

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ РФ
МОСКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

М.А. Кирсанов, В.В. Кушин, Н.А. Миханчук, С.Г. Покачалов

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ДЕТЕКТОР

Лабораторная работа

МОСКВА 2006

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ДЕТЕКТОР

Лабораторная работа

Содержание

Введение	4
Контрольное задание	17
Лабораторная установка	18
Рабочее задание	20
1. Исследование зависимости емкости детектора от напряжения смещения $U_{см}$ на его электродах	21
2. Выбор оптимального напряжения детектора.....	22
3. Измерение собственного энергетического разрешения ППД.....	25
4. Измерение энергетического эквивалента уровня шума ППД.....	28
5. Проверка пропорциональности детектора.....	30
6. Измерение эффективности собирания зарядов в ППД.....	31
Обработка результатов	32
Контрольные вопросы и задания.....	34
Список литературы.....	35
Приложение	36

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ДЕТЕКТОР

Цель работы: изучение общих принципов действия полупроводникового детектора и исследование основных характеристик кремниевого поверхностно-барьерного полупроводникового детектора, работающего в спектрометрическом режиме.

ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые детекторы (ППД) относятся к классу ионизационных детекторов. Требования к рабочему веществу ППД и принцип их действия проще всего рассмотреть на примере однородного твердотельного проводящего детектора. Конструктивно такой детектор представляет собой пластину диэлектрика или полупроводника, помещенную между двумя плоскими электродами. К электродам приложена разность потенциалов, создающая внутри рабочего вещества электрическое поле. Будем анализировать случай, когда диэлектрик или полупроводник имеет омический контакт с электродами, т.е. контакт, при котором осуществляется свободный обмен носителями заряда любого знака между электродами и диэлектриком или полупроводником.

Заряженная частица, проходя через рабочее вещество, образует на своем пути свободные электроны и дырки. Под действием электрического поля образованные свободные носители смещаются к электродам, индуцируя при этом на них заряд, что приводит к возникновению во внешней цепи импульса тока.

Выбор диэлектрика или полупроводника в качестве рабочего вещества однородного проводящего детектора не случаен, так как это вещество должно удовлетворять одновременно нескольким требованиям.

1. Если заряженная частица потеряла в веществе энергию $E_{\text{п}}$, то среднее число образованных пар зарядов N_0 составляет величину $N_0 = E_{\text{п}} / \omega$, где ω – средняя энергия, требующаяся на образование одной пары носителей заряда. Чем меньше ω , тем больше носителей возникает в рабочем веществе и тем больше амплитуда сигнала, снимаемого с детектора. Диэлектрики и полупроводники обладают сравнительно небольшой величиной ω , значение которой лежит в диапазоне от единиц до нескольких десятков электронвольт.

2. При движении зарядов, образованных заряженной частицей, к электродам их число вследствие рекомбинации или захвата ловушками может уменьшаться. Процесс изменения числа свободных зарядов принято характеризовать величиной среднего времени жизни τ , которая показывает, за какое время число свободных зарядов уменьшается в e раз. Очевидно, что амплитуда сигнала во внешней цепи зависит не только от исходного числа образованных частицей носителей N_0 , но и от их среднего времени жизни τ . Поэтому, чем больше значений τ , а точнее, соотношение величины τ и времени собирания зарядов, тем больше амплитуда сигнала. В некоторых полупроводниках время жизни электронов и дырок может достигать значений порядка $\tau = 10^{-3} \div 10^{-4}$ с и существенно превышать время их собирания на электроды.

3. Время собирания зарядов на электроды определяется скоростью перемещения носителей $V_{\text{др}}$ (скорость дрейфа) в электрическом поле, которая, в свою очередь, связана с напряженностью поля E соотношением:

$$V_{\text{др}}^+ = \mu_+ \cdot E, \quad V_{\text{др}}^- = \mu_- \cdot E,$$

где μ_+ , μ_- – подвижности положительных и отрицательных зарядов. Чем больше подвижности зарядов, тем меньше время их собирания на электроды и тем лучшим разрешающим временем будет обладать детектор. В ряде диэлектриков и полупроводников электроны и дырки имеют приблизительно равные и достаточно большие значения подвижностей, и по-

этому детекторы на их основе могут обладать хорошими временными характеристикам.

4. Очень важное требование предъявляется к величине удельного электрического сопротивления рабочего вещества рассматриваемого детектора. Так как любой материал обладает конечной электропроводностью, то под действием электрического поля через него течет ток. Число носителей заряда, перемещающихся между электродами и создающих постоянный ток I_0 , испытывает статистические флуктуации, абсолютное значение которых тем больше, чем больше ток. Если флуктуации числа носителей тока сравнимы с числом носителей N_0 , образованных частицей, то становится невозможным выделение полезного сигнала на фоне этих флуктуаций (часто говорят – на фоне шумов). Для оценки допустимой величины удельного сопротивления рабочего вещества однородного твердотельного проводящего детектора найдем отношение числа носителей N_0 к флуктуациям постоянного тока I_0 .

Будем характеризовать флуктуации постоянного тока величиной среднеквадратического отклонения $\sigma(N)$ от среднего числа носителей, создающих постоянный ток. Считая, что число носителей постоянного тока, пересекающих расстояние d между электродами за время собирания носителей $T = d/V_{др}$, описывается распределением Пуассона, величина $\sigma(N) = \sqrt{I_0 T / e}$, где e – заряд носителя. Тогда отношение числа пар носителей, созданных заряженной частицей с энергией E_n , к величине $\sigma(N)$ составляет $N_0/\sigma(N) = \frac{E_n}{\omega} \sqrt{\frac{e}{I_0 T}}$.

Выберем отношение $N_0/\sigma(N)=10^2$, т.е. зададим величину сигнала от заряженной частицы на два порядка больше флуктуаций постоянного тока во внешней цепи детектора. Тогда для среднего значения постоянного тока, проходящего через детектор, должно выполняться условие:

$$I_0 \leq (E_n / \omega)^2 \frac{e}{T} \cdot 10^{-4}.$$

Учитывая, что удельное сопротивление материала ρ связано с током соотношением $I_0 = \frac{ES}{\rho}$, где E – напряженность электрического поля в объеме детектора, и полагая $\mu_- \cong \mu_+ = \mu$, получаем:

$$\rho \geq \left(\frac{\omega}{E_n} \right)^2 \frac{EST}{e} \cdot 10^4 = \left(\frac{\omega}{E_n} \right)^2 \cdot \frac{V \cdot 10^4}{e\mu},$$

где $V = Sd$ – объем детектора.

Для количественной оценки значения ρ предположим, что в детекторе объемом 1 см^3 заряженные частицы полностью теряют свою энергию, $E_n = 1 \text{ МэВ}$, $\omega \cong 5 \text{ эВ}$, $\mu = 10^3 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. По порядку величины ω и μ соответствуют их значениям в диэлектриках и полупроводниках. Тогда минимально допустимое удельное сопротивление оказывается равно $\rho \cong 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

Таким образом, проведенный выше анализ ω , τ , μ и оценка допустимого значения ρ резко сужают диапазон материалов, которые можно использовать в качестве рабочего вещества однородного твердотельного проводящего детектора.

