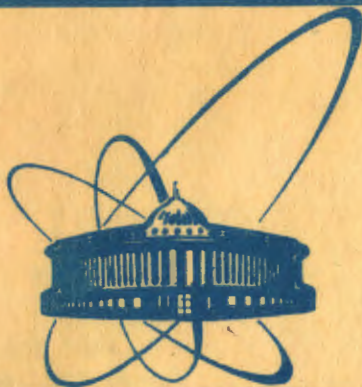


82-90



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

2324 / 82

17/v-82

13-82-90

В.Г.Сандуковский

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ
ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ
ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

1982

ВВЕДЕНИЕ

В экспериментальной ядерной физике известны в основном четыре типа детекторов, предназначенных для регистрации координат исследуемых частиц: фотоэмульсионные детекторы, газовые счетчики /различные проволочные камеры/, микроканальные датчики и полупроводниковые детекторы. Использование того или иного типа позиционно-чувствительных детекторов /ПЧД/ диктуется потребностями конкретного физического измерения. Прогресс в применении полупроводниковых ПЧД для решения ряда задач ядерной физики и смежных наук связан с наличием определенных преимуществ этого класса приборов перед другими методами регистрации. Прежде всего – это возможность получения одновременной информации о координате и энергии заряженных частиц при хорошей линейности, энергетическом и позиционном разрешении.

Развитие однокоординатных полупроводниковых ПЧД было стимулировано желанием получить полностью электронное решение детектирования частиц в магнитных спектрографах. По сравнению с обременительной методикой фотопластинок использование полупроводниковых счетчиков дает возможность вести сбор данных в он-лайн режиме. Более того, энергетический сигнал позволяет легко идентифицировать частицы, т.к. частицы с различными массами, но одинаковой магнитной жесткостью имеют различные энергии. Первое применение полупроводникового ПЧД сделано в начале 60-годов^{1/}, почти сразу за появлением обычных полупроводниковых счетчиков.

Принцип работы этого детектора был основан на резистивном делении созданного частицей заряда. Из-за малого размера счетчика /~2 см/ и нелинейности позиционного съема он оказался малопригодным в качестве детектора магнитного спектрометра. В последующие годы было показано использование для магнитной спектрометрии более совершенных полупроводниковых ПЧД, как отдельных детекторов с резистивным делением^{2,3/}, так и систем из нескольких детекторов^{4,5/}, а также детекторов дискретного типа^{6,7/} Ниже рассматриваются различные типы полупроводниковых ПЧД, принцип их работы, а также требования, предъявляемые к электронике для получения оптимальной линейности и разрешающей способности приборов.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ

Работа любого полупроводникового счетчика основана на регистрации заряда, созданного в обедненной носителями области детектора падающим излучением. В зависимости от способа индикации позиции частицы ПЧД можно разделить на два класса: непрерывные и дискретные. Оба класса позволяют изготавливать однокоординатные и двухкоординатные детекторы.

А. Наибольшее распространение получили непрерывные детекторы, в которых собранный заряд делится на резистивном электроде /рис. 1а/. Если сопротивление электрода /который может быть как верхним, так и нижним/ однородно и используются предусилители с низким входным импедансом, то часть заряда, достигшая одного из концов, будет точно пропорциональна расстоянию между точкой прохождения частицы и другим концом резистивного слоя /рис. 1г/, т.е.

$$Q_{x2} = Q_0 \cdot x/l, \quad /1/$$

где Q_0 - полный заряд, созданный частицей.

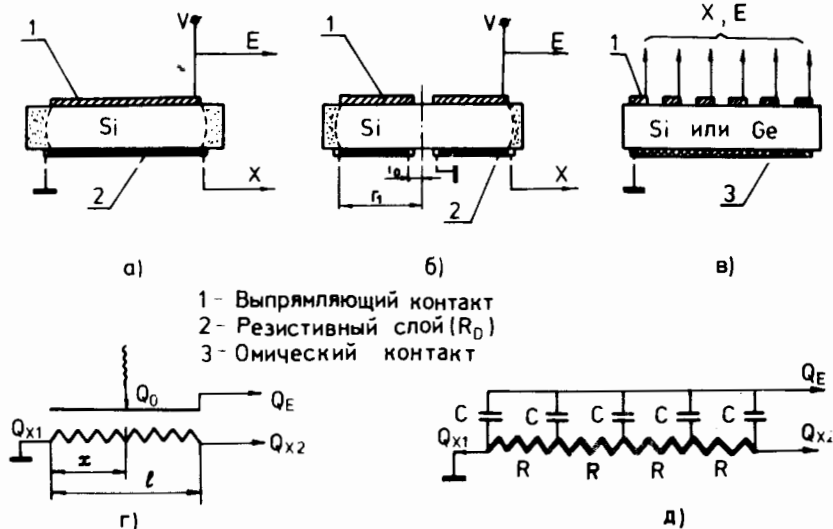


Рис. 1. Схемы полупроводниковых позиционно-чувствительных детекторов: а - непрерывный однокоординатный детектор с резистивным слоем; б - радиальный непрерывный детектор; в - дискретный детектор; г - схема деления заряда на резистивном электроде; д - эквивалентная схема позиционного детектора в виде непрерывно распределенной RC-цепи.

В зависимости от метода изготовления резистивного слоя в непрерывных детекторах можно выделить четыре типа:

- слой, образованные необедненной областью базового материала детектора /1,8/;
- слой, полученные напылением металла /4,9-14/;
- слой, полученные имплантацией фосфора или бора /2,3,15-18/;
- диффузионные слои /2,13,19,21/.

Первые два типа резистивных слоев показали нелинейность, которая связана с неоднородностью кремния или тонкого слоя напыленного металла. Поэтому наибольшее распространение получили детекторы с имплантированными слоями. Такие счетчики имеют нелинейность лучше 1% и дают хорошее позиционное разрешение $\sim 0,5\%$ /39/.

