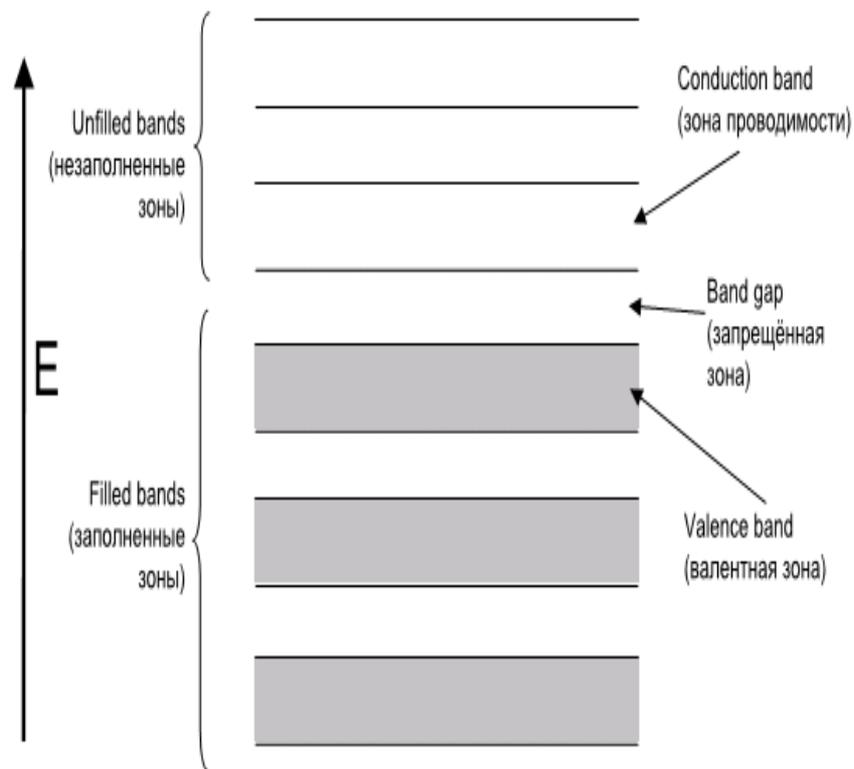


Полупроводниковые детекторы

Кимленко Ирина Михайловна

В кристаллах п/п энергетический уровень расщепляется на N близких по значению энергий. Они различаются незначительно и практически сливаются в непрерывную полосу энергий шириной в несколько эВ. Это разрешенная зона. Соседние разрешенные зоны разделены свободной от электронов запрещенной зоной шириной ΔW . Ряд разрешенных зон подразделяется на заполненные и свободные.

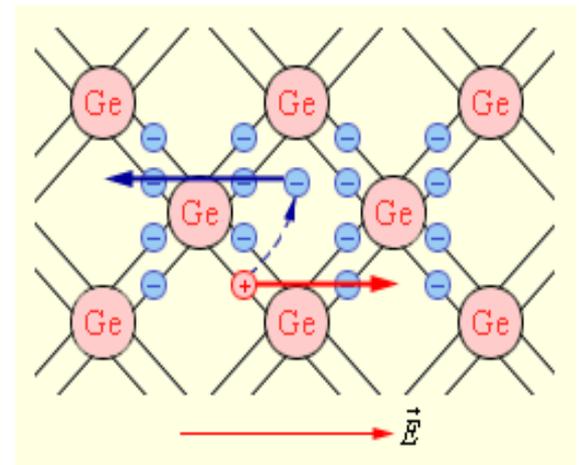


Последнюю заполненную зону, в которой сгруппированы валентные электроны называют валентной, а первую полностью или частично свободную зону - зоной проводимости.

Кристалл проводит электрический ток, когда в зоне проводимости есть электроны.

Электроны в зоне проводимости п/п могут появляться в результате переходов из валентной зоны. Электрон покидает валентную зону, если получает энергию, не меньшую ΔW .

После перехода электрона в валентной зоне п/п остается незаполненная валентная связь, которую называют дыркой. Она эквивалентна одному положительному элементарному заряду. Дырку может заполнить любой соседний валентный электрон. Тогда дырка переходит в соседнее междоузлие. Таким путем дырка хаотично перемещается по объему п/п.



Образование электронно-дырочной пары в кристалле германия

Одновременно с образованием электронов и дырок происходит процесс рекомбинации. Электроны переходят снова в валентную зону и компенсируют дырки. В результате переходов электронов между валентной зоной и зоной проводимости устанавливается равновесная концентрация свободных электронов и дырок в п/п.

После включения п/п в замкнутую электрическую цепь электроны в зоне проводимости начинают двигаться к аноду, а дырки в валентной зоне к катоду. Ток в химически чистом п/п называют собственным. Он равен сумме токов электронов и дырок.

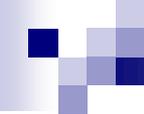
Проводимость чистых п/п - собственная проводимость.

Приготовить химически чистые п/п сложно. В п/п, приготовленных по современной технологии всегда есть примеси инородных атомов. Их концентрация составляет 10^{12} - 10^{15} ат/см².

Примесные атомы сильно влияют на электропроводность п/п.

Электропроводность, обусловленную примесями, - примесная.

Добавление определенных примесей позволяет получить п/п, имеющий электронную (n-полупроводники) или дырочную (p-полупроводники) проводимость.



При наличии примесей электрическая проводимость полупроводников сильно изменяется.