Изоляторы обладают большим удельным сопротивлением ($\sim 10^{16} \text{ Ом} \cdot \text{см}$), сравнительно малым ω , большим μ . Однако время жизни носителей в них мало и, кроме того, захват носителей в объеме кристалла приводит к возникновению объемного заряда, поляризации и, в конечном итоге, нарушению работы детектора.

Из полупроводниковых материалов для создания однородных проводящих ППД требуемыми значениями ω , τ , μ обладают кремний и германий (табл.1).

Однако при комнатной температуре удельное сопротивление кремния и особенно германия оказывается существенно меньше, чем необходимо по сделанным выше расчетам для

создания рассматриваемого типа детектора. Покажем это на примере кремния.

Таблица 1

Характеристики полупроводниковых материалов

Материал	ω , эВ	μ , см ² /В·с		τ_p , с	
		μ_-	μ_+	e^-	e^+
Алмаз	18 – 20	1800	1200	-	-
Теллурид кадмия	4,65	600	45	$> 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$
Кремний	3,7	1350	480	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
Германий	2,94	3800	1820	10^{-3}	10^{-3}

Известно, что удельное сопротивление диэлектриков и полупроводников определяется через плотности электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне и их подвижности следующим выражением:

$$\rho = \frac{1}{e(n\mu_- + p\mu_+)},$$

где n и p – плотности электронов и дырок соответственно.

В кристалле кремния, обладающем собственным типом проводимости (кристалле, в котором абсолютно отсутствуют примеси и структурные дефекты), плотности электронов и дырок равны $n = p = n_i(\text{Si})$ и определяются формулой:

$$n_i(\text{Si}) = 2,8 \cdot 10^{16} T^{3/2} e^{-E_g/2kT},$$

где T – температура; $E_g = 1,1$ эВ – ширина запрещенной зоны; k – постоянная Больцмана. Рассмотрим случай однородного проводящего детектора с омическими контактами, когда полупроводник свободно обменивается свободными зарядами с электродами, плотность носителей в зонах в присутствии электрического поля остается равновесной и равной $n_i(\text{Si})$.

Вычисляя значение $n_i(\text{Si})$ в кремнии при комнатной температуре ($T = 300 \text{ K}$) и используя данные табл.1, получаем значение ρ для беспримесного кристалла $\rho(\text{Si})=2,4 \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Аналогичный расчет для германия

$$n_i(\text{Ge})= 9,7 \cdot 10^{15} T^{3/2} \cdot e^{-E_g/2kT},$$

где $E_g(\text{Ge}) = 0,67 \text{ эВ}$ дает $\rho(\text{Ge}) = 65 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

Кроме того, удельное сопротивление кремния и германия очень сильно зависит от наличия в них примесей. Поэтому удельное сопротивление реальных кристаллов даже при очень высокой степени их очистки от примесей оказывается существенно меньше рассчитанных выше значений $\rho(\text{Si})$ и $\rho(\text{Ge})$.

Поэтому в настоящее время развитие детекторов на основе кремния и германия идет в направлении создания неоднородных ППД. В таких ППД используются свойства перехода между полупроводниками с разным типом проводимости или перехода между полупроводником и металлом.

Рассмотрим процессы, происходящие в переходе, образованном между полупроводниками p -типа и n -типа, или сокращенно p - n переходе (примеры способов создания переходов приведены ниже). Выберем часто встречающийся на практике случай, когда один из полупроводников (например, p -типа) сильно легирован, т.е. концентрация акцепторных примесей в нем существенно превышает концентрацию примесей в кристалле n -типа. В n -области полупроводника основными носителями являются электроны, в p -области – дырки. В момент возникновения контакта между n - и p -полупроводниками из-за различия концентрации происходит диффузия носителей в сторону уменьшения их градиента концентрации. Так как ионизованные атомы донорных и акцепторных примесей двигаться не могут, в n -области полупроводника вблизи контакта возникает нескомпенсированный положительный объемный заряд, в p -области – отрица-

тельный заряд ионов акцептора. По мере накопления объемных зарядов на переходе появляется скачок потенциала, играющий роль потенциального барьера и препятствующий диффузии электронов в p -область и дырок в n -область.

В состоянии наступившего динамического равновесия ток основных носителей каждого знака за счет остаточной диффузии будет уравниваться током неосновных носителей, диффундирующих из другой области, среднее значение тока через переход оказывается равным нулю, а концентрация носителей в области перехода будет резко понижена (рис.1, I).

В принципе такой детектор с p - n переходом можно уже использовать для регистрации заряженных частиц даже при отсутствии внешнего источника напряжения, так как в полупроводнике существует область, в которой напряженность электрического поля отлична от нуля. Если через эту область пролетит заряженная частица и создаст свободные носители, то они будут перемещаться под действием поля объемного заряда и индуцировать заряд на электродах.

Однако область объемного заряда в p - n переходе (толщина области перехода d) оказывается меньше 10^{-4} см. Поскольку пробеги заряженных частиц обычно превышают эту величину, практического интереса такой режим не представляет.

Поэтому при использовании неоднородных ППД толщину перехода увеличивают, прикладывая к электродам детектора обратное напряжение смещения $U_{см}$, т.е. к электроду со стороны n -области присоединяют «плюс» источника напряжения, к электроду со стороны p -области – «минус». В этом случае высота потенциального барьера растет, внешнее поле растаскивает основные носители из области перехода, увеличивая тем самым протяженность объемного заряда и соответственно толщину перехода (рис.1, II).

Проводимость переходной области, к которой приложено обратное напряжение смещения, отлична от нуля, так как в области перехода имеется определенная плотность свободных носителей заряда и, следовательно, через переход посто-

янно протекает ток. Действительно, в отличие от p - n перехода без внешнего электрического поля ток неосновных носителей уже не уравнивается током основных носителей, поскольку практически ни один основной носитель не может преодолеть высокий потенциальный барьер, созданный внешним электрическим полем в области перехода. Поэтому через переход будет протекать ток за счет диффузии неосновных носителей в области перехода (диффузионный ток).

Так как концентрация неосновных носителей вне перехода (это, в основном, дырки в слаболегированной n -области) пропорциональна τ_p , где τ_p – время жизни дырок до их рекомбинации в n -области, а концентрация неосновных носителей в переходе пропорциональна T , где T – время дрейфа дырок через переход, то их соотношение в переходе и вне его составляет величину T/τ_p .

Кроме того, в зоне перехода постоянно идет тепловая генерация электронов и дырок. Эти носители, перемещаясь под действием электрического поля, также являются источником тока (генерационный ток).

При скорости тепловой генерации носителей в переходе $\sim n_i/\tau_p$ их плотность в области p - n перехода по отношению к плотности вне перехода пропорциональна отношению T/τ_p . Так, например, в ППД с p - n переходом на основе кремния в зависимости от размеров области перехода время собирания T лежит в диапазоне $10^{-6} - 10^{-9}$ с. Сравнивая T с величиной τ_p в кремнии, приведенной в табл.1 ($\tau_p \sim 10^{-3}$ с), видим, что $T \ll \tau_p$. Поэтому плотность носителей в переходе оказывается на несколько порядков меньше плотности носителей вне перехода. Следовательно, через переход будет протекать существенно меньший ток, чем в случае однородного проводящего детектора одинаковых геометрических размеров. Другими словами, поскольку удельное сопротивление обратно пропорционально плотности свободных носителей, значение ρ полупроводникового материала в области перехода оказыва-

ется приблизительно в τ_p/T больше, чем величина удельного сопротивления вне области перехода, т.е. исходного полупроводникового материала.