Перспективными, на наш взгляд, могут оказаться кремниевые детекторы с резистивными слоями, изготовленными методом низкотемпературной диффузии лития /13,20,21/, у которых нелинейность значительно лучше 1%. При этом исключается такое дорогостоящее оборудование, как имплантатор.

Определенный интерес для ряда задач представляют приборы с радиальной позиционной чувствительностью /2,22/ /рис. 1б/. Такие детекторы не дают сигнала, линейно пропорционального радиусу падения частицы, если используется однородный резистивный слой между внутренним и внешним контактами. Отклик детектора $Q(r)$ будет пропорционален $\ln(\frac{r}{r_0})/\ln(\frac{r_1}{r_0})$, где r_0 и r_1 - внутренний и внешний радиусы. Можно получить линейный отклик, если попытаться сделать резистивный слой с градиентом проводимости, пропорциональным радиусу, или градиентом толщины слоя, обратно пропорциональным радиусу.

Б. С развитием теории деления заряда на резисторе и разработок полупроводниковых ПЧД стало ясно, что непрерывные детекторы не будут удобны для регистрации низко-энергетических излучений. Более перспективными приборами для этой области являются ПЧД дискретного типа - приборы, у которых несколько отдельных детекторных элементов размещены на одном базовом материале /рис. 1в/. Каждый элемент может быть соединен с собственным предусилителем и последующей электроникой. Детекторы дискретного типа часто называют стрип-детекторами, а двухкоординатные - "шахматная доска" или матричные детекторы.

Первый стрип-детектор продемонстрирован в 1966 году /23/. В дальнейшем вопросы изготовления и использования детекторов дискретного типа были описаны рядом авторов /6,7,24-28/. Следует отметить еще один важный фактор, стимулировавший разработки таких детекторов. Скорость счета непрерывных детекторов достаточно низка, т.к. только одно событие в данный момент может

быть обработано. Кроме того, временное разрешение нельзя сравнивать с обычным полупроводниковым детектором из-за координатной зависимости времен нарастания сигналов. Поэтому для получения временной информации, особенно в экспериментах на совпадение /7/, использование стрип-детекторов может значительно улучшить временное разрешение и загрузочные характеристики. К сожалению, необходимость иметь усилительный тракт на каждый электрод создает очень высокие требования к внешней электронике. Для уменьшения электроники, связанной с большим количеством элементов, был показан специальный матрично-адресный метод, использующий только 30 усилителей для 224 элементов детектора /26/.

Потребность в двухкоординатных детекторах с большой площадью для медицинских целей стимулировала разработки дискретных ПЧД из германия для низко- и среднеэнергетичных γ -квантов /27-31/.

2. РАБОТА ДЕТЕКТОРА С РЕЗИСТИВНЫМ ДЕЛЕНИЕМ ЗАРЯДА

Теоретический анализ работы ПЧД с резистивным делением заряда был подробно сделан в работах /32,11,2/ на основе простой модели, которая представляет ПЧД как непрерывную однородно распределенную RC-линию /рис.1д/. При этом предполагается, что рабочая область детектора распространяется от верхнего до нижнего электродов, процесс разряда заряда Q_0 на соответствующей локальной емкости C представляется в виде δ -функции, т.е. время собирания носителей мало по сравнению с характеристической временной константой прибора ($\tau_{\text{соб}} \ll \tau_D = R_D C_D$), где R_D - сопротивление резистивного слоя, C_D - емкость детектора.

Математическое описание процесса передачи заряда к выводам резистивного электрода представляется дифференциальным уравнением /32/:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\ell^2}{r_D} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \right). \quad /2/$$

Его решение и последующие преобразования дают собранный на позиционном контакте заряд, который зависит от времени и места попадания частицы /33/:

$$Q_{x2} = Q_0 \left[\frac{x}{\ell} - 2 \sum_{n=1}^{\infty} (\pi n)^{-1} \sin(n\pi x/\ell) (1 - \cos n\pi) \exp(-n^2 \pi^2 t/\tau_D) \right]. \quad /3/$$

Для энергетического сигнала будем иметь:

$$Q_E = -Q_0 \left[1 - 2 \sum_{n=1}^{\infty} (\pi n)^{-1} \sin(n\pi x/\ell) (1 - \cos n\pi) \exp(-n^2 \pi^2 t/\tau_D) \right]. \quad /4/$$

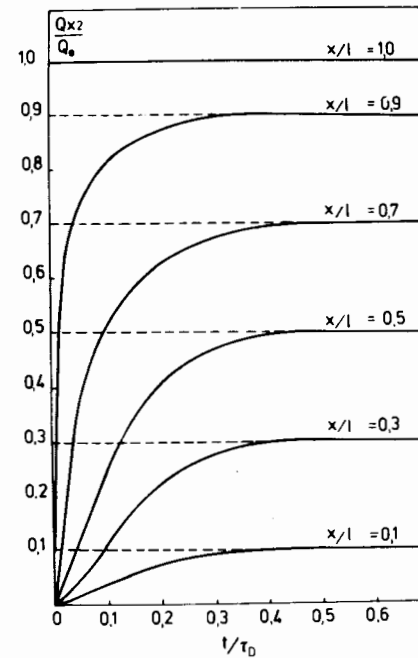


Рис.2. Зависимость заряда на выходе позиционного сигнала детектора от времени съема для ряда позиций падающих на детектор частиц.

