

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ ЭНЕРГИИ ГАММА-ЛУЧЕЙ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СПЕКТРОМЕТРАХ

А. П. Лашко, Т. Н. Лашко

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина

Выполнен детальный анализ всех возможных экспериментальных погрешностей, которые сопутствуют измерениям энергии γ -лучей на полупроводниковых спектрометрах. Даны рекомендации по их минимизации, предложены наиболее оптимальные методики проведения исследований подобного рода.

В последние годы для прецизионных измерений энергии γ -квантов, возникающих при распаде радиоактивных ядер, наряду с кристалл-дифракционными спектрометрами [1] широко используют детекторы из сверхчистого германия, позволяющие определять энергии переходов с точностью несколько электрон-вольт [2, 3].

Методика подобных измерений заключается в следующем. Приготавливают смешанный радиоактивный источник такого состава, чтобы вблизи γ -линии, энергию которой хотят определить, слева или справа по спектру находилась бы, по крайней мере, одна реперная линия, энергия которой известна с высокой точностью (нормаль второго, третьего или четвертого порядка). Затем измеряют положения линий в спектре, строят по реперам калибровочную кривую и по ней определяют энергию искомой γ -линии.

Измерения такого рода требуют тщательного анализа и исключения всех возможных ошибок эксперимента. Погрешность каждого измерения складывается из погрешности в значении энергии реперных γ -квантов, погрешности калибровки детектора по энергии, погрешности в определении расстояния между линиями (статистической погрешности) и систематической погрешности. Рассмотрим подробно каждую из них.

Погрешности в значении энергии реперных γ -квантов

Согласно [4] спектроскопические нормалю, которые используют в ядерной спектроскопии, можно классифицировать следующим образом:

1. *Нормалью первого порядка* называют переход в ^{86}Kr , имеющий длину волны в вакууме $\lambda = 6057,80211 \text{ \AA}$.

2. *Нормали второго порядка* выбирают на основании следующих правил:

а) длина волны нормали второго порядка должна быть определена сравнением с длиной волны нормали первого порядка;

б) сравнение производится с точностью, соответствующей лучшим современным работам.

3. К *нормальям третьего порядка* относят:

а) ядерные переходы, длины волн которых определены сравнениями с длинами волн нормалей либо первого, либо второго порядка, выполненных на современном уровне точности при помощи методов, опирающихся на хорошо известные физические законы;

б) переходы, энергии которых определяются по двум нормальям третьего порядка и правилу Ритца: $E_1 + E_2 = E_3$.

4. *Нормальями четвертого порядка, или реперами*, называют спектральные линии, энергии которых определены сравнением с нормальями второго и третьего порядка. Допускается использовать методы, в которых энергию перехода определяют по градуировочной кривой, построенной по ряду нормалей второго и третьего порядка.

В качестве нормали второго порядка используют $\gamma_{411,8}^{198}\text{Hg}$, значение энергии которой на сегодняшний день составляет $411,80205 \pm \pm 0,00017 \text{ кэВ}$ [5]. Требования, предъявляемые к точности определения энергии нормалей третьего и четвертого порядка, постоянно меняются с усовершенствованием методов измерений. Согласно последнему обзору [6] в список рекомендованных энергетических стандартов для ядерной спектроскопии вошли только те γ -линии, относительная ошибка в определении энергии которых не превышает 10^{-5} .

Погрешности калибровки детекторов по энергии

Основная трудность измерений энергии γ -лучей на полупроводниковых спектрометрах заключается в том, что функция, определяющая энергию γ -линии в зависимости от ее положения в спектре, не является линейной. Более того, когда речь идет об измерениях энергии переходов с точностью порядка 1 эВ, мы должны очень хорошо изучить эту зависимость.

На рис. 1 приведен типичный график калибровочной кривой γ -спектрометра, построенный по результатам измерений энергии γ -квантов из распада ^{192}Ir . Пунктирная прямая соответствует линейной зависимости, сплошная же линия отображает реальный ход градуировочной кривой.

Величина отклонения от линейности рассчитывалась по формуле

$$\Delta E_i = E_i - \left(E_{295} + \frac{E_{604} - E_{295}}{n_{604} - n_{295}} (n_i - n_{295}) \right),$$

где E_i , E_{295} , E_{604} – рекомендованное значение энергии репера из [6]; n_i , n_{295} , n_{604} – положение соответствующей линии в спектре.