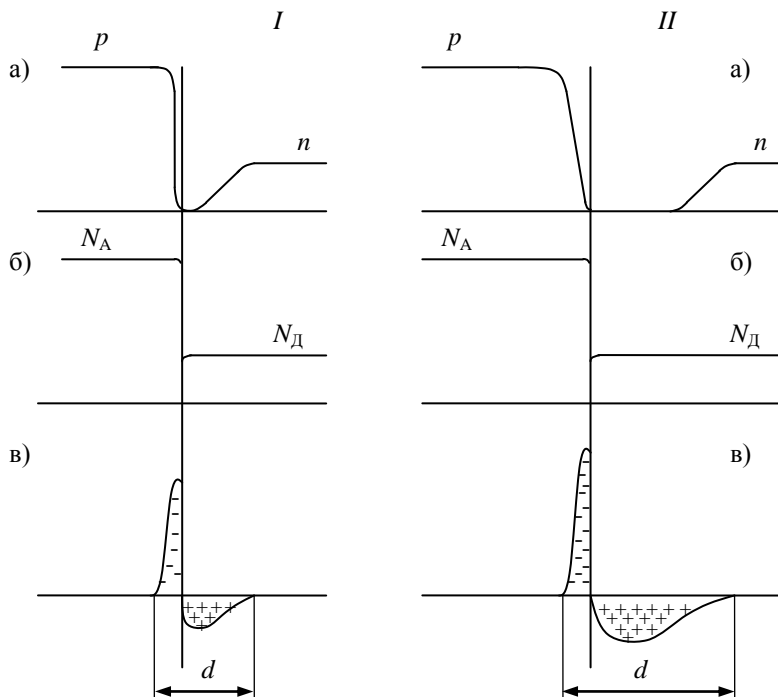


Рис.1. Характеристики равновесного p - n перехода (I) и p - n перехода с обратным смещением (II): а – концентрация электронов и дырок; б – концентрация ионизованных атомов примесей; в – распределение объемного заряда

Современная промышленность выпускает много различных типов неоднородных кремниевых и германиевых ППД. В отличие от неоднородных ППД на основе германия с кремниевыми ППД обычно работают при комнатной температуре. В зависимости от способа создания перехода различают сле-

дующие типы кремниевых детекторов: диффузионные, ионно-легированные, поверхностно-барьерные. В диффузионных детекторах переход создается диффузией донорных атомов (в основном фосфора) в полупроводник p -типа или акцепторных атомов (бора) в полупроводник n -типа.

В ионно-легированных детекторах переход создается введением примесных атомов в полупроводник при его облучении пучком ионов.

В поверхностно-барьерных детекторах переход возникает на поверхности кремния при нанесении на нее испарением в вакууме некоторых металлов или окислением поверхности на воздухе.

Особенно широкое применение для регистрации различного типа заряженных частиц нашли кремниевые поверхностно-барьерные ППД. Толщина перехода таких ППД сравнительно невелика, они обычно используются для спектрометрии тяжелых заряженных частиц (протонов с энергией до 5 МэВ, альфа-частиц с энергией до 20 МэВ, тяжелых ионов, осколков деления), электронов с энергией до 200 кэВ, для регистрации потоков низкоэнергетических рентгеновских и гамма-квантов.

Основные эксплуатационные параметры кремниевых поверхностно-барьерных ППД. В настоящее время такие ППД изготавливаются в основном из кремния n -типа. После соответствующей обработки в поверхностном очень тонком слое кремния n -типа образуется слой с высокой плотностью дырок, сходный по своим свойствам с диффузионным слоем p -типа.

Электрический контакт с образованным на поверхности слоем перехода осуществляется чаще всего с помощью тонкой пленки золота, нанесенной в вакууме. На другой стороне кристалла создается омический контакт распылением алюминия в вакууме или нанесением никеля. В процессе регистра-

ции ионизирующего излучения на детектор подается обратное напряжение смещения.

По ГОСТу такие поверхностно-барьерные кремниевые детекторы обозначаются следующим образом: ДКПс-100. Маленькая буква после ДКП указывает на тип конструктивного оформления, цифры обозначают площадь чувствительной поверхности детектора в квадратных миллиметрах.

Обычно характеристики ППД принято подразделять на геометрические, электрические и радиометрические.

К геометрическим параметрам ППД относятся толщина чувствительной области, толщина мертвого слоя и площадь чувствительной поверхности.

Под чувствительной областью понимается та часть объема ППД, в которой взаимодействие ионизирующего излучения с полупроводниковым материалом приводит к возникновению полезного сигнала на выходных электродах детектора.

Толщина чувствительной области – это протяженность области перехода, измеренная по нормали к поверхности ППД. Для поверхностно-барьерных детекторов толщину области d можно выразить уравнением:

$$d = \sqrt{2\varepsilon_0\varepsilon_{\text{к}} \cdot \mu \cdot \rho(U_0 + U_{\text{см}})},$$

где ε_0 – электрическая постоянная; ε – диэлектрическая проницаемость кремния; μ – подвижность основных носителей слаболегированного полупроводника; ρ – удельное сопротивление исходного материала кремния n -типа, который использован для создания детектора; U_0 – разность потенциалов в области перехода в отсутствие внешнего напряжения; $U_{\text{см}}$ – обратное напряжение смещения, подаваемое на ППД.

Получаемый в настоящее время кремний n -типа позволяет изготавливать промышленные детекторы типа ДКП с толщиной чувствительной области, не превышающей 300 мкм.

Толщина мертвого слоя определяется как нечувствительная часть ППД, расположенная между входным окном и чув-

ствительной областью детектора. У поверхностно-барьерных детекторов типа ДКП мертвый слой определяется только толщиной пленки золота, нанесенной на поверхность кремния, и составляет $\lesssim 20\div 50$ мкг/см ($\lesssim 0,03$ мкм).

Площадь чувствительной поверхности – это часть поверхности детектора, через которую излучение попадает в чувствительный объем. Кремний, выпускаемый в настоящее время промышленностью, позволяет изготавливать детекторы с площадью чувствительной поверхности не более 5 см^2 .

К основным электрическим параметрам ППД можно отнести емкость детектора, обратный темновой ток, энергетический эквивалент уровня шума.

Емкость детектора. Поверхностно-барьерный детектор с поданным на него напряжением смещения можно приближенно рассматривать как два металлических электрода с изолятором между ними. Тогда емкость детектора $C_{\text{дет}}$ и толщина чувствительной области d связаны соотношением: $C_{\text{дет}} = \epsilon_0 \epsilon S / d$, где S – площадь чувствительной поверхности. В формулу для $C_{\text{дет}}$ входит именно значение d , а не полная толщина самого кристалла кремния, из которого изготовлен детектор. Это связано с тем, что, как отмечалось выше, сопротивление области перехода существенно больше сопротивления исходного материала полупроводника, и поэтому напряжение, подаваемое на электроды, падает в основном на переходе.