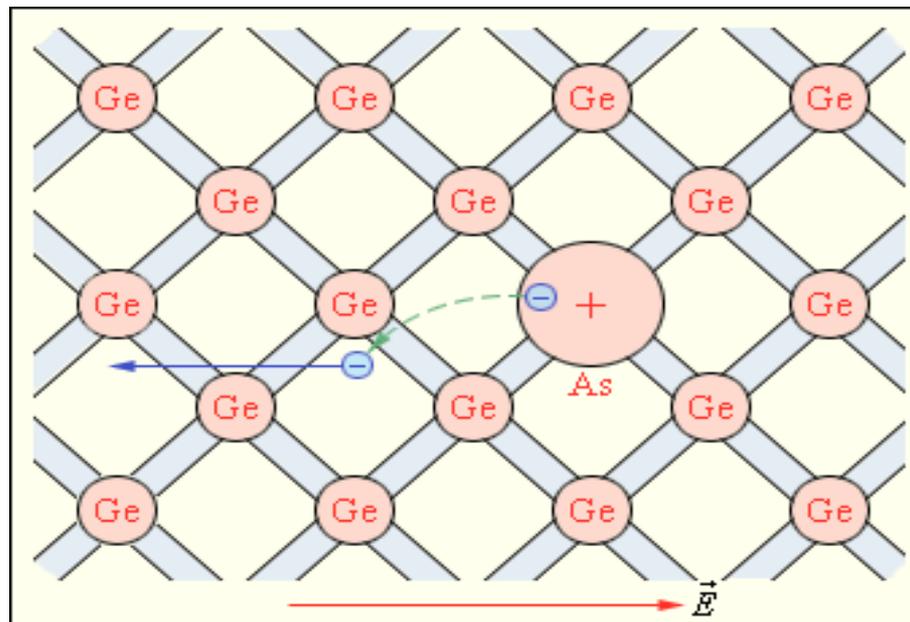
Атомы примесей вносят в кристалл новые дополнительные разрешенные зоны.

Тип примесных атомов подбирают такой, чтобы их валентная зона находилась между валентной зоной и зоной проводимости п/п (например, кремния или германия).

Необходимым условием резкого уменьшения удельного сопротивления полупроводника при введении примесей является отличие валентности атомов примеси от валентности основных атомов кристалла.

Полупроводник *n*-типа

Электронная проводимость возникает, когда в кристалл германия с четырехвалентными атомами введены пятивалентные атомы (например, атомы мышьяка, As).



Примесь из атомов с валентностью, превышающей валентность основных атомов полупроводникового кристалла, называется **донорной примесью**.

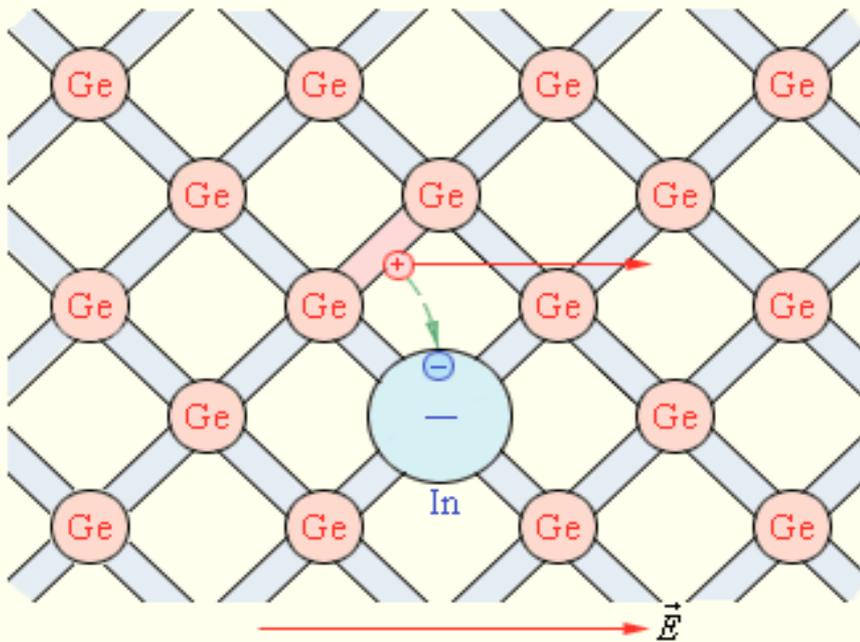
В кристалле появляется значительное число свободных электронов. Это приводит к резкому уменьшению удельного сопротивления полупроводника – в тысячи и даже миллионы раз.

Удельное сопротивление проводника с большим содержанием примесей может приближаться к удельному сопротивлению металлического проводника.

В кристалле германия с примесью мышьяка есть электроны и дырки, ответственные за собственную проводимость кристалла. Но основным типом носителей свободного заряда являются электроны, оторвавшиеся от атомов мышьяка. В таком кристалле $n \gg p$.

Полупроводник *p*-типа

Дырочная проводимость возникает, когда в кристалл германия введены трехвалентные атомы (например, атомы индия In).

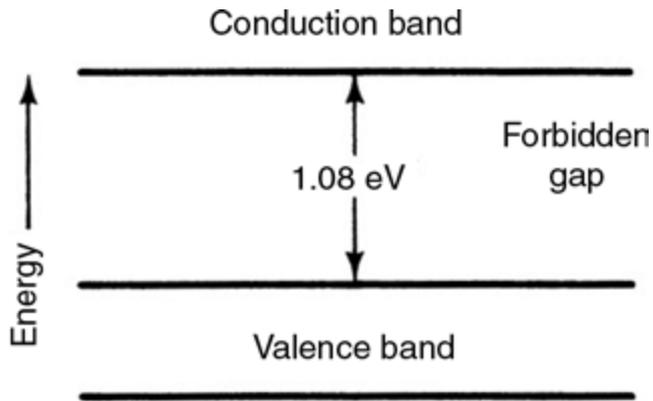


На образование связи с четвертым атомом германия у атома индия нет электрона. Недостающий электрон может быть захвачен атомом индия из ковалентной связи соседних атомов германия. В этом случае атом индия превращается в отрицательный ион, расположенный в узле кристаллической решетки, а в ковалентной связи соседних атомов образуется вакансия.

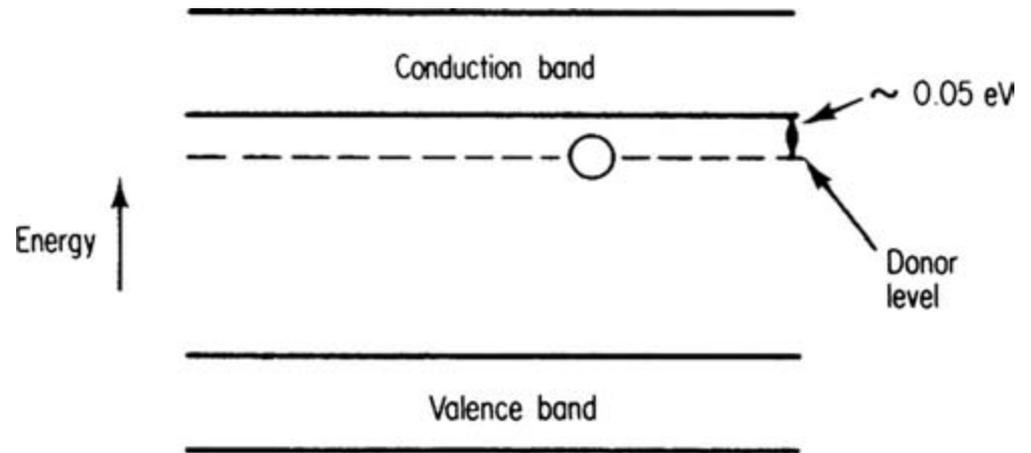
Примесь атомов, способных захватывать электроны, называется **акцепторной примесью**.