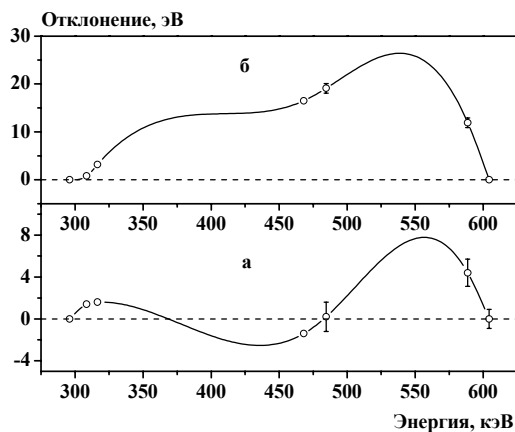


Рис. 1. Калибровочная кривая γ -спектрометра, состоящего из коаксиального HPGe-детектора GEM-40195, усилителя 572 ORTEC и многоканального буфера 919 SPECTRUM MASTER фирмы ORTEC для разных коэффициентов усиления: а – КУ = 20, б – КУ = 70. Там, где погрешности не приведены, они не превышают размера точек.

Очевидно, каким-то образом эти поправки должны быть учтены. Проблема в том, что кривая имеет сложную форму, зависит от коэффициента усиления (КУ) спектрометрического тракта, от типа используемого детектора.

На рис. 2 приведена аналогичная зависимость для планарного HPGe-детектора.

Анализируя полученные данные, можно сделать следующие выводы:

форма кривой отличается как для разных детекторов, так и для разных коэффициентов усиления;

чем больше коэффициент усиления, тем больше отклонение калибровочной кривой от линейности;

при одинаковых коэффициентах усиления отклонение калибровочной кривой от линейности больше для планарного детектора. Этот факт можно объяснить тем, что для разных типов детекторов используются разные предусилители. Так, для детекторов серии GEM устанавливают предусилитель 137CP2 с коэффициентом усиления 400 мВ/МэВ, а для детекторов серии GLP – 139 с коэффициентом усиления 1700 мВ/МэВ;

изменение уровня квантования входного сигнала на АЦП слабо влияет на изменение калибровочной кривой.

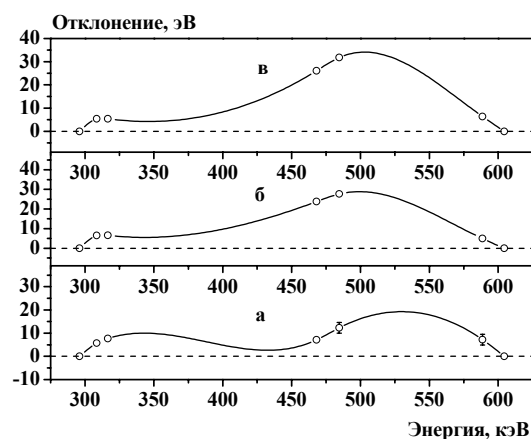


Рис. 2. Калибровочная кривая γ -спектрометра, состоящего из планарного HPGe-детектора GLP-36360/13, усилителя 572 ORTEC и многоканального буфера 919 SPECTRUM MASTER фирмы ORTEC для разных коэффициентов усиления: а – КУ = 10, б – КУ = 18 и разных уровней квантования входного сигнала на АЦП: б – 8192 канала, в – 16384 канала. Там, где погрешности не приведены, они не превышают размера точек.

Таким образом, в области энергий выше 100 кэВ, где преимущество планарных детекторов в разрешении уже не компенсирует худшую нелинейность калибровочной кривой, применение коаксиальных HPGe-детекторов более предпочтительно.

Используют три основных подхода при описании градуировочной кривой полупроводникового γ -спектрометра:

детально исследуют ее поведение на всем участке спектра (например, по методике, предложенной авторами работы [2]), а затем вводят поправки на нелинейность для каждой γ -линии;

функциональную зависимость описывают полином второй (или более высокой) степени, определяя коэффициенты из подгонки положений реперных γ -линий по методу наименьших квадратов;

подбирают реперные γ -линии так, чтобы они располагались как можно ближе к измеряемой γ -линии, а калибровочную кривую считают линейной.