Обратный темновой ток кремниевого поверхностно-барьерного детектора при приложении к нему напряжения смещения связан с протеканием тока через переходную область, обладающую конечной проводимостью (объемный ток утечки) и протеканием тока утечки через поверхность ППД (поверхностный ток утечки). Объемный ток имеет диффузионную и генерационную компоненты, природа которых обсуждалась выше. Поверхностный ток утечки оценить расчетом практически невозможно, хотя во многих случаях он вно-

сит основной вклад в обратный темновой ток. Поэтому обычно значение обратного темнового тока измеряется экспериментально и приводится в паспорте на данный экземпляр детектора для оптимального напряжения смещения (понятие характеристики ППД – оптимальное напряжение смещения, приводится ниже). Так как обратный ток дает, как правило, основной вклад в шумы ППД, эта характеристика относится к важным электрическим параметрам детектора. Для детектора типа ДКП типичное значение обратного тока утечки лежит в интервале (0,05 – 0,5) мкА.

Энергетический эквивалент уровня шума ППД характеризует разброс амплитуд импульсов на выходе детектора, связанный с протеканием обратного темнового тока при приложении напряжения смещения. Кроме того, тепловые шумы, связанные с флуктуациями скорости теплового движения носителей, проявляются как флуктуации напряжения на концах проводника и, как следствие, являются дополнительным источником разброса амплитуд импульсов на выходе детектора.

Энергетический эквивалент уровня шума принято описывать величиной $\Delta E_{\text{ш.дет}} = 2,35\sigma_{\text{ш.дет}}$, где $\sigma_{\text{ш.дет}}$ – среднеквадратические флуктуации амплитуд импульсов на выходе детектора, выраженные в единицах энергии (обычно – кэВ). Экспериментально определив $\Delta E_{\text{ш.дет}}$, можно сделать вывод о вкладе шумов ППД в собственное энергетическое разрешение детекторов. Методика измерения величины $\Delta E_{\text{ш.дет}}$ приведена в рабочем задании.

К радиометрическим параметрам ППД относятся параметры, связанные с регистрацией ионизирующего излучения, в частности, собственное энергетическое разрешение, пропорциональность детектора, эффективность собирания заряда, созданного ионизирующим излучением, эффективность регистрации частиц.

Наряду с собственным энергетическим разрешением в качестве характеристики всей спектрометрической установки (детектора совместно с электронным трактом) пользуются

понятием *полного энергетического разрешения*. Эта величина учитывает также вклад электронного тракта в разброс импульсов по амплитудам.

Известно, что полное энергетическое разрешение спектрометрической установки с ППД в качестве детектора зависит от величины $U_{\text{см}}$. Поэтому при эксплуатации ППД типа ДКП большую роль играет правильный выбор напряжения смещения.

Методики выбора оптимального напряжения смещения, измерения собственного энергетического разрешения ППД, эффективности собирания заряда, проверки пропорциональности ППД приведены в рабочем задании.

КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

При подготовке к лабораторной работе выполнить следующие задания.

1. Рассчитать значение заряда, создаваемого альфа-частицей от источника ^{239}Pu в чувствительном объеме ППД.

2. Рассчитать минимальную толщину чувствительной области d в ППД, в которой альфа-частица от источника ^{226}Ra полностью теряет свою энергию.

3. Построить ожидаемое распределение импульсов по амплитудам для источника $^{233}\text{U} + ^{239}\text{Pu} + ^{238}\text{Pu}$, считая, что полное относительное энергетическое разрешение детектора для альфа-частиц с энергией 5 МэВ составляет 2 %.

При выполнении данного задания воспользоваться сведениями, изложенными в разделах «Введение» и «Приложение», а также данными из табл.2.

ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА

Функциональная схема установки приведена на рис.2. Исследуется стандартный поверхностно-барьерный полупроводниковый детектор ДКПс-100 (площадь чувствительной поверхности детектора 100 мм^2).

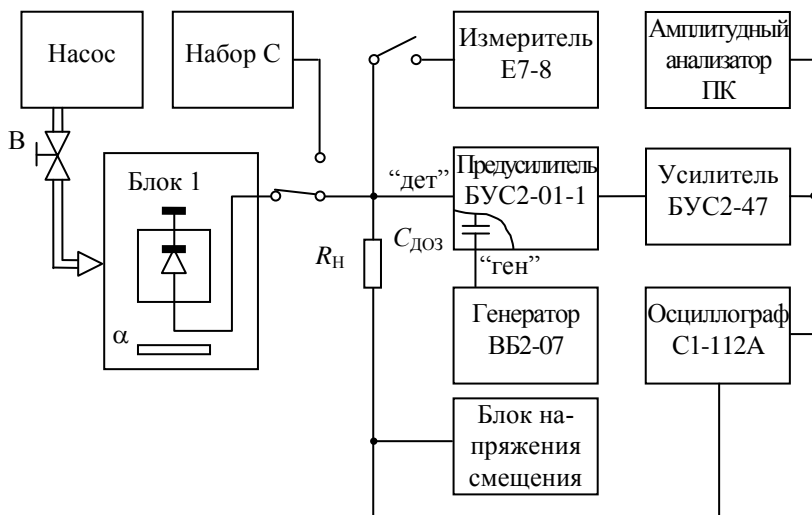


Рис.2. Функциональная схема установки

Полупроводниковый детектор и источники альфа-излучения расположены в блоке детектирования «Блок 1». Область перехода полупроводникового детектора со стороны золотого электрода облучается одним из альфа-источников, которые можно менять с помощью ручки, выведенной на боковую стенку блока 1. Вращением ручки, расположенной на верхней крышке блока 1, можно варьировать расстояние между детектором и источником в пределах 6 – 40 мм.

Для того чтобы исключить потери энергии альфа-частиц в воздухе между детектором и источником, воздух из рабочего объема блока 1 откачивается форвакуумным насосом. Насос включается на все время эксперимента и обеспечивает в рабочем объеме блока детектирования вакуум $\sim 6,6$ Па ($\sim 5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст.). С помощью вентиля В магистраль откачки может соединяться с атмосферой.

ППД подключен к зарядочувствительному предусилителю БУС2-01-1, имеющему коэффициент преобразования заряда в напряжение $\sim 4 \cdot 10^{12}$ В/Кл (± 40 %), и источнику внешнего напряжения (блок «Напряжение смещения»), установленному в крейте. Резистор R_n расположен в блоке предусилителя. Полярность импульсов, поступающих от ППД на вход предусилителя, положительная.

С выхода предусилителя импульсы поступают на разъем «вход А» основного усилителя БУС2-47, коэффициент усиления которого изменяется в пределах от 4 до 2048, с помощью ступенчатого переключателя коэффициента усиления «грубо» и регулятора плавного изменения коэффициента усиления «плавно» от 0,5 до 1 в пределах каждой ступени.

