

HPGE-детектор

(полупроводниковый детектор из сверхчистого германия)

План

- Виды детекторов
- Спектры и амплитудные распределения
- Полупроводниковый детектор
- Функция отклика детектора
- Эффективность детектора

Введение

- сцинтилляционные спектрометры,
которые имеют высокую эффективность регистрации γ -квантов (до 100 %), но низкое энергетическое разрешение (> 10 %)
- кристалл-дифракционные спектрометры,
имеющие высокое разрешение (~ 0.01 %) при низкой светосиле ($\sim 0.1 \div 10^{-3}$ %)

Спектры и амплитудные распределения

- Под γ -спектром подразумевается распределение γ -квантов по энергии
- Спектры γ -квантов имеют дискретный характер (линейчатые спектры)
- При регистрации амплитудного распределения, как сам детектор, так и электронная аппаратура, применяемая для передачи его сигналов, вносят свои искажения (шум)
- Энергетическое разрешение определяет, насколько близко могут находиться в спектре две линии, которые спектрометр позволяет идентифицировать как разные

Энергетическим разрешением детектора называют отношение ширины ΔE на полувысоте распределения к энергии E , соответствующей максимуму распределения

$$\eta = (\Delta E / E) * 100\%$$

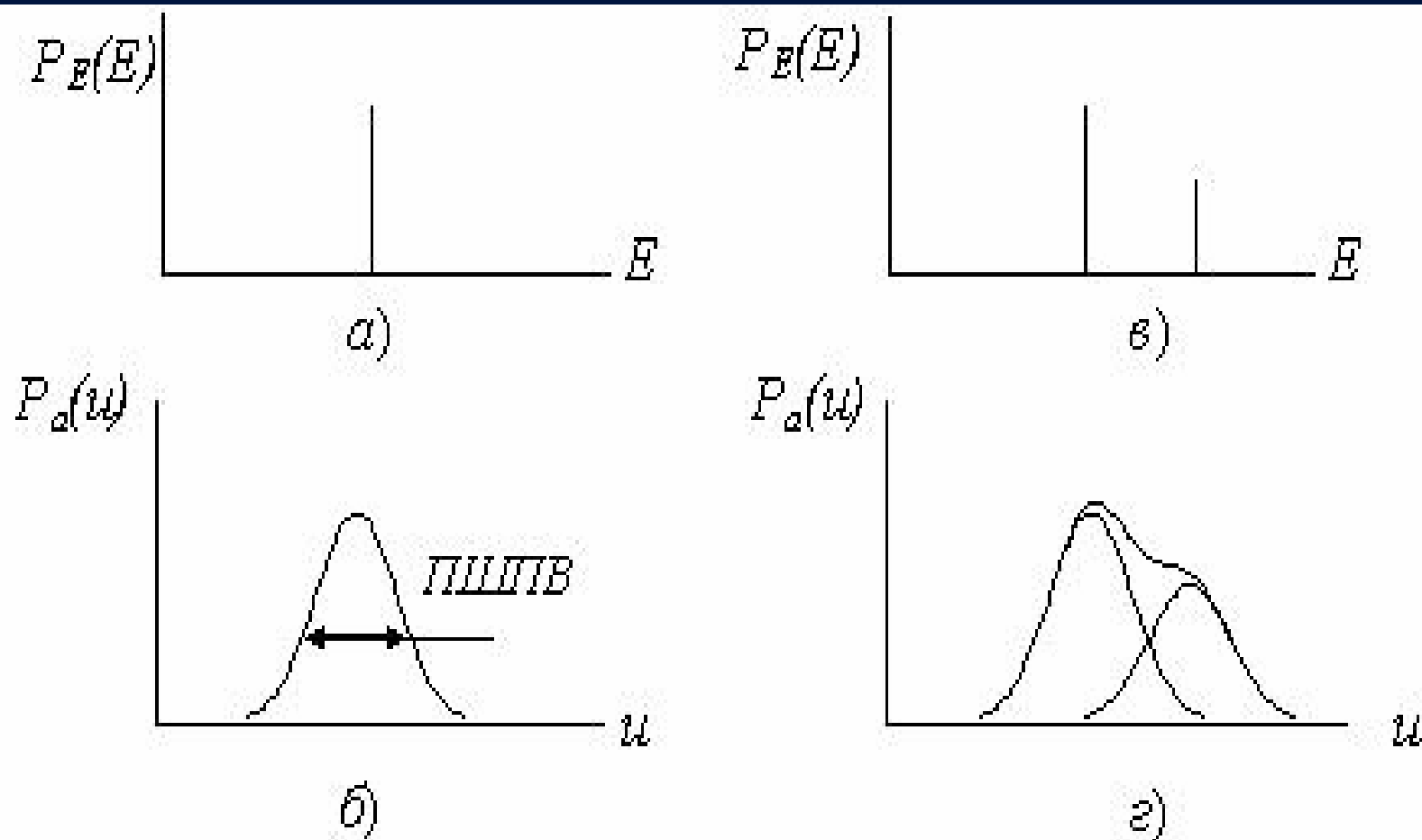


Рис 1 Энергетический спектр и амплитудное распределение:

а) монохромный спектр (синглет), б) амплитудное распределение одиночной линии, в) две близкие линии (дублет), г) амплитудное распределение дублета.