С нашей точки зрения последний подход является наиболее предпочтительным. В основе построения базиса ядерно-спектроскопических нормалей лежит измерение длины волн на кристалл-дифракционных спектрометрах. Чтобы перейти в энергетическую шкалу используют универсальные константы, значения которых постоянно уточняются. Это влечет за собой и уточнение энергии реперов. Поэтому данные, полученные по первому и второму подходу,

имеют «настоящее», в виде рекомендованных авторами значений, но не имеют «будущего» – при уточнении реперов никто, кроме авторов, не сможет внести поправки и уточнить результат.

Правильным подбором аппаратуры и оптимальных условий измерений неравномерность калибровочной кривой на участке спектра шириной в 200 – 300 кэВ можно уменьшить до $(1 - 3) \cdot 10^{-5}$, что при удачном выборе реперов приводит к неопределенности в определении положения линии меньше 1 эВ [7].

Статистическая погрешность

Жесткие требования, предъявляемые к точности определения энергии переходов, нельзя удовлетворить без качественной математической обработки результатов измерений. В программах обработки γ -спектров используются два основных решения:

для описания формы линии используют простой или модифицированный гауссиан [8];

применяют метод вписывания «приборной» линии в интересующий участок спектра [9, 10]. Он заключается в том, что какая-нибудь одиночная интенсивная γ -линия из полученного спектра или же, если такой нет, специально измеренная одиночная γ -линия, близкая по форме к линии изучаемого участка спектра, снимается с высокой статистической точностью. После вычитания фона она описывается в промежутках между экспериментальными точками кубическими сплайнами и используется в качестве «приборной», определяющей экспериментальную форму линии для дальнейшей обработки по методу наименьших квадратов.

Оба метода имеют свои достоинства и недостатки. Первый более предпочтителен при описании сложных спектров, так как позволяет с высокой точностью определить энергии и интенсивности компонентов при несимметричной форме линий и их перекрытии.

Следует отметить, что для качественной обработки спектра необходимо иметь как можно больше экспериментальных точек на линии. Этого можно достичь увеличением коэффициента усиления спектрометрического тракта или изменением уровня квантования входного сигнала на АЦП. Как было показано выше, второй метод более предпочтителен, поскольку не приводит к увеличению нелинейности калибровочной кривой, а следовательно, и к увеличению погрешности в определении положения линии.

Чем выше энергетическое разрешение детектора, тем точнее можно определить положение линии в спектре. Планарные детекторы имеют

более высокое разрешение, чем коаксиальные. С другой стороны, они обладают худшими характеристиками в отношении линейности калибровочной кривой. Кроме того, коаксиальные детекторы имеют большую эффективность регистрации (в высокой области энергий), что немало важно для набора достаточной статистики. Поэтому в эксперименте разумнее всего использовать разные типы детекторов, не ограничиваясь каким-либо одним.

Систематическая погрешность

При определении относительного положения линий особое значение приобретает величина неконтролируемой систематической ошибки измерений.

При измерении энергии γ -лучей на полупроводниковых детекторах было установлено, что энергия фотопика зависит от положения источника относительно оси кристалла и эта зависимость тем сильнее, чем меньше расстояние от источника до детектора и чем выше энергия γ -кванта [11 - 13]. Если компоненты сложного источника пространственно удалены друг от друга, то это может приводить к систематической ошибке.

Чтобы исключить эту погрешность, мы обычно приготавливали радиоактивные источники следующим образом. Активности предварительно растворяли в кислоте, затем растворы постепенно смешивали и добивались требуемого соотношения активностей, постоянно контролируя его с помощью γ -спектрометра. После этого приготовленный раствор выкапывали на фильтровальную бумагу, высушивали и придавали источнику минимально возможный размер с тем, чтобы при измерениях он, по возможности, был близок к точечному. В процессе проведения измерений такой источник обычно размещался на расстоянии от 10 до 30 см от детектора. При таких условиях не наблюдалось систематических ошибок (больше 1 эВ), которые можно было бы связать с различным расположением компонент сложного источника.

Чтобы свести к минимуму возможные систематические ошибки, результаты определяются из нескольких измерений γ -спектров, выполненных на разных детекторах, при различных геометриях, разных коэффициентах усиления и разных уровнях квантования входного сигнала на АЦП. При этом каждое измерение также состоит из некоторого числа коротких серий. Так усредняются возможные отклонения, связанные с колебаниями температуры, давления, влажности и прочими изменениями внешних условий.