В схеме усилителя предусмотрен блок формирования импульсов, состоящий из интегрирующей τ_n ($\tau_n \geq 0,05$ мкс) и дифференцирующей τ_d ($\tau_d \leq 12,8$ мкс) цепочек. Параметры формирующих цепей устанавливаются с помощью переключателей «Дифф.мкс» и «Интегр.мкс». Максимальная амплитуда выходного сигнала БУС2-47 не должна превышать 10 В, так как при амплитудах, превышающих 10 В, нарушается линейность усиления и наблюдается ограничение сигнала.

С выхода усилителя импульсы напряжения подаются на вход многоканального амплитудного анализатора импульсов, который используется для измерения амплитуд импульсов, поступающих в случайные моменты времени, хранения и обработки информации. Анализатор выполнен на базе персонального компьютера, в системный блок которого встроена

плата, содержащая амплитудно-цифровой преобразователь импульсов (АЦП), и память для хранения данных.

С помощью универсального осциллографа С1-112А осуществляется контроль формы импульсов и измерение их амплитуды, а также измерение напряжения смещения, подаваемого на детектор.

Для калибровки электронного тракта в единицах заряда используется «Генератор ВБ2-07», «прямой» выход которого через дозирующую емкость $C_{\text{доз}}=1$ пФ, расположенную в блоке предусилителя, соединен со входом предусилителя БУС2-01-1 (разъем «генератор»). Полярность импульсов генератора положительная.

Емкость ППД измеряется с помощью прибора «Измеритель Е7-8». Измеритель подключается ко входу ППД через разъем и тумблер «Измерение С», которые помещены в экраняющий корпус и расположены между выходом ППД и кабелем, идущим на вход БУС2-01-1. В процессе измерения собственных шумов предусилителя БУС2-01-1 к его входу подключается набор конденсаторов – «Набор С».

Полученные экспериментальные данные студенты сохраняют в виде файлов на жестком диске персонального компьютера внутри папки «Student» в своей персональной папке.

РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

Показать преподавателю результаты, полученные при выполнении контрольного задания, и, ответив на дополнительные вопросы, приступить к измерениям.

Перед началом работы проверить подключение блоков электронной аппаратуры в соответствии с функциональной схемой установки.

Блоки ВБ2-07, БУС2-47, «Напряжение смещения», установленные в одном крейте с блоком питания БНН2-22, и блок БУС2-01-1 включаются тумблером, размещенным на передней панели блока БНН2-22.

Включить все приборы в сеть. Дать приборам прогреться в течение 10 – 15 мин.

Порядок работы с амплитудным анализатором, программой обработки спектров, осциллографом С1-112А приводится в отдельных инструкциях.

1. Исследование зависимости емкости детектора от напряжения смещения $U_{см}$ на его электродах

Известно, что ширина чувствительной области в ППД зависит от напряжения смещения $d \sim \sqrt{U_{см}}$. Емкость перехода $C_{дет}$ связана с шириной перехода соотношением $C_{дет} = \epsilon_0 \epsilon S/d$. Отсюда $C_{дет} \sim 1/\sqrt{U_{см}}$. Предлагается провести экспериментальную проверку данной зависимости. Для этого рекомендуется выполнить следующие операции.

1. Подключить измерительный кабель прибора «Измеритель Е7-8» к разъему «Измерение С» и включить тумблер «Измерение С».

2. Измерить величину эквивалентной емкости $C_{эkv} = C_{дет} + C_m$, равную суммарной емкости перехода $C_{дет}$ и емкости входных цепей предусилителя C_m , от напряжения смещения. Как отмечалось выше, $C_{дет} \sim 1/\sqrt{U_{см}}$, поэтому следует ожидать, что наиболее сильное изменение $C_{дет}$ от $U_{см}$ будет иметь место в диапазоне малых значений напряжения смещения. В соответствии с этим рекомендуется выбирать $U_{см}$ в области малых значений с шагом 1 В, постепенно увеличивая шаг вплоть до 55 В (например, 3 В, 4 В, 5 В, 7 В, 10 В, 15 В, 30 В, 55 В). Величина $U_{см} = 55$ В соответствует максимальному паспортному значению $U_{см}$, которое допускается подавать на данный образец ДКПс-100.

По показаниям Е7-8 оценить флуктуации значений $C_{эkv}$ за время измерений. Величина емкости входных цепей предуси-

лителя измерена заранее и ее значение приведено на корпусе, в котором размещены разъем и тумблер «Измерение С».

По окончании измерений обязательно выключить прибор «Измеритель Е7-8», отключить кабель от разъема «Измерение С», поставить тумблер «Измерение С» в положение «Выкл.».

2. Выбор оптимального напряжения детектора

Под *оптимальным напряжением смещения*, подаваемым на ППД, понимается напряжение смещения $U_{см}$, при котором для данной энергии частиц полное энергетическое разрешение спектрометрической установки (т.е. собственное энергетическое разрешение ППД с учетом вклада в энергетическое разрешение электронного тракта) является лучшим.

Перед началом измерений подготовить блок детектирования к работе. Для этого необходимо: а) закрыть вентиль В, соединяющий магистраль откачки с воздухом; б) включить форвакуумный насос тумблером «Насос» (в присутствии преподавателя или дежурного инженера).

Поместить под детектором источник альфа-частиц $^{233}\text{U} + ^{239}\text{Pu} + ^{238}\text{Pu}$ (в окошке на крышке блока 1 должна стоять цифра 3). Энергии альфа-частиц изотопов приведены в табл.2. Установить между детектором и альфа-источником расстояние 10 мм (см. визирную шкалу на крышке блока 1). В этом случае загрузка ППД (т.е. число частиц, регистрируемых в единицу времени) становится такой, при которой энергетическое разрешение детектора за счет наложения импульсов практически не ухудшается.

Установить оптимальные параметры дифференцирующей τ_d и интегрирующей τ_i цепочек в основном усилителе, которые обеспечивают максимальное отношение амплитуды сигнала с выхода ППД к шумам предусилителя (в соответствии с паспортными данными используемого в работе БУС2-01 эти параметры имеют следующие значения: $\tau_d = \tau_i = 1,6$ мкс). При таком выборе τ_d и τ_i вклад шумов предусилителя в пол-

ное энергетическое разрешение системы ППД плюс электронный тракт оказывается минимальным. Тумблер «Дифф.мкс» должен стоять в положении 1.

Таблица 2

Энергии альфа-частиц изотопов

Изотоп	Энергия альфа-частиц, МэВ	Выход, %
^{239}Pu	5,156	73,3
	5,143	15,1
	5,105	11,5
^{233}U	4,773	15
	4,816	84
^{238}Pu	5,499	72
	5,456	28
^{226}Ra	4,599	5,4
	4,782	94,6
	5,490	100
	6,002	100
	7,687	100

Подать на ППД максимальное напряжение смещения $U_{\text{см}} = 55$ В. Измеряя по осциллографу амплитуды импульсов на выходе усилителя БУС2-47, подобрать коэффициент усиления таким образом, чтобы максимальные амплитуды не превышали 4 – 4,5 В.

