

Рис. 3. Теоретические кривые зависимости выходов  $Rb^{83}$ ,  $Rb^{84}$ ,  $Rb^{86}$  от энергии дейтронов для толстых мишеней из криптона.

ным сечениям и выходам аналогичных ядерных реакций в рассматриваемой области масс ядер при энергии  $\alpha$ -частиц  $\sim 44$  Мэв (см. таблицу).

В интервале энергии бомбардирующих частиц 0—30 Мэв были рассчитаны теоретические функции возбуждения десяти реакций типа  $(p, xn)$  и  $(d, xn)$ , указанных в таблице. Расчеты проводились по формулам работы [4], полученным на основе модели составного ядра с параметром  $r_0 = 1,3$ . Из работ [5, 6] следует, что расчеты сечений ядерных реакций с испусканием нейтронов дают обычно удовлетворительное согласие теоретических и экспериментальных данных

в области средних и тяжелых ядер. Кривые выходов  $Rb^{83}$ ,  $^{84}$ ,  $^{86}$ , приведенные на рис. 2, 3, получены путем численного интегрирования по пробегу рассчитанных функций возбуждения. Выходы  $Rb^{83}$ ,  $^{84}$ ,  $^{86}$  при максимальной энергии частиц на циклотроне ФЭИ для четырех рассмотренных способов получения приведены в таблице.

Кривые на рис. 2,3 весьма полезны при выборе оптимального способа получения каждого изотопа. Например, облучая криптоновую мишень, в которой полностью укладывается пробег протонов с энергией 22 Мэв, получаем, что активность  $Rb^{84} + Rb^{86}$  на конец облучения в 2,5 раза превышает активность  $Rb^{83}$ . Если же облучать «тонкую» криптоновую мишень, в которой укладывается пробег протонов только от 22 до 18 Мэв, то содержание примеси  $Rb^{84} + Rb^{86}$  по отношению к  $Rb^{83}$  снижается до 40 % (т. е. в восемь раз), а выход  $Rb^{83}$  уменьшается всего в 1,7 раза.

Из способов получения, не указанных в таблице, можно отметить реакцию  $Sr^{88}(d, \alpha) Rb^{86}$ , позволяющую получить  $Rb^{86}$ , не используя криптоновую мишень. В работе [7] получен выход  $Rb^{86}$  20 мкюри/мкА·ч при облучении стронция дейтронами с энергией 30 Мэв. Ввиду малой распространенности других изотопов стронция примеси  $Rb^{83}$  и  $Rb^{84}$  на конец облучения не должны превышать нескольких процентов.

Авторы благодарят Г. А. Молина и Г. Н. Гриненко за помощь в работе.

Поступило в Редакцию 19/VII 1971 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Н. Н. Краснов, П. П. Дмитриев. «Атомная энергия», 20, 57 (1966); 20, 154 (1966).
- И. Г. Гусев и др. Радиоактивные изотопы как гамма-излучатели. М., Атомиздат, 1964.
- Н. Н. Краснов. «Атомная энергия», 26, 284 (1969).
- М. З. Максимов. ЖЭТФ, 33, 1411 (1957).
- П. П. Дмитриев, Н. Н. Краснов. «Атомная энергия», 18, 184 (1965).
- П. П. Дмитриев, И. О. Константинов, Н. Н. Краснов. «Атомная энергия», 22, 310 (1967); 24, 278 (1968); 24, 279 (1968).
- A. A. ten, J. Halberstadt. Philips Techn. Rev., 16, No. 1 (1954).

## Определение гафния в рудах и продуктах их переработки по реакции $(\gamma, \gamma')$

С. С. КОДИРИ, И. А. АБРАМС, Л. Л. ПЕЛЕКИС, Л. П. СТАРЧИК

УДК 533.53:539.144.7

Количественное определение гафния производится различными химическими и ядернофизическими методами. Однако использование классических химических методов анализа на гафний сильно затруднено из-за большого химического сродства гафния и циркония [1]. Определение содержания гафния в присутствии циркония путем активации тепловыми нейтронами по  $Hf^{180m}$  ( $T_{1/2} = 5,5$  ч) или  $Hf^{181}$  ( $T_{1/2} = 46$  суток) требует большой затраты времени [2, 3]. На результаты анализа влияют также сопутствующие гафнию элементы, что снижает точность и надежность результатов. Чувствительность анализа по изотопу  $Hf^{179m}$  при