Полупроводниковый детектор

- Основное отличие детекторов γ -излучения от детекторов заряженных частиц состоит в том, что заряженная частица, попавшая в чувствительный объем детектора, регистрируется как правило с вероятностью, равной единице, тогда как вероятность регистрации γ -квантов значительно меньше единицы

- HPGe-детектор представляет собой полупроводниковый диод с р-п переходом
- Повышение эффективности:
 - использование Ge
 - коаксиальная геометрия

Почему Ge?

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

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

- $\sigma_{КОМ} \sim Z$

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

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

Технология изготовления HPGe-детекторов в планарной геометрии

- Из монокристалла сверхчистого германия *p*-типа (германий, легированный галлием), с концентрацией примесей не превышающей $\sim 10^{10}$ 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

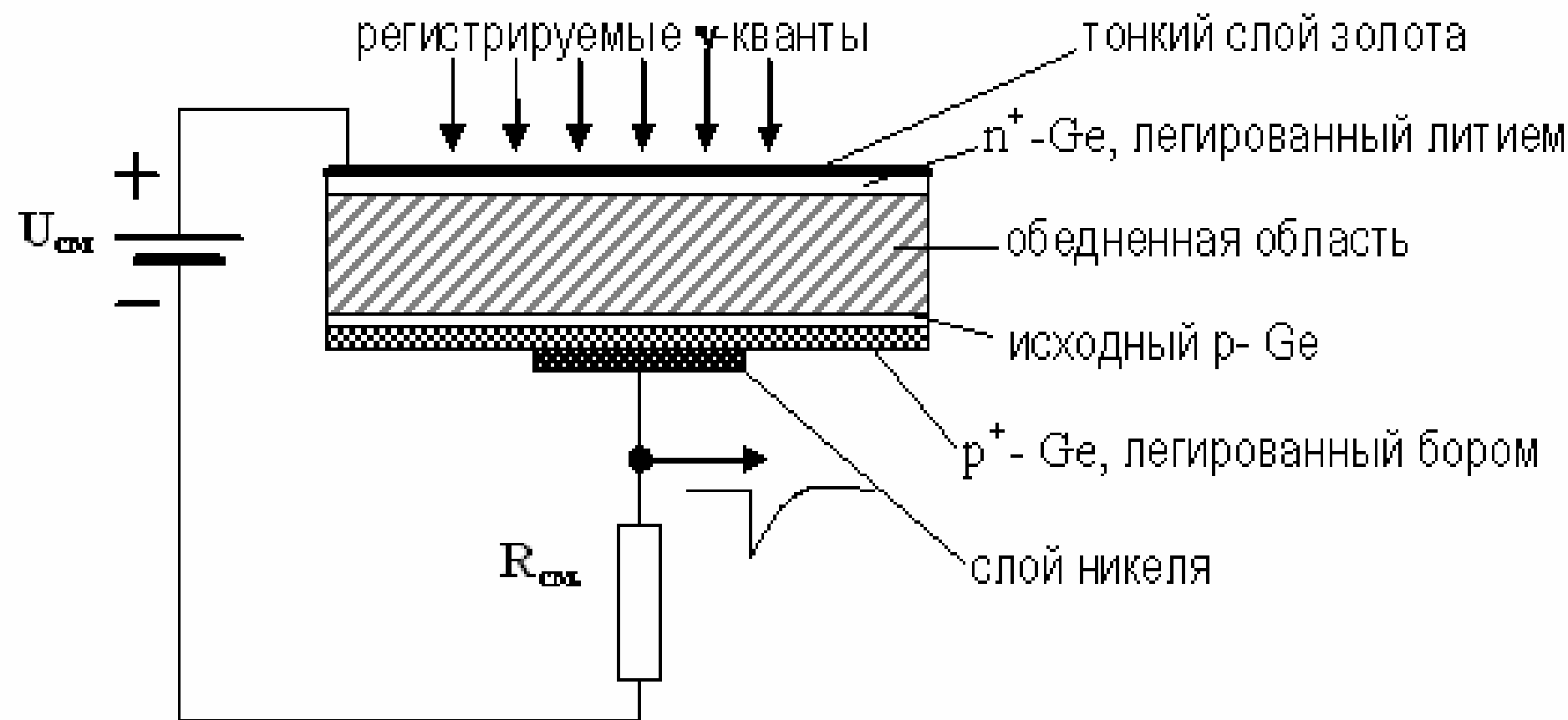
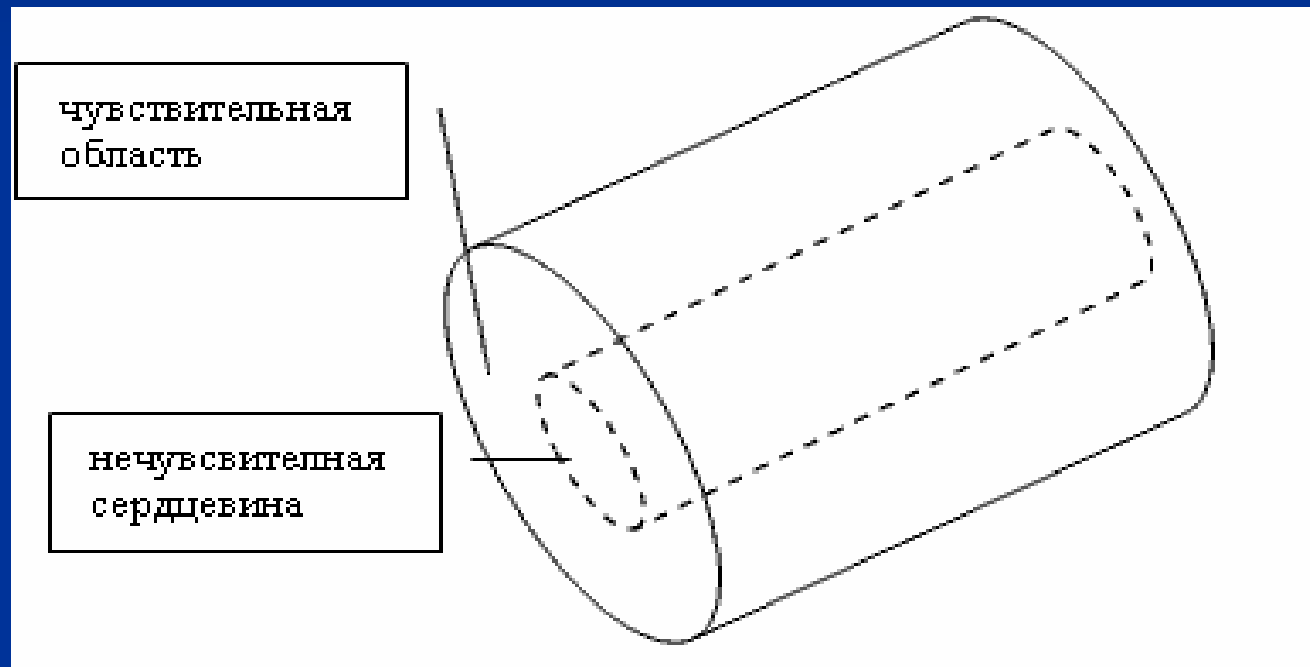


