях наблюдается постепенное уменьшение обратного тока в течение первых нескольких дней после напыления металлического электрода. Кроме того, на некоторых детекторах наблюдается явление гистерезиса при прямом и обратном ходе напряжения, что указывает на наличие медленных поверхностных состояний.

Вольт-амперные характеристики изготовленных детекторов в течение длительного времени практически не изменяются (рис. 4).

На рис. 5 показана зависимость емкости от обратного смещения. Емкость измерялась с помощью прибора ИИЕВ-12 на частоте 400 кГц. В рабочей области напряжения смещения изменение емкости можно представить прямой линией с наклоном $\sim 1/2$ (в логарифмических координатах), что хорошо совпадает с ходом барьерной емкости перехода с резким градиентом концентрации примесей.

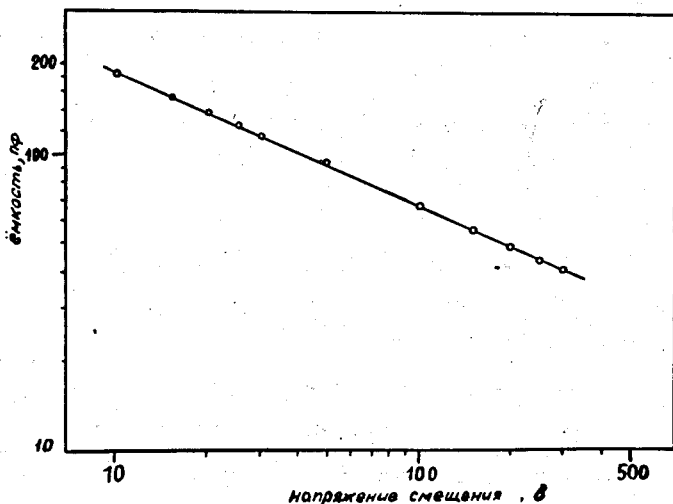


Рис. 5. Вольт-емкостная характеристика.

Для иллюстрации спектрометрических свойств полученных детекторов на рис. 6 приведен спектр α -частиц ^{241}Am . Разрешающая способность составляет 19 кэВ, шумы электронного тракта и детектора — 14 кэВ. Собственное разрешение детектора $\sigma = \sqrt{\sigma_{\text{ИЭМ}}^2 - \sigma_{\text{Ген}}^2}$ составляет 13 кэВ. Наилучшее собственное разрешение, достигнутое с этими детекторами, составило 9,7 кэВ для детектора площадью 30 мм².

Важным параметром спектрометрического детектора является толщина входного окна, которая может давать заметный вклад в энергетическое разрешение. Верхний предел для флуктуаций, связанных с потерей энергии во входном окне, можно получить, исключая из величины собственного разрешения флуктуации, связанные со статистикой образования пар (~ 3 кэВ) и передачей энергии при упругом рассеянии (~ 6 кэВ). Подсчитанная таким образом, эта величина для наших детекторов составила от 6 до 10 кэВ. Такая оценка подтверждается и измерениями потерь энергии в мертвом слое, сделанными при различных углах падения α -частиц на поверхность детектора. Эффективная толщина мертвого слоя, измеренная таким способом, составила для различных детекторов от 12 до 25 кэВ.

На детекторах площадью 100 мм² было получено разрешение 25–35 кэВ, причем эта величина определялась однородностью использованного материала, а не шумами детекторов.

Рис. 7 иллюстрирует возможности спектрометрии электронов. Разрешение по энергии для конверсионных электронов ^{109}Cd и ^{137}Cs составляет около 14 кэВ.

Другой важной характеристикой спектрометрических свойств служит зависимость разрешения от напряжения смещения. На рис. 8 показана эта зависимость для трех различных детекторов. Широкое плато (примерно от 25 до 200–300 вольт) позволяет спектрометрировать различные частицы в достаточно широком диапазоне энергий с высокой разрешающей способностью.

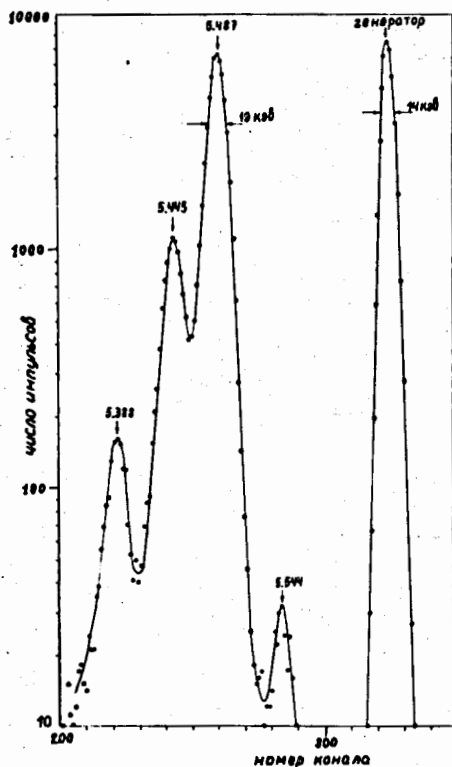


Рис. 6. Спектр α -частиц ^{241}Am . Детектор площадью 30 мм^2 , напряжение смещения - 300 вольт.