С помощью амплитудного анализатора снять распределение импульсов по амплитудам (предварительно необходимо внимательно ознакомиться с инструкцией по работе с анализатором). Время измерения выбрать таким, чтобы статистические флуктуации в числе импульсов в максимумах амплитудного распределения не превышали 4 %. Полученное амплитудное распределение сохранить в виде файла в своей персональной папке на компьютере.

Повторить аналогичные измерения для других величин $U_{\text{см}}$, меняя $U_{\text{см}}$ в диапазоне от 1 до 5 В через ~ 1 В; далее че-

рез 10 – 15 В (рекомендуемые значения $U_{\text{см}}$, В, приблизительно 55; 30; 15; 5; 4; 3; 2; 1). Сохранить данные в виде файлов.

Чтобы определить оптимальное напряжение смещения $U_{\text{см}}$, значение которого будет использоваться в следующих пунктах лабораторной работы, необходимо по полученным результатам для каждого $U_{\text{см}}$ вычислить полное абсолютное энергетическое разрешение $\Delta E_{\text{п}}$ системы ППД плюс электронный тракт.

Известно, что абсолютное энергетическое разрешение $\Delta E_{\text{п}}$ вводится как ширина распределения импульсов по амплитудам на его полувысоте для данной энергии частиц и выражается в энергетических единицах. В нашем случае для нахождения полного абсолютного энергетического разрешения $\Delta E_{\text{п}}$ рекомендуется использовать распределение импульсов по амплитудам, соответствующее энергии альфа-частиц, испускаемых ядрами ^{233}U (см. табл.2). Величина $\Delta E_{\text{п}}$ находится из формулы $\Delta E_{\text{п}} = \alpha \cdot \Delta N$, где ΔN – число каналов, равное ширине распределения на его полувысоте для энергии альфа-частиц источника ^{233}U ; α – энергетическая ширина канала анализатора, выраженная в кэВ/канал.

Величина α вычисляется для каждого $U_{\text{см}}$ как отношение $\alpha = \frac{E_{\alpha 1} - E_{\alpha 2}}{N_1 - N_2}$, где $E_{\alpha 1}$ и $E_{\alpha 2}$ – энергии моноэнергетических линий альфа-частиц; N_1 и N_2 – номера каналов, соответствующих для данного $U_{\text{см}}$ максимумам амплитудных распределений от альфа-частиц с энергиями $E_{\alpha 1}$ и $E_{\alpha 2}$, например, ^{233}U и ^{239}Pu .

Исходя из полученных результатов, определить оптимальное напряжение смещения $U_{\text{см}}$, при котором система ППД плюс электронный тракт имеет лучшее энергетическое разрешение.

3. Измерение собственного энергетического разрешения ППД

Полное абсолютное энергетическое разрешение $\Delta E_{\text{п}}$ является параметром, которым описывается разброс амплитуд импульсов на выходе электронного тракта, подключенного к детектору, регистрирующему моноэнергетические частицы. Разброс амплитуд импульсов связан, во-первых, с процессами, относящимися к собственно детектору и, во-вторых, с процессами усиления и анализа сигналов детектора электронной аппаратурой.

Экспериментально измерив вклад каждого из этих процессов в полное абсолютное энергетическое разрешение $\Delta E_{\text{п}}$, можно сделать вывод, чем в основном определяется полное разрешение системы *детектор + электронный тракт* и, таким образом, при необходимости целенаправленно улучшать величину $\Delta E_{\text{п}}$.

Разделить вклад детектора и электроники в $\Delta E_{\text{п}}$ можно следующим образом.

Если распределение импульсов по амплитудам на выходе электронного тракта аппроксимируется нормальным распределением, то полное абсолютное энергетическое разрешение $\Delta E_{\text{п}}$ можно представить в виде:

$$\Delta E_{\text{п}}^2 = (2,35)^2 \cdot (\sigma_{\text{дет}}^2 + \sigma_{\text{эл}}^2),$$

где $\sigma_{\text{дет}}$ и $\sigma_{\text{эл}}$ – среднеквадратические флуктуации в амплитудах импульсов, обусловленные процессами в детекторе и электронике соответственно. Тогда вклад в полное энергетическое разрешение за счет процессов в детекторе характеризуется величиной $\Delta E_{\text{дет}} = 2,35\sigma_{\text{дет}}$, называемой *собственным энергетическим разрешением детектора*.

Разброс амплитуд импульсов электронной аппаратурой связан с наличием входных шумов усилительных устройств, нестабильностью аппаратуры, дискретным характером пре-

образования амплитуды в анализаторе. Если по сравнению с влиянием шумов всеми остальными факторами можно пренебречь, то в этом случае $\sigma_{эл} = \sigma_{ш.ус}$, где $\sigma_{ш.ус}$ – среднеквадратические флуктуации амплитуд шумовых импульсов. На практике величину входных шумов усилительных устройств чаще всего принято характеризовать величиной энергетического эквивалента уровня шума усилительного тракта $\Delta E_{ш.ус}$. Величина $\Delta E_{ш.ус}$ равна ширине распределения шумовых импульсов по амплитудам на полувысоте этого распределения. Поскольку известно, что распределение шумовых импульсов по амплитудам описывается нормальным распределением, энергетический эквивалент уровня шума усилительного тракта $\Delta E_{ш.ус}$ связан с $\sigma_{ш.ус}$ соотношением $\Delta E_{ш.ус} = 2,35\sigma_{ш.ус}$.

Из трех величин: $\Delta E_{п}$, $\Delta E_{дет}$ и $\Delta E_{ш.ус}$ можно непосредственно измерить значения $\Delta E_{п}$ и $\Delta E_{ш.ус}$, а собственное энергетическое разрешение детектора определить по формуле:

$$\Delta E_{дет} = \sqrt{\Delta E_{п}^2 - \Delta E_{ш.ус}^2}.$$

Методика нахождения полного энергетического разрешения $\Delta E_{п}$ рассмотрена в предыдущем пункте. Существующая методика измерения энергетического эквивалента уровня шума усилительного тракта $\Delta E_{ш.ус}$ заключается в следующем.

Измеряют величину полного энергетического разрешения $\Delta E_{п}$ и фиксируют выбранные параметры усилительного тракта. От входа усилителя отключают детектор и, так как входные шумы усилительного тракта зависят от величины емкости на входе усилителя, то на вход вместо детектора подключают конденсатор, емкость которого равна емкости ППД. На вход усилителя (обычно через небольшую емкость $C_{доз}$) подают импульсы от генератора импульсов стабильной амплитуды. С помощью анализатора снимают распределение импульсов по амплитудам на выходе усилительного тракта от генератора импульсов и определяют величину $\Delta N_{ш}$ – число каналов, равное ширине распределения на его полувысоте.

Так как при этом измерении параметры усилительного тракта оставались такими же, как при определении $\Delta E_{\text{п}}$, для перехода от $\Delta N_{\text{ш}}$ к энергетическому эквиваленту уровня шума $\Delta E_{\text{ш.уc}}$ можно воспользоваться значением α , полученным при измерении $\Delta E_{\text{п}}$. Тогда $\Delta E_{\text{ш.уc}}$ вычисляется по формуле: $\Delta E_{\text{ш.уc}} = \alpha \cdot \Delta N_{\text{ш}}$.