Рис. 2 Структура HPGe-детектора

Технология изготовления HPGe-детекторов в коаксиальной геометрии

- Аналогична



Чувствительный объем детектора достигает 300-400 см³

- Детекторы на основе сверхчистого германия характеризуются низким значением обратного тока и высоким энергетическим разрешением
- В отличие от полупроводниковых детекторов из кремния германиевые детекторы необходимо эксплуатировать при низкой температуре

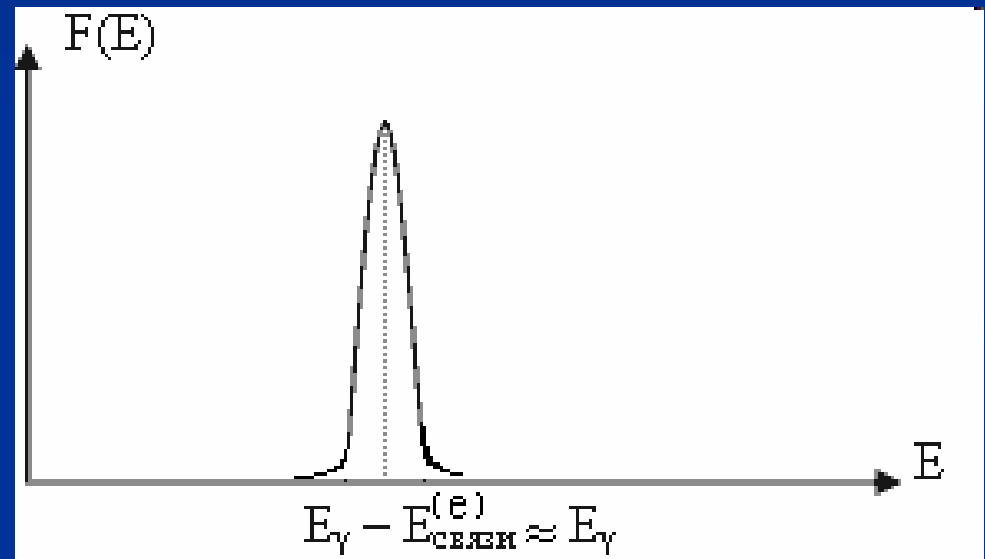
Это связано с тем, что ширина запрещенной зоны E_g германия заметно меньше, чем у кремния (0,66 эВ у германия и 1,09 эВ у кремния). В связи с этим вероятность тепловой генерации неосновных носителей заряда ($\sim \exp(-E_g / (kT))$) у германия существенно выше, и при комнатной температуре токи утечки недопустимо велики

