

Детекторы ионизирующих излучений

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

Полупроводниковый детектор – твердотельный аналог ионизационной камеры, прибор для регистрации ионизирующих излучений, основным элементом которого является кристалл полупроводника.

Принципиальная схема ППД
на кремниевой основе

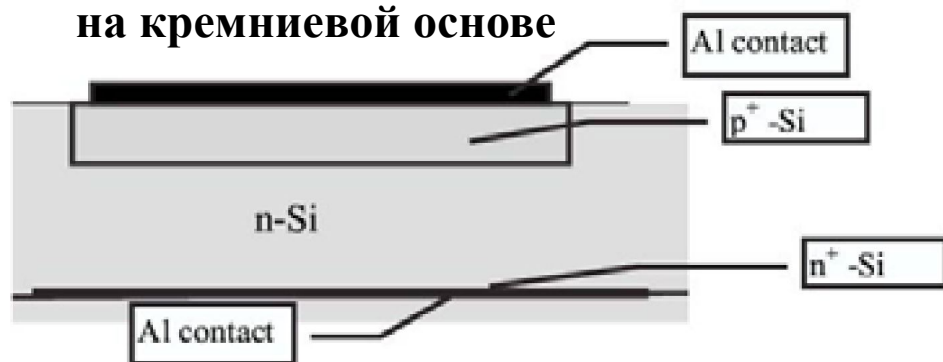
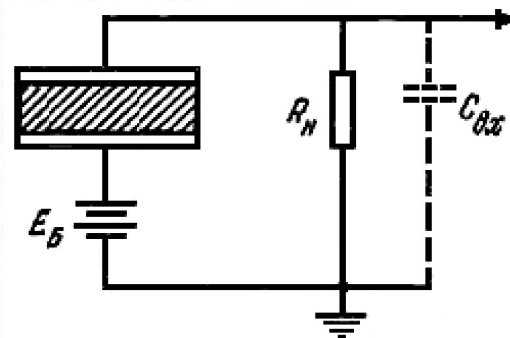


Схема включения ППД



В ППД ликвидированы два недостатка газонаполненных детекторов. 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.

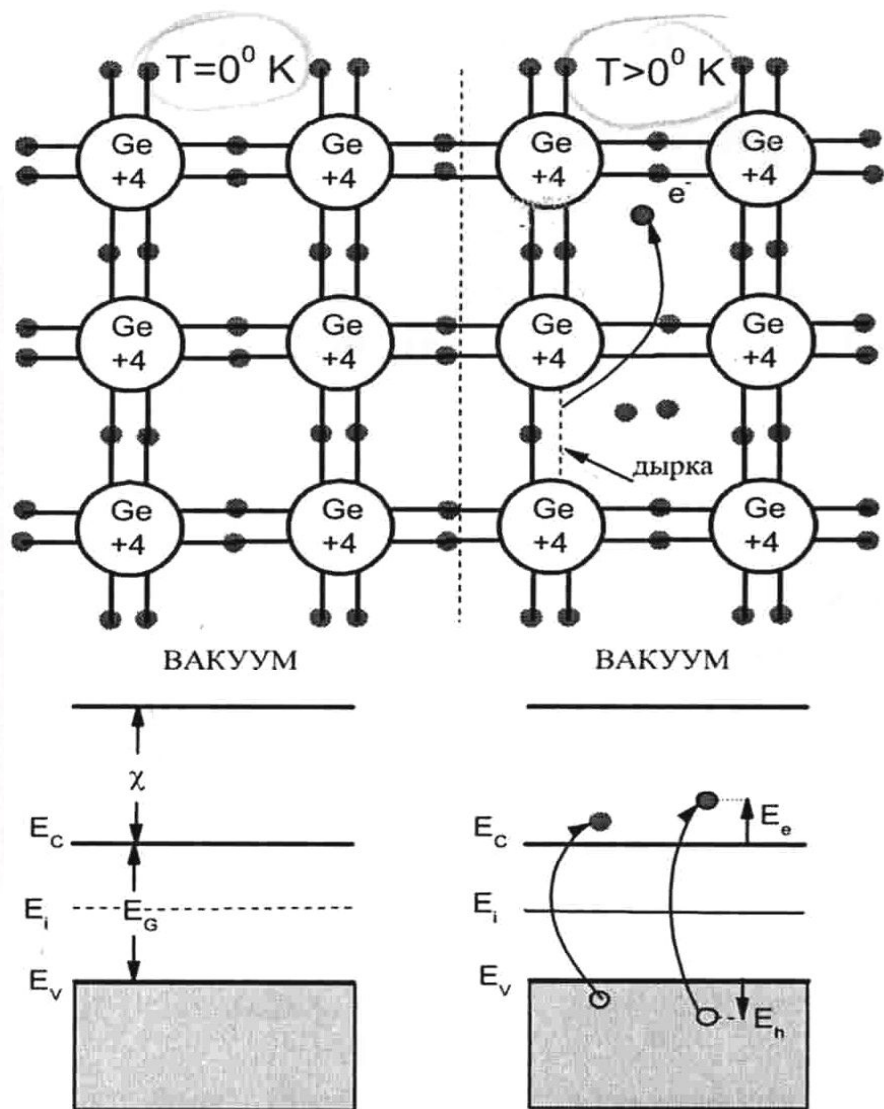
Процесс передачи электрических зарядов в ППД

ППД представляет собой полупроводниковый диод, на который подано обратное (запирающее) напряжение ($\sim 10^2$ В). Слой полупроводника вблизи границы p — n -перехода) с объёмным 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 объёме 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. 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.