В результате введения акцепторной примеси в кристалле разрывается множество ковалентных связей и образуются вакантные места (дырки). На эти места могут перескакивать электроны из соседних ковалентных связей, что приводит к хаотическому блужданию дырок по кристаллу.

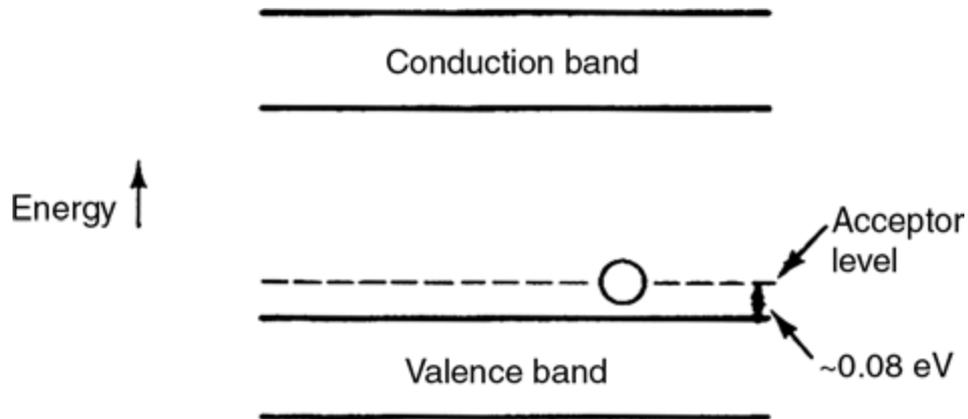
Концентрация дырок в полупроводнике с акцепторной примесью значительно превышает концентрацию электронов, которые возникли из-за механизма собственной электропроводности полупроводника: $np \gg nn$.



Schematic diagram of the energy levels of crystalline silicon



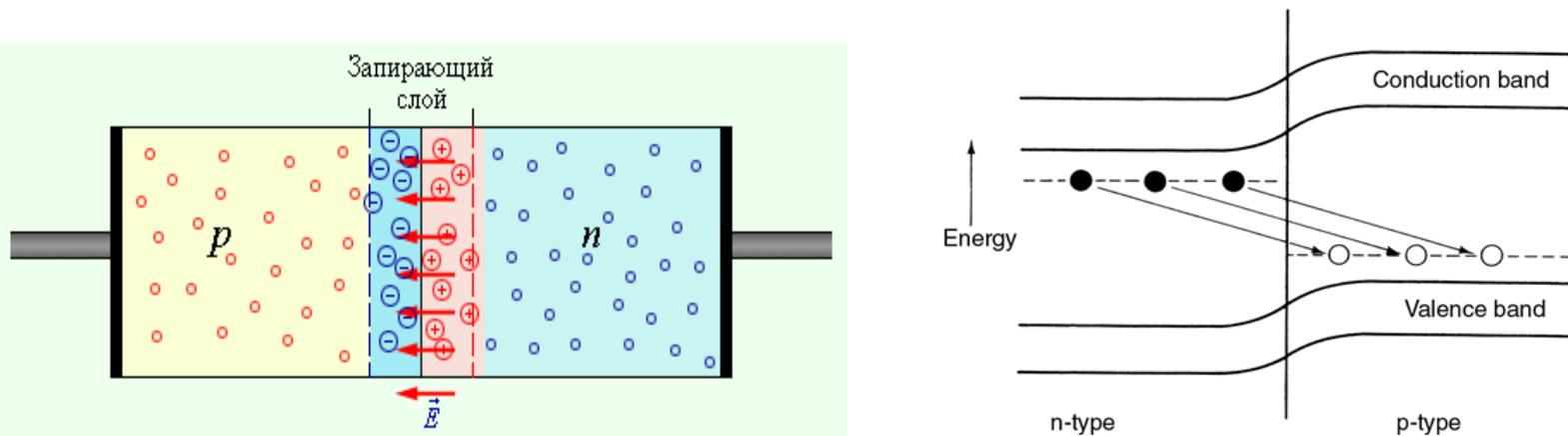
Schematic diagram of the energy levels of crystalline silicon with a donor impurity



Schematic diagram of the energy levels of silicon with a p-type impurity

ОБРАЗОВАНИЕ n - p -ПЕРЕХОДА

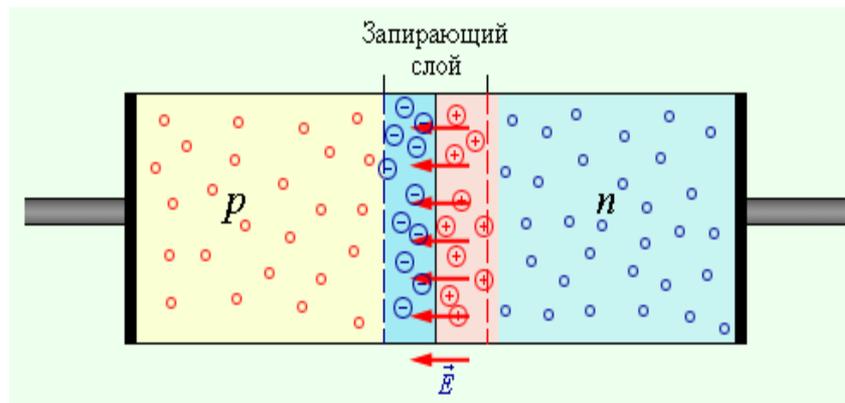
В любом полупроводниковом приборе имеется один или несколько электронно-дырочных переходов. **Электронно-дырочный переход** (или n - p -переход) – это область контакта двух полупроводников с разными типами проводимости.