- Одним из существенных преимуществ HPGe-детекторов перед аналогичными диффузионно-дрейфовыми Ge(Li) детекторами является возможность хранения их при комнатной температуре в период между измерениями, хотя при работе они также должны быть охлаждены до температуры жидкого азота – 77°K (подавать напряжение смещения на неохлажденный детектор нельзя!). Ge(Li) детекторы обладают столь же высоким энергетическим разрешением, что и HPGe-детекторы, однако должны постоянно находиться в криостате с жидким азотом – даже кратковременное повышение температуры Ge(Li) детектора до комнатной, вызванное, например, несвоевременной заправкой криостата жидким азотом, выводит детектор из строя

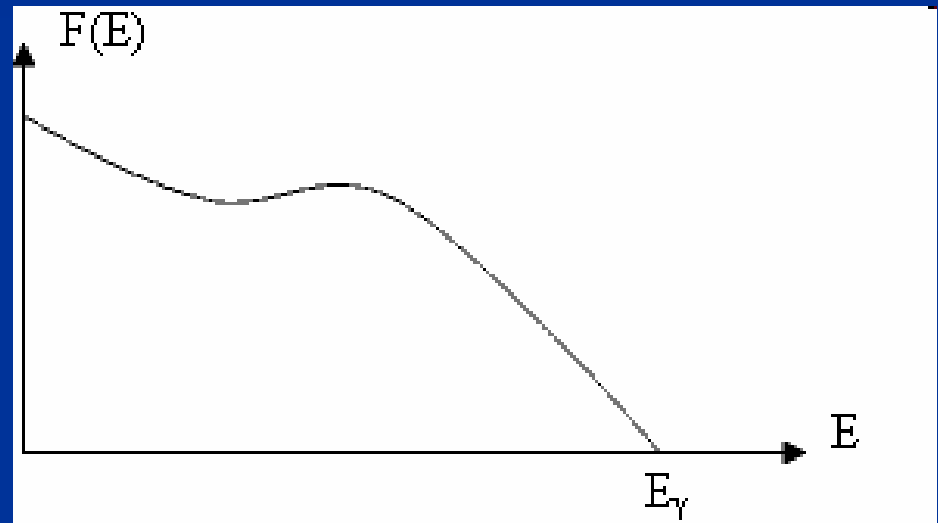
Функция отклика детектора

- это есть функция, которая описывает амплитудное распределение импульсов на выходе детектора для монохроматического γ -излучения, падающего на детектор
- в полупроводниковых детекторах регистрация γ -излучения осуществляется по вторичным электронам, которые образуются при взаимодействии γ -квантов с рабочим веществом детекторов
- наличие трех процессов взаимодействия (фотоэффект, комптон-эффект, образование пар) приводит к тому, что амплитудное распределение, соответствующее монохроматическому излучению, довольно сложно

- Фотоэффект в конечном счете дает в амплитудном распределении пик, положение максимума которого соответствует энергии γ -квантов