Р-п-переход (п-р-переход) - переходная область между двумя частями одного кристалла полупроводника, одна из которых имеет электронную проводимость (п-типа), а другая - дырочную (р-типа). В области р-п-перехода возникает электрическое поле, которое препятствует переходу электронов из п- в р-область, а дырок обратно, что обеспечивает выпрямляющие свойства р-п-перехода. Является основой многих полупроводниковых приборов.

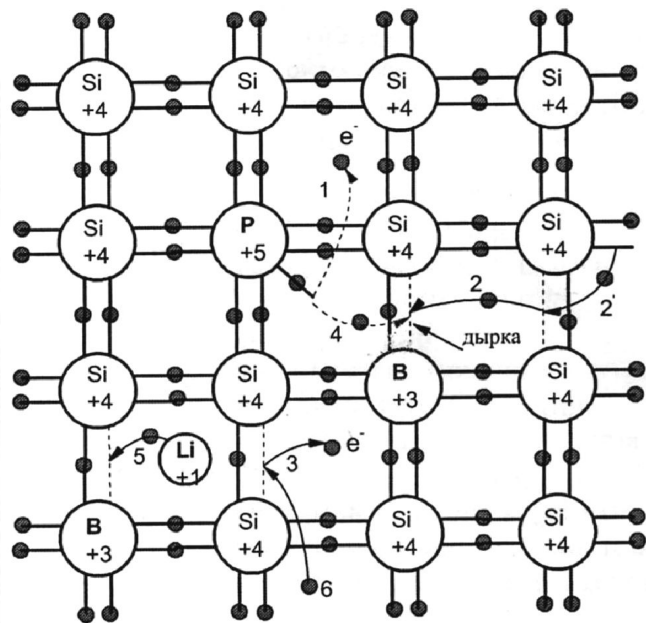
СОБСТВЕННЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ



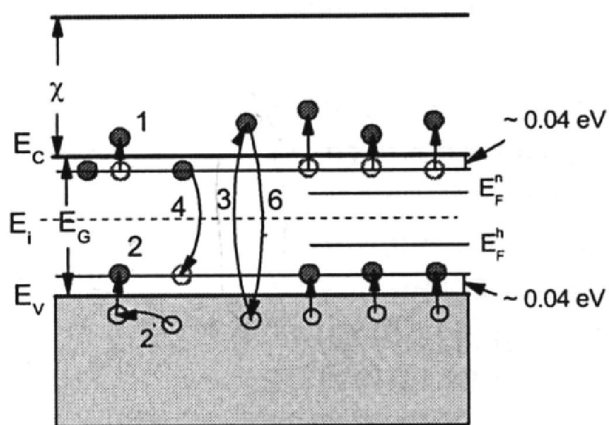
Плоская модель кристаллической решетки беспримесного (идеального, собственного) германия при двух температурах.

Соответствующие энергетические диаграммы. E_g – ширина запрещенной зоны. E_v – верхний край валентной зоны. E_c – нижний край зоны проводимости. E_i – положение уровня Ферми (приблизительно в середине запрещенной зоны). χ — аффинити, сродство к электрону — аналог работы выхода электрона в металлах Φ_m . E_e – кинетическая энергия электрона (отсчитывается от дна зоны проводимости вверх). E_h – кинетическая энергия дырки (отсчитывается от верхнего края валентной зоны вниз). Величина E_g слабо зависит от температуры. При повышении температуры часть электронов переходит из валентной зоны в зону проводимости, в результате чего образуется пара свободных носителей заряда – электрон в зоне проводимости и дырка в валентной зоне.

ПРИМЕСНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ

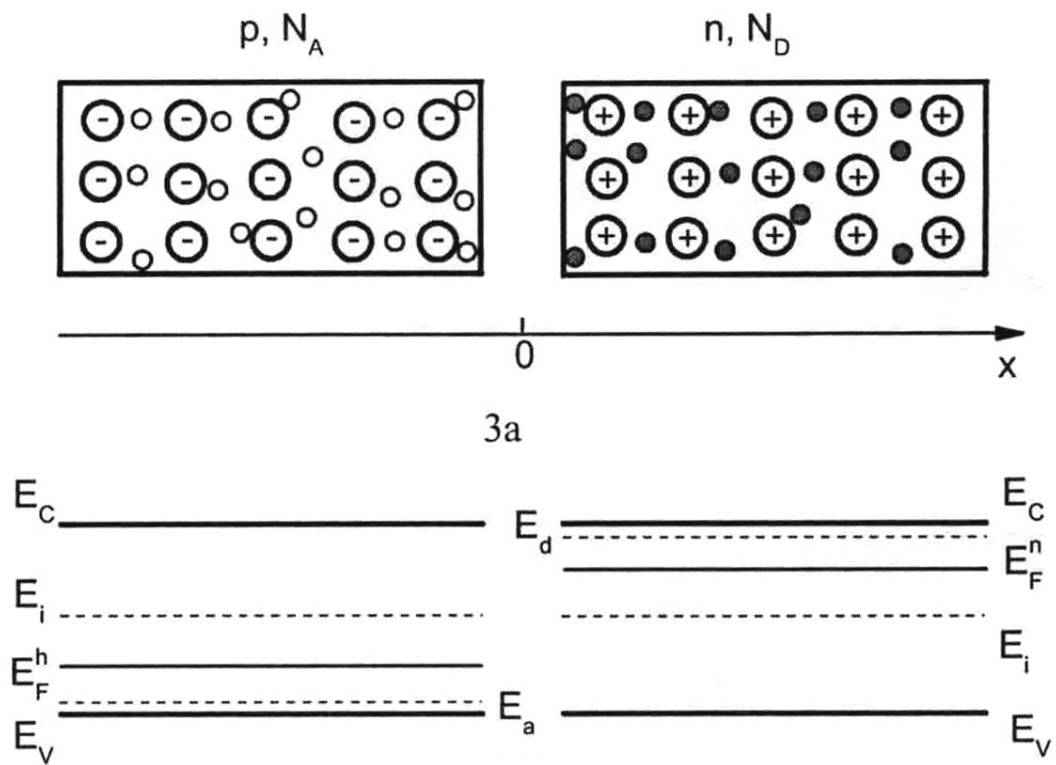


ВАКУУМ

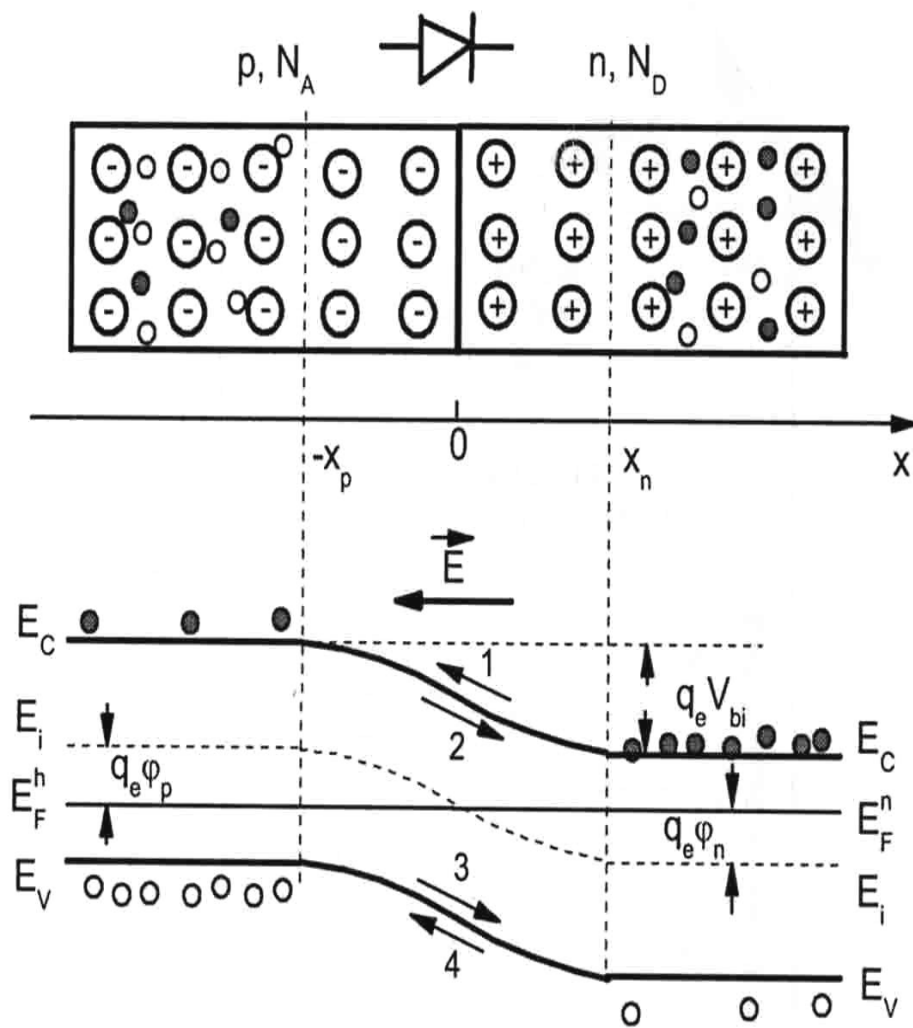


Наличие доноров в кристаллической решетке германия или кремния приводит к появлению слабо связанных электронов, а в случае акцепторных атомов — к появлению дырок. В результате на энергетической диаграмме кристалла в запрещенной зоне появляются уровни от примесных донорных атомов. Акцепторные атомы дают уровни вблизи края валентной зоны. При комнатной температуре примесные атомы полностью ионизированы, т. е. донорные атомы теряют лишние электроны и превращаются в неподвижные положительно заряженные ионы. Акцепторные атомы, присоединив электроны превращаются в неподвижные отрицательно заряженные ионы. Примесная проводимость преобладает над собственной так как энергия которая требуется для ионизации примесных атомов, существенно меньше ширины запрещенной зоны, которая определяет собственную проводимость полупроводника

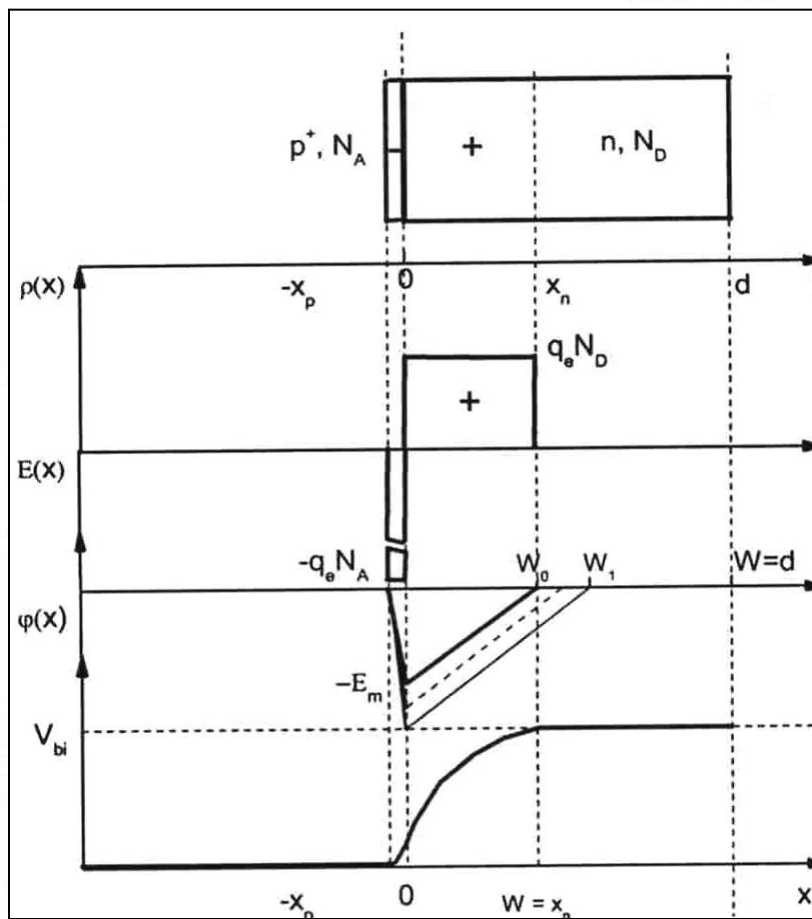
Образование и свойства р-n перехода



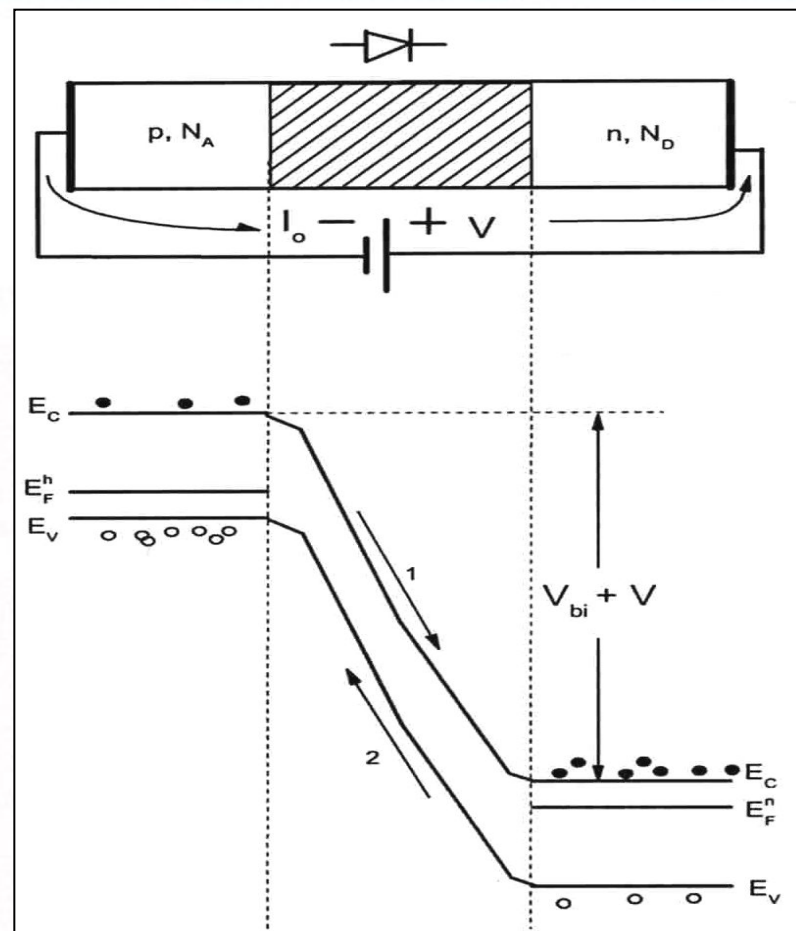
Две области с р и n типами проводимости до сближения + соответствующие диаграммы зонной теории. p, n, N_A, N_D – концентрации электронов, дырок, акцепторных и донорных атомов соответственно.



Образование резкого p-n перехода. Упрощенная плоская модель перехода + соответствующая энергетическая диаграмма. ϕ_p , ϕ_n , V_{bi} - электростатические потенциалы левой и правой части системы и контактная разность потенциалов соответственно. E - вектор напряженности поля в переходе. Стрелками показано направление диффузии электронов и дырок соответственно. Стрелками 2 и 4 показано направление дрейфа электронов и дырок. В равновесном состоянии суммарный заряд слева при $x < -x_p$ и справа при $x > x_n$ равен нулю. Эти области электрически нейтральны.



Несимметричный резкий переход $p^+ - n$ переход.



Смещенный в обратном направлении $p - n$ переход. Стрелками 1 и 2 показан дрейф электронов и дырок (неосновных носителей в соответствующих областях), которые обуславливают обратный ток через переход.

Требования к материалу ППД

1. Большая часть энергии частицы (кванта), поглотившаяся в полупроводнике должна приводить к созданию носителей тока: электронов и дырок. Число, создаваемых электронно-дырочных пар тоже должно быть большим, в этом случае полезный сигнал будет максимальным, а его относительные флуктуации минимальными.

2. После создания электронов и дырок в объеме полупроводника, необходимо как можно полнее собрать заряды на электродах. Для этого они должны обладать большим временем жизни и подвижностью. Время жизни носителей определяется наличием атомов примесей-ловушек и структурных дефектов, которые могут захватывать электроны и дырки на некоторое время, а также способствовать их рекомбинации.

3. Важное свойство полупроводникового материала это атомный номер Z и плотность ρ . Чем выше значение Z , тем тем больше удельные ионизационные потери для заряженных частиц и сечение элементарных процессов взаимодействия гамма-квантов с атомами, т. е. тем выше эффективность регистрации.

4. Очень важным свойством материала применяемого для изготовления детекторов является его удельное сопротивление.

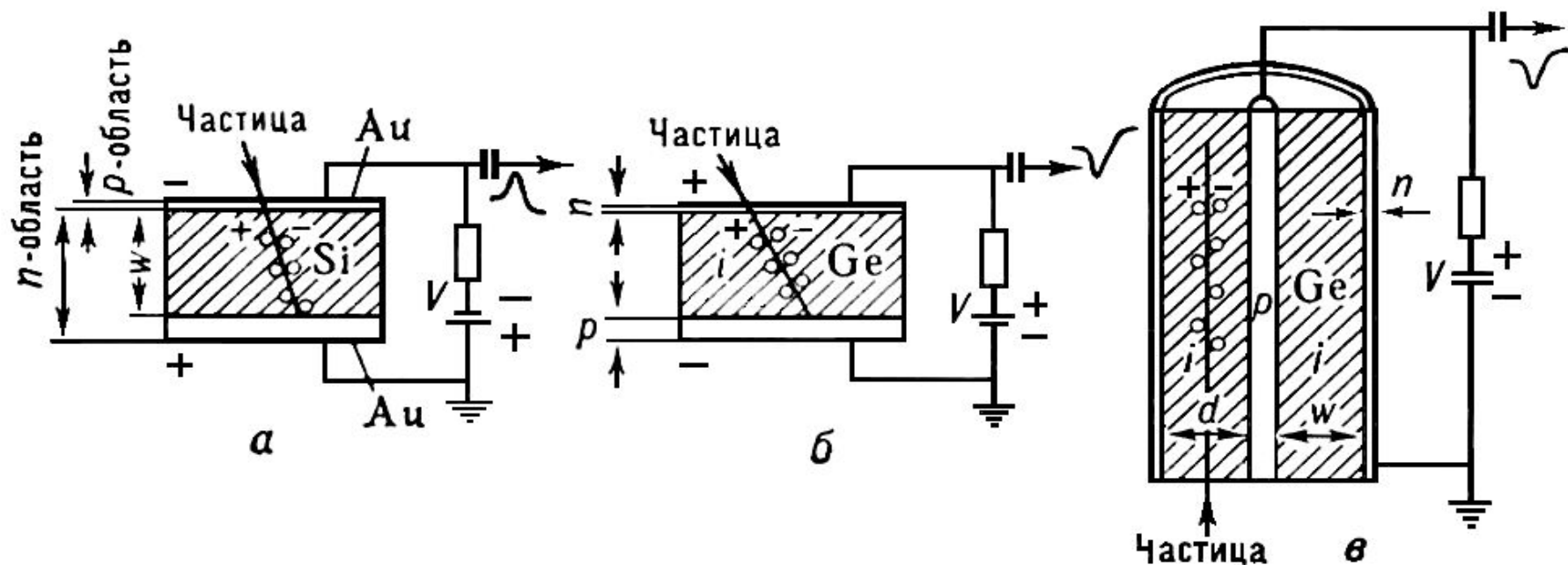
Характеристика	Ge	Si
Атомный номер	32	14
Атомная масса	72,6	28
Плотность при 300 ⁰ К, г/см ³	5,32	2,33
Число атомов в см ³	4,41 10 ²²	4,96 10 ²²
Относительная диэлектрическая постоянная ε	16	12
Ширина запрещенной зоны при 300 ⁰ К, E _g , эВ	0,665	1,115
Ширина запрещенной зоны при 0 ⁰ К, E _g , эВ	0,746	1,165
Средняя энергия для образования пары, эВ, ω	2,96	3,76
Подвижность электронов при 77 ⁰ К, см ² /В с	3,6 10 ⁴	4, 10 ²
Подвижность дырок при 77 ⁰ К, см ² /В с	4,2 10 ⁴	1,8 10 ⁴
Подвижность электронов при 300 ⁰ К, см ² /В с	3900	1350
Подвижность дырок при 300 ⁰ К, см ² /В с	1900	1350
Собственное удельное сопротивление при 300 ⁰ К, Ом/см	47	2,3 10 ⁵
Собственное удельное сопротивление при 0 ⁰ К, Ом/см	∞	∞
Концентрация собственных носителей при 300 ⁰ К, n _i =p _i , 1/см ³	2,4 10 ¹³	1,5 10 ¹⁰
Концентрация собственных носителей при 273 ⁰ К, n _i =p _i , 1/см ³	4,7 10 ¹²	1,3 10 ⁹
Концентрация собственных носителей при 77 ⁰ К, n _i =p _i , 1/см ³	2,3 10 ⁻²⁰	3,2 10 ⁻⁷

Основные типы ППД

1. Поверхностно-барьерные, где n - r переход осуществлен непосредственно на поверхности полупроводника. Применяются для спектроскопии мало энергетических частиц с небольшим пробегом.

2. Диффузионные n - r детекторы, в которых n - r переход создается в объеме – в процессе диффузии примесей. „Окном” служит обычно слой иной проводимости, образовавшийся у поверхности полупроводника.

3. Диффузионно-дрейфовые n - i - r детекторы, в которых дополнительно вводится i -область с собственной проводимостью - это обычно наиболее высокоомная и чувствительная область детектора с шириной до нескольких миллиметров. Окном детектора в этом служат „ n ” или „ r ” зона. Применяется для спектроскопии частиц с большими пробегами в веществе. При изготовлении таких детекторов, в частности для гамма-спектроскопии, методами диффузии и дрейфа дополнительно вносится легирующая добавка лития.



ППД: штриховкой выделена чувствительная область; n – область полупроводника с электронной проводимостью, p – с дырочной, i – с собственной проводимостями; а – кремниевый поверхностно-барьерный детектор; б – дрейфовый германий-литиевый планарный детектор; в – германий-литиевый коаксиальный детектор.

Почему Ge?

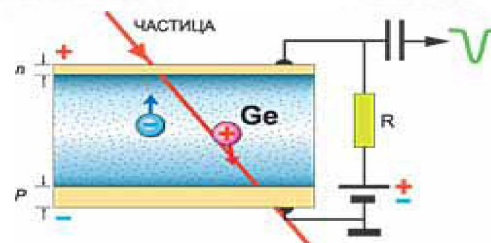
■ сечение взаимодействия γ -квантов сильно зависит от атомного номера вещества Z :

$$- \sigma_{\Phi} \sim Z^5$$

$$- \sigma_{\text{КОМ}} \sim Z$$

$$- \sigma_{\text{эл-познар}} \sim Z^2$$

$$Z(\text{Ge}) = 32, \text{ а } Z(\text{Si}) = 14$$



Технология изготовления HPGe-детекторов в планарной геометрии

Из монокристалла сверхчистого германия *p*-типа (германий, легированный галлием), с концентрацией примесей не превышающей $\sim 10E10$ см⁻³ вырезается необходимая заготовка, поверхности которой шлифуются и травятся в смеси плавиковой и азотной кислот. На одной из сторон заготовки, которая будет тыльной стороной детектора, создается омический контакт. Это достигается легированием исходного материала ионами бора с энергией ~ 10 кэВ, в результате чего в приповерхностной области образуется слой *p⁺-Ge* с низким удельным сопротивлением. На этот слой либо напыляют в вакууме золото, либо осаждают никель из раствора и припаивают тонкий электрод. На лицевую сторону заготовки напыляют в вакууме металлический литий и проводят его диффузию при температуре ~ 300 °С в течение ~ 10 мин. В результате диффузии лития на глубину ≤ 1 мкм образуется *p-n* переход. Затем на эту сторону заготовки напыляют слой золота и припаивают тонкий электрод. Схематическая структура подобного детектора показана на рис. 2. Подавая на *p-n* переход обратное смещение, добиваются расширения области, обедненной свободными равновесными носителями заряда (рабочего объема детектора), практически на всю толщину заготовки

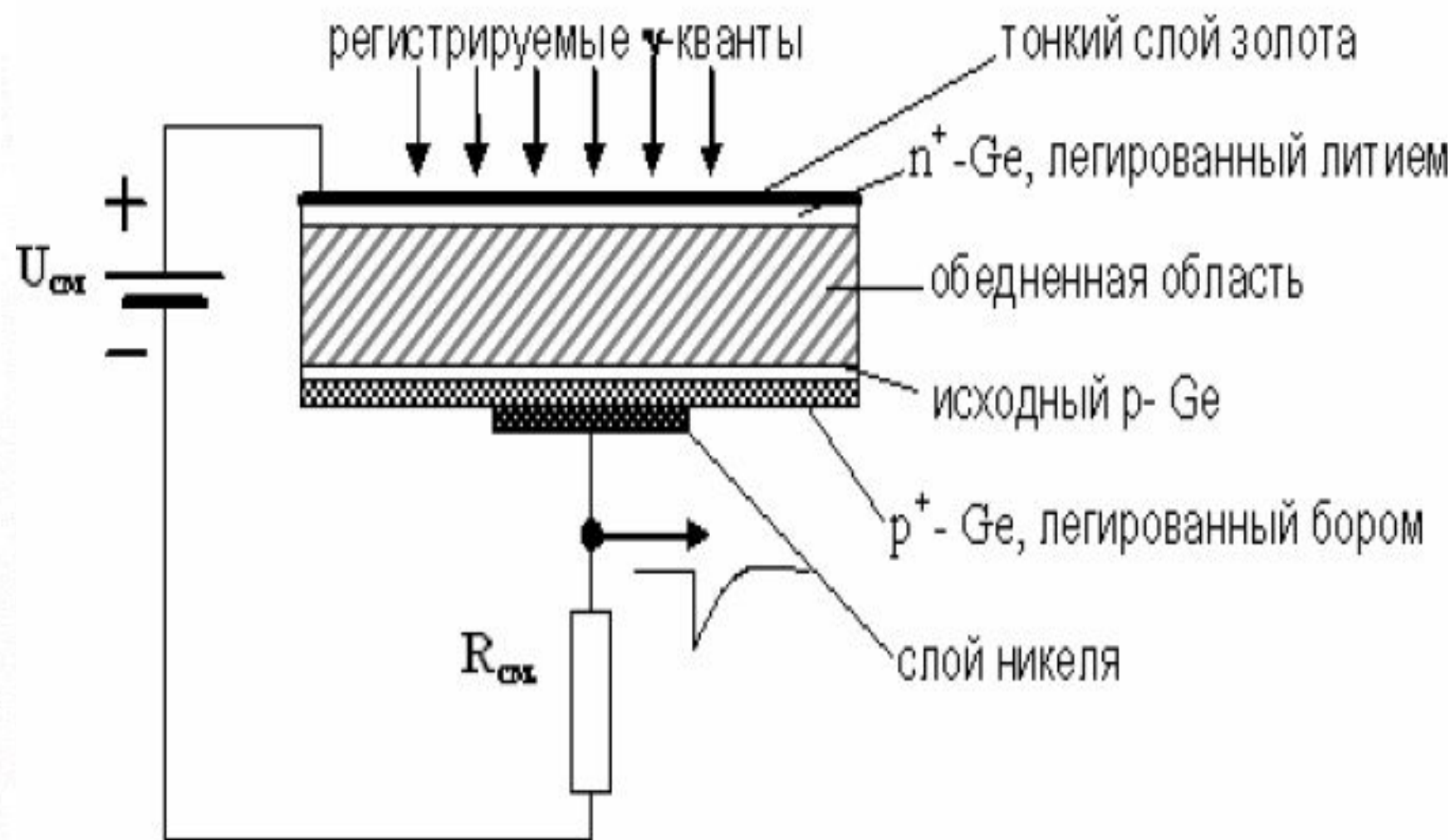


Рис. 2 Структура HPGe-детектора

Основные характеристики ППД

Энергетическое разрешение детектора называется отношение ширины ΔE на полувысоте к энергии E , соответствующей максимуму распределения $\eta = \Delta E/E \cdot 100\%$. Обычно энергетическое разрешение детекторов γ -квантов определяют по γ -линиям радиоактивного источника. Предельное разрешение Ge спектрометра в 3 раза выше чем у лучшей ионизационной камеры и в 10 раз выше чем у сцинтилляционного детектора.

Малое время собирания зарядов (порядка 10^{-8} – 10^{-12} с) обеспечивает высокую **временную разрешающую способность** полупроводникового счетчика, т.е. возможность разделить во времени два близких импульса

Эффективность регистрации – это отношение числа зарегистрированных частиц или гамма-квантов к полному числу частиц или гамма-квантов, попавших в детектор.

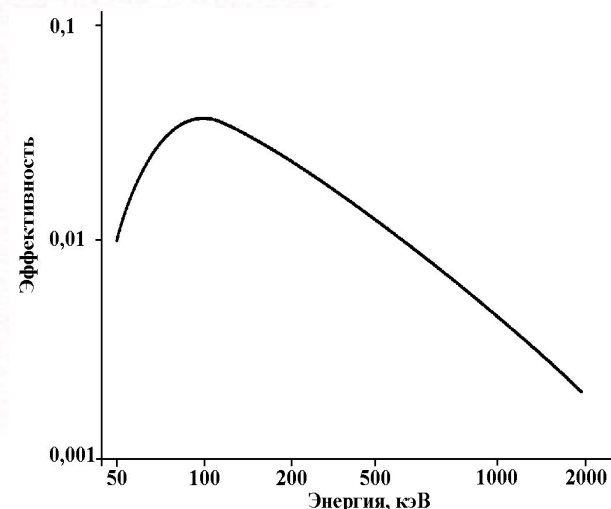


Рис. 3.3. Типичная зависимость эффективности регистрации γ -квантов (по пику ППЭ) от их энергии.

ПРИМЕР

Обычно энергетическое разрешение детекторов γ -квантов определяют по γ -линиям радиоактивного источника ^{60}Co ($E_{\gamma_1} = 1,17$ МэВ, $E_{\gamma_2} = 1,33$ МэВ). На образование одной пары "электрон-дырка" в германии требуется порядка 3 эВ (в сцинтилляторе около 350 эВ, в ионизационной камере около 35 эВ). Энергетическое разрешение детектора зависит от флуктуаций в числе N пар носителей зарядов.

Амплитуда сигнала пропорциональна N . Распределение числа носителей — распределение Пуассона. Его дисперсия D

определяется соотношением $D = N \approx N$, откуда

$$\Delta E/E = \Delta N/N = D^{1/2}/N = \approx N^{1/2}/N = N^{-1/2}$$

N (число носителей) для германиевого детектора в случае: $E_{\gamma_1} = 1,2 - 1,3$ МэВ (т. е. для ^{60}Co); $N(\text{Co}) = 1,2 \cdot 10^6 \text{эВ} / 3 \text{эВ} = 4 \cdot 10^5$;

$$\Delta E/E = \Delta N/N = N(^{60}\text{Co})^{-1/2} = \approx (4,5 \cdot 10^5)^{-1/2} = 1,5 \cdot 10^{-3}$$

Таким образом $\Delta E_{\gamma} = (1,2 - 1,3 \text{ МэВ}) \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ МэВ}$

Преимущества полупроводниковых детекторов

1. Энергия, необходимая для получения одной пары носителей в детекторе, гораздо меньше (2,96 эВ в Ge и 3,66 эВ в Si), чем в газах, заполняющих камеры (35 эВ). Поэтому число образовавшихся пар в детекторе соответственно больше и оно меньше подвержено статистическим флуктуациям.
2. Плотность материала полупроводникового детектора гораздо больше, чем плотность газов, заполняющих ионизационные камеры. Поэтому даже небольшие детекторы могут регистрировать частицы высоких энергий и γ -кванты.
3. Время нарастания электрического импульса в детекторах значительно меньше, чем в ионизационных камерах (разрешающее время 10^{-7} - 10^{-9} сек.), так как подвижность носителей в полупроводнике гораздо больше, чем подвижность ионов и электронов в камерах.
3. Амплитуда сигнала от ППД будет пропорциональна энергии ионизирующей частицы в широком интервале энергий. Поэтому ППД используются в спектрометрии ионизирующих частиц и гамма - квантов.
4. Возможность получения компактных детекторов малых размеров (обычно кремневых).

К недостаткам ППД можно отнести: 1. Большая стоимость по сравнению с газоразрядными и сцинтилляционными детекторами; 2. Необходимость, принудительного охлаждения при работе и хранении (германий-литиевых ППД).

