

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



19/vi-78

13 - 11355

Б-444

Е.Бельцаж, Б.П.Осипенко, В.Г.Сандуковский

2617/2-78

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ

ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

1. Характеристики резистивных слоев

1978

13 - 11355

Е. Бельцаж; Б.П.Осипенко, В.Г.Сандуковский

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ

ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

1. Характеристики резистивных слоев

*Направлено на 28 совещание по ядерной спектроскопии
и структуре атомного ядра, Алма-Ата, 1978 г.*

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Бельцаж Е., Осяпенко Б.П., Сандуковский В.Г.

13 - 11355

Полупроводниковые позиционно-чувствительные детекторы.

1. Характеристики резистивных слоев

Исследованы шумовые характеристики резистивных слоев позиционно-чувствительных детекторов, созданных на кремнии *p*-типа напылением, имплантацией или диффузией. Показана возможность получения однородных резистивных слоев с помощью диффузии лития в *p*-кремний. Результаты измерения при комнатной температуре спектра α -частиц ^{241}Am показаны для детектора 25x25x1 мм с литиевым резистивным слоем, позиционное разрешение - 0,3 мм, нелинейность - лучше 1%.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

© 1978 Объединенный институт ядерных исследований Дубна

1. ВВЕДЕНИЕ

Возможность получения одновременной информации о координате прохождения и энергии заряженных частиц позволяет эффективно применять полупроводниковые позиционно-чувствительные детекторы в ряде физических задач. Хорошая линейность /лучше 1%/ , относительно низкое рабочее напряжение, механическая прочность и компактность определяют преимущества полупроводниковых приборов перед аналогичными газовыми детекторами.

Принцип работы и вопросы изготовления кремниевых однокоординатных детекторов обсуждались рядом авторов^{/1-11/}. Основным элементом позиционного детектора является резистивный слой R , на котором происходит деление заряда, созданного регистрируемой частицей^{/5,12/}. В зависимости от метода изготовления резистивного слоя можно выделить три типа детекторов:

- с резистивным слоем, полученным напылением металлических пленок^{/2-4,6,9/};
- с резистивным слоем, полученным диффузией^{/8,10/};
- с резистивным слоем, полученным имплантацией^{/1,7,11/}.

Принято считать, что наилучшую линейность / < 1%/ с высокой воспроизводимостью можно получить только с имплантированным типом детекторов. В настоящей работе приведены результаты исследования 40 резистивных слоев, полученных различными методами. Позиционные детекторы были изготовлены из *p*-кремния с удельным сопротивлением $\rho = 40 \text{ кОм см}$ и $\rho = 10 \text{ кОм см}$.

Выпрямляющий контакт создавался, как и для поверхностно-барьерных детекторов, напылением золота в вакууме. Резистивные слои на обратной стороне детектора /рис. 1/ изготавливались напылением нихрома или палладия, имплантацией фосфора и диффузией лития. Размеры напыленных и имплантированных детекторов - 32 x 8 x 1 мм, диффузионных - 25 x 5 x 1 мм. В нашем случае лучшая воспроизводимость детекторов с нелинейностью меньше 1% получена для приборов с резистивными слоями, созданными диффузией лития.

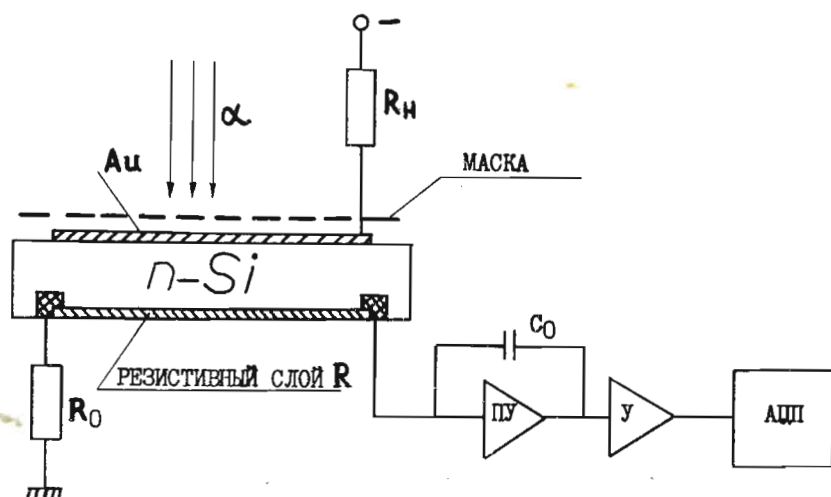


Рис. 1. Структура однокоординатного позиционно-чувствительного детектора и блок-схема измерения позиционного разрешения.

2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ РЕЗИСТИВНЫХ СЛОЕВ

Важнейшими характеристиками позиционно-чувствительных детекторов являются разрешающая способность /позиционная и энергетическая/ и линейность прибора. Для однородных резистивных слоев нелинейность де-

текторов порядка 1% за счет баллистического дефицита^{15,12/} получается при условии:

$$RC \leq A_0 \tau, \quad /1/$$

где R - сопротивление резистивного слоя, C - емкость детектора, τ - постоянные времени формирования основного усилителя ($\tau_{II} = \tau_{д} = \tau$), A_0 - коэффициент, определяемый конструкцией формирующих цепей усилителя /для однократного интегрирования и дифференцирования $A_0 \approx 2/$. В этом случае энергетическое и позиционное разрешение определяется следующими выражениями^{11/}:

$$1/2 \Delta_E \sim (A_1 C^2 \frac{RT}{\tau} + A_2 I \tau)^{1/2} \quad /2/$$

$$1/2 \Delta_p \sim (\frac{T \tau}{R})^{1/2}, \quad /3/$$

где T - температура, I - ток детектора, A_1 и A_2 - константы. Из /1/-/3/ видно, что резистивный слой R прямо влияет на основные параметры детектора. Поэтому особое внимание уделялось изучению свойств резистивных слоев и методам их изготовления.

а/ Напыленные резистивные слои создавались термическим испарением в вакууме палладия или нихрома. Удельное сопротивление используемого кремния - 4000 Ом см. Геометрия напыления была выбрана таким образом, чтобы неоднородность резисторной пленки была меньше 1%. Сопротивление пленки оценивалось по количеству напыляемого материала и геометрии напыления. Для различных детекторов оно варьировалось в диапазоне 3-10 кОм. Для увеличения надежности выводных контактов на концах резисторной пленки напылялся дополнительный слой палладия или /в случае нихрома/, алюминия.

б/ Имплантированные резистивные слои изготавливались ионным внедрением фосфора в кремний с удельным сопротивлением 4000 Ом см. Энергия внедрения - 5-8 кэВ. Отжиг проводился в вакууме при $T = 380^\circ \text{C}$. В зависимости от дозы внедрения $/10^{14} \div 8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}/$

сопротивление резистивных слоев после отжига было 10 ± 40 кОм соответственно. Контакты к резистивному слою изготавливались дополнительным внедрением фосфора /доза 10^{16} см⁻²/ с последующим напылением алюминия или золота.

в/ Третий тип резистивных слоев изготавливался с помощью диффузии лития в кремний n-типа с удельным сопротивлением 10000 Ом см. Литий наносился на предварительно протравленную поверхность кремния термическим испарением в вакууме. Диффузия проводилась при строгом контроле температуры и времени диффузии. Сопротивление резистивного слоя оценивалось по формулам:

$$R = \rho_{\text{пов.}} \cdot \frac{5}{x_{\text{эфф}}} \quad /4/$$

$$x_{\text{эфф}} = \frac{1}{C_s} \int_0^{4\sqrt{Dt}} C_x dx \quad /5/$$

$$\frac{C_x}{C_s} = \text{erfc} \left[\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right], \quad /6/$$