плотности потока нейтронов  $10^{12} - 10^{13}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек не лучше 0,03—0,04% [2—4], хотя в работе [5] при анализе цирконовых концентратов достигнута чувствительность  $5 \cdot 10^{-4}$ %. Проведению анализа с помощью нейтронов с энергией 14 Мэв по реакции  $Hf^{180}(n, 2n) Hf^{179m}$  мешают цирконий ( $Zr^{89m} - T_{1/2} 4,4$  мин), кремний [ $Si^{28}(n, p) Al^{28} - T_{1/2} 2,3$  мин] и другие элементы [6]. Пороговая чувствительность определения гафния при потоке  $1 \cdot 10^9$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек для образца весом 0,1 г равна всего 50 мкг в отсутствие мешающих элементов.

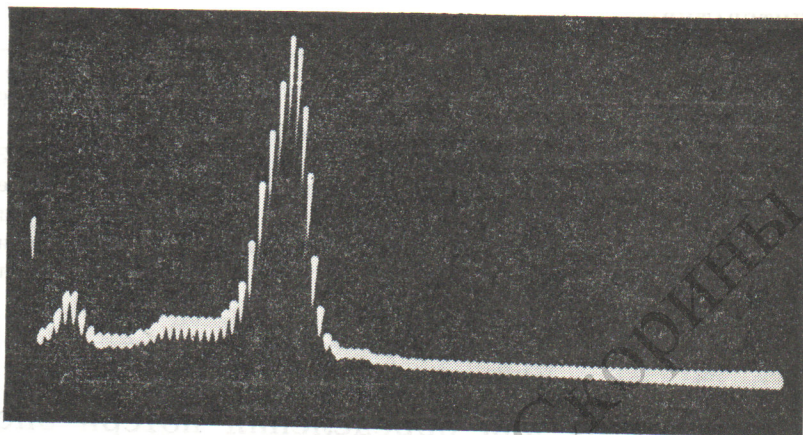
Предлагаемый метод активационного определения гафния по реакции ( $\gamma$ ,  $\gamma'$ ) является экспрессным, селективным и высокочувствительным. Использованию этого взаимодействия для определения содержания гафния в рудах и продуктах их переработки благоприятствует то, что при граничной энергии тормозного излучения ( $E_{\gamma \text{ макс}}$ ), лежащей ниже порогов фотоядерных реакций, исключается возможность активации всех легких элементов до мышьяка. Эти элементы являются основными породообразующими компонентами рудных образцов. Более того, число ядер, проявляющих по реакции ( $\gamma$ ,  $\gamma'$ ) изомерную активность с  $T_{1/2}$  = секунды — сутки, ограничено 21 ядром 18 элементов от селена до ртути [7—9]. Не возбуждается при этом и постоянный спутник гафния — цирконий. Это существенно улучшает селективность анализа и значительно упрощает расшифровку  $\gamma$ -спектров. Другим обстоятельством, благоприятствующим применению этого метода, является практическое устранение эффекта самоэкранирования, что позволяет анализировать более представительные пробы, чем при нейтронноактивационном анализе.

Неупругое рассеяние  $\gamma$ -квантов на ядрах изотопа  $\text{Hf}^{179}$  приводит к образованию метастабильного состояния  $\text{Hf}^{179m}$  с  $T_{1/2}$  19 сек и  $E_{\gamma}$  = 215 кэв. Возбуждение  $\text{Hf}^{179m}$  производится тормозным излучением линейного ускорителя с энергией электронов 5 Мэв.

Число импульсов под фотофиком 215 кэв при  $E_{\gamma \text{ макс}}$  = 5 Мэв,  $i$  = 700 мкА, времени активации 1 мин, времени охлаждения 3 сек равно  $5,4 \cdot 10^6$  имп/мин от 1 г гафния. Пороговая чувствительность определения гафния ( $4\sigma$ , где  $\sigