

сивности γ -излучения со сложным спектрально-угловым распределением.

Автор выражает благодарность О. И. Лейпунскому за ценные замечания, высказанные при обсуждении работы.

Поступило в Редакцию 11/VII 1962 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Н. Сахаров. «Атомная энергия», 3, вып. 7, 61 (1957).
2. Б. П. Булатов. «Атомная энергия», 6, вып. 3, 332 (1959).

539.12.03

Определение содержания α -излучателей с близкими энергиями в смеси изотопов

Л. С. Горн, Б. И. Хазанов

Определение изотопного состава методом α -спектрометрии — одна из интересных практических задач радиометрического анализа.

Равная интенсивность линий изотопов, находящихся в равновесии, и однозначное соответствие амплитуды электрического сигнала энергии излучения представляются определенными преимуществами описываемого метода по сравнению с γ - β -измерениями. В частности, таким методом может быть определено соотношение изотопов элементов естественных радиоактивных рядов [1, 2].

Для элементов, лежащих в начале уранового и ториевого рядов, энергия α -распадов лежит в пределах 4—5,7 Мэв, причем отдельные линии отстоят друг от друга на несколько сотен килоэлектронвольт. Поэтому к спектрометрическому α -детектору предъявляются требования достаточно высокого энергетического разрешения (порядка 1%).

Развитие в последние годы техники полупроводниковых детекторов [3, 4] позволяет создать α -спектрометрические установки для массового лабораторно-производственного анализа, не связанные со сложными вакуумными устройствами и превосходящие по разрешению ионизационные камеры. Однако наилучшими спектрометрическими свойствами обладают детекторы с малой площадью перехода, т. е. малой эффективностью. Это весьма важно, если учесть низкие удельные скорости счета при измерении естественных радиоактивных препаратов.

Увеличение площади детектора вследствие увеличения его емкости и ухудшения отношения сигнал — шум неизбежно приводит к ухудшению спектрометрических качеств, так что распределения амплитуд от двух линий начинают перекрываться. Это видно из рис. 1, а, где приведен спектр урана (UI и UII), полученный с полупроводниковым детектором площадью около 0,8 см². Кроме того, при отношении содержания изотопов, значительно отличающемся от единицы, перекрытие даже относительно далеко отстоящих линий начинает играть заметную роль, так как вносит погрешность в измерение.

В связи с этим определенный интерес может представить использование простейшей математической операции (вычитания спектральных распределений) с целью эффективного улучшения разрешения и повышения чувствительности и точности при использовании α -полупроводниковых детекторов для изотопного анализа. Далее такая методика будет рассмотрена для случая двух перекрывающихся линий. Очевидно, не представит труда обобщение этой методики для случая нескольких перекрывающихся распределений.

Измерения проводились в двух энергетических каналах I и II (см. рис. 1, б). Если I_I и I_{II} — числа импульсов,

зарегистрированных в каналах I и II, I_A и I_B — фактические числа импульсов от соответствующих излучателей (площадь под пиками A и B) и коэффициенты

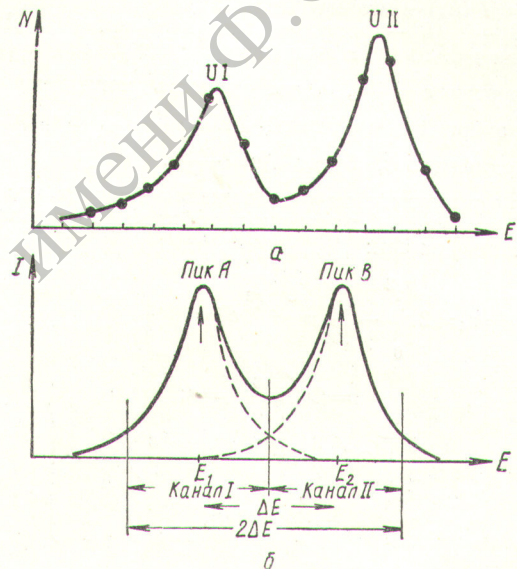


Рис. 1. Спектр урана, полученный на полупроводниковом детекторе (а) и диаграмма размещения энергетических каналов (б).