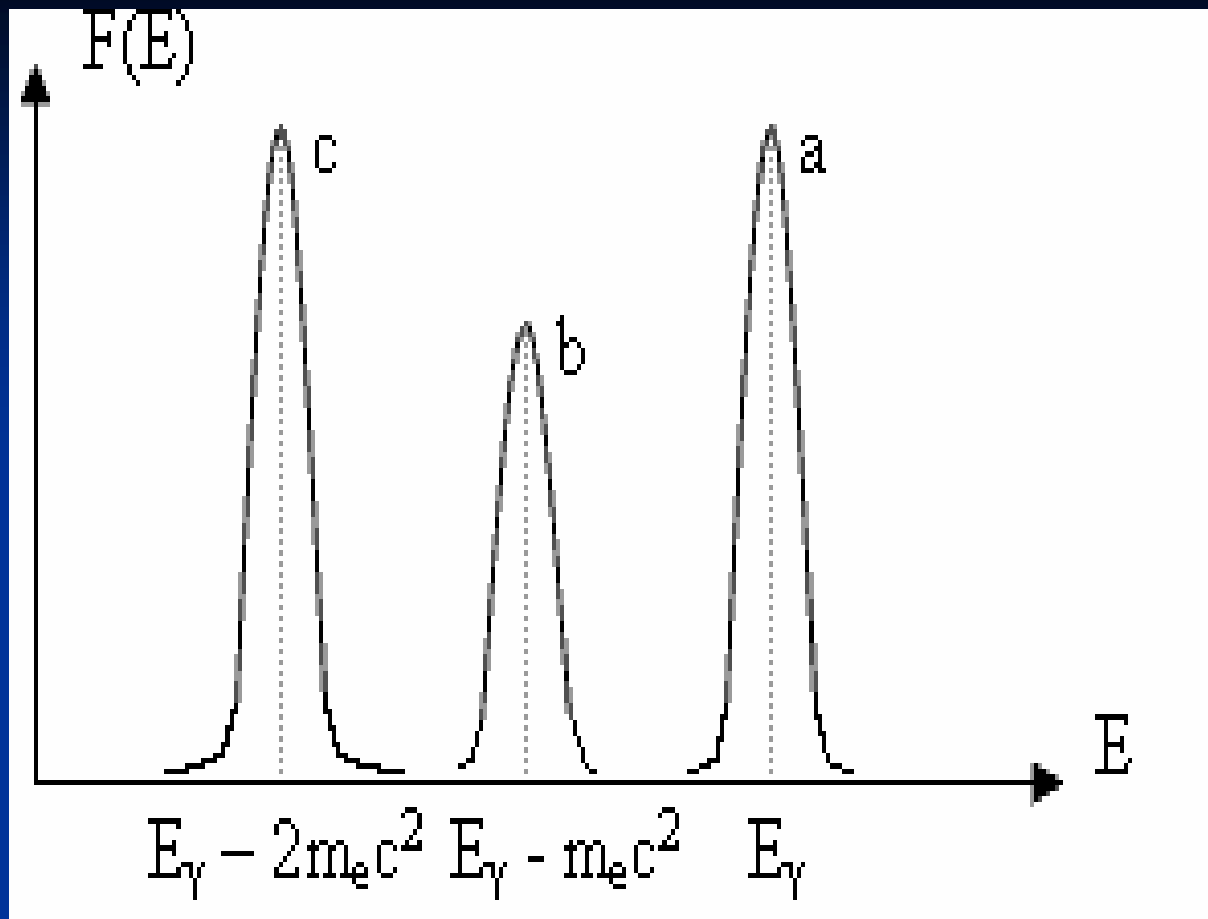


- Гамма-кванты, испытавшие комптоновское рассеяние, образуют в веществе детектора электроны с энергиями от 0 до E_{max} , где $E_{max} = E\gamma / (1 + (mc)^2 / 2E\gamma)$. Величина E_{max} в зависимости от $E\gamma$ принимает значение на 150 ÷ 250 кэВ меньше $E\gamma$



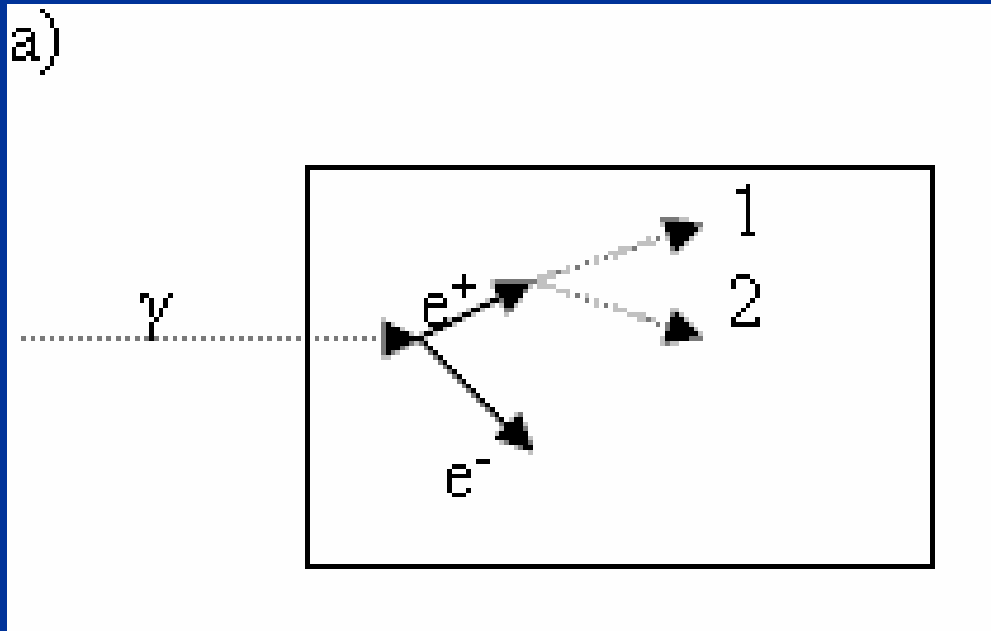
Таким образом, функция отклика для энергий $E\gamma$, меньших порога образования пар, состоит из плавного распределения и пика, часто называемого фотопиком