где $\rho_{\text{пов.}}$ - удельное сопротивление кремния, отвечающее растворимости лития при данной температуре, C_s - растворимость лития в кремнии при температуре диффузии, C_x - концентрация лития вдоль направления диффузии, t - время диффузии, D - коэффициент диффузии лития в кремнии. Величины C_s и D взяты нами из^{7/13/}.

$$D = (2,5 \pm 0,2) \cdot 10^{-3} \exp \left[-\frac{0,655}{kT} \right], \quad /7/$$

где T - температура диффузии, $k = \frac{1}{11604,5} \text{ } ^\circ\text{K}$ - постоянная Больцмана. При оценке R мы пользовались выражением, полученным из /5/ и /6/

$$x_{\text{эфф}} = 1,12 \sqrt{Dt}. \quad /8/$$

Измерения сопротивлений резистивных слоев делались с помощью прецизионного омметра сразу после диффузии. Как видно из табл. 1, они хорошо согласуются с вычисленными оценками

Таблица 1

N дет.	t (мин.)	T (K)	R _{расч.} (Ом)	R _{изм.} (Ом)
24	5	509	1958	2000
25	5	489	3846	3780
26	10	477	4465	4100
27	9	466	8032	8500

Для надежности контактов на концах резистивного слоя проводилась предварительная диффузия лития при температуре 673 К на шлифованные участки кремния. После создания резистивного слоя на контакты напылялся алюминий.

Все изготовленные детекторы упаковывались в оправки из тефлона; выводы осуществлялись тонкой медной проволокой /0,1 мм/ и серебряным контактолом.

3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЗИСТИВНЫХ СЛОЕВ

Исследование шумовых характеристик резистивных слоев проводилось при комнатной температуре с помощью селективного нановольтметра "Type 237". Селективность измерения была 25 дБ. Сопротивления резистивных слоев измерялись прецизионным омметром и по вольтамперным характеристикам при пропускании малых токов обеих полярностей.

На рис. 2 приведены типичные зависимости шума от частоты для образцов с напыленным /R=3,5 кОм/

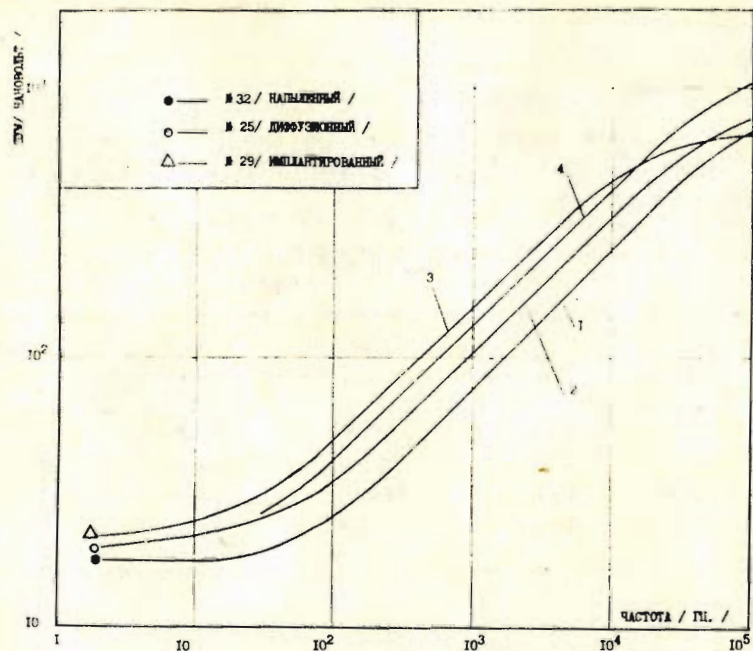


Рис. 2. Шумовые характеристики резистивных слоев, $U_R=0$. 1 - напыленный, $R = 3,5 \text{ кОм}$; 2 - диффузионный, $R = 8 \text{ кОм}$; 3 - имплантированный, $R = 17 \text{ кОм}$; 4 - угольное сопротивление, $R = 11 \text{ кОм}$ /для сравнения/.