При контакте двух полупроводников n - и p -типов начинается процесс диффузии: дырки из p -области переходят в n -область, а электроны, наоборот, из n -области в p -область. В результате в n -области вблизи зоны контакта уменьшается концентрация электронов и возникает положительно заряженный слой. В p -области уменьшается концентрация дырок и возникает отрицательно заряженный слой. На границе полупроводников образуется двойной электрический слой, поле которого препятствует процессу диффузии электронов и дырок навстречу друг другу.

ОБРАЗОВАНИЕ n-p-ПЕРЕХОДА

Пограничная область раздела полупроводников с разными типами проводимости (**запирающий слой**) обычно достигает толщины порядка десятков и сотен межатомных расстояний. Объемные заряды этого слоя создают между p - и n -областями запирающее напряжение U_z .



ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ППД

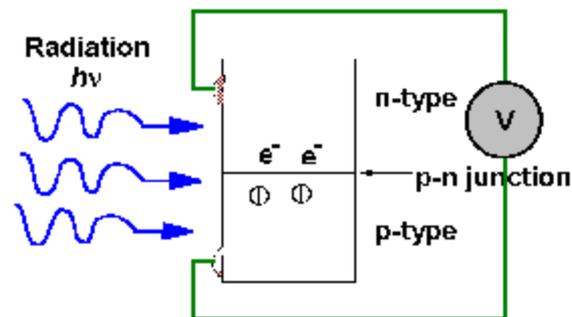
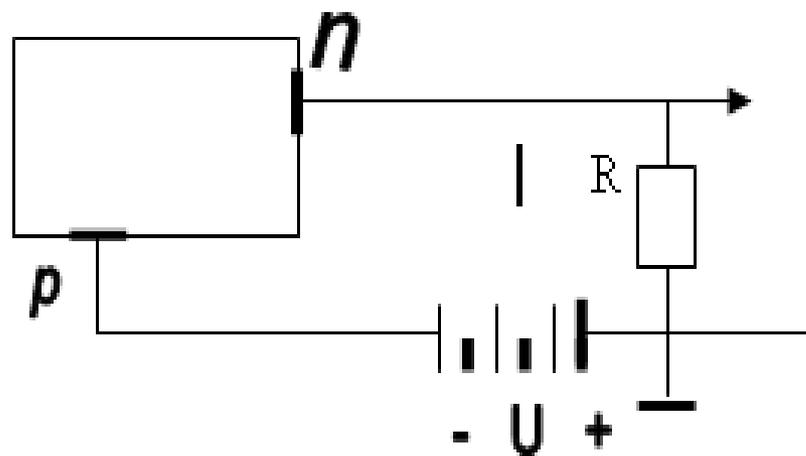
Для регистрации излучения применяют п/п, в которых n-p-переход занимает часть объема.

На поверхность п/п наносят 2 электрода. К ним подключают источник питания.

Высокое отрицательное напряжение подводят к p-слою, n-слой заземляют через нагрузочное сопротивление R.

Детекторы выдерживают напряжение от 200 до 2000 в.

При таком включении в электрическую цепь через детектор протекает только темновой (собственный) ток.



ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ППД

Темновой ток зависит от температуры T и ширины запрещенной зоны ΔW .

Чем меньше значение ΔW , тем сильнее возрастает темновой ток с повышением температуры.

ΔW германия составляет 0,67 В , кремния - 1,12 В.

Темновой ток германия высок при комнатной температуре, у кремния - очень мал.

ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ППД

- Заряженная частица, попадая в п/п детектор, ионизирует и возбуждает преимущественно атомы кремния или германия. По зонной теории в процессе ионизации электрон переводится из полностью заполненной разрешенной зоны в зону проводимости, в результате чего образуется пара электрон - дырка.
- Если пара электрон-дырка возникла в n- или p- части детектора, то в цепи детектора не возникает ионизационного тока, т.к. все напряжение приложено к n-p-переходу.
- Если же заряды появляются в n-p-переходе, то электроны и дырки свободно перемещаются под действием внешнего напряжения соответственно к аноду и катоду. При этом электрическое поле от внешнего источника и поле самого перехода способствует быстрому собиранию электронов и дырок на электродах.

ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ППД

- После торможения заряженной частицы в n-p-переходе и образования пар электрон-дырка электрическая цепь детектора замыкается. В течение некоторого времени в ней протекает электрический ток.
- Через p/n детектор постоянно протекает собственный (темновой) ток, поэтому заряженную частицу можно зарегистрировать, если рабочий ток намного больше темнового.
- Темновой ток не должен превышать 10^{-8} - 10^{-10} А. Это условие выполняется для кремниевых детекторов при комнатной температуре, для германиевых - при охлаждении до -140 – 160 С.

ОСОБЕННОСТИ п/п ДЕТЕКТОРОВ

Энергия образования пары электрон-дырка E не зависит от типа и энергии заряженной частицы.

Около $2/3$ энергии заряженной частицы расходуется на возбуждение атомов, которая затем преобразуется в энергию колебания атомов кристаллической решетки. Поэтому значение E примерно в три раза больше ширины запрещенной зоны.

Значение E в п/п детекторе меньше энергии ионной пары в газах примерно в 10 раз. Следовательно, при полном торможении одной и той же частицы с энергией E в импульсной камере и п/п счетчике амплитуда импульса в п/п детекторе примерно в 10 раз больше.

ОСОБЕННОСТИ п/п ДЕТЕКТОРОВ

Подвижность электронов и дырок, а, значит, время собирания их на электродах детектора отличаются не более чем в 3 раза.

В п/п детекторе всегда осуществляется полное собирание как электронов, так и дырок, вследствие чего отсутствует индукционный эффект. При охлаждении детектора подвижности электронов и дырок увеличиваются и становятся приблизительно равными по величине.

Время собирания электронов и дырок в п/п детекторе составляет 20-100 нсек и значительно меньше времени собирания ионов в ИК. Поэтому п/п детекторы обладают **хорошим быстродействием или малым разрешающим временем.**

При невысоких U на электродах п/п детектора происходит частичная рекомбинация электронов и дырок. Это снижает количество зарядов в детекторе по закону

$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau}$$

N_0 - количество зарядов (электронов и дырок) в момент времени $t=0$;
 τ - среднее время жизни заряда до рекомбинации. Численно равно времени, в течение которого кол-во зарядов в п/п уменьшается в e раз.