В данном задании предлагается измерить собственное энергетическое разрешение ППД. Для этого необходимо выполнить следующие операции.

1. Подать на ППД оптимальное напряжение смещения $U_{\text{см}}$, выбранное в рабочем задании (п.2). С помощью анализатора снять распределение импульсов по амплитудам от альфа-частиц источника $^{233}\text{U} + ^{239}\text{Pu} + ^{238}\text{Pu}$. Статистические ошибки в максимумах амплитудных распределений не должны превышать 4 %. Сохранить данные в виде файла.

2. Отключить предусилитель от ППД и подключить вход предусилителя к набору конденсаторов. **Обязательно** выключить напряжение смещения (установить $U_{\text{см}} = 0$), иначе это напряжение будет подаваться на подключенный конденсатор и явится источником дополнительных шумов. Установить значение емкости конденсатора, равное (или наиболее близкое) величине емкости детектора $C_{\text{дет}}$ для $U_{\text{см}}$, соответствующего оптимальному напряжению смещения (см. результаты предыдущего задания).

Переключатель «Частота» на генераторе импульсов ВБ2-07 установить в положение 140 Hz. Варьируя плавную регулировку «Амплитуда» на ВБ2-07, подобрать по осциллографу амплитуду генераторных импульсов на выходе усилителя БУС2-47 таким образом, чтобы она не превышала 4 – 4,5 В. С помощью анализатора снять распределение импульсов по амплитудам от генератора импульсов. Время измерения выбрать таким же, как в предыдущем задании. Сохранить данные в виде файла.

По окончании измерений выключить генератор ВБ2-07, поставив переключатель «Частота» на лицевой панели ВБ2-07 в положение «Выкл.».

4. Измерение энергетического эквивалента уровня шума ППД

Как отмечалось выше, разброс амплитуд импульсов на выходе ППД определяется целым рядом процессов, происходящих в объеме детектора: во-первых, флуктуациями в числе образованных электронно-дырочных пар, флуктуациями в числе собранных носителей и т.д. Будем характеризовать каждый источник разброса амплитуд импульсов от таких процессов среднеквадратическим отклонением σ_i . Во-вторых, разброс амплитуд определяется флуктуациями амплитуд импульсов на выходе ППД за счет шумов ППД, связанных с наличием обратного темнового тока детектора и тепловых шумов. Этот тип флуктуаций описывается величиной среднеквадратического отклонения $\sigma_{ш.дет.}$.

Как показывает эксперимент, распределение импульсов на выходе ППД близко к нормальному распределению. Тогда собственное энергетическое разрешение ППД, которое является характеристикой этого распределения, может быть записано в виде:

$$\Delta E_{дет}^2 = (2,35)^2 \cdot \left(\sum_i \sigma_i^2 + \sigma_{ш.дет.}^2 \right).$$

На практике флуктуации амплитуд импульсов, связанные с шумами ППД, чаще всего характеризуют величиной $\Delta E_{ш.дет} = 2,35\sigma_{ш.дет}$ – энергетическим эквивалентом уровня шума ППД. Знание $\Delta E_{ш.дет}$ позволяет оценить вклад в собственное энергетическое разрешение флуктуаций, вызванных другими процессами.

Существующая методика измерения энергетического эквивалента уровня шума ППД для выбранного значения $U_{\text{см}}$ заключается в следующем. На вход усилительного тракта, к которому подключен ППД, подают импульсы от генератора стабильной амплитуды, а ППД облучают альфа-частицами, содержащими в спектре две или более моноэнергетических групп. С помощью анализатора снимают распределение импульсов по амплитудам от альфа-частиц и от генератора импульсов. Из полученных амплитудных распределений от альфа-частиц определяют энергетическую цену канала анализатора. В амплитудном распределении, соответствующем импульсам от генератора, разброс импульсов обусловлен как шумами ППД, так и входными шумами усилительного тракта, а ширина распределения $\Delta E_{\text{ш.дет.ус}}$ характеризует энергетический эквивалент уровня шума системы: ППД + усилительный тракт. Затем подключают на вход усилителя вместо ППД конденсатор, равный емкости ППД, и измеряют величину $\Delta E_{\text{ш.ус}}$ – энергетического эквивалента уровня шума усилительного тракта. Очевидно, что полученные значения $\Delta E_{\text{ш.дет.ус}}$, $\Delta E_{\text{ш.ус}}$ и величина $\Delta E_{\text{ш.дет}}$ связаны соотношением:

$$\Delta E_{\text{ш.дет.ус}}^2 = \Delta E_{\text{ш.дет}}^2 + \Delta E_{\text{ш.ус}}^2, \text{ откуда можно вычислить } \Delta E_{\text{ш.дет}}.$$

В данном задании предлагается измерить энергетический эквивалент уровня шума ППД. Для этого необходимо выполнить следующие операции.

1. Подключить ППД к предусилителю. Подать на ППД оптимальное напряжение смещения $U_{\text{см}}$. Переключатель «Частота» на генераторе импульсов ВБ2-07 установить в положение 140 Нз. Варьируя плавную регулировку «Амплитуда» на ВБ2-07, подобрать по осциллографу амплитуду генераторных импульсов таким образом, чтобы она не накладывалась на импульсы от альфа-частиц источника $^{233}\text{U} + ^{239}\text{Pu} + ^{238}\text{Pu}$. С помощью анализатора снять распределение импульсов по амплитудам. Сохранить данные в виде файла.

2. Измерение энергетического эквивалента уровня шума усилительного тракта $\Delta E_{ш.ус}$ следует провести по методике, описанной в п.3 рабочего задания, или при обработке результатов воспользоваться уже измеренным ранее значением $\Delta E_{ш.ус}$. По окончании измерений выключить генератор ВБ2-07, поставив переключатель «Частота» на лицевой панели ВБ2-07 в положение «Выкл.».

5. Проверка пропорциональности детектора

Пропорциональный детектор – детектор, у которого величина сигнала на выходе ΔV пропорциональна энергии $E_{п}$, потерянной ионизирующей частицей в рабочем объеме детектора. Полупроводниковый детектор является пропорциональным.

Для проверки пропорциональности ППД при оптимальном напряжении смещения необходимо выполнить следующие операции.

1. Подключить предусилитель к ППД. Разместить под детектором источник альфа-частиц ^{226}Ra (в окошке на крышке блока 1 должна стоять цифра 2). Убедиться в том, что все пики источника ^{226}Ra умещаются в наблюдаемом диапазоне амплитудного анализатора. Если это не выполняется, то подобрать коэффициент усиления усилителя таким, чтобы максимальные амплитуды импульсов укладывались в рабочий диапазон амплитудного анализатора. Снять распределение импульсов по амплитудам. Время измерения выбрать таким, чтобы статистические ошибки в максимумах амплитудных распределений не превышали 4 %. Сохранить данные в виде файла.

2. Установить под детектором альфа-источник $^{233}\text{U} + ^{239}\text{Pu} + ^{238}\text{Pu}$ (в окошке на крышке блока 1 должна стоять цифра 3). Не меняя параметров спектрометрического тракта, снять распределение импульсов по амплитудам для данного источника. Сохранить данные в виде файла.

