

**ВЫСОКОТОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГИИ ЯДЕРНЫХ СОСТОЯНИЙ,
ВОЗБУЖДАЮЩИХСЯ В РАДИОАКТИВНОМ РАСПАДЕ**

А. П. Лашко, Т. Н. Лашко

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

Для определения с высокой точностью энергии возбужденных состояний атомных ядер, заселяющихся в радиоактивном распаде, предлагается воспользоваться методом опорных переходов, применение которого позволяет существенно уменьшить трудоемкость экспериментов. Подробно описана процедура подобных исследований, даны практические рекомендации по ее использованию.

Сегодня все более востребованными становятся данные об энергиях возбужденных состояний атомных ядер с точностью порядка нескольких электрон-вольт и выше. Развитие методики прецизионных измерений энергии γ -лучей на полупроводниковых спектрометрах, а также существенное расширение сетки ядерно-спектроскопических нормалей создали благоприятные условия для комплексных измерений энергии возбужденных уровней ядер, заселяющихся в распаде источников с более-менее значительными временами жизни.

Количество уровней дочернего ядра, которые возбуждаются в радиоактивном распаде материнского ядра, обычно значительно меньше, чем количество разряжающих их γ -квантов. Чтобы получить информацию об энергии этих γ -лучей, не обязательно измерять их все. Можно воспользоваться методом опорных переходов, применение которого позволит существенно уменьшить трудоемкость исследований.

Процедура определения энергии возбужденных состояний атомных ядер и разряжающих их γ -квантов методом опорных переходов сводится к следующим основным этапам:

1) в качестве опорных выбирают наиболее удобные для измерений одиночные интенсивные γ -линии;

2) подбирают набор реперов из списка рекомендованных энергетических стандартов для ядерной спектроскопии. Чтобы уменьшить ошибки, связанные с неопределенностью калибровочной кривой, необходимо подбирать такие реперы, которые располагались бы достаточно близко к измеряемой γ -линии и в то же время хорошо разрешались в спектре;

3) приготавливают смешанный радиоактивный источник нужного состава с подбором желательных соотношений удельных активностей входящих в него радионуклидов. Для уменьшения статистической погрешности (погрешности в определении расстояния между линиями) необходимо, чтобы репер и измеряемая линия были близки по интенсивности;

4) чтобы свести к минимуму возможные систематические ошибки, измерения проводят сериями на разных детекторах, при различных геометриях, разных коэффициентах усиления и разных уровнях квантования входного сигнала на амплитудно-цифровых преобразователях;

5) определяют энергии опорных переходов;

6) составляют систему линейных уравнений для расчета энергии уровней и решают ее по методу наименьших квадратов;

7) на основе полученных данных рассчитывают энергии всех γ -квантов, сопровождающих распад материнского ядра.

Остановимся подробно на анализе каждого из этих этапов.

Опорные γ -линии

В фундаментальной работе Б. С. Джелепова по ядерной спектроскопии [1] подробно описаны метод опорных уровней, используемый при построении сложных схем распада радиоактивных ядер, и система аргументов, на основании которой ядерные состояния разделяют на три категории: 1) опорные уровни, 2) рядовые уровни и 3) предполагаемые уровни.

Главное требование, которое предъявляется к опорным уровням – это их достоверность, т. е. полная уверенность в их существовании, в правильности значений энергии, спинов, четности.

Аналогичный подход используем и при выборе опорных γ -линий. Это должны быть одиночные, интенсивные линии, расположение которых в схеме распада надежно установлено. Количество их выбирается достаточным для того, чтобы можно было построить всю схему уровней дочернего ядра, заселяющихся в радиоактивном распаде (во всяком случае, к этому нужно стремиться).

Следует отметить, что в сложных схемах распада встречаются случаи, когда один и тот же переход может быть размещен в двух или трех местах. Причиной неоднозначных размещений является неточное определение энергии уровней и переходов. Постепенно, с повышением точно-

сти измерений, неоднозначные размещения должны исчезнуть. При точности измерений энергии ~ 100 эВ они появляются обычно, когда число введенных уровней превышает 15. Когда же речь идет о точностях порядка нескольких электрон-вольт, такие ситуации становятся чрезвычайно редкими и являются объектом детальных исследований (см., например, [3]).