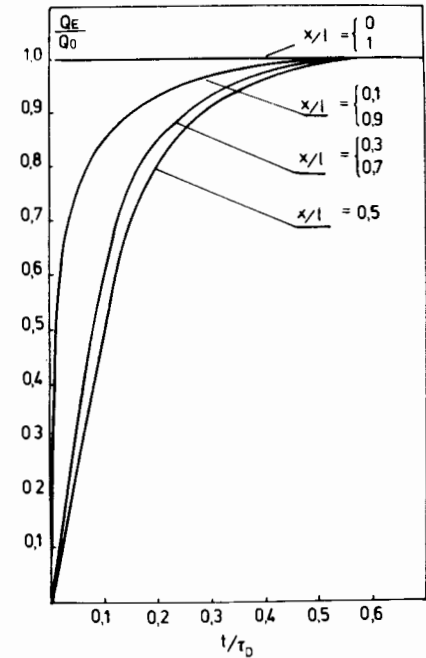


Рис.3. Зависимость заряда на выходе энергетического сигнала позиционного детектора от времени съема для ряда позиций падающих на детектор частиц.

Из выражений /3/ и /4/ можно получить заряды, собранные за бесконечное время. В первом случае получим равенство /1/, во втором $Q_E = -Q_0$. Видно, что позиционный сигнал является линейной функцией позиции, а энергетический не зависит от координаты падающей частицы. Равенства /3/ и /4/ получены на основе однокоординатной распределенной RC-линии /рис.1д/, т.е. без учета ширины резистивного слоя. Теоретические исследования /34/ показали, что ширина резистивного слоя не влияет на деление заряда, описываемое уравнениями /3/ и /4/, и проблема сводится к однокоординатному случаю.

Зависимость от времени позиционного и энергетического сигналов является определяющим фактором возникновения нелинейности детектора. На рис.2,3 показаны результаты машинной обработки /32/ Q_{x2} и Q_E для ряда позиций частиц, падающих на детек-

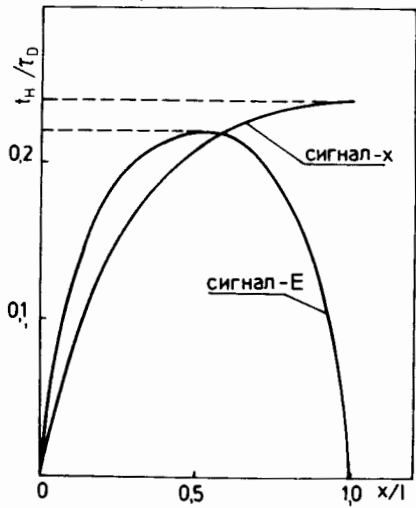


Рис.4. Зависимость времени нарастания позиционного и энергетического сигналов детектора от координаты падающих частиц.

Рис.5. Блок-схема амплитудного метода съема сигнала с непрерывного позиционно-чувствительного детектора: а - однокоординатный детектор, б - двухкоординатный детектор.

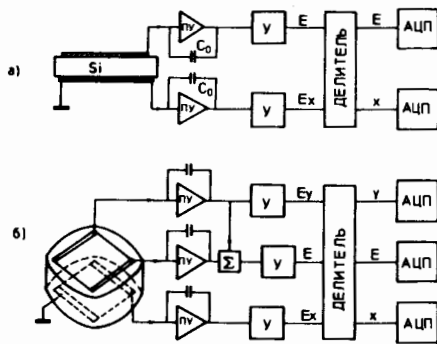
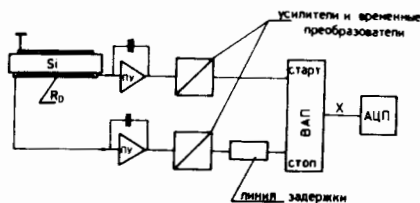


Рис.6. Блок-схема временного метода съема сигнала с непрерывного позиционно-чувствительного детектора.

тор. Видно, что заряд на выходе линейно соответствует позиции, когда время съема больше $0,5\tau_D$. Рис.4 иллюстрирует зависимость времени нарастания позиционного и энергетического сигналов от координаты события.

Зависимость амплитуды и времени нарастания сигнала полупроводникового ПЧД определила два основных способа обработки сигнала для определения координаты:

- амплитудный метод, основанный на резистивном делении заряда /2, 19, 10, 11, 33, 35/;
- временной метод, основанный на измерении формы сигнала /2, 36-38/.

Блок-схемы обоих методов показаны на рис.5 и 6. В работе /38/ рассмотрены относительные достоинства каждого метода и сделан вывод о том, что первый метод больше подходит для полупроводниковых детекторов. Временной метод дает значительное отклонение от линейности вблизи концов резистивного слоя. Поэтому обычно при использовании этого метода определяют среднюю нелинейность только для центральной части детектора /порядка 75-85% длины детектора/. Кроме того, шум позиционного канала, полученный с использованием временного метода, значительно выше, чем в амплитудном /39/.

3. ЛИНЕЙНОСТЬ И РАЗРЕШЕНИЕ. АМПЛИТУДНЫЙ МЕТОД

Из-за различия времени нарастания и конечности постоянных формирования сигнала в усилителе амплитуда переданного импульса зависит от соотношения времени формирования усилителя τ_A и нарастания сигнального импульса. Если τ_A/τ_D мало, возникающий баллистический дефицит* приводит к ухудшению линейности позиционного и энергетического сигналов. При этом величина нелинейности зависит не только от τ_A/τ_D , но также от передаточной функции усилителя, т.е. от типа формирующих цепей.

Принято считать характеристики детектора линейными, если баллистический дефицит энергетического сигнала в центре детектора $i/x=0,5l$ меньше i_0 . Из этого условия вытекает верхний предел для τ_D . В ряде работ были проделаны численные расчеты для различных типов формирующих цепей: CR-RC/2, 11, D-RC/11/, CR-RC²/19/, а также для трапецеидального фильтра и усилителя с активными фильтрами /39/. Так, например, для D-RC фильтров:

$$R_D \cdot C_D \leq 1,68 \tau_A, \quad /5/$$

$$\text{для CR-RC: } R_D \cdot C_D < 1,87 \tau_A, \quad /6/$$

$$\text{для CR-RC}^2: R_D \cdot C_D \leq 2,5 \tau_A, \quad /7/$$

где CR- дифференцирование, RC- интегрирование, D - дифференцирование на линии задержки, причем $\tau_H = \tau_{\text{диф}} = \tau_A$. Исследования различных фильтров показали, что наилучшее формирование импульса получается с трапецеидальным фильтром /33/. На практике баллистический дефицит оценивается по разнице амплитуд энергетического сигнала, полученного из середины и края детек-

*Баллистический дефицит - разница, полученная на выходе усилителя между амплитудой импульса, имеющего фронт нарастания, и амплитудой ступенчатого сигнала той же величины.