диффузионным / $R = 8 \text{ кОм}$ / и имплантированным / $R = 17 \text{ кОм}$ / резистивным слоем. На этом же рисунке показана шумовая характеристика обычного угольного сопротивления / $R = 11 \text{ кОм}$ /. При подаче на резистивный слой напряжения / $U_R = 0,3 \text{ В}$ /, в низкочастотной области для диффузионных и имплантированных слоев наблюдаются кроме тепловых дополнительные шумы /рис. 3/. Мы предположили, что они связаны с окисной пленкой между напыленными металлическими контактами и резистивным слоем. Для улучшения контактов был сделан "пробой" контактов импульсом тока в нескольких местах с по-

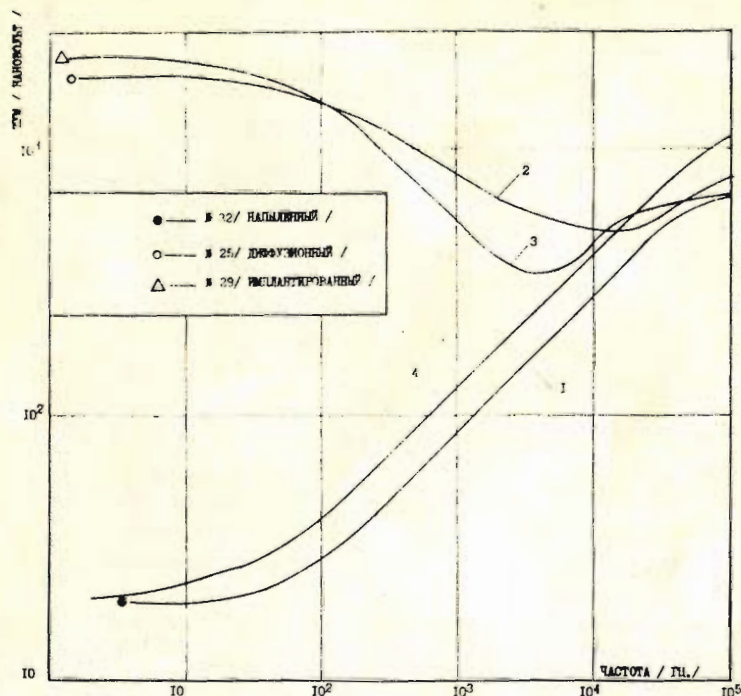


Рис. 3. Шумовые характеристики резистивных слоев, $U_R = 0,3 \text{ В}$. 1 - напыленный, 2 - диффузионный, 3 - имплантированный, 4 - угольное сопротивление $R = 11 \text{ кОм}$.

мощью двух медных зондов. На рис. 4 видно улучшение шумовых характеристик резистивных слоев после "пробоя".

Рис. 5 показывает зависимости R имплантированного и диффузионного слоев от приложенного к ним напряжения до и после "пробоя", которые хорошо коррелируют с частотными характеристиками, показанными на рис. 4. Для сравнения дана $R = f(U)$ для напыленного слоя. Мы считаем, что улучшение шумовых характеристик