Заключение

Разработана простая методика изготовления поверхностно-барьерных детекторов из кремния р-типа. Напыление тонкой пленки ($15\text{--}20 \text{ мкг/см}^2$) кремния перед нанесением алюминиевого контакта позволило получить стабильную выпрямляющую структуру с хорошими электрическими и спектрометрическими свойствами.

Величина мертвого слоя полученных детекторов не превышает 25 кэВ для α -частиц с энергией 5,5 МэВ и не вносит существенного вклада в энергетическое разрешение.

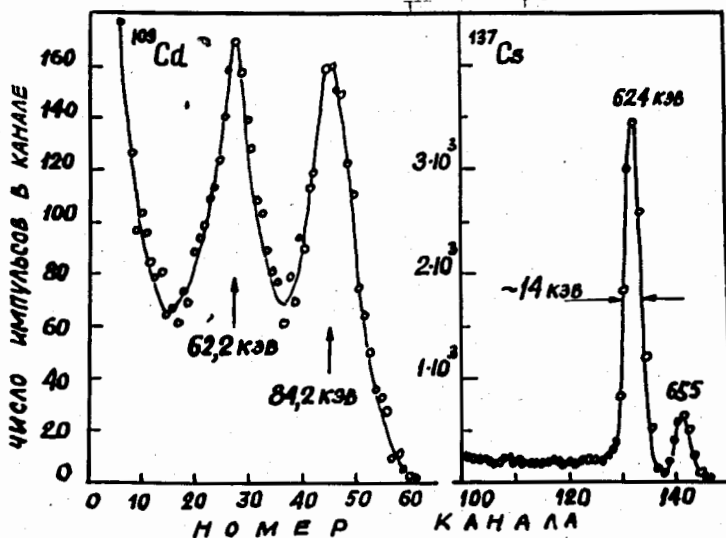


Рис. 7. Спектр конверсионных электронов ^{109}Cd и ^{137}Cs . Детектор площадью 100 мм^2 , удельное сопротивление кремния - $25000 \text{ ом}\cdot\text{см}$, напряжение смещения - 210 вольт.

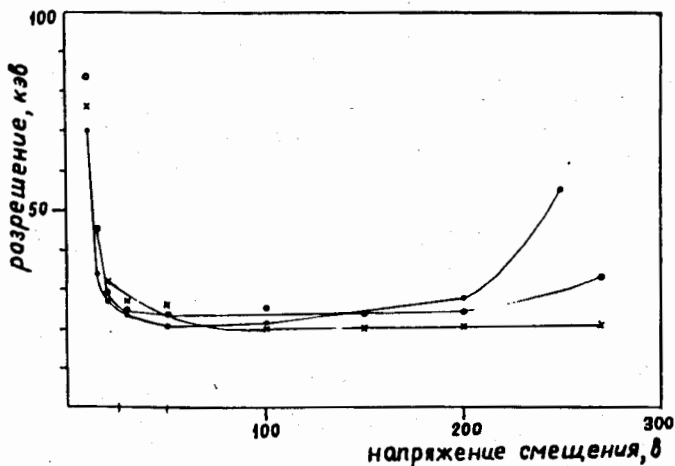


Рис. 8. Зависимость разрешения от напряжения смещения для трех различных детекторов. Источник - ^{241}Am .

Авторы благодарны академику Г.Н.Флерову за интерес к этой работе и поддержку, а также сотруднику из КНДР Зо Зен Саму, принимавшему участие в работе на ее начальном этапе.

Л и т е р а т у р а

1. C.N.Inskeep, W.W.Eidson. *Electronique Nucleaire*, Paris, 1963, p. 162.
2. В.А.Лазарев. ПТЭ, 4, 225 (1965).
3. А.В.Проценко, В.Н.Синицын, Н.В.Панасенко, В.М.Король. ФТП, 3, вып.9, 1341 (1969).
4. P.J.Mathew, N.G.Chapman, G.E.Coote..Nucl.Instrum. and Methods, 49,No 2, 245 (1967).
5. Ю.В.Максимов, Ю.Ф.Родионов, Ю.И.Явлинский. ФТП, 1, вып.7, 1039 (1967).
6. C.Kaufman. Internationale Arbeitstagung "Herstellung und Anwendung von Halbleiterdetektoren", ZfK-PhA 12, Rossendorf, 1963, p. 10.
7. T.M.Buck. "Surface effects on silicon particle detectors". NAS-NRC Pub. 871 (1967), p. 111.
8. P.Siffert, A.Coche. IEEE Trans. NS-11, No 3, 244 (1964).
9. R.Chaudhry ans R.V.Srikantiah. Report BARC-527, Bombay (1971).

Рукопись поступила в издательский отдел
7 июля 1972 г.