

Характеристическое рентгеновское излучение германия в спектрометрии с помощью HPGe детектора

В результате фотонейтронных реакций образуются ядра, сильно перегруженные протонами. Для таких ядер основными модами распада являются β^+ -распад и e-захват.

На рис. 1 в качестве примера приведена схема распадов изотопа празеодима ^{140}Pr . Это ядро образуется в результате реакции (γ, n) на стабильном изотопе ^{141}Pr . Основное состояние ядра ^{140}Pr распадается на основное состояние ядра ^{140}Ce с вероятностью 50 % путем β^+ -распада и с вероятностью 49 % - путем e-захвата.

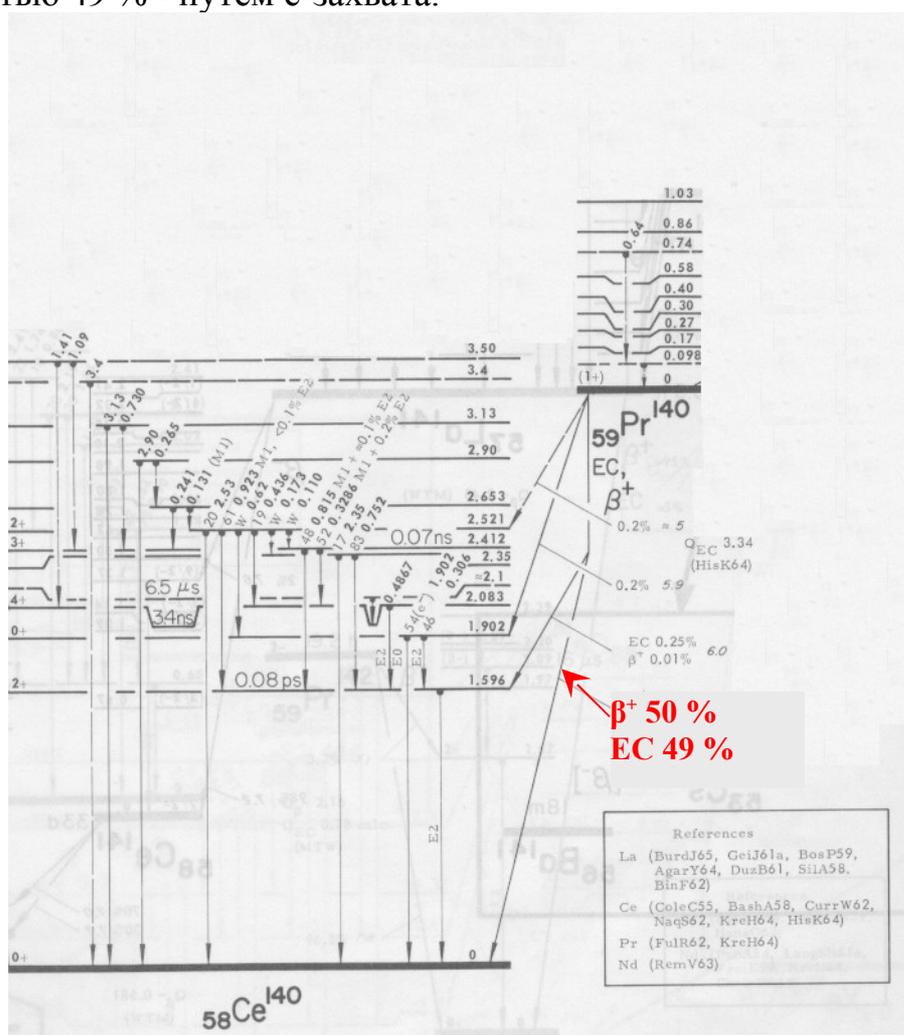


Рис. 1. Схема распадов основного состояния ядра ^{140}Pr .

При e-захвате ядро захватывает электрон с K-оболочки атома (ближайшей к ядру) с образованием вакансии на K-оболочке. При этом атом оказывается в возбужденном состоянии. Снятие возбуждения происходит за счет переходов электронов с более высоко расположенных по энергии оболочек атома на K-оболочку с испусканием рентгеновских фотонов. По интенсивностям этих переходов можно рассчитать вероятность образования продуктов фотоядерных реакций. Кроме того, в активационном анализе эти

фотоны можно использовать для определения состава вещества. Действительно, каждый атом обладает определенным индивидуальным набором рентгеновских гамма-квантов. Поэтому по энергии этих фотонов можно однозначно определить порядковый номер химического элемента.

Однако т.к. в результате e -захвата испускаются рентгеновские фотоны достаточно низких энергий (обычно до ~ 50 кэВ), то возникают проблемы, связанные с их детектированием.

Рассмотрим взаимодействие гамма-квантов низких энергий (с энергиями ниже ~ 50 кэВ) с веществом HPGe детектора.

Низкоэнергетичные фотоны обладают низкой проникающей способностью и поэтому взаимодействуют с веществом детектора преимущественно вблизи поверхности детектора.

При взаимодействии фотона с энергией E_γ с атомом германия Ge из последнего выбивается электрон. Возможно выбивание электрона как с внешней оболочки атома Ge, так и с внутренних оболочек.

1) В случае если электрон выбивается с внешней оболочки (рис. 2), его энергия приблизительно равна энергии E_γ первоначального фотона, поскольку это самый слабо связанный в атоме электрон и его энергия связи пренебрежимо мала по сравнению с E_γ .

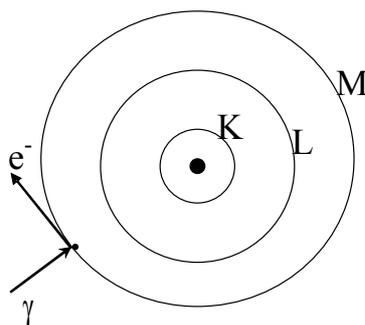


Рис. 2. Выбивание фотоном электрона с внешней оболочки атома Ge.

2) Рассмотрим выбивание электрона с K-оболочки атома Ge (рис. 3а). Это возможно в случае, если энергия фотона выше энергии связи электрона на K-оболочке в атоме германия (эта энергия называется краем поглощения и для германия Ge равна 11.103 кэВ). При этом в атоме Ge образуется вакансия на K-оболочке. Это возбужденное состояние атома Ge. Снятие возбуждения происходит за счет переходов электронов с верхних оболочек на K-оболочку с испусканием рентгеновских фотонов (рис. 3б). Эти фотоны называются флуоресцентными, или характеристическими рентгеновскими фотонами германия. При переходе электрона с L-оболочки на K-оболочку атом Ge испускает фотон с энергией 9.9 кэВ (Ka₂-линия), при переходе с M-оболочки на K-оболочку испускается фотон с энергией 11.0 кэВ (Kb₁-линия). Таким образом, при девозбуждении атома Ge испускается фотон либо с энергией 9.9 кэВ, либо с энергией 11.0 кэВ.

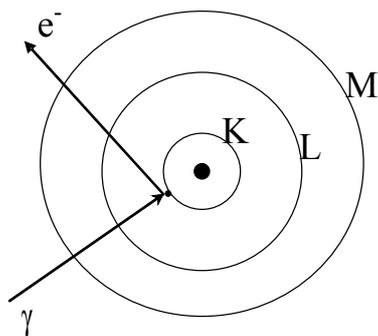


Рис. 3 а

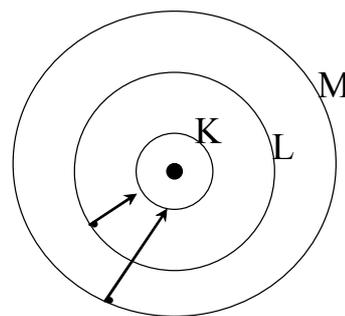


Рис. 3 б

Рис. 3. Выбивание фотоном электрона с внутренней К-оболочки атома Ge (а) и последующие переходы электронов с верхних оболочек L и M на образовавшуюся вакансию на К-оболочке (б).

Если характеристический рентгеновский фотон Ge поглощается в веществе детектора, то полная энергия, поглощенная в детекторе, будет равна энергии E_g первоначального фотона. Действительно, полная поглощенная детектором энергия складывается из энергии электрона, испущенного атомом Ge, и энергии двух характеристических рентгеновских фотонов. При этом конечное состояние атома Ge (после его девозбуждения) будет таким же, как и в случае 1 (см. рис. 2).

Характеристические рентгеновские фотоны германия могут выходить из чувствительного объема детектора, не поглощаясь в нем. В этом случае полная энергия, поглощенная в детекторе, будет меньше, чем энергия первоначального фотона E_g . В спектре появляются два дополнительных пика с энергиями E_1 и E_2 , меньшими энергии E_g на 9.9 кэВ (при вылете фотона $K\alpha_2$) и на 11.0 кэВ (вылет фотона $K\beta_1$), соответственно: $E_1 = E_g - 9.9$ кэВ, $E_2 = E_g - 11.0$ кэВ.

Отметим, что вероятность для характеристических рентгеновских фотонов германия покинуть чувствительный объем детектора достаточно велика. Это связано с тем, что, как сказано выше, процесс рождения этих фотонов происходит вблизи верхней границы чувствительного объема детектора.

Интенсивность пика, связанного с вылетом рентгеновских гамма-квантов, приблизительно обратно пропорциональна энергии E_g первоначального фотона, падающего на детектор.