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ и α_4 — доли пиков, вносящие вклад в счет в соответствующие каналы, то

$$\begin{cases} I_I = \alpha_1 I_A + \alpha_2 I_B; \\ I_{II} = \alpha_3 I_A + \alpha_4 I_B. \end{cases} \quad (1)$$

Величины I_I и I_{II} определяют из эксперимента. Значения коэффициентов α могут быть найдены из измерений с монохроматическими линиями. Однако, если исследуемый препарат достаточно тонок, то форма линий с хорошей степенью точности приближается к гауссовой кривой ошибок и коэффициенты α могут быть рассчитаны. Это справедливо, если размытие линий, вызванное конечной толщиной препарата, существенно меньше, чем дисперсия за счет детектора, т. е. $\frac{d}{R} \ll \sigma$ (где d — толщина препарата, R — пробег α -частиц и σ — дисперсия линии). В противном случае

симметрия кривой нарушается и необходимо экспериментальное определение коэффициентов α .

Решая систему (1) относительно неизвестных I_A и I_B , найдем

$$\left. \begin{aligned} I_A &= \frac{\alpha_4}{\alpha_1\alpha_4 - \alpha_2\alpha_3} I_I - \frac{\alpha_2}{\alpha_1\alpha_4 - \alpha_2\alpha_3} I_{II}; \\ I_B &= \frac{-\alpha_3}{\alpha_1\alpha_4 - \alpha_2\alpha_3} I_I + \frac{\alpha_1}{\alpha_1\alpha_4 - \alpha_2\alpha_3} I_{II}. \end{aligned} \right\} (2)$$

Если разность энергий $E_1 - E_2$ мала по сравнению со значениями E_1 и E_2 , то дисперсия обеих линий практически одинакова и форма каждой линии может быть описана в следующей аналитической форме:

$$I(E) = \frac{I_0}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2} \frac{\Delta E^2}{\sigma^2}}, \quad (3)$$

где $I_0 = I(E_0)$ — интенсивность линии в максимуме; $\Delta E = E_0 - E$ (E_0 — вероятное значение энергии). Для удобства дальнейших вычислений введем безразмерную энергию $\varepsilon = \frac{E}{\sigma}$, тогда разность между значениями энергий обеих линий $\Delta E = E_1 - E_2$, выраженная в единицах σ , будет $\Delta\varepsilon = \frac{\Delta E}{\sigma}$.

При симметричном расположении каналов, показанном на рис. 1, б, значения коэффициентов α_i могут быть записаны так:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 = \alpha_4 &= 2 \int_0^{\varepsilon/2} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \xi^2} d\xi = \\ &= \Phi\left(\frac{\Delta\varepsilon}{2}\right) = \alpha; \\ \alpha_2 = \alpha_3 &= \frac{1}{2} \left[\Phi\left(\frac{3}{2} \Delta\varepsilon\right) - \Phi\left(\frac{\Delta\varepsilon}{2}\right) \right] = \\ &= \frac{1}{2} (a - \alpha), \end{aligned} \right\} (4)$$

где

$$2 \int_0^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \xi^2} d\xi = \Phi(x); \quad \Phi\left(\frac{3}{2} \Delta\varepsilon\right) = a.$$

Значения функции $\Phi(x)$ табулированы и могут быть использованы при вычислениях. Фактор a в приведенных уравнениях характеризует степень перекрытия линий.

Отношение содержания обоих изотопов в смеси может быть найдено из соотношения

$$\begin{aligned} \frac{I_A}{I_B} &= \frac{\alpha_4 I_I - \alpha_2 I_{II}}{-\alpha_3 I_I + \alpha_1 I_{II}} = \frac{I_I - \frac{1}{2} \left(\frac{a}{\alpha} - 1 \right) I_{II}}{-\frac{1}{2} \left(\frac{a}{\alpha} - 1 \right) I_I + I_{II}} = \\ &= \frac{I_I - k I_{II}}{-k I_I - I_{II}}, \end{aligned}$$

где $k = \frac{1}{2} \left(\frac{a}{\alpha} - 1 \right)$ — фактор, зависящий только от перекрытия линий.

Например, при определении концентрации U^{238} ($E = 4,18$ Мэв) и U^{235} ($E = 4,38$ Мэв) и при разрешении спектрометра около 3% значения коэффициентов будут равны $\alpha_1 = \alpha_4 = 0,93$; $\alpha_2 = \alpha_3 = 0,035$ и $k = 0,038$.

Указанный метод позволяет принципиально решать как угодно близкие линии. Однако на практике из-за ряда причин этого сделать нельзя. Для достижения такой же статистической точности, как и при регистрации разделяющихся линий, приходится увеличивать время измерения, которое при значительном сближении линий становится настолько большим, что не может быть реализовано на практике.