тора. Без большой ошибки можно считать детектор линейным практически для всех типов фильтров, если выполняется условие

$$\tau_D \leq 2\tau_A.$$

Для сравнения различных типов формирующих цепей и постоянных времени формирования удобно выражать нелинейность в средне-квадратичных величинах, находя по методу наименьших квадратов корреляционный коэффициент γ . Для ряда измерений более важной величиной является дифференциальная линейность dp/dx , где dp - измеренная, dx - истинная позиции. Дифференциальная линейность отражает полезный выход набранного спектра.

Для амплитудного метода съема обычно производится деление позиционного сигнала на энергетический /рис.5/. Деление сигналов не только устраняет зависимость позиционной информации от энергии регистрируемых частиц, но также уменьшает нелинейность. Как было показано в работе /34/, деление позволяет уменьшить баллистический дефицит с 4% до 1% для усилителя с однократным дифференцированием и однократным интегрированием. Для нормализации сигнала необходим быстрый делитель цифрового или аналогового типа, имеющий нелинейность /-1%/ в большом динамическом диапазоне, а также мертвое время, сравнимое с последующим анализирующим устройством. Выпускаемые коммерческие делители /35/ имеют достаточно большое мертвое время - 12 мкс.

Резистивный делитель создает собственный тепловой шум как в позиционном, так и в энергетическом каналах. Вторым важным источником шума является эквивалентное шумовое сопротивление предусилителя. Шумами токов утечки можно пренебречь, т.к. путем охлаждения детектора их можно снизить до незначительной величины. Для вычисления шума необходимо знать импеданс детектора (Z_D), соединенного с предусилителем /рис.7а/.

Найдено /11/, что импеданс детектора для позиционного канала

$$Z_{D_x} = Z_0 \operatorname{tgh}(\omega R_D C_D)^{1/2}, \quad /8/$$

а для энергетического

$$Z_{D_E} = \frac{1}{2} Z_0 \operatorname{ctgh} \frac{1}{2} (\omega R_D C_D)^{1/2}, \quad /9/$$

где $Z_0 = (R_D / i\omega C_D)^{1/2}$, $\omega = 2\pi f$.

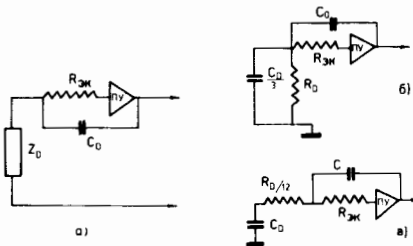


Рис.7. Эквивалентная схема позиционный детектор - предусилитель, необходимая для анализа шума /без учета токов утечки/: а - общая схема, б - позиционный канал, в - энергетический канал.

Как показано в работе /2/, без серьезных ошибок можно использовать низкочастотную аппроксимацию при условии $\tau_D = 2\tau_A$

$$\frac{1}{Z_{D_x}} \approx \frac{1}{R_D} + \frac{i\omega C_D}{3}, \quad /10/$$

$$Z_{D_E} \approx \frac{R_D}{12} + \frac{1}{i\omega C_D}. \quad /11/$$

Отсюда можно дать эквивалентную цепь детектор-предусилитель для анализа шума позиционного и энергетического каналов /рис.7б,в/. Зная R_D , C_D , тип фильтра и величину постоянных формирования, можно вычислить полный шум, который принято разделять на две компоненты: последовательный /пропорциональный входной емкости/ и параллельный /обратно пропорциональный квадратному корню из параллельного сопротивления/. Такие расчеты были выполнены для различных формирующих цепей: CR-RC /2,11/, D-RC /11,34/, CR-RC² /19/, трапецеидального /33,38/ и активного /39/ фильтров. Так, например, было показано, что в случае D-RC формирования с $\tau_A = 0,7 \mu\text{с}$ для детекторов, имеющих $R_D C_D = 1,2 \mu\text{с}$, позиционное и энергетическое разрешение будет

$$(\Delta E_x)^2 = 4 \cdot 10^{-3} C_D^2 + 11,5 \cdot C_D / \text{кэВ для Si} /, \quad /12/$$

$$(\Delta E)^2 = 9,3 \cdot 10^{-3} C_D^2 + 3,4 C_D / \text{кэВ для Si} /, \quad /13/$$

где C_D в пФ.

Эквивалентное шумовое сопротивление предусилителя принималось равным 250 Ом, температура 300 К.

Для CR-RC² фильтров /39/:

$$\Delta E_x = 7,3 \cdot 10^{19} \left[\frac{3kT\tau_A}{R_D} \left(1 + \frac{R_{\text{Эк}}}{R_D} + \frac{C_D^2 R_{\text{Эк}} R_D}{192\tau_A^2} \right) \right]^{1/2} / \text{эВ} /, \quad /14/$$

$$\Delta E = 7,3 \cdot 10^{19} C_D \left[\frac{kTR_{\text{Эк}}}{\tau_A} \left(1 + \frac{R_D}{48R_{\text{Эк}}} \right) \right]^{1/2} / \text{эВ} /, \quad /15/$$

где k - постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23}$ Кл.В/К, T - температура /К/, R /Ом/, C /пФ/, τ /с/.

Для трапецеидального фильтра /33/:

$$\Delta x/x \approx 2,54 (kTC_D)^{1/2} / Q_0, \quad /16/$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Кл.В/К, T /К/, Q_0 /Кл/, C_D /пФ/.

Приведенные равенства рассчитывались при условии, что баллистический дефицит $\leq 1\%$. На рис.8 для примера показаны зависимости шума позиционного и энергетического каналов от сопротивления резистивного слоя. Кривые рассчитаны для детектора с емкостью $C = 150$ пФ, эквивалентного шумового сопротивления предусилителя $R_{\text{Эк}} = 250$ Ом и $\tau_A = 0,7 \mu\text{с}$ (D-RC) /11/. Видно, что шум позиционного канала падает приблизительно как $R^{-1/2}$.

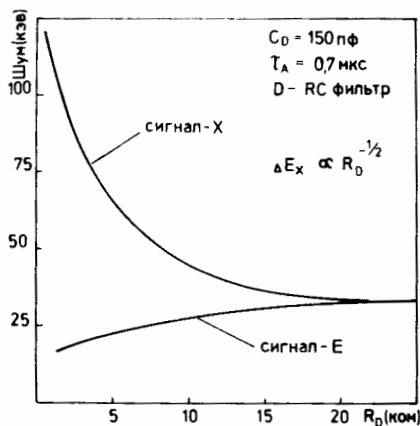


Рис. 8. Зависимости шума позиционного и энергетического сигналов от величины сопротивления резистивного слоя, рассчитанные для детектора емкостью 150 пФ и формирующих сигнал цепей типа D-RC, имеющих время интегрирования и дифференцирования равными 0,7 мкс.

Зная шум позиционного канала, можно оценить величину позиционного разрешения ^{/2/}

$$\Delta x (\text{мм}) = \frac{\Delta E_x (\text{кэВ}) \ell (\text{мм})}{E (\text{кэВ})}, \quad /17/$$

где ℓ - длина детектора, E - энергия регистрируемого излучения. Если учитывать нормализацию позиционного сигнала на энергетический, то разрешение из-за шума энергетического канала ухудшается ^{/39/}:

$$\Delta x = \frac{[\Delta E_x^2 + (\Delta E \cdot x/\ell)^2]^{1/2}}{E}, \quad /18/$$

Проведенные исследования с непрерывными позиционно-чувствительными детекторами выявляют следующие тенденции, которые необходимо учитывать при создании детекторов и проведении с ними физических измерений:

- хорошая линейность требует большого времени формирования (r_A) или малого сопротивления резистивного слоя R_D /из условия $R_D C_D \leq 2r_A$ /;
- хорошее позиционное разрешение требует короткого времени формирования и как можно большего сопротивления R_D , т.к. $\Delta E_x \propto (T \cdot r_A / R_D)^{1/2}$;
- позиционное разрешение обратно пропорционально энергии регистрируемого излучения.

Решение возникающего противоречия между линейностью и разрешением зависит от реального эксперимента, особенно для низкоэнергетических частиц, т.к. в этом случае очень важно достаточно точно определить оптимальное время формирования импульса.

Уменьшение уровня шума можно получить путем снижения температуры детектора, что приведет к падению не только токов утечки, но и теплового шума резистивного слоя.

Итак, как было показано, основой хорошей работы ПЧД является удовлетворение требований, которые предъявляются к сигналу, т.е. получение оптимальной фильтрации в соответствии с линейностью и разрешением.

Помимо сказанного, при работе с непрерывными ПЧД следует учитывать еще два важных фактора, влияющих на позиционное разрешение и истинность позиционной информации - это угол падения частиц на детектор и размытие центра тяжести зарядового распределения. До сих пор, рассматривая работу детектора, мы полагали, что зарядовое распределение в начальный момент ($t=0$) точечное. На самом деле при остановке заряженных частиц в твердом теле их траектории сильно зависят от многократных рассеяний на ядрах. Образование свободных зарядов происходит вдоль трека частицы, что приводит к размытию в центре тяжести позиции образованных электронно-дырочных пар. Этот эффект особенно проявляется в случае легких высокоэнергетических частиц и может преобладать над вышеописанными источниками ухудшения разрешения. Если принять, что образованный заряд распределен с плотностью $q(x)$ в некотором конечном интервале $0 < a \leq x \leq b < \ell$, то заряд, собранный на одном из позиционных контактов, есть позиционно взвешенная сумма ^{/34/}:

$$Q_x = \int_a^b \frac{x}{\ell} q(x) dx = \frac{Q_0}{\ell} X_{Ц}, \quad /19/$$

где $X_{Ц}$ - координата центра тяжести зарядового распределения. Если центр тяжести совпадает с позицией падения частицы, мы имеем истинную позиционную информацию. Для частиц, падающих под косым углом, центр тяжести зарядового распределения будет отличаться от действительного места падения частицы. Кроме того, разброс пробега будет давать вклад в ухудшение разрешения особенно в случае длиннопробежных частиц.

Для тяжелых частиц позиционное разрешение практически не зависит от этого эффекта, т.к. пробег частиц мал.

4. ИЗГОТОВЛЕНИЕ НЕПРЕРЫВНЫХ ДЕТЕКТОРОВ. ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК

Вопросы технологии изготовления непрерывных ПЧД обсуждались в работах об однокоординатных ^{/2,3,10,13,16,17-20/} и двухкоординатных ^{/2,15,21,40/} счетчиках. Коммерческие полупроводниковые ПЧД выпускаются только двумя изготовителями, фирмами "Schlumberger" и ORTEC. Это однокоординатные ПЧД из кремния с имплантированным резистивным слоем, имеющие нелинейность порядка 1% и позиционное разрешение ~1% длины детектора для α -частиц с энергией 5,5 МэВ.

Как правило, выпускаемый промышленностью кремний имеет удельное сопротивление ρ , не превышающее $10 \text{ кОм}\cdot\text{см}$, и удовлетворительную однородность в лучшем случае на длине слитка $\leq 100 \text{ мм}$. Однородность по длине слитка и ρ определяют максимальные размеры и емкость изготавливаемого детектора. Исходя из емкости и времени формирования, изготовитель может определить необходимую величину сопротивления резистивного слоя $R_D \leq 2r_A / C_D$. Далее, в зависимости от технологии изготовления резистивного слоя, можно оценить дозу облучения и температуру отжига /17// в случае имплантации/ или температуру и время диффузии /13,20// в случае диффузионной методики/. Зная R_D и C_D , а также тип формирования сигнала и энергию регистрируемых частиц, можно оценить позиционное разрешение /формулы /12/, /14/, /16/-/18//. Согласие теоретических оценок с реальными характеристиками зависит от совершенства технологии изготовления детектора, т.е. от величины обратных токов детектора и шума контактов к резистивному слою /13/.

Для примера оценим позиционное разрешение для детектора, изготовленного из кремния, имеющего следующие параметры: $\rho = 10 \text{ кОм}\cdot\text{см}$, размер детектора $25 \times 5 \text{ мм}$.

При напряжении на детектор $U_D = 120 \text{ В}$ емкость будет $C_D = 30 \text{ пФ}$. Если взять $r_A = 0,5 \mu\text{с}$, то имеем $R_D \leq 33,3 \text{ кОм}$.

Из равенства /14/ для формирования $CR-RC^2$, $T = 300 \text{ К}$ и $R_{\text{эк}} = 250 \text{ Ом}$, получим шум позиционного канала $E_x = 31,5 \text{ кэВ}$.

Для α -частиц энергией $5,5 \text{ МэВ}$ из /17/ имеем $\Delta x = 0,143 \text{ мм}$.

В работе /13/ описан детектор размером $25 \times 5 \text{ мм}$, изготовленный из кремния с $\rho = 10 \text{ кОм}\cdot\text{см}$, который имел резистивный слой 35 кОм и разрешение $0,3 \text{ мм}$ для α -частиц энергией $5,5 \text{ МэВ}$. Ток утечки детектора при $T = 300 \text{ К}$ составлял $2,0 \mu\text{А}$. Вклад в шум позиционного канала за счет тока утечки для $CR-RC^2$ формирования будет /19/:

$$\Delta E_I = 34,4 (I \cdot r_A)^{1/2} / \text{кэВ} /, \quad /20/$$

где I - ток утечки в $\mu\text{А}$, r_A - время формирования в $\mu\text{с}$.

С учетом /20/ шум позиционного канала будет $E_x' = (\Delta E_x^2 + \Delta E_I^2)^{1/2} = 46,4 \text{ кэВ}$, что дает $\Delta x = 0,21 \text{ мм}$. Измеренное Δx было $\sim 0,3 \text{ мм}$.

Расхождение рассчитанной и измеренной величины позиционного разрешения, вероятно, связано с недостатками метода измерения разрешения с помощью щелевидного коллиматора и α -источника. Для адекватного измерения разрешения таким способом ширина щелей должна быть либо значительно меньше, либо больше предполагаемого разрешения. В первом случае получается спектр, состоящий из пиков гауссиановской формы, и позиционным разрешением будет ширина пика на полувысоте. Во втором случае пики будут иметь плато, и разрешение определяется из наклона сторон пика /число каналов анализирующего устройства между 12% и 88%

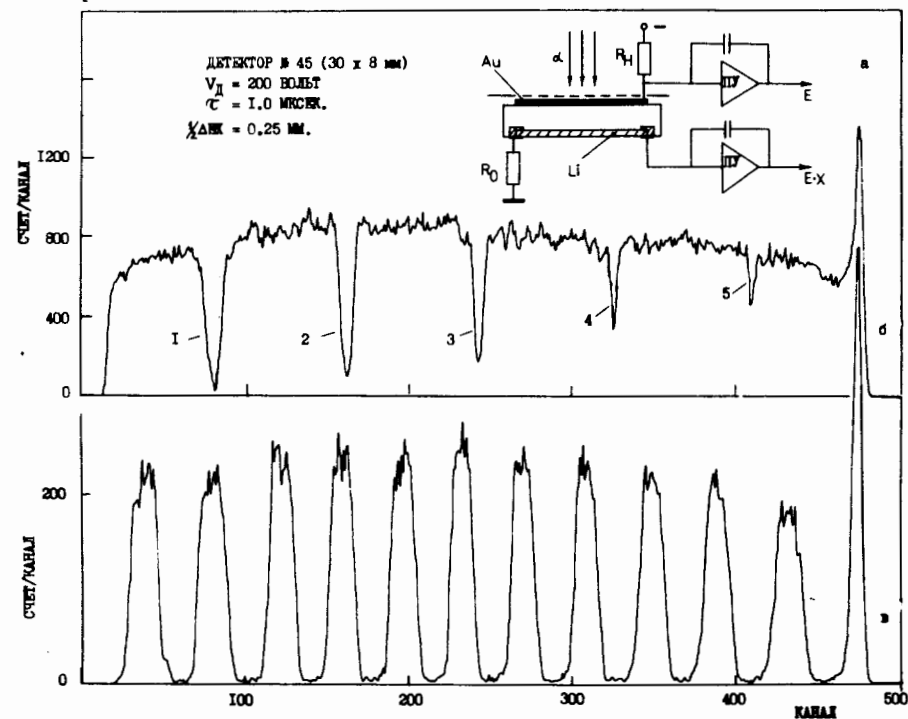


Рис.9. Измерение линейности и позиционного разрешения детекторов с помощью α -частиц ^{241}Am : а - схема измерения; б - позиционный спектр α -частиц, падающих на детектор через нитевидную маску; диаметры нитей: 1 - $0,46 \text{ мм}$, 2 - $0,4 \text{ мм}$, 3 - $0,3 \text{ мм}$, 4 - $0,2 \text{ мм}$, 5 - $0,1 \text{ мм}$; в - позиционный спектр α -частиц, падающих на детектор через щелевидный коллиматор.