Реперные γ -линии

Список рекомендованных энергетических стандартов для ядерной спектроскопии на сегодняшний день насчитывает около 240 γ -линий, охватывающих диапазон энергий от 24 до 4806 кэВ [4, 5]. В него вошли только те γ -линии, относительная ошибка в определении энергии которых не превышает 10^{-5} . Как уже отмечалось выше, для прецизионного определения энергии переходов немаловажной является близость репера к измеряемой γ -линии, что позволяет минимизировать ошибки, связанные с неопределенностью калибровочной кривой спектрометра. Поэтому весьма существенным при выборе опорных γ -линий является наличие в данной области спектра удобных ядерно-спектроскопических нормалей.

На рис. 1 приведено распределение плотности реперов в интервале энергий от 24 до 2000 кэВ, построенное по данным работы [5]. Как видно из рисунка, в области энергий от 24 до 900 кэВ на 100 кэВ спектра приходится 10 - 20 нормалей, тогда как в районе от 900 до 2000 кэВ – от 2 до 10. Следовательно, в низкоэнергетической области спектра можно подобрать репер не далее 5 - 10 кэВ от измеряемой γ -линии, в то время как в высокоэнергетической области спектра расстояние составит уже от 10 до 20 кэВ и больше. Правильным подбором аппаратуры и оптимальных условий измерений неравномерность калибровочной кривой спектрометра можно уменьшить до $(1 - 3) \cdot 10^{-5}$ [2], реальная же возможность выбора реперов приводит к неопределенности в определении положения линии от 0,15 до 0,6 эВ и выше для указанных областей энергии соответственно.

Отметим также, что более 90 % нормалей расположены в районе до 2000 кэВ. На оставшиеся 2800 кэВ спектра приходится всего 22 репера, что соответствует плотности менее чем в один репер на 100 кэВ. Этого количества нормалей конечно же недостаточно для нужд ядерной спектроскопии.

Методические вопросы, касающиеся проведения измерений энергии γ -лучей на полупроводниковых спектрометрах подробно изложены в работе [2]. Там же выполнен детальный анализ всех возможных экспериментальных погреш-

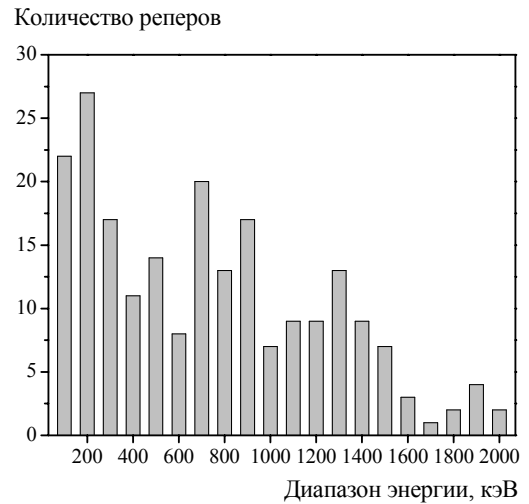


Рис. 1. Количество реперных γ -квантов на 100 кэВ спектра в области энергии от 24 до 2000 кэВ.

ностей, даны рекомендации по их минимизации, предложены наиболее оптимальные методики проведения исследований подобного рода. Поэтому перейдем к рассмотрению шестого этапа предложенной процедуры.

Расчет энергии уровней по измеренным энергиям опорных переходов

В эксперименте измеряют энергии γ -лучей. Чтобы перейти к энергиям переходов необходимо учесть энергию ядра отдачи при испускании γ -кванта. Энергия перехода определяется выражением [6]

$$E_n = E_\gamma + E_\gamma^2 / 2Mc^2,$$

где M – масса ядра отдачи.

При $E_\gamma = 100$ кэВ и $A = 181$ второе слагаемое составляет 0,05 эВ, а при $E_\gamma = 500$ кэВ поправка составит 0,7 эВ, что уже сравнимо с точностью определения энергии переходов.