6. Измерение эффективности собирания зарядов в ППД

Под *эффективностью собирания зарядов* в ППД понимается величина α , равная отношению зарядов:

$$\alpha = Q_1/Q_2,$$

где Q_1 – значение заряда, полученного на собирающем электроде ППД для энергии E_α , потерянной ионизирующей частицей в чувствительном объеме детектора; Q_2 – расчетное значение заряда, создаваемого ионизирующей частицей в чувствительном объеме ППД. Значение Q_2 вычисляется по формуле:

$$Q_2 = eE_\alpha/\omega,$$

где e – заряд электрона, ω – средняя энергия ионообразования в кремнии.

В данной работе для определения величины Q_1 необходимо выполнить следующие операции.

Установить под детектором альфа-источник ^{239}Pu (в окошке на крышке блока 1 должна стоять цифра 1). Подать на вход предусилителя через емкость $C_{\text{доз}}$ (см. рис.2) импульсы напряжения с генератора (переключатель «Частота» на генераторе ВБ2-07 установить в положение 140 Hz). Дозирующая емкость $C_{\text{доз}}$ расположена в блоке предусилителя. Варьируя плавную регулировку «Амплитуда», подобрать амплитуду импульсов напряжения с генератора ΔV_{Γ} такой, чтобы на выходе усилительного тракта амплитуды импульсов от альфа-частиц и генератора были равны. Сравнение амплитуд импульсов на выходе усилительного тракта производится с помощью осциллографа.

Величина Q_1 вычисляется по формуле $Q_1 = \Delta V_{\Gamma} \cdot C_{\text{доз}}$. Для определения ΔV_{Γ} отключить осциллограф от выхода усилителя и подключить к выходу генератора. При этом, чтобы параметры импульсов с генератора не изменились, генератор

должен оставаться подключенным к предусилителю. Зная энергию альфа-частиц, значение $C_{\text{доз}}$ ($C_{\text{доз}} = 1 \text{ пФ}$) и считая $\alpha \cong 1$, оценить ожидаемую величину амплитуды импульса генератора $\Delta V_{\text{г}}$. Установить переключатель осциллографа на соответствующий диапазон измерения амплитуд. Измерить с помощью осциллографа амплитуду импульсов на выходе генератора, записать результат измерения в рабочий журнал.

По окончании работы необходимо установить между детектором и альфа-источником расстояние 40 мм. Выключить насос и с помощью вентили **В обязательно** напустить в магистраль откачки воздух. Выключить все приборы.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Используя результаты п.1 задания:

а) построить в логарифмических координатах ($\ln C_{\text{дет}}$, $\ln U_{\text{см}}$) зависимость емкости детектора $C_{\text{дет}}$ от напряжения смещения. Отложить на графике ошибки результатов измерений. Сравнить полученную зависимость с теоретически ожидаемым результатом;

б) определить ширину перехода d для различных $U_{\text{см}}$, используя для этого формулу:

$$C_{\text{дет}} = \epsilon_0 \epsilon S / d,$$

где S – площадь детектора; $\epsilon_0 \cong \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \text{ Ф/м}$ – электрическая постоянная, $\epsilon = 12$ – диэлектрическая проницаемость кремния. Привести значение d в микрометрах;

в) используя одно из полученных значений d , вычислить удельное сопротивление (ρ) кремния по формуле:

$$d = \sqrt{2\epsilon_0 \epsilon \mu \cdot \rho (U_0 + U_{\text{см}})},$$

где μ – подвижность основных носителей слаболегированного полупроводника (в исследованном ППД это – n -

полупроводник, для которого $\mu = 0,1350 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$); U_0 – разность потенциалов в области перехода в отсутствие внешнего источника напряжения (для кремния $U_0 \cong 0,5 - 0,7 \text{ В}$).

2. По результатам п.2 рабочего задания построить зависимость полного энергетического разрешения $\Delta E_{\text{п}}$ системы ППД плюс электронный тракт для энергии альфа-частиц источника ^{233}U от напряжения смещения. Отметить на графике оптимальное напряжение смещения. Привести ошибки результатов измерений.

3. Для оптимального напряжения смещения построить распределения импульсов по амплитудам: а) для генератора импульсов стабильной амплитуды (по данным п.3 рабочего задания); б) для источника $^{233}\text{U} + ^{239}\text{Pu} + ^{238}\text{Pu}$ и генератора импульсов стабильной амплитуды (по данным п.4 рабочего задания). Сравнить ширину распределений генераторных импульсов для обоих случаев. Объяснить полученный результат.

4. Для оптимального напряжения смещения для альфа-частиц источника ^{239}Pu определить в единицах кэВ:

а) собственное энергетическое разрешение ППД, используя формулу $\Delta E_{\text{дет}} = \sqrt{\Delta E_{\text{п}}^2 - \Delta E_{\text{ш.ус}}^2}$;

б) энергетический эквивалент уровня шума ППД по формуле: $\Delta E_{\text{ш.дет}} = \sqrt{\Delta E_{\text{ш.дет.ус}}^2 - \Delta E_{\text{ш.ус}}^2}$.

Полученные данные представить в виде табл.3.

Таблица 3

$U_{\text{см}}$	$\Delta E_{\text{п}}$	$\Delta E_{\text{дет}}$	$\Delta E_{\text{ш.дет}}$	$\Delta E_{\text{ш.ус}}$

Сравнить собственное энергетическое разрешение ППД и энергетический эквивалент уровня шума ППД, объяснить полученный результат.

5. По данным п.5 для проверки пропорциональности ППД, используя метод наименьших квадратов, построить зависимость номеров каналов анализатора, соответствующих максимумам амплитудных распределений от энергии альфа-частиц. Сделать вывод о пропорциональности ППД в исследованном диапазоне энергий альфа-частиц.

6. Вычислить эффективность собирания заряда в ППД по формуле $\alpha = Q_1/Q_2$. Объяснить полученный результат.

Контрольные вопросы и задания

1. Для регистрации каких частиц в основном используется исследуемый детектор и почему?
2. Зачем в полупроводниковом детекторе создается переход?
3. Что влияет на эффективность собирания зарядов в ППД?
4. На какие характеристики влияет величина удельного сопротивления ППД?
5. Нарисовать схему включения ППД.

Список литературы

1. Абрамов А.И., Казанский Ю.А., Матусевич Е.С. Основы экспериментальных методов ядерной физики. М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике. Под ред. Ю.К. Акимова. М.: Энергоатомиздат, 1989.
3. Кремниевые детекторы ионизирующих излучений. Под ред. Н.С. Лидоренко. М.: Энергоатомиздат, 1983.
4. Ободовский И.М. Сборник задач по экспериментальным методам ядерной физики. М.: Энергоатомиздат, 1987.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Зависимость пробега легких ионов в веществе от их энергии описывается эмпирической формулой:

$$R = aE^b,$$

где пробег R выражен в мкм, а энергия E – в МэВ.

Значения констант a и b для легких ионов в кремнии приведены в табл.4.

Таблица 4

Значения констант a и b для легких ионов в кремнии

Константа	p	d	^3H	^3He	α
a	13,27	8,48	6,96	1,90	1,61
b	1,74	1,72	1,68	1,66	1,65