высоты пика/. Этот метод позволяет также определить средне-квадратичную линейность, т.к. расстояние между щелями коллиматора точно известно. На рис.9в показан типичный позиционный спектр α -частиц ^{241}Am . Ширина щелей - 1 мм , расстояние между центрами - 2 мм . На верхнем рисунке /9а/ дан отклик детектора на α -частицы, падающие через маску в виде нитей различного диаметра. Согласие измеренного и рассчитанного позиционных разрешений зависит от хорошей геометрии измерения.

В другом методе измерения линейности и разрешения используются /17,21/ GaAs-светодиоды с микрометрическим перемеще-

нием. Световой сигнал нормализуется к сигналу от 5,5 МэВ α -частиц. Эта методика позволяет быстро набирать спектр и исключает геометрические ошибки α -методики через щели.

Позиционное разрешение можно также определить, измеряя шум позиционного канала с последующей нормировкой его в единицах длины

$$\Delta x = 2,35 \frac{E_x [\text{МВ}] \cdot \ell [\text{мм}]}{E [\text{МВ}]} \quad /21/$$

Итак, как было показано, стремление иметь хорошее позиционное разрешение при нелинейности $\leq 1\%$ требует изготовления детекторов из материала с максимально возможным удельным сопротивлением для того, чтобы иметь малую емкость. Некоторым решением этой проблемы является создание резистивных слоев на Si (Li) -детекторах /9,19-21/.

5. ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЧД

Уже говорилось об успешном использовании полупроводниковых ПЧД в фокальной плоскости магнитных спектрометров. Но это не единственное применение, которое нашли полупроводниковые позиционно-чувствительные детекторы.

В экспериментах по рассеянию, по изучению углового и энергетического распределений продуктов ядерных реакций использовались как непрерывные, так и дискретные ПЧД. Так, измерения поляризации протонов, рассеянных на углероде /41/, были бы невозможны без одновременной регистрации позиции и энергии, которая осуществлялась с помощью двух однокоординатных детекторов. Широкое применение нашли ПЧД в экспериментах по исследованию угловых корреляций между фрагментами деления, получаемыми легкими ионами /42/. Было показано использование ПЧД при определении коротких времен жизни компаунд-ядер /43/. С помощью двухкоординатного тонкого / $\sim 20 \mu\text{м}$ / детектора была решена проблема выделения обратно рассеянных ионов азота, кислорода и фтора в экспериментах по изучению деления под действием тяжелых ионов /44/.

Двухкоординатные стрип-детекторы использовались в изучении времени реакций в Ge (p,p') -реакциях /45/.

Было продемонстрировано применение однокоординатного детектора в измерениях малоуглового многократного рассеяния /46/. Для исследования интенсивности и углового распределения частиц в стратосфере была показана возможность использования однокоординатного детектора для регистрации протонов с энергией ниже 1 МэВ /47/.

Успешное применение начинают находить полупроводниковые ПЧД в биологических и медицинских исследованиях /28,29,48/.

Например, при изучении больших протеиновых молекул с помощью низкоэнергетических γ -лучей использовался дискретный двухкоординатный Ge (Li)-детектор /25/.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Возможности применения полупроводниковых позиционно-чувствительных детекторов в различных областях физики растут с каждым годом. Однако отсутствие широкого промышленного производства этого класса приборов ограничивает их использование в эксперименте. Как было показано выше, в лабораторных условиях изготавливаются позиционно-чувствительные детекторы, отвечающие потребностям целого ряда исследований, где необходима информация о координате заряженных частиц или γ -квантов.

Непрерывные детекторы имеют преимущества перед дискретными ПЧД в разрешении и простоте электроники /за исключением регистрации низкоэнергетических легких частиц/, но проигрывают по временным и загрузочным характеристикам. Поэтому при использовании полупроводниковых ПЧД необходимо исходить из потребностей конкретного эксперимента. Так, в ряде задач определения тонких пространственных деталей целесообразней использовать непрерывные детекторы малого размера /оценка разрешения детектора длиной 1 мм дает величину 2 мкм для α -частиц энергией 5 МэВ/. Ограничения в изготовлении непрерывных детекторов больших размеров связаны с трудностями в получении исходного полупроводника с высоким удельным сопротивлением и достаточной степенью однородности на большой длине слитка. Для однокоординатного непрерывного детектора размером $200 \times 5 \text{ мм}^2$, изготовленного из кремния с удельным сопротивлением $10000 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, возможно получить при комнатной температуре разрешение не хуже 3 мм для α -частиц энергией 5 МэВ. Позиционное разрешение лучше 1% /для α -частиц/ возможно для детектора такого размера, если исходный кремний будет иметь удельное сопротивление более $30000 \text{ Ом}\cdot\text{см}$.

При работе с непрерывными ПЧД следует помнить об ограничениях, накладываемых на линейность и разрешение, связанных с природой процессов образования заряда в объеме детектора, передачей созданного заряда по распределенной RC-линии и типом формирующих цепей электроники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lauterjung K.H. et al. Nucl. Instr. and Meth., 1963, 22, p.117.