- При энергиях γ -квантов, бóльших энергии порога образования пар (1022 кэВ), картина усложняется, и, в общем случае, функция отклика дополнительно будет иметь еще два пика, наличие которых связано с вылетом из детектора одного или двух аннигиляционных квантов. Эти кванты возникают в результате аннигиляции позитронов, образовавшихся при поглощении γ -излучения в детекторе. В амплитудном распределении им соответствуют два дополнительных пика. Они находятся при меньших, чем фотопик, амплитудах на расстояниях, соответствующих энергиям mec^2 (511 кэВ) и $2mec^2$ (1022 кэВ) до фотопика. Относительная интенсивность трех пиков зависит от энергии γ -квантов и от размеров детектора

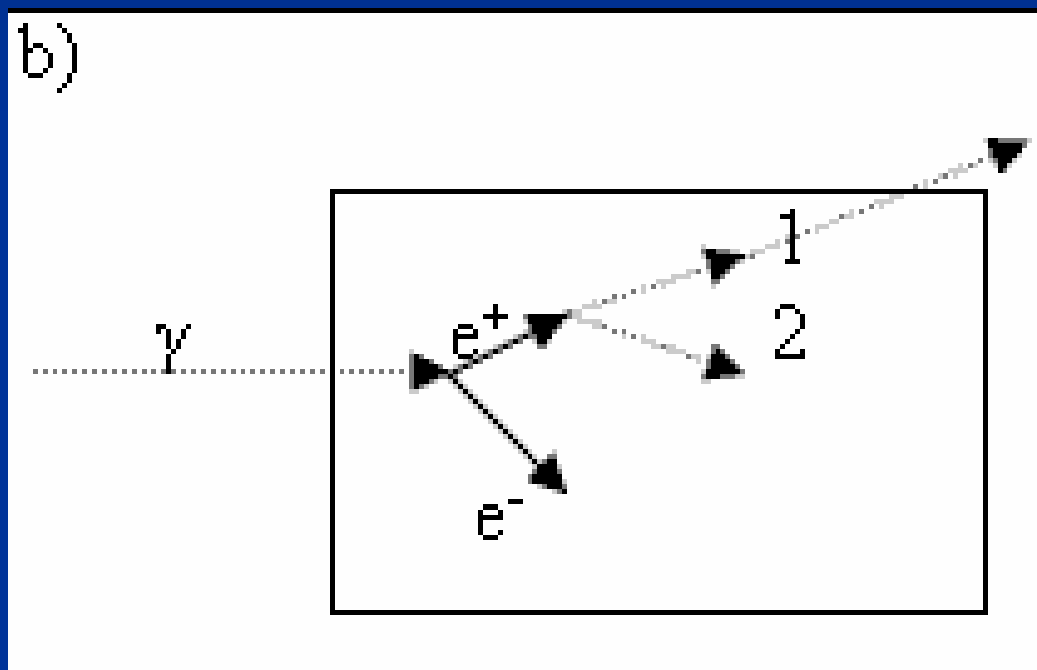


Три этих пика соответствуют трем разным вариантам развития событий при рождении e^+e^- - пар