Среднеквадратичная ошибка в определении величины I_A

$$(\Delta I_A)^2 = [\Delta(c_1 I_I)]^2 + [\Delta(c_2 I_{II})]^2 = c_1^2 \Delta I_I^2 + c_2^2 \Delta I_{II}^2,$$

где

$$c_1 = \frac{\alpha_4}{\alpha_1\alpha_4 - \alpha_2\alpha_3} \quad \text{и} \quad c_2 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1\alpha_4 - \alpha_2\alpha_3},$$

или

$$\Delta I_A = \sqrt{c_1^2 (\alpha_1 I_A + \alpha_2 I_B) + c_2^2 (\alpha_3 I_A + \alpha_4 I_B)}.$$

В качестве критерия выберем фактор $m = \frac{I_A^0}{\Delta I_A^0}$, позволяющий оценить необходимое превышение измеряемой величины над уровнем статистических флуктуаций. Следовательно для достижения требуемой точности измеренная величина I_A должна удовлетворять соотношению

$$I_A \geq I_A^0 = m \Delta I_A^0 = m \sqrt{I_A^0 (c_1^2 \alpha_1 + c_2^2 \alpha_3) + I_B^0 (c_1^2 \alpha_2 + c_2^2 \alpha_4)}.$$

Отсюда найдем

$$\begin{aligned} I_A^0 &= m^2 c_1^2 \left[\left(\alpha_1 + \frac{c_2^2}{c_1^2} \alpha_3 \right) + \frac{I_B}{I_A} \left(\alpha_2 + \frac{c_2^2}{c_1^2} \alpha_4 \right) \right] = \\ &= m^2 f(\alpha, \beta), \end{aligned}$$

где $\beta = \frac{I_B}{I_A}$. Таким образом, величина I_A^0 зависит от требуемой статистической точности (фактор m), фактора перекрытия линий α и соотношения интенсивностей линий β . Подставляя в последнее выражение значения коэффициентов α из уравнений (4), найдем вид функциональной зависимости $f(\alpha, \beta)$:

$$f(\alpha, \beta) = \frac{16\alpha^2}{(\alpha+a)^2 + (3\alpha+a)^2} \left[\alpha + \frac{(a-\alpha)^3}{8\alpha^2} + \frac{(a^2-\alpha^2)}{4\alpha} \beta \right]. \quad (5)$$

Нетрудно убедиться, что в частном случае $\alpha = 1$, т. е. линии разделены, и $f(\alpha, \beta) = 1$, т. е. получается обычный результат $I_A^0 = m^2$.

На рис. 2 изображено семейство кривых $f(\Delta\varepsilon, \beta)$, характеризующее увеличение времени измерений (параметром является β). Из кривых видно, что при равных интенсивностях линий разделение линий, отличающихся на $\Delta\varepsilon = 2$ (т. е. $\Delta E = 2\sigma$), требует увеличения времени замера вдвое по сравнению с временем замера разделяемых линий. Если же $\Delta\varepsilon = 1$, то время измерения возрастает примерно в 17 раз.

Для реализации изложенного метода была выполнена двухканальная установка (рис. 3). Она рассчитана на раздельное определение содержания двух изотопов с близкими энергиями (перекрывающимися амплитудными распределениями). Построение элементов установки полностью на транзисторах позволяет использовать ее в полевых лабораториях.

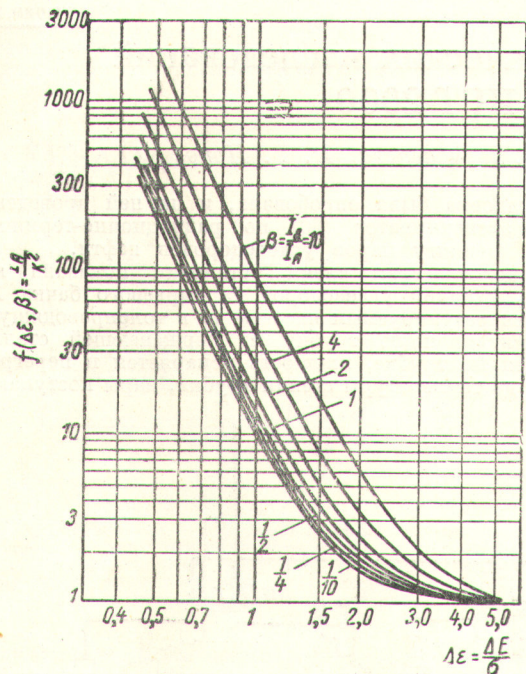


Рис. 2. Увеличение времени измерения в зависимости от соотношения интенсивностей линий и их перекрытия.