2. Owen R.B., Awcook M.L. IEEE Trans. on Nucl.Sci., 1968, NS-15, p.290.
3. Lagsgaard E., Martin F.W., Gibson W.M. IEEE Trans. on Nucl.Sci., 1968, NS-15, p.239.
4. Bock R. et al. Nucl.Instr. and Meth., 1966, 41, p.190.
5. Daenick W.W. Phys.Rev., 1969, 177, p.1763.
6. Haase E.L. et al. Nucl.Instr. and Meth., 1971, 97, p.465.
7. Lagsgaard E., Andersen J.U., Lund M. Phys.Fenn., 1974, 9, p.52.
8. Chaszczewska J., Krogulski T., Tys J. Nucleonika, 1969, 1, p.11.
9. Ludwig E.J. Rev.Sci.Instr., 1965, 36, p.1175.
10. Melzer W., Puhlhofer F. Nucl.Instr. and Meth., 1968, 60, p.201.
11. Doehring A., Kalbitzer S., Melzer W. Nucl.Instr. and Meth., 1968, 59, p.40.
12. Кушнирук В.Ф., Никитина Р.А. ОИЯИ, 13-4612, Дубна, 1969.
13. Бельцаж Е., Осипенко Б.П., Сандуковский В.Г. ОИЯИ, 13-11355, Дубна, 1978.
14. Евсеев И.И. и др. ПТЭ, 1979, 4, с.97.
15. Kalbitzer S. et al. Nucl.Instr. and Meth., 1967, 54, p.323.
16. Lagsgaard E., Martin F.W., Gibson W.M. Nucl.Instr. and Meth., 1968, 60, p.24.
17. Elad E., Sareen R. IEEE Trans. on Nucl.Sci., 1974, NS-21, p.75.
18. Виноградова В.Г., Еремин Н.В., Козей И.В. ПТЭ, 1978, 5, с.47.
19. Gigante J.R. Nucl.Instr. and Meth., 1973, 111, p.345.
20. Бельцаж Е., Осипенко Б.П., Сандуковский В.Г. ОИЯИ, 13-12766, Дубна, 1979.
21. Walton J.T. et al. IEEE Trans. on Nucl.Sci., 1979, NS-26, p.334.
22. Feuerstein A., Kalbitzer S. Nucl.Instr. and Meth., 1973, 109, p.601.
23. Hofker W.K. et al. IEEE Trans. on Nucl.Sci., 1966, NS-13, p.208.
24. Lamport J.E. et al. Nucl.Instr. and Meth., 1976, 134, p.71.
25. Biebl U., Parak F. Nucl.Instr. and Meth., 1973, 112, p.455.
26. Hansen N.J., Henderson D.J., Scott R.G. Nucl.Instr. and Meth., 1972, 105, p.293.
27. Detko J.F. IEEE Trans. on Nucl.Sci., 1976, NS-23, p.538.
28. Gerber M.S. et al. IEEE Trans. on Nucl.Sci., 1977, NS-24, p.182.

29. Berninger W.H. IEEE Trans. on Nucl.Sci., 1974, NS-21, p.374.
30. Kaufman L. et al. IEEE Trans. on Nucl.Sci., 1974, NS-21, p.652.
31. Kurz R. et al. IEEE Trans. on Nucl.Sci., 1977, NS-24, p.255.
32. Kablitzer S., Melzer W. Nucl.Instr. and Meth., 1967, 56, p.301.
33. Radeka V. IEEE Trans. on Nucl.Sci., 1974, NS-21, p.51.
34. Kablitzer S., Stumpfi W. Nucl.Instr. and Meth., 1970, 77, p.300.
35. Johanssen C.R. Rev.Sci.Instr., 1974, 45, p.1017.
36. Mathieson E. Nucl.Instr. and Meth., 1971, 97, p.171.
37. Mathieson E. et al. Nucl.Instr. and Meth., 1974, 121, p.139.
38. Alberi J.L., Radeka V. IEEE Trans. on Nucl.Sci., 1976, NS-23, p.251.
39. Lagsgaard E. Nucl.Instr. and Meth., 1979, 162, p.93.
40. Andersen J.U. et al. Nucl.Phys., 1975, 241A, p.317.
41. Clegg T.B., Barnard A.C., Swint J.B. Nucl.Instr. and Meth., 1966, 40, p.45.
42. Minor M.M. et al. Nucl.Instr. and Meth., 1972, 99, p.63.
43. Gibson W.M. Ann.Rev.Nucl.Sci., 1975, 25, p.465.
44. Andersen J.U. et al. Phys.Rev.Lett., 1976, 36, p.1539.
45. Clark G.J. et al. Nucl.Phys., 1971, 173A, p.73.
46. Hooton B.W., Freeman J.M., Kane P.P. Nucl.Instr. and Meth., 1975, 124, p.29.
47. Etcheto J. et al. Nucl.Instr. and Meth., 1973, 108, p.271.
48. Schlosser P.A. et al. IEEE Trans. on Nucl.Sci., 1974, NS-21, p.658.

Рукопись поступила в издательский отдел
4 февраля 1982 года.

Сандуковский В.Г.

13-82-90

Полупроводниковые позиционно-чувствительные детекторы
ядерных излучений

Рассматриваются полупроводниковые позиционно-чувствительные детекторы из Si и Ge, предназначенные для получения одновременной информации о координате и энергии частиц ядерных излучений. Обсуждаются вопросы получения координатной информации методами амплитудного и временного съема сигнала, а также проблемы получения оптимального позиционного разрешения в случае амплитудного метода съема информации при выполнении условия нелинейности отклика детектора на координату частиц $\leq 1\%$. Предложены методы измерения позиционного разрешения и линейности изготавливаемых приборов с помощью α -частиц, генерации световых сигналов и по шумовым характеристикам позиционного канала детектора. Описаны различные способы применения полупроводниковых позиционно-чувствительных детекторов в ядерной физике и смежных областях науки. Показаны ограничения, накладываемые на разрешающую способность и размеры детекторов.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Sandukovsky V.G.

13-82-90

Position-Sensitive Semiconductor Detectors
of Nuclear Radiations

The position-sensitive detectors made of Si and Ge are considered, which are used to gain a simultaneous information on the coordinate and particle energy of nuclear radiations. The methods of amplitude and time extraction of the coordinate information are discussed. The problems of the optimal position resolution are considered for the case of amplitude method provided that the nonlinearity of detector response is $\leq 1\%$. The methods of measurement of the position resolution and linearity of the above mentioned detectors by the α -particles, light signal generation and by the noise of the position channel of the detector are presented. The use of the semiconductor position-sensitive detectors in nuclear physics and related sciences is described. The limitations imposed on the resolution and detector size are shown.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982

Перевод О.С.Виноградовой.