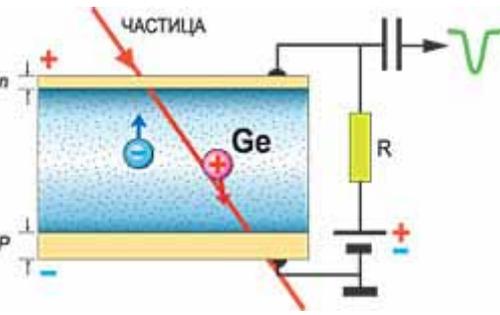


## 2. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

*Полупроводниковый детектор. В кристалле полупроводника частица создает дополнительные заряды — электронно-дырочные пары. Под действием приложенного напряжения они перемещаются к электродам детектора, создавая во внешней цепи электрический импульс.*

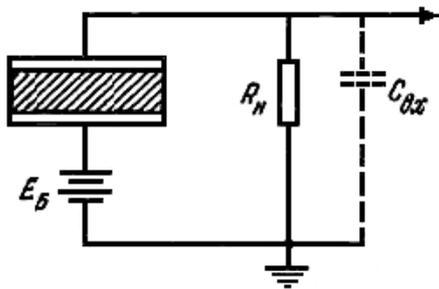


Газонаполненные детекторы имеют два недостатка. Во-первых, плотность газа низка и энергия, теряемая частицей в объеме детектора мала, что не позволяет эффективно регистрировать высокоэнергичные и слабоионизирующие частицы. Во-вторых, энергия, необходимая для рождения пары электрон-ион в газе велика (30-40 эВ), что увеличивает относительные флуктуации числа зарядов и ухудшает энергетическое разрешение. Значительно более удобными в этом плане являются детекторы с твердотельной рабочей средой. Наибольшее распространение получили *полупроводниковые детекторы* из кристаллов кремния (плотность 2.3 г/см<sup>3</sup>) и германия (5.3 г/см<sup>3</sup>).

**Рис. 19.** Устройство кремниевого детектора

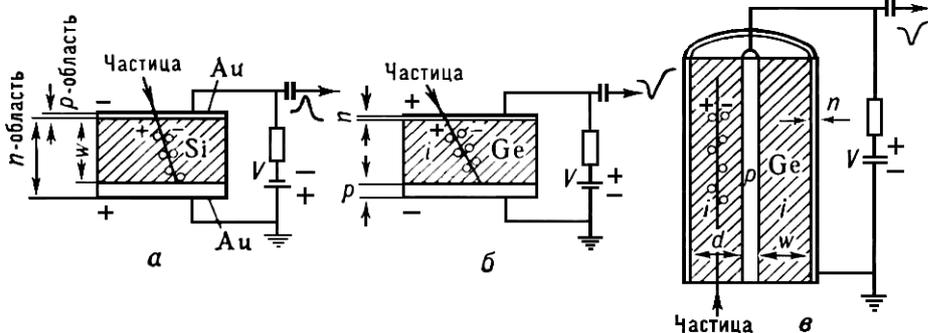
*Полупроводниковый детектор - прибор для регистрации ионизирующих излучений, основным элементом которого является кристалл полупроводника.*

Полупроводниковый детектор работает подобно ионизационной камере с тем отличием, что ионизация происходит не в газовом промежутке, а в толще кристалла. Полупроводниковый детектор представляет собой полупроводниковый диод, на который подано обратное (запирающее) напряжение ( $\sim 10^2$  В). Слой полупроводника вблизи границы *p-n*-перехода с объемным зарядом «обеднён» носителями тока (электронами проводимости и дырками) и обладает высоким удельным электросопротивлением. К полупроводниковому кристаллу прикладывается напряжение до нескольких кэВ, что обеспечивает сбор всех зарядов, образованных частицей в объеме детектора (**Рис. 20**).



**Рис. 20.** Схема включения полупроводникового детектора.

Заряженная частица, проникая в детектор, создаёт дополнительные (неравновесные) электронно-дырочные пары, которые под действием электрического поля «рассасываются», перемещаясь к электродам прибора. В результате во внешней цепи полупроводникового детектора возникает электрический импульс, который далее усиливается и регистрируется (**Рис. 28**).



**Рис. 21.** Полупроводниковые детекторы: штриховкой выделена чувствительная область; *n* – область полупроводника с электронной проводимостью, *p* – с дырочкой, *i* – с собственной проводимостями; *а* – кремниевый поверхностно-барьерный детектор; *б* – дрейфовый германий-литиевый планарный детектор; *в* – германий-литиевый коаксиальный детектор.

Заряд, собранный на электродах полупроводникового детектора, пропорционален энергии, выделенной частицей при прохождении через обеднённый (чувствительный) слой. Поэтому, если частица полностью тормозится в чувствительном слое, полупроводниковый детектор может работать как спектрометр. Средняя энергия, необходимая для образования одной электронно-дырочной пары в полупроводнике, мала (у Si 3,8 эВ, у Ge  $\sim 2,9$  эВ). В сочетании с высокой плотностью вещества это позволяет получить спектрометр с высокой разрешающей способностью ( $\sim 0,1\%$  для энергии  $\sim 1$  Мэв). Если частица полностью тормозится в чувствительном слое, то эффективность её регистрации  $\sim 100\%$ . Большая подвижность носителей тока в Ge и Si позволяет собрать заряд за время  $\sim 10$  нсек, что обеспечивает высокое временное разрешение полупроводникового детектора.

Энергия, необходимая для рождения одной пары электрон-дырка равна 3.62 эВ при температуре  $T=300$  К, 3.72 эВ при  $T=80$ К в кремнии и 2.95 эВ германии при  $T=80$ К. Это при использовании полупроводникового счётчика в качестве спектрометра позволяет в несколько раз улучшить энергетическое разрешение по сравнению с газонаполненными счётчиками, такими как ионизационная камера и пропорциональный счётчик.

Для регистрации заряженных частиц используют кремниевые детекторы и детекторы из сверхчистого германия (HrGe). Толщина чувствительной области кремниевых детекторов не превышает 5 мм, что соответствует пробегу протонов с энергией  $\sim 30$  МэВ и  $\alpha$ -частиц с энергией  $\sim 120$  МэВ. Для германия толщина 5 мм соответствует пробегам протонов и  $\alpha$ -частиц с энергиями  $\sim 40$  МэВ и  $\sim 160$  МэВ соответственно, более того, германиевые детекторы могут быть изготовлены с гораздо более толстой чувствительной областью. Кремниевые детекторы часто используют при комнатной температуре. Германиевые детекторы всегда охлаждают до азотных температур.

В первых полупроводниковых детекторах (1956—57) использовались поверхностно-барьерные или сплавные  $p$ — $n$ -переходы в Ge. Эти полупроводниковые детекторы приходилось охлаждать для снижения уровня шумов (обусловленных обратным током), они имели малую глубину чувствительной области и не получили распространения. Практическое применение получили в 60-е гг. полупроводниковые детекторы в виде поверхностно-барьерного перехода в Si (**Рис.21а**). Глубина чувствительной области  $W$  в случае поверхностно-барьерного полупроводникового детектора определяется величиной запирающего напряжения  $V$ :

$$W = 5,3 \cdot 10^5 \sqrt{\rho V}. \quad (6)$$

Здесь  $r$  — удельное сопротивление полупроводника в  $ом \times см$ . Для поверхностно-барьерных переходов в Si с  $r = 10^4$   $ом \times см$  при  $V = (1—2)10^2$  в,  $W = 1$  мм. Эти полупроводниковые детекторы имеют малые шумы при комнатной температуре и применяются для регистрации короткопробежных частиц и для измерения удельных потерь энергии  $dE/dx$ .

Для регистрации длиннопробежных частиц в 1970—71 были созданы полупроводниковые детекторы  $p$ — $i$ — $n$ -типа (**Рис.21б**). В кристалл Si  $p$ -типа вводится примесь Li. Ионы Li движутся в  $p$ -области перехода (под действием электрического поля) и, компенсируя акцепторы, создают широкую чувствительную  $i$ -область собственной проводимости, глубина которой определяется глубиной диффузии ионов Li и достигает 5 мм. Такие дрейфовые кремний-литиевые детекторы используются для регистрации протонов с энергией до 25 МэВ, дейтронов — до 20 МэВ, электронов — до 2 МэВ и др.



**Рис. 22.** Внешний вид полупроводниковых детекторов.

Дальнейший шаг в развитии полупроводникового детектора был сделан возвращением к Ge, обладающему большим порядковым номером  $Z$  и, следовательно, большей эффективностью для регистрации гамма-излучения.

Дрейфовые германий-литиевые плоские (планарные) полупроводниковые детекторы применяются для регистрации  $\gamma$ -квантов с энергией в несколько сотен  $кэВ$ . Для регистрации  $\gamma$ -квантов с энергией до 10 МэВ используются коаксиальные германий-литиевые детекторы (**Рис. 21в**) с чувствительным объёмом достигающим  $100$   $см^3$ . Эффективность регистрации  $\gamma$ -квантов с энергией  $< 1$  МэВ  $\sim$  десятков % и падает при энергиях  $> 10$  МэВ до 0,1—0,01%. Для частиц высоких энергий, пробег которых не укладывается в чувствительной области, полупроводниковые детекторы позволяют, помимо акта регистрации частицы, определить удельные потери энергии  $dE/dx$ , а в некоторых приборах координату  $x$  частицы (позиционно-чувствительные полупроводниковые детекторы).

Для того, чтобы такой кристалл работал долго, а сигнал, получаемый на его выходе, был пропорционален энергии, потерянной заряженной частицей в чувствительном объеме детектора, и, наконец, протяженность сигнала во времени была небольшой, материал счетчика должен характеризоваться: малой величиной средней энергии, расходуемой заряженной частицей для создания одной пары носителей заряда; отсутствием рекомбинации и захвата носителей; большой подвижностью носителей обоих знаков; большим удельным сопротивлением.

Лучше всего удовлетворяют всем перечисленным требованиям полупроводниковые материалы - кристаллические германий и кремний, хотя их удельное сопротивление недостаточно велико, порядка 10  $кОм \cdot см$  для кремния, а для германия еще меньше - 100  $Ом \cdot см$ . Приходится прибегать к специальным мерам, повышающим сопротивление, например, добавляя специальные примеси, или охлаждать кристалл до низкой температуры, порядка температуры жидкого азота.

В среднем для создания одной электронно-дырочной пары необходимо затратить 3,5 эВ энергии, потерянной падающей тяжелой частицей в кремнии, и около 3,0 эВ в германии. Эти величины примерно в три раза больше ширины запрещенной зоны, по-видимому, дополнительная энергия тратится на возбуждение колебаний решетки (фононов).

Небольшое значение энергии, необходимой на образование электронно-дырочной пары (примерно в 10 раз меньше, чем на образование ион-электронной пары в газе), означает, что при прочих равных условиях амплитуда сигнала от полупроводникового счетчика в 10 раз больше амплитуды сигнала от ионизационной камеры. Приблизительно на порядок меньше и дисперсия амплитудного распределения импульсов, а значит, лучше и энергетическое разрешение.

Большие преимущества даёт применение полупроводниковых детекторов в спектрометрах  $\gamma$ -квантов. В этом случае применяются специально выращенные кристаллы сверхчистого германия объёмом до нескольких сот  $\text{см}^3$ . Германий имеет довольно высокий атомный номер  $Z = 32$  и поэтому эффективное сечение взаимодействия  $\gamma$ -квантов велико (вероятность фотоэффекта пропорциональна  $Z^5$ , Комpton-эффекта  $- Z$ , рождения пар  $- Z^2$ ). Чтобы добиться наилучшего энергетического разрешения германиевые кристаллы во время эксперимента охлаждают до температуры жидкого азота (77К). Энергетическое разрешение германиевых детекторов при регистрации  $\gamma$ -квантов достигает 0.1%, что в десятки раз выше, чем у сцинтилляционных детекторов. Временное разрешение лучших полупроводниковых детекторов  $10^{-8}$ - $10^{-9}$  с.

Недостатки полупроводникового детектора: малая эффективность при регистрации  $\gamma$ -квантов больших энергии; ухудшение разрешающей способности при нагрузках  $> 10^4$  частиц в сек; конечное время жизни полупроводникового детектора при высоких дозах облучения из-за накопления радиационных дефектов. Малость размеров доступных монокристаллов (диаметр  $\sim 3$  см, объём  $\sim 100$   $\text{см}^3$ ) ограничивает применение полупроводникового в ряде областей. Кремний обычно применяется не в чистом виде, а в виде поверхностно-барьерных детекторов, применяются и детекторы с диффузионным переходом, но кремниевые ионно-имплантированные детекторы обладают большей стойкостью к внешним воздействиям и высокой стабильностью параметров.