Время жизни τ является характеристикой качества материала п/п, из которого изготовлен детектор.

Величина τ равна среднему времени жизни заряда до рекомбинации - при движении электронов и дырок к электродам детектора всегда часть зарядов рекомбинирует.

Чем $>\tau$, тем $<$ доля рекомбинирующих электронов и дырок.

Высококачественный исходный германий характеризуется временем жизни зарядов 50-200 мксек.

- n-p-переход выполняет такие же функции, как газ в ИК.
- П/п детектор представляет собой ИК с твердым наполнением.
- Удельная ионизация в п/п примерно в 1000 раз больше удельной ионизации в газе, поэтому необходимый для торможения частиц объем n-p-перехода намного меньше объема ИК.
- П/п детектор миниатюрен по своим размерам. Его можно использовать для регистрации в труднодоступных местах.

Типы ПП детекторов

В зависимости от метода приготовления

- Поверхностно-барьерные (ПБД)
- Диффузионные (ДД)
- Детекторы р-і-п-типа (PINД)

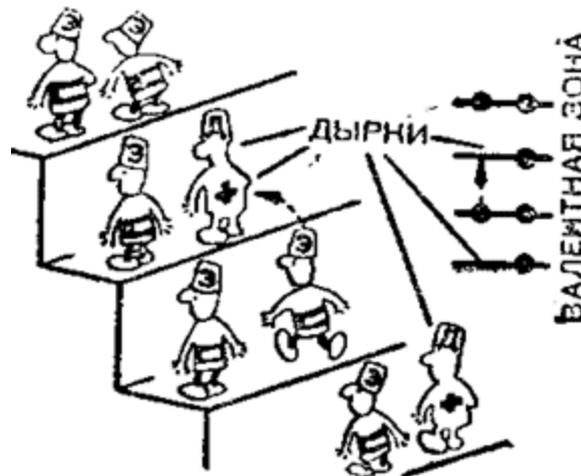
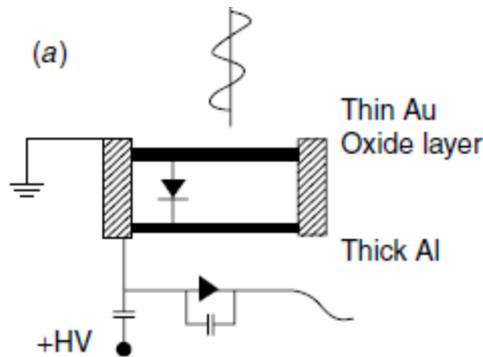


Рис. 24

Поверхностно-барьерные детекторы

ПБД кратко обозначают химическими символами исходного n-полупроводника и золотого электрода. Например, в Si-Au-детекторе n-полупроводником служит кремний.

ПБД наиболее распространены, т.к. не требуют специального охлаждения для снижения темнового тока.



Consist of a thin cylindrical piece of high resistivity pure n-type silicon with a thin gold contact on one side and an aluminum contact on the other. The gold contact is a thin layer through which the radiation enters the silicon. Just under the gold is an oxide layer that forms the semiconductor junction (or barrier). The gold layer is sensitive to physical wear, and the oxide layer can be depleted by extended exposure to vacuum. The oxide layer is also very sensitive to organic molecules but can be reconstructed with proper treatment.

Поверхностно-барьерные детекторы

- Толщина чувствительного к излучению слоя n-p-перехода не превышает 0,2-0,5 мм.
- ПБД регистрируют заряженные частицы, пробеги которых укладываются в чувствительном слое: осколки деления, альфа-частицы, протоны и электроны до энергий 500 кэВ. Заряженные частицы проникают в n-p переход через тонкий слой золота, в котором они теряют незначительную часть своей энергии.

Диффузионные детекторы

n-p-переход получают методом диффузии в тонкий поверхностный слой p- или n-полупроводника донорных или акцепторных атомов.

Большинство ДД изготавливают из p-кремния, в который вводят фосфор в качестве донора.

Технология производства заготовок для ДД и ПБД одинакова.

После шлифовки боковую пов-ть покрывают защитной пленкой и на одну поверхность наносят электрод - слой алюминия.

Другую пов-ть покрывают раствором P_2O_5 в этиленгликоле.

Заготовку помещают на 1-2 часа в атмосферу сухого аргона при 500-800 °С.

Фосфор, диффундируя в кремний, не только компенсирует акцепторные примеси, но и превращает поверхностный слой p-кремния толщиной примерно в 1 мкм в n-кремний.

Электроды ДД (алюминий и n-кремний) подключают к электрической цепи через прижимные контакты.

Толщина чувствительного слоя p-n-перехода ДД составляет несколько десятых мм.

ДД регистрируются такие же частицы, как и ПБД. Частицы поступают в n-p-переход через n-кремний, проходя через который частицы практически не уменьшают своей энергии.

Детекторы p-i-n-типа

Для регистрации бета-частиц и гамма -квантов необходима большая толщина чувствительного слоя, чем у ПБД и ДД. Можно расширить, если в p-полупроводник (германий или кремний) ввести донорную примесь лития методами диффузии и дрейфа.

Скорость проникновения лития в материал п/п в 10^7 раз больше, чем для других доноров. Такая высокая скорость связана с рядом особенностей поведения лития в кристаллической решетке п/п.

Энергия связи внешнего электрона атомов лития, внедренных в п/п, составляет всего 0,033 эВ в кремнии и 0,0043 эВ в германии. Этот внешний, слабосвязанный электрон атомы лития теряют, превращаясь в положительные ионы лития.

Диаметр иона лития настолько мал, что при диффузии он располагается в междоузлиях кристаллической решетки тонкого поверхностного слоя п/п. Если к п/п приложить внешнее напряжение, то под действием электрического поля ионы лития начинают дрейфовать внутрь п/п по междоузлиям кристаллической решетки.

Получение толстого чувствительного слоя:

в беспримесном п/п имеет место зависящее от температуры равновесие между процессом образования электронов, дырок и их рекомбинацией. В то же время в п/п всегда содержатся примеси донорного или акцепторного типа.

Примеси создают свободные заряды соответствующего типа, нарушают равновесие между зоной проводимости и валентной зоной и ведут к возникновению проводимости того или иного типа.