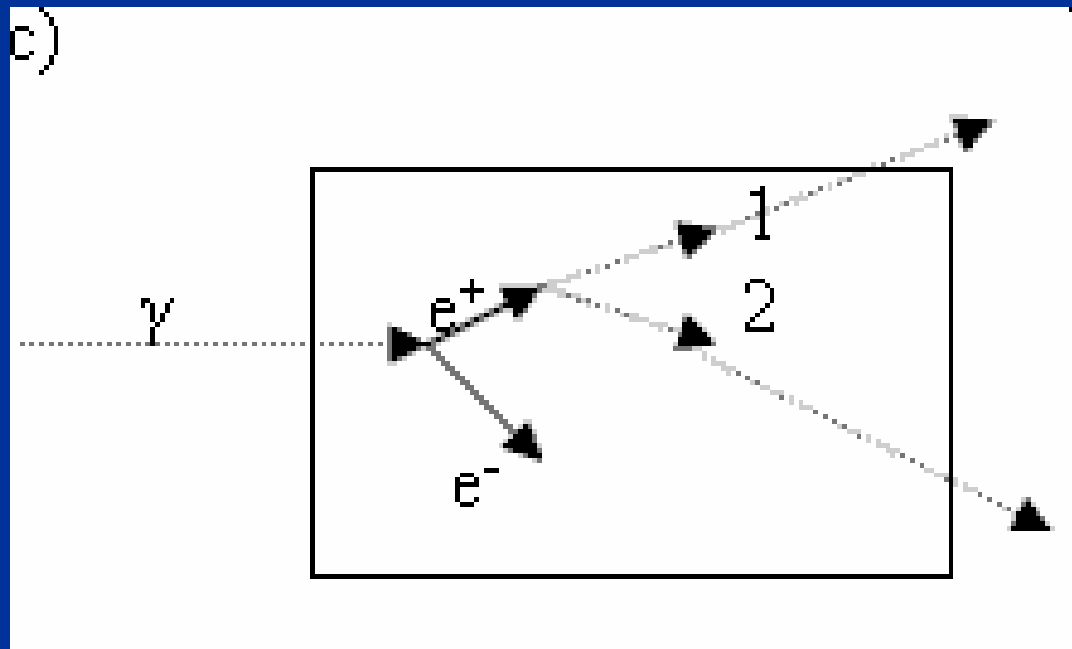
- Позитрон e^+ в детекторе быстро тормозится и затем сталкивается с одним из электронов и аннигилирует с образованием двух аннигиляционных фотонов 1 и 2 с энергиями по 0.511 МэВ, причем оба этих фотона поглощаются в детекторе и он выдает сигнал с фиксированной (в пределах энергетического разрешения E детектора) амплитудой, соответствующей энергии E_γ : $A = E_\gamma$



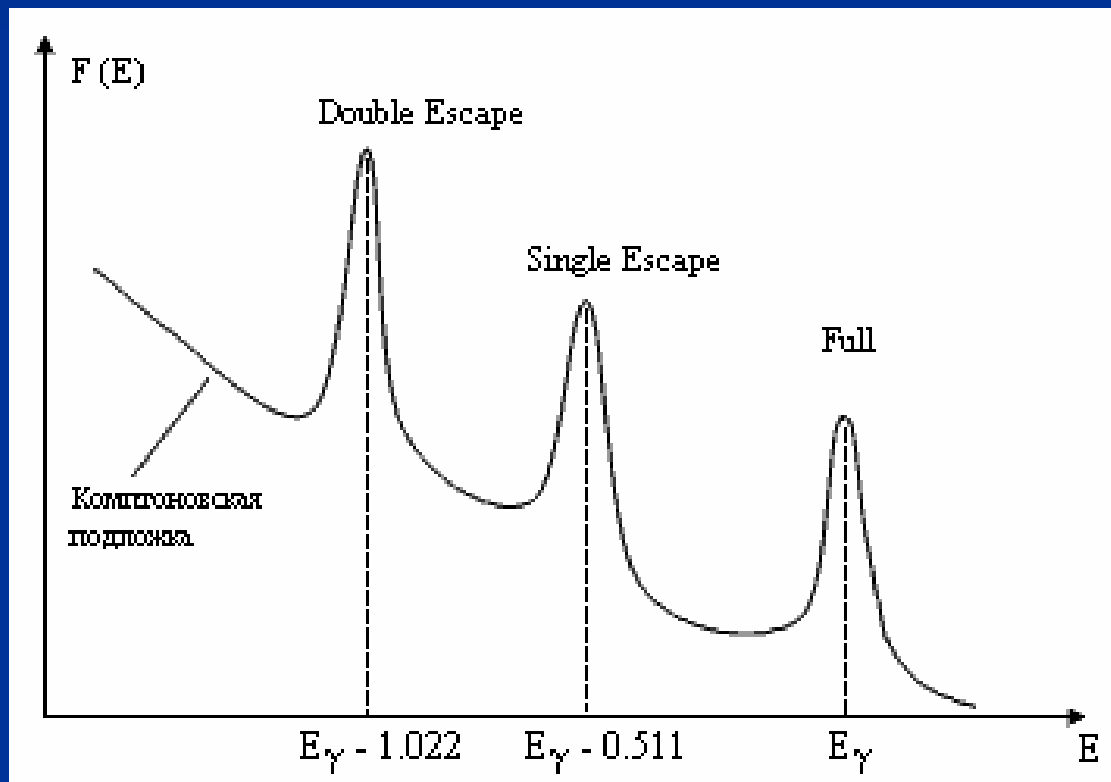
- Один из аннигиляционных фотонов выходит из детектора без регистрации (ускальзает- escape). Его энергия вычитается из E_γ и амплитуда $A = E_\gamma - 0.511 \text{ МэВ}$