В использованных полупроводниковых детекторах уровень сигнала, соответствующего энергии 5 Мэв, составлял 100 мкв. Транзисторный предусилитель выполнялся с расчетом достижения минимального уровня шумов, которые составили в пересчете на вход схемы 2—3 мкв [5]. После предварительного усиления сигналы поступают на дискриминирующее устройство,

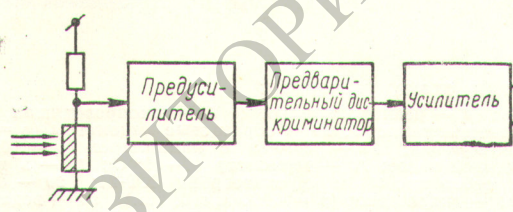


Рис. 3. Блок-схема измерительной установки.

и далее вновь усиливаются лишь вершины импульсов, превышающие определенный порог (тем самым исключается диапазон от 0 до 3 ÷ 3,5 Мэв).

Уровни дискриминации двух дифференциальных дискриминаторов D_1 и D_2 выбираются так, что максимумы амплитудных распределений совпадают с центрами каналов. Регистрация импульсов ведется двумя разностными регистраторами, причем на вход суммирования каждого из регистраторов сигналы подаются непосредственно со своих же дискриминаторов, а на вход вычитания — с другого дискриминатора после дополнительного пересчета.

Для настройки системы на регистрацию интенсивности двух определенных излучателей необходимо обеспечить коэффициенты дополнительного пересчета K_1 и K_2 в соответствии с расчетными значениями. Если один из регистраторов используется в качестве управляющего, т. е. прекращает регистрацию после достижения определенного объема счета N_0 , то второй регистратор можно использовать для получения непосредственно соотношения контролируемых изотопов. При выборе величины N_0 учитываются коэффициенты в формулах, связывающих регистрируемое число импульсов с истинным, соответствующим площади пика.

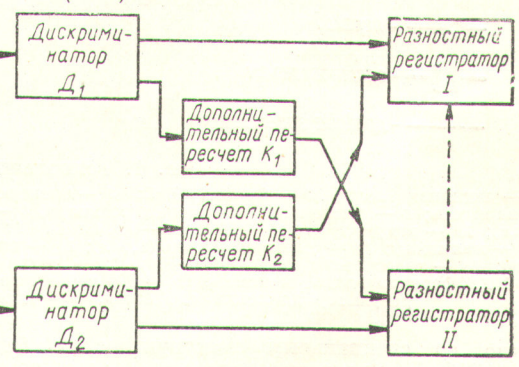
Следует отметить, что изложенный метод принципиально применим к разделному определению не только двух, но и большего числа изотопов в смеси. Измерения должны проводиться несколькими одноканальными дискриминаторами, за которыми следует простейшее вычислительное устройство. Метод может оказаться удобным также и при использовании α -сцинтилляционных детекторов (тонкие кристаллы CsI(Tl), обладающих худшим энергетическим разрешением, но позволяющих из-за большой площади добиться высокой эффективности счета [6]). Кривые, приведенные на рис. 2, позволяют определить границы применения того или иного детектора для решения конкретных задач с целью проведения измерений в кратчайшее время.

В заключение выражаем благодарность В. Л. Шашкину и Ю. А. Юзвук за постоянный интерес к работе, а также М. И. Крапивину, Б. В. Фефилову и Ю. Р. Носову, любезно предоставившим полупроводниковые α -детекторы для проведения экспериментов.

Поступило в Редакцию 31/V 1962 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. А. Сурков и др. «Атомная энергия», 9, вып. 6, 477 (1960).



2. В. В. Чердынцев и др. «Геохимия» № 10, 840, (1961).
 3. A. Chetham-Strode et al. IRE Trans. Nucl. Sci., 8, No. 1, 59 (1961).
 4. С. М. Рывкин и др. «Атомная энергия», 11, вып. 3, 247 (1961).
 5. А. Д. Вережкин и др. В кн.: «Труды V научнотехнической конференции по ядерной радиоэлектронике». М., Госатомиздат, 1962.
 6. В. Ф. Болотин и др. Сборник работ по некоторым вопросам дозиметрии. Вып. II. Под ред. Ю. В. Сивинцева. М., Госатомиздат, 1961, стр. 154.