Если в п/п добавлен акцептор, то возникает больше дырок.

Процесс рекомбинации восстанавливает нарушенное равновесие и обеспечивает выполнение условий

$$n_e n_d = n_o^2 \quad , \quad n_e < n_o \quad , \quad n_d > n_o \quad ,$$

где n_e - число электронов в зоне проводимости; n_d - число дырок в валентной зоне.

Увеличение числа дырок приводит к уменьшению числа электронов.

Если в такой п/п ввести донорную примесь, то произойдет уменьшение числа дырок и увеличение числа электронов.

При равенстве концентраций донора и акцептора п/п не будет отличаться от беспримесного, т.к. в нем снова будет n_0 электронов в зоне проводимости и p_0 дырок в валентной зоне. Такой проводник называют **полностью скомпенсированным**.

Если к проводнику приложить напряжение, то через него потечет собственный ток.

Акцептор создает в п/п n_1 неподвижных отрицательных ионов и p_1 свободных дырок,

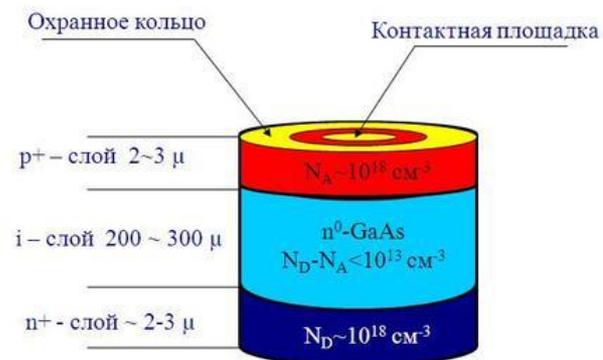
Донорная примесь - n_1 неподвижных положительных ионов и n_1 свободных электронов.

Дырки и электроны рекомбинируют, а неподвижные ионы не переносят электрического заряда.

Полностью скомпенсированный п/п является основой для получения чувствительного слоя толщиной до 2 см.

Большой чувствительный слой называют i - слоем. Детекторы с таким слоем называют детекторами p-i-n-типа.

i-слой получают методом дрейфа лития - детекторы называют кремний-литиевыми и германий-литиевыми.



Германиевые ППД

В начале 80-ых годов были разработаны новые методы очистки Ge, которые позволяют выращивать большие кристаллы сверхчистого германия HPGe.

В зависимости от степени очистки HPGe может обладать собственной проводимостью n- или p-типа.

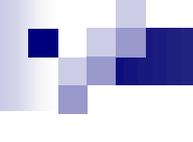
Детекторы из особо чистого германия обозначаются как HPGe(p) или HPGe(n).



Германиевые ППД

Основное преимущество детекторов на основе HPGe: возможность хранения при комнатной температуре в отличие от $Ge(Li)$ детекторов, которые должны храниться при температуре жидкого азота.

Детекторы на основе HPGe могут иметь большие размеры по сравнению с $Ge(Li)$ детекторами. Это позволяет создавать детекторы гамма-излучения не только с высоким энергетическим разрешением, но и с хорошей эффективностью в области регистрации гамма-излучения.



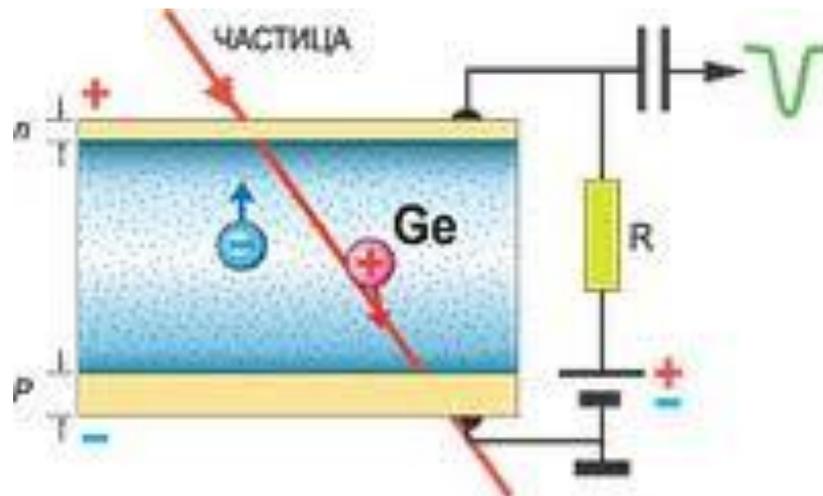
Сегментирование позволяет в несколько раз повысить чувствительность спектрометра на основе HPGe.

Радиационная стойкость полупроводниковых спектрометрических гамма-детекторов значительно меньше сцинтилляционных и существенно зависит от вида облучения, типа кристалла и его размеров.