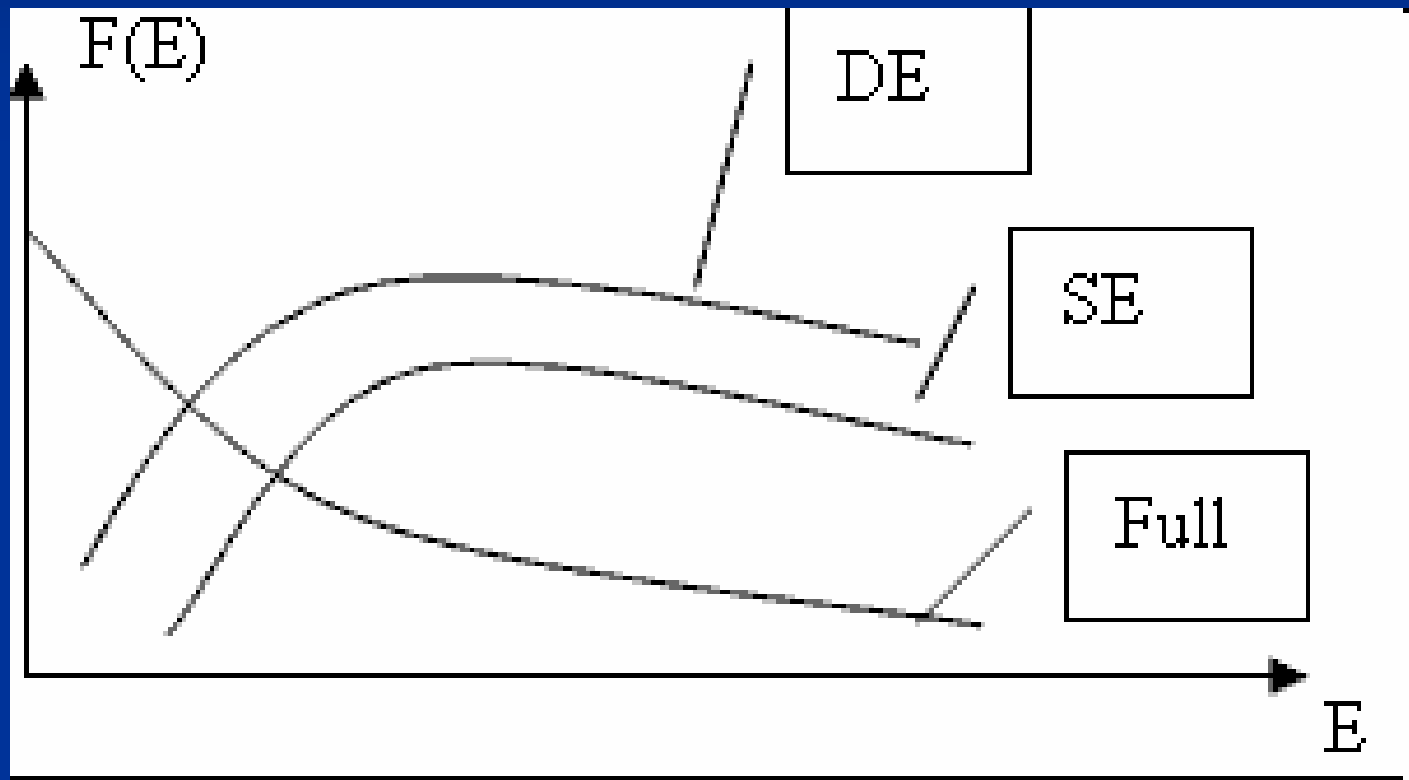
- Оба аннигиляционных фотона ускользают из области детектора и $A = E_\gamma - 1.022 \text{ МэВ}$



- Пик полного поглощения при рождении пар сливается с фотопиком и полная функция отклика детектора имеет примерно следующий вид



- Детектор имеет разную эффективность к трем разным - пикам



Эффективность детектора

- Эффективность ε определяет вероятность получения на спектрометре сигнала при попадании частицы в чувствительный объем детектора

- $\varepsilon = N_{\text{рег}} / N_{\text{дет}}$, где $N_{\text{дет}} = Ak\Omega$

A – число фотонов, испускаемых источником изотропно по всем направлениям

k – коэффициент, учитывающий поглощение и рассеяние излучения на пути источник – чувствительный объем детектора (коэффициент k равен отношению числа частиц, попавших в чувствительный объем детектора, к числу частиц, испущенных в его направлении)

$\Omega = \omega / (4\pi)$ – относительный телесный угол

$\omega = S_{\text{дет}} / R^2$ – телесный угол, под которым виден детектор из источника

Список литературы

- Частицы и атомные ядра. Практикум./О.И.Василенко, В.К.Гришин, Н.Г.Гончарова, Ф.А.Живописцев, Б.С.Ишханов, И.М.Капитонов др. 5-ое изд. М.2004
- <http://nuclphys.sinp.msu.ru/>
- Лабораторная работа №31 (спектрометр гамма-излучения с детектором из сверхчистого германия)