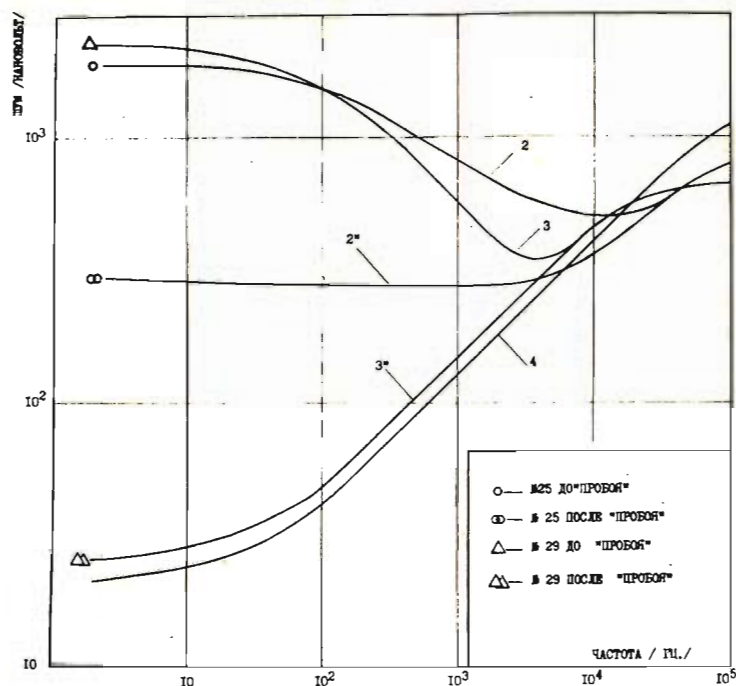


Рис. 4. Шумовые характеристики диффузионного и имплантированного резистивного слоя до "пробоя" - /2,3/ и после него /2*, 3*/, 4 - угольное сопротивление. $U_R = 0,3 \text{ В}$.

и уменьшение сопротивления диффузионных и имплантированных слоев наступает вследствие впаивания контактов в точках "пробоя". При рассмотрении принципов работы позиционно-чувствительного детектора на основе модели однородно-распределенной RC-цепи /5,8,12/ предполагается наличие омических контактов к резистивным слоям. Видно, что в реальных резистивных слоях /особенно в диффузионных и имплантированных/ это условие не всегда соблюдается.

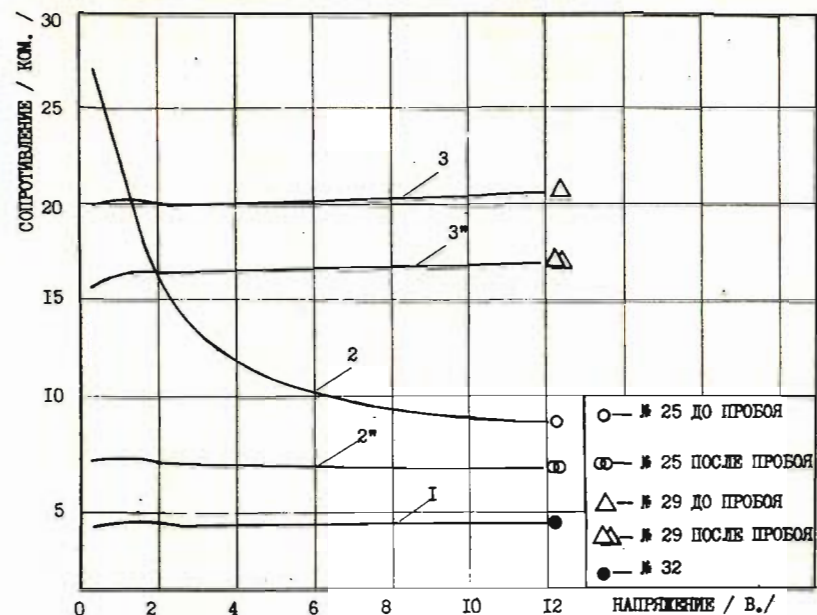


Рис. 5. Зависимости сопротивления диффузионного и имплантированного резистивного слоя от напряжения до "пробоя" /2,3/ и после /2*, 3*/. 1 - напыленный резистивный слой /для сравнения/.

На рис. 6 показано изменение сопротивления напыленного и диффузионного резистивных слоев во времени. При выборе временных формирований основного усилителя это необходимо учитывать в процессе работы с детекторами.

4. ПОЗИЦИОННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ И ЛИНЕЙНОСТЬ

Измерения позиционного разрешения и линейности детекторов проводились с помощью α -частиц ^{241}Am , падающих на детектор через щелевидную маску. Ширина щелей - 1 мм, расстояние между центрами - 2,5 мм.

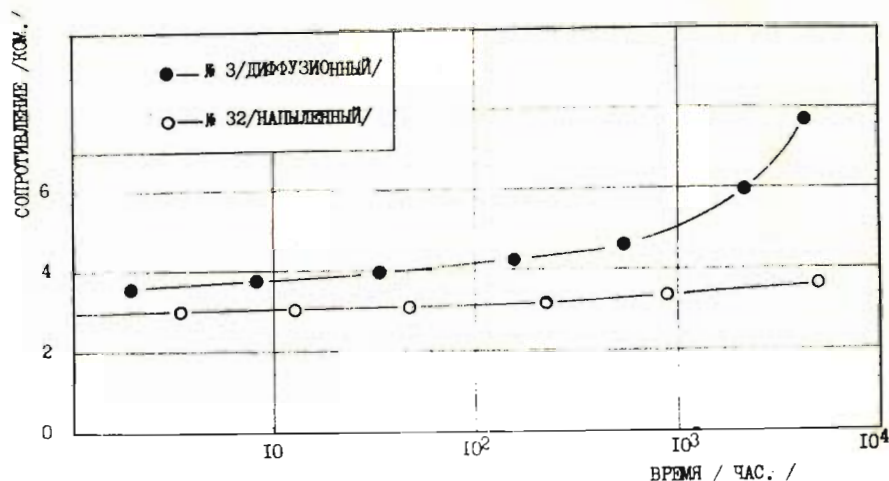


Рис. 6. Изменение сопротивления напыленного и диффузионного резистивного слоя во времени.

Позиционный сигнал снимался с одного из контактов резистивного слоя, другой был заземлен через сопротивление R_0 для выделения начальных пиков спектра из области шумов.

Большинство детекторов с напыленным резистивным слоем имели сильную нелинейность за счет неоднородности слоя, достигавшую в некоторых случаях 7%. Предполагаем, что такая неоднородность связана с различным "смачиванием" поверхности кремния вдоль образца. Лучшая линейность у нас получена для детекторов с диффузионными резистивными слоями. В табл. 2 приведены результаты измерения позиционного разрешения и линейности при комнатной температуре для детекторов с различными резистивными слоями: напыленным /№16/, имплантированным /№20/ и диффузионным /№27/.

Таблица 2

N дет.	U (В)	J (мкА)	R (кОм)	C (пФ)	τ (мкс)	$1/2 \Delta_p$ (мм)	Нелинейность (%)
16	140	1,4	8	80	0,5	0,33	1,5%
20	200	2,0	30	59	1,0	0,43	3%
27	120	1,5	35	28	0,5	0,29	< 1%

На рис. 7 показан позиционный спектр детектора /25 x 5 x 1/ с диффузионным резистивным слоем, облученного α -частицами через маску.

Следует заметить, что недостатком используемого метода измерения позиционных спектров является влияние геометрии источник - маска - детектор и очень

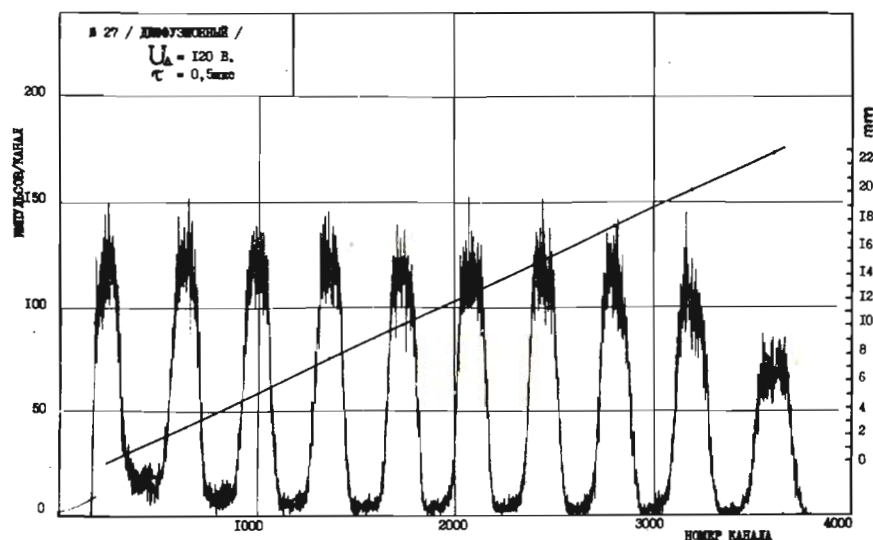


Рис. 7. Позиционный спектр α -частиц ^{241}Am , полученный через щелевидную маску /ширина щелей 1 мм, расстояние между центрами - 2,5 мм/. Позиционное разрешение для шестого пика - 0,3 мм. Нелинейность < 1%.

низкая скорость счета при использовании стандартных α -источников.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение работы позиционно-чувствительных детекторов с различными резистивными слоями показало, что наиболее линейными получились резистивные слои, изготовленные методом диффузии лития. Воспроизводимость однородных диффузионных резистивных слоев достигает 100%. Для напыленных слоев воспроизводимость не превышала 20%. Кроме того, литиевые резистивные слои оказались достаточно стабильными во времени. Все детекторы, изготовленные по диффузионной технологии, не ухудшили линейности $< 1\%$ в течение 8 месяцев работы.

Результаты исследования шумовых характеристик резистивных слоев, приведенные в работе, показывают, что хотя диффузионные и имплантированные слои дают неинжектирующие задние контакты детекторов, тем не менее возникает проблема создания хороших омических контактов к самим слоям. Противоположная ситуация наблюдается в случае напыленных резистивных слоев. Известно, что практически все напыленные металлические пленки создают выпрямляющий контакт на протравленном высокоомном кремнии после выдержки их на воздухе.

Авторы приносят благодарность Б.Амову за изготовление имплантированных резистивных слоев.

ЛИТЕРАТУРА

1. Layterjung K.H. e.a. *Nucl.Instr.Meth.*, 1963, 22, p. 117.
2. Ludwig E.J., Gibson W.M., Hood J.S. *IEEE Trans. on Nucl.Sci.*, NS-12, 1965, 247.
3. Ludwig E.J. *Rev.Sci.Instr.*, 1965, 36, p. 1175.
4. Bock R. e.a. *Nucl.Instr.Meth.*, 1966, 41, p. 190.
5. Doehring A., Kalbitzer S., Melzer W. *Nucl.Instr.Meth.*, 1968, 59, p. 40.

6. Melzer W., Puhlhofer F. *Nucl.Instr.Meth.*, 1968, 60, p. 201.
7. Lagsgaard E., Martin F.W., Gibson W.M. *Nucl.Instr.Meth.*, 1968, 60, p. 24.
8. Owen R.B., Awcock M.L. *IEEE Trans. on Nucl.Sci.*, NS-15, 1968, 290.
9. Артемов В.С. и др. *ПТЭ*, 1972, №3, с. 59.
10. Gigante J.R. *Nucl.Instr.Meth.*, 1973, 111, p. 345.
11. Elad E., Sareen R. *IEEE Trans. on Nucl.Sci.*, NS-21, 1974, p. 75.
12. Kalbitzer S., Melzer W. *Nucl.Instr.Meth.*, 1967, 56, p. 301.
13. Pell E.M. *Phys.Rev.*, 1960, 119, p. 1014.

Рукопись поступила в издательский отдел
28 февраля 1978 года.