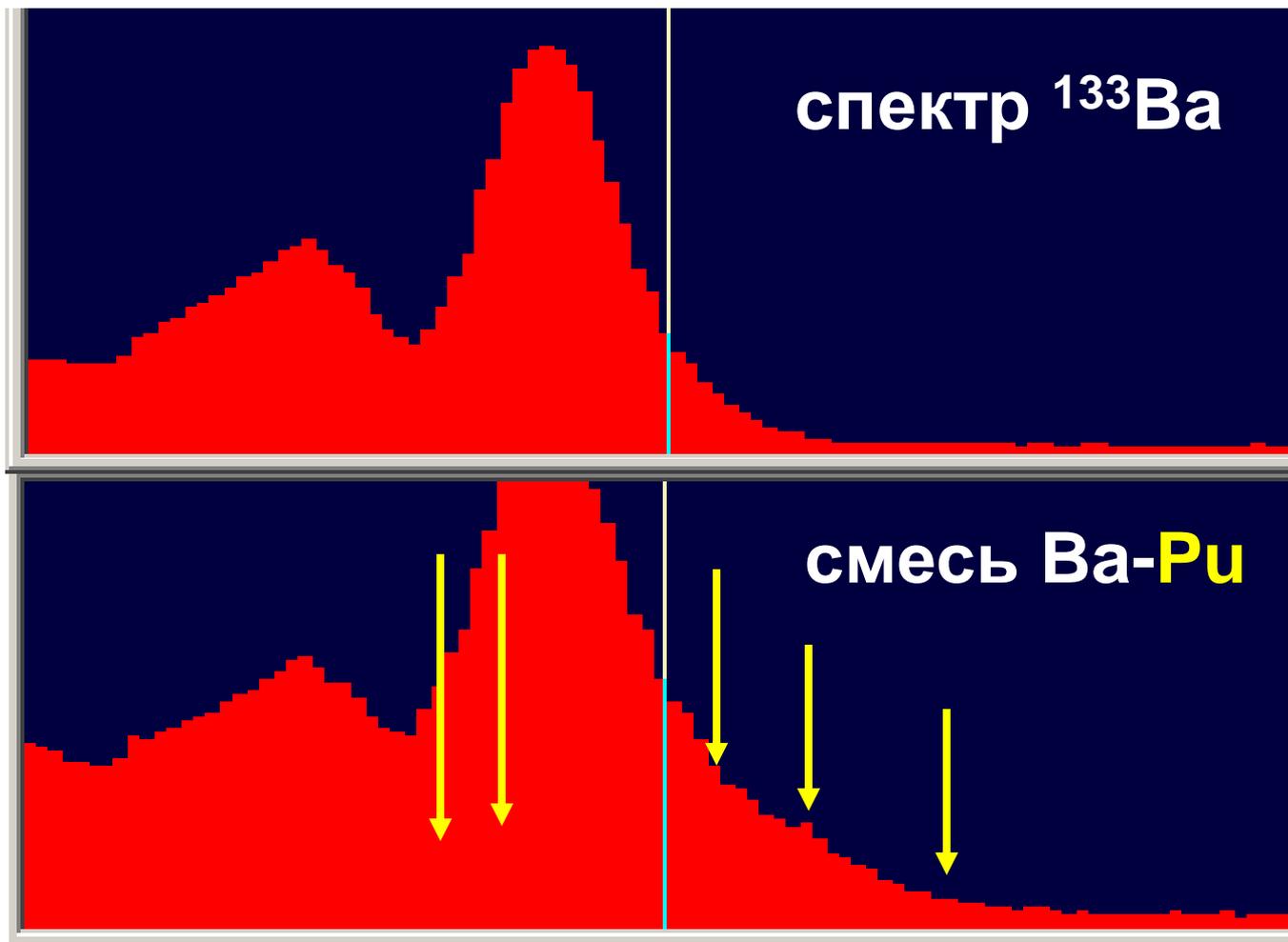
Заметные изменения свойств этих детекторов могут происходить в процессе их работы, так как в этих кристаллах под действием ионизирующего излучения происходит накопление необратимых радиационных повреждений.

Различные виды взаимодействия ионизирующего излучения с веществом детектора приводят к возникновению дефектов в структуре его кристаллической решетки, и в большинстве случаев эти повреждения возрастают пропорционально дозе облучения.

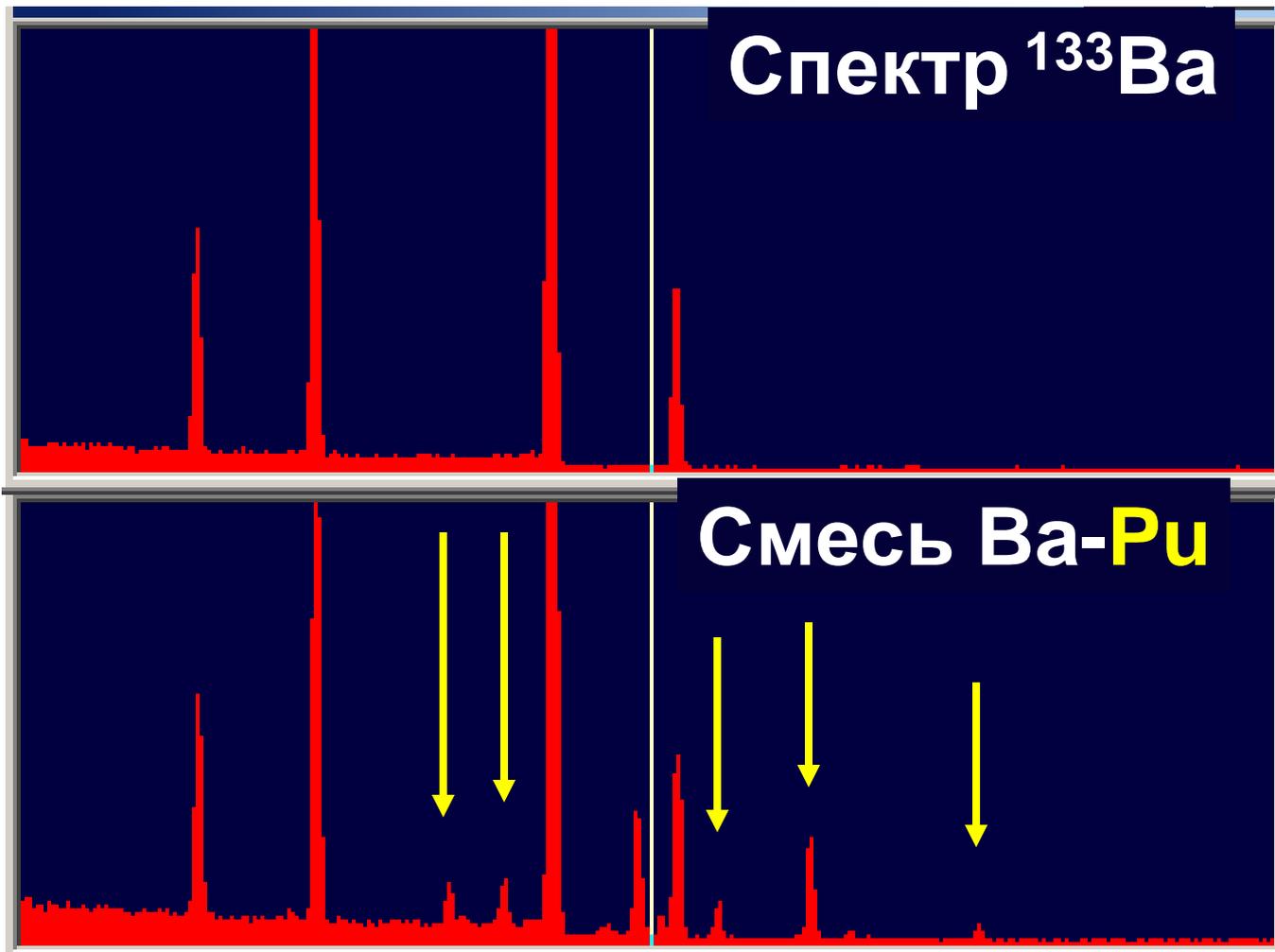
Чем больше размеры полупроводникового детектора, тем раньше начинается деградация его энергетического разрешения при облучении ионизирующими излучениями.