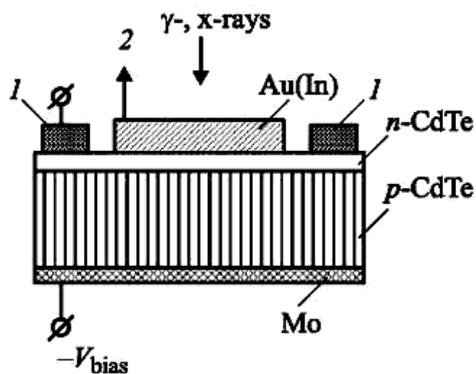


Рис. 23. Конструкция пленочного CdTe-детектора: 1 — охранные электроды, 2 — к импульсной электронной системе.

Дальнейшее развитие полупроводникового детектора связано с получением «сверхчистых» полупроводниковых монокристаллов больших размеров и с возможностью использования GaAs, SiC, CdTe. Полупроводниковые детекторы широко применяются в ядерной физике, физике элементарных частиц, а также в химии, геологии, медицине и в промышленности.

В настоящее время возник интерес к детекторам ядерных излучений на основе тонких полупроводниковых слоев (ТПС), сформированных на поверхности монокристаллических полупроводников. В качестве базового материала используются GaAs и SiC. GaAs имеет эффективный атомный номер  $Z$ , близкий к атомному номеру германия ( $Z_{\text{GaAs}} \sim 31$ ), и поэтому не может обеспечить высокую эффективность фотопоглощения, а SiC-детектор в принципе не пригоден для регистрации рентгеновского (X) и гамма ( $\gamma$ )-излучений. Полупроводниковые соединения  $A_2B_6$  являются наиболее перспективными для изготовления неохлаждаемых полупроводниковых детекторов X-,  $\gamma$ - и других видов ядерных излучений. Монокристаллические CdTe-детекторы ( $Z_{\text{CdTe}} \sim 48$ ) доказали свои преимущества перед Si- и GaAs- детекторами и могут с успехом использоваться для спектрометрии X- и  $\gamma$ -излучений в широком интервале энергий ионизирующего излучения. Основным недостатком детекторных монокристаллов на основе  $A_2B_6$ , получаемых различными способами, это наличие в них значительного количества дефектов различной природы, которые ухудшают характеристики детекторов. Пленочные детекторы свободны от этого недостатка.

Для регистрации рентгеновского и гамма-излучений созданы CdTe-p-n-детекторы на основе тонких полупроводниковых пленок, имеющих столбчатую структуру. Детекторы изготовлены на молибденовых подложках путем сублимирования CdTe и магнетронного распыления атомов кадмия. Толщина p-CdTe-пленок  $d = 30$ – $150$  микрон, удельное сопротивление  $\rho > 10^3 - 10^7 \Omega \text{ см}$ . Монокристаллы (зерно) пленок имеют поперечный размер  $50 - 100$  микрон и ориентированы перпендикулярно к Mo-подложке. В сравнении с детекторными CdTe-монокристаллами пленочные CdTe-монокристаллы имеют более совершенную структуру, так как прослойки между ними являются эффективными стоками дефектов. Энергетическое разрешение CdTe-детекторов нового поколения достигает величины  $\sim 5$  кэВ на линии 59.6 кэВ  $^{241}\text{Am}$  при комнатной температуре.

Конструкция пленочного CdTe-детектора приведена на **Рис. 23**. Электрические контакты и охранные

электроды наносились на входное окно детектора, роль которого выполняли *n-CdTe*-слои, методом термического напыления индия In и золота Au в вакууме через специальные маски. Поверхностная плотность напыленного металла составляла 30–50 мкг/см<sup>2</sup>.

**Рис. 24.** Амплитудный спектр источника <sup>241</sup>Am, измеренный CdTe плёночным детектором. Напряжение смещения  $V_k=4.3$  В.  $N_{ch}$  — номер канала.

Энергетическая разрешающая способность при измерении X- и  $\gamma$ -излучения в области энергий  $E = 5—60$  кэВ составляет от  $R = 5$  кэВ до  $R = 10$  кэВ (**Рис. 24**).