Измерения сравнивают между собой для выяснения согласованности весовых погрешностей (S_B) с погрешностями разброса (S_p). Если $S_p/S_B < 2$, то измерения считаются согласованными, а если $S_p/S_B > 2$, то имеется противоречие, которое может быть обусловлено, в частности, недооценкой погрешностей [14]. Не наблюдалось больших рассогласований, что указывает на незначительное влияние внешних условий на результаты эксперимента.

Наиболее достоверную информацию о величине систематической ошибки можно получить, сравнивая результаты измерений с эталоном. Но в подавляющем большинстве случаев сделать это невозможно. Поэтому в своих заключениях приходится опираться на данные других авторов, более предпочтительными из которых являются результаты, полученные другими методами.

Для выяснения верхней границы возможной систематической ошибки при прецизионном определении энергии γ -квантов с помощью полупроводниковых спектрометров был измерен участок γ -спектра с переходами 97, 103 кэВ ^{153}Gd и 100 кэВ ^{182}Ta [15]. Определяли энергию перехода 100 кэВ по значениям энергии двух других переходов, которые использовали в качестве реперов. Энергии всех трех γ -переходов известны из измерений на кристалл-дифракционных спектрометрах с точностью в несколько десятых долей электрон-вольта.

Смешанный источник ^{153}Gd и ^{182}Ta был получен на реакторе при облучении тепловыми нейтронами послойно напыленных на алюминиевую фольгу стабильных изотопов ^{152}Gd и ^{181}Ta . Измерения проводили на планарном HPGe-детекторе объемом 2 см^3 и разрешением 490 эВ на γ -линии 122 кэВ ^{57}Co . В измерениях использовали пред-

усилители и усилители фирмы ORTEC, γ -спектр накапливался на анализаторе АМ-А-02Ф. Были выполнены три независимых измерения одиночного γ -спектра при разных коэффициентах усиления и разных уровнях квантования входного сигнала на АЦП. Время измерения одного спектра занимало около суток.

Обработку γ -спектра проводили по разработанным нами программам [9]. Калибровочную кривую γ -спектрометра считали линейной. Отклонение от линейности не превышало 10^{-4} для области 97 - 103 кэВ. Для энергии перехода 100 кэВ получены следующие значения (пересчитанные по значениям энергии реперов из [6]), эВ: $100107,1 \pm 0,7$; $100106,5 \pm 0,8$; $100107,3 \pm 0,7$.

Погрешность каждого из измерений складывается из погрешности определения расстояния между линиями (0,4 эВ), погрешности, связанной с неточностью определения цены канала (0,2 эВ), и погрешности в значении энергии реперов. Средневзвешенное значение всех трех измерений составляет $100107,0 \pm 0,5$ эВ. Значение энергии для этого перехода, полученное с помощью кристалл-дифракционных спектрометров, составляет $100103,3 \pm 2,0$ эВ [16], $100106,52 \pm 0,27$ эВ [1], $100108,3 \pm 0,9$ эВ [17]. Значение, рекомендованное на сегодняшний день в качестве энергетического стандарта для ядерной спектроскопии, равно $100105,95 \pm 0,07$ эВ [6]. Они хорошо согласуются с нашими данными (в пределах двух среднеквадратических отклонений).

Полученные результаты убедительно доказывают, что при корректной постановке эксперимента на полупроводниковых γ -спектрометрах можно определять энергии γ -квантов с точностью около 1 эВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Borchert G.L., Scheck W., Schult Q.W.B. Curved crystal spectrometer for precise energy measurement of gamma-rays from 30 to 1500 keV // Nucl. Instrum. and Methods. - 1975. - Vol. 124. - P. 107 - 117.
2. Matsui S., Inoue H., Yoshizawa Y. Gamma-ray energy measurement for $^{177\text{m}}\text{Lu}$ with a precision pulser // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. - 1989. - Vol. A281. - P. 568 - 576.
3. Helmer R.G., Reich C.W. An excited state of ^{229}Th at 3.5 eV // Phys. Rev. C. - 1994. - Vol. 49. - P. 1845 - 1858.
4. Джелепов Б.С., Шестопалова С.А. Ядерно-спектроскопические нормалы - М.: Атомиздат, 1980. - 232 с.
5. Helmer R.G., Van der Leun C. Recommended standards for γ -ray energy calibration (1999) // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. - 1999. - Vol. A422. - P. 525 - 531.
6. Helmer R.G., Van der Leun C. Recommended standards for γ -ray energy calibration (1999) // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. - 2000. - Vol. A450. - P. 35 - 70.
7. Купряшкин В.Т., Лашко А.П., Лашко Т.Н., Феоктистов А.И. Энергии гамма-переходов и уровней ^{181}Ta в распаде ^{181}Hf // Изв. РАН. Сер. физ. - 2005. - Т. 69, № 5. - С. 637 - 640.
8. Хоменков В.П. Дослідження атомно-ядерних ефектів у процесі внутрішньої конверсії гамма-