На рис. 4 показан экспериментальный γ -спектр, измеренный с помощью HPGe детектора (лаборатория радиохимии). Показан спектр остаточной активности образца, изготовленного из йода ^{127}I и облученного на разрезном микротроне RTM-70 (синяя кривая). Фиолетовая кривая соответствует фону. Каждый спектр (спектр образца и спектр фона) измерен в течение суток.

На графике (рис. 4) приведена только низкоэнергетическая часть измеренного спектра в интервале от 0 до 40 кэВ (полный спектр измерен в

диапазоне от 0 до ~ 3 МэВ). γ -Пики 27.4 кэВ и 31 кэВ соответствуют распадам изотопов йода (рентгеновские линии йода). В спектре видны также пики при энергиях $E_1 = 27.4 - 10 = 17.4$ кэВ, $E_2 = 31 - 10 = 21$ кэВ. Они соответствуют вылету характеристических рентгеновских фотонов германия из детектора. На самом деле в каждой области энергий E_1 и E_2 находится по два пика (соответствующих вылету рентгеновских фотонов германия с энергиями 9.9 и 11.0 кэВ). Но каждая пара пиков детектором не разрешается и сливается в один пик: первая пара дает один пик при энергии 17.4 кэВ, вторая пара – пик при энергии 21 кэВ.

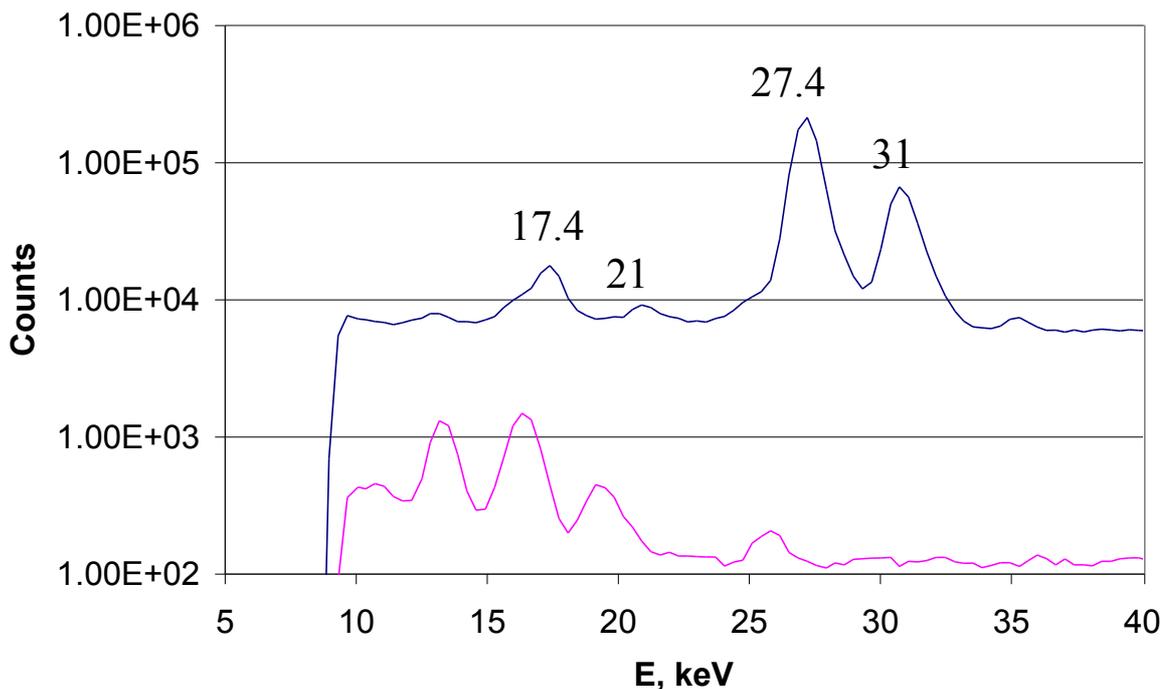


Рис. 4. Экспериментальный γ -спектр, измеренный с помощью HPGe детектора (лаборатория радиохимии). Синяя кривая – спектр остаточной активности образца, изготовленного из йода ^{127}I и облученного на разрезном микротроне RTM-70 (синяя кривая). Фиолетовая кривая – фон.

Наличие в спектре пиков, связанных с вылетом рентгеновских гамма-квантов, устранить невозможно. Это необходимо учитывать при расшифровке гамма-спектров, особенно в низкоэнергетической части спектров.

Литература

- 1) Физические величины. Справочник. Под редакцией И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. Москва: Энергоатомиздат, 1991.
- 2) R.J. Gehrke, J.R. Davidson «Acquisition of quality g-ray spectra with HPGe spectrometers». Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, P.O. Box 1625, Idaho Falls, ID 83415-2114, USA. Applied Radiation and Isotopes 62 (2005) 479–499.