Используя данные об энергии опорных переходов и правило Ритца для каскадных переходов ($E_1 + E_2 = E_3$, где E_3 – энергия замыкающего прямого перехода между крайними уровнями), составляют систему линейных уравнений для расчета энергии уровней. В результате получают систему неточных уравнений разного веса:

$$a_1x + b_1y + \dots + m_1v = t_1 \pm \Delta t_1,$$

$$a_2x + b_2y + \dots + m_2v = t_2 \pm \Delta t_2,$$

.....

$$a_Nx + b_Ny + \dots + m_Nv = t_N \pm \Delta t_N,$$

где a, b, \dots, m – заданные числа (обычно они равны ± 1 или нулю); t и Δt – энергии опорных

переходов со своими погрешностями; x, y, \dots, v – неизвестные (энергии уровней).

Если N больше числа неизвестных (как правило, так оно и есть), то систему решают по методу наименьших квадратов, т. е. определяют такие значения неизвестных, при которых была бы минимальной сумма

$$\sum_{i=1}^N p_i (t_i - a_i x - b_i y - \dots - m_i v)^2,$$

где $p_i = (\Delta t_i)^{-2}; i = 1, \dots, N$.

Определив энергии возбужденных состояний ядра, совсем несложно рассчитать и энергии γ -переходов между ними.

Эта методика была использована при исследовании распада ^{181}Hf и хорошо зарекомендовала себя, позволив получить данные об энергиях уровней ^{181}Ta и разряжающих их γ -лучей на порядок точнее известных до сих пор значений. Схема распада ^{181}Hf представлена на рис. 2.

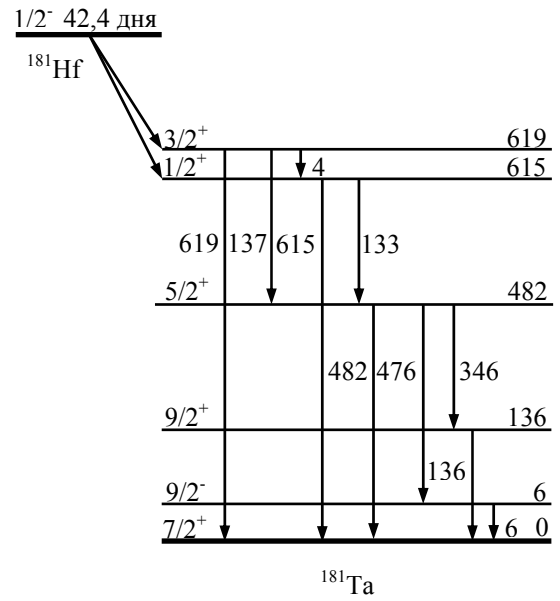


Рис. 2. Схема распада ^{181}Hf .

В табл. 1 приведены экспериментальные данные об энергиях опорных переходов в ^{181}Ta , полученные на полупроводниковых спектрометрах.

Таблица 1. Значения энергии опорных γ -лучей в ^{181}Ta , возбуждающихся в распаде ^{181}Hf

Измеряемая разность энергий γ -линий	Значения разности энергий, эВ	Энергия реперного кванта, эВ	Энергия искомого кванта, эВ	Литература
$\gamma_{133} (^{181}\text{Hf}) - \gamma_{130} (^{169}\text{Yb})$	2534,0(13)	130522,93(6)	133056,9(13)	[7, 8]
$\gamma_{346} (^{181}\text{Hf}) - \gamma_{344} (^{152}\text{Eu})$	1656,0(31)	344278,5(12)	345934,5(33)	[7, 8]
$\gamma_{484} (^{192}\text{Ir}) - \gamma_{482} (^{181}\text{Hf})$	2394,1(30)	484575,1(4)	482181,0(30)	[7, 8]
$\gamma_{482} (^{181}\text{Hf}) - \gamma_{468} (^{192}\text{Ir})$	14120,0(15)	468068,85(26)	482188,9(15)	[8]
$\gamma_{482} (^{181}\text{Hf}) - \gamma_{476} (^{181}\text{Hf})$	6222,0(15)			[9, 10]
$\gamma_{137} (^{181}\text{Hf}) - \gamma_{133} (^{181}\text{Hf})$	3794,0(9)			[11]
$\gamma_{137} (^{181}\text{Hf}) - \gamma_{136} (^{181}\text{Hf})$	601,4(9)			[11]