- променів: Автореф. дис. ... канд. фіз.-мат. наук / ІЯД НАН України. - Київ, 2003. - 19 с.
9. Булгаков В.В., Гаврилюк В.И., Лашко А.П. и др. Магнитный бета-спектрометр высокого разрешения ИЯИ АН УССР. - Киев, 1986. - 48 с. - (Препр. / АН УССР. Ин-т ядерных исслед.; КИЯИ-86-33).
 10. Лашко А.П., Лашко Т.Н., Одинцов А.А., Хоменков В.П. Комплексный анализ изотопного состава плутония в аварийном выбросе 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС // Атомная энергия. - 2001. - Т. 91, вып. 6. - С. 443 - 448.
 11. Sakai E. Charge collection in coaxial Ge(Li) detectors // IEEE Trans. Nucl. Sci. - 1968. - Vol. NS-15 (3). - P. 310 - 327.
 12. Gunnink R, Meyer R.A., Niday J.B., Anderson R.P. Precise determinations of high-energy gamma rays and errors in the pair-peak method // Nucl. Instrum. and Methods. - 1968. - Vol. 65. - P. 26 - 30.
 13. Helmer R.G., Gehrke R.J., Greenwood R.C. Peak position variation with source geometry in Ge(Li) detector spectra // Nucl. Instrum. and Methods. - 1975. - Vol. 123. - P. 51 - 59.
 14. Дзюленов Б.С. Методы разработки сложных схем распада – Л.: Наука, 1974. – 232 с.
 15. Казновецкий А.Б. и др. К вопросу точности определения энергии гамма-квантов с помощью HPGe-детектора // Точные измерения в ядерн. спектр.: Материалы X Междунар. семинара по точн. измер. в ядерн. спектр. (ТИЯС X) (Валдай, 15 - 17 июня 1994 г.). - СПб., 1994. - С. 23 - 24.
 16. Gruber U., Koch R., Maier B.P., Schult Q.W.B. Energie- und intensitat-messung der wahrend des ^{182}Ta und ^{183}Ta zerfalls von ^{182}W und ^{183}W ausgesandten γ -strahlung // Z. Naturforsch. - 1965. - Bd. 20a, H. 7. - S. 929 - 938.
 17. Piller O., Beer W., Kern J. Das fokussierende kristall spectrometer der Universitat Fribourg // Nucl. Instrum. and Methods. - 1973. - Vol. 107. - P. 61 - 77.

АНАЛІЗ ПОХИБОК ВИМІРЮВАНЬ ЕНЕРГІЇ ГАММА-ПРОМЕНІВ НА НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СПЕКТРОМЕТРАХ

А. П. Лашко, Т. М. Лашко

Виконано детальний аналіз усіх можливих експериментальних похибок, що мають місце при вимірюваннях енергії γ -променів на напівпровідникових спектрометрах. Подано рекомендації щодо їх мінімізації, запропоновано найбільш оптимальні методики проведення подібних досліджень.

ANALYSIS OF UNCERTAINTIES OF GAMMA-RAY ENERGY MEASUREMENT MADE WITH SEMICONDUCTOR SPECTROMETERS

A. P. Lashko, T. N. Lashko

Detailed analysis of all possible experimental uncertainties accompanying γ -ray energy measurements completed with semiconductor spectrometers has been performed. Recommendations are given concerning minimizing such uncertainties, the most optimal procedures for making such investigations are suggested.

Поступила в редакцию 23.06.06,
после доработки – 05.07.07.