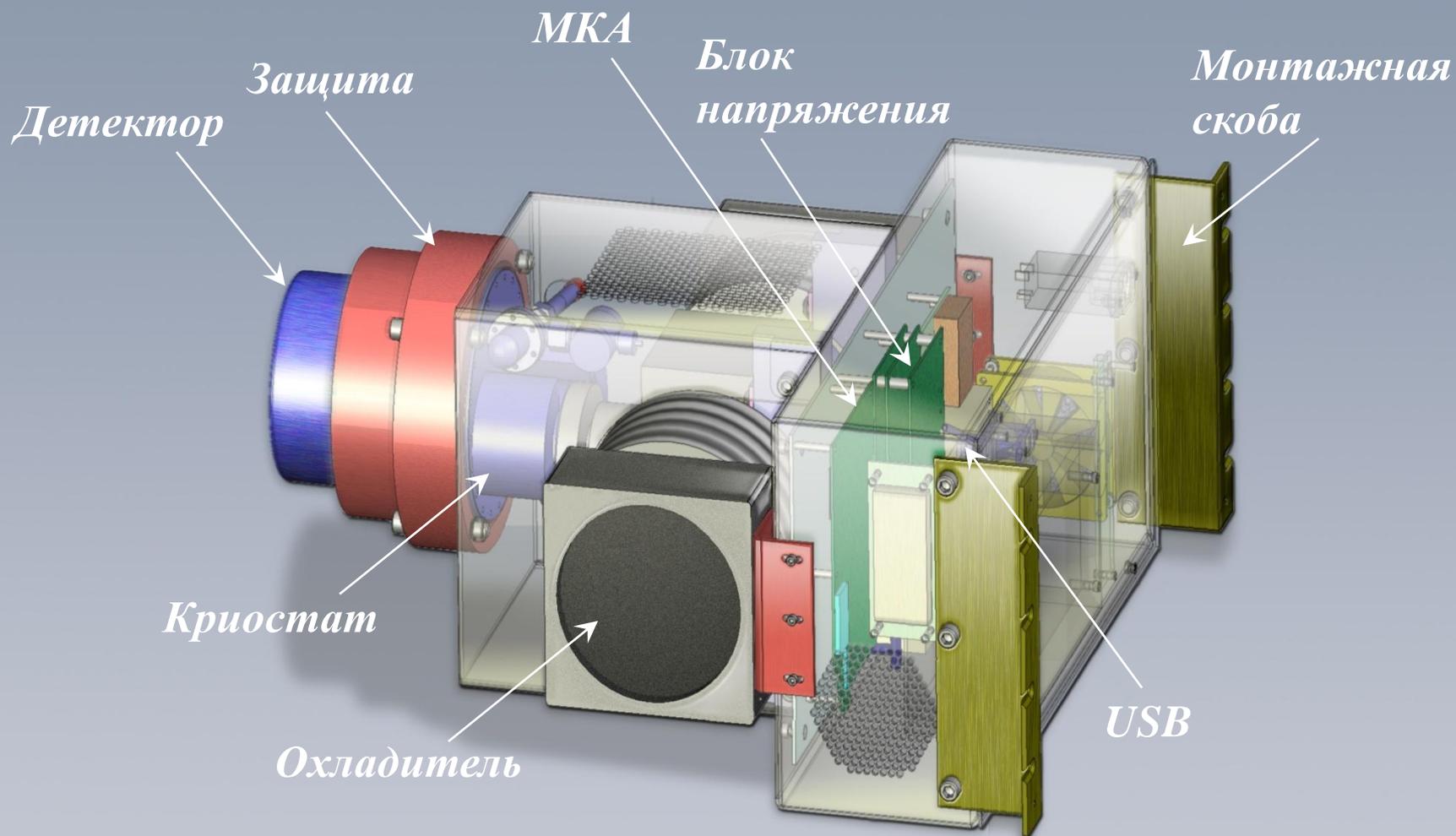
Преимущества использования ППД детекторов
NaI не способен увидеть Pu в смеси



*Только ППД детектор
способен разделить пики Рu и Ва*



Как устроен детектор ОЧГ





$T = -196^{\circ}\text{C}$



Система охлаждения
(азотное или электроохлаждение)

Обработка сигнала



Система электроники
(аналоговая или цифровая)

Обработка спектра



Программное обеспечение
(зависит от решаемой задачи)

Выбор «правильного» ОЧГ детектора

С чем нужно определиться?

- «Упаковка» (вертикальный или горизонтальный)
- Лабораторный или переносной
- Стандартный или низкофоновый

Спектрометрический тракт





Лабораторный цифровой спектрометр

В состав спектрометра помимо детектора, криостата и дьюара входит цифровой интегральный малогабаритный (вес 1 кг) анализатор с программным обеспечением MAESTRO-32



Переносной цифровой спектрометр

Портативные криостаты объёмом от 1.2 л до 7л





Основные преимущества

Совместим со всеми типами ОЧГ детекторов ORTEC

Позволяет охладить ОЧГ детектор в любом месте, где есть 220В

Замена детектора может быть произведена пользователем в полевых условиях.

Компактный. Вес 16.4 кг.

Семейство портативных спектрометров



Detective - профессиональный прибор для поиска / идентификации нуклидов для пользователей, НЕ являющихся научными работниками.

Detective-EX -

*Detective + счетчик нейтронов.
Активный цветной экран*



Micro-Trans-Spec - интегрированный гамма-спектрометр с детектором ОЧГ эффективностью 15%.

Trans-Spec-100 то же, но с детектором эффективностью 45%.



Аксессуары Trans-Spec и Detective



Чемодан для транспортировки



Поясные аккумуляторы с зарядным устройством



LDM = Laboratory Detector Module

Интегрированный лабораторный гамма-спектрометр LDM-100-GEM



ОЧГ- спектрометрия в любом месте