Обработав данные из табл. 1 описанным выше способом, удалось более точно определить энергии всех уровней ^{181}Ta и γ -лучей, возбуждающихся в распаде ^{181}Hf . Они представлены в табл. 2. В качестве опорной энергии γ -перехода 482 кэВ использовали средневзвешенное по двум измерениям значение $E_\gamma(482) = 482187,3 \pm 3,2$ эВ. Небольшое значение $\chi^2 = 0,50$ свидетельствует об отсутствии систематических погрешностей в энергии переходов.

Таблица 2. Значения энергии уровней ^{181}Ta и γ -лучей, возбуждающихся в распаде ^{181}Hf

Энергии уровней, эВ	Энергии γ -лучей, эВ	Энергии уровней, эВ	Энергии γ -лучей, эВ
6222,0(15)	6222,0(15)	615243,8(8)	133057,2(11)
			615242,7(8)
136250,1(9)	136250,0(9)		
		619037,9(7)	3795,2(11)
482186,5(8)	345936,0(12)		136851,3(11)
	475963,8(17)		619036,8(7)
	482185,8(8)		

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Джеленов Б.С.* Методы разработки сложных схем распада - Л.: Наука, 1974. - 232 с.
2. *Лашко А.П., Лашко Т.М.* Анализ погрешностей измерений энергии гамма-лучей на полупроводниковых спектрометрах // Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy (NPAE-Kyiv2006): Proc. of the Int. Conf. (Kyiv, May 29 - June 03, 2006). - Kyiv, 2007 (in press).
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. *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.
5. *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.
6. *Джеленов Б.С., Шестопалова С.А.* Ядерно-спектроскопические нормалы - М.: Атомиздат, 1980. - 232 с.
7. *Кошутский Ю.Е., Купряшкин В.Т., Олейник В.С. и др.* Измерение с высокой точностью энергий переходов в распаде ^{181}Hf // Ядерн. спектр. и структ. атомн. ядра: Тез. докл. 39-го совещ. (Ташкент, 18 - 21 апр. 1989 г.). - Л: Наука, 1989. - С. 116.
8. *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.
9. *Лашко А.П., Лашко Т.Н.* О сверхтонкой структуре конверсионных линий // 36. науч. праць Ін-ту ядерних досл. - 2003. - № 2 (10). - С. 46 - 52.
10. *Лашко А.П., Лашко Т.Н.* Влияние магнитного момента ядра на энергию конверсионных линий в ^{181}Ta // Изв. РАН. Сер. физ. - 2005. - Т. 69, № 1. - С. 5 - 9.
11. *Купряшкин В.Т., Лашко А.П., Остапенко Б.В. и др.* Определение разности значений энергии переходов γ_{133} , γ_{136} и γ_{137} в ^{181}Ta // Изв. РАН. Сер. физ. - 1994. - Т. 58, № 1. - С. 43 - 46.

**ВИСОКОТОЧНІ ВИМІРЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ ЯДЕРНИХ СТАНІВ, ЩО ЗБУДЖУЮТЬСЯ
В РАДІОАКТИВНОМУ РОЗПАДІ**

А. П. Лашко, Т. М. Лашко

Для визначення з високою точністю енергії збуджених станів атомних ядер, що заселяються в радіоактивному розпаді, пропонується скористатися методом опорних переходів, застосування якого дозволяє суттєво зменшити трудомісткість експериментів. Детально описано процедуру подібних досліджень, подано практичні рекомендації щодо її використання.

**HIGH-ACCURACY MEASUREMENT OF THE ENERGY OF NUCLEAR STATES EXCITED
IN THE RADIOACTIVE DECAY**

A. P. Lashko, T. N. Lashko

For high-precision determination of the energy of excited nuclear states populated in radioactive decay the reference nuclear transition method is suggested. Application of this method allows to essentially reduce laboriousness of the experiments. The procedure of such investigations is described in detail; guidelines on its practical implementation are given.

Поступила в редакцію 05.06.06,
после доработки – 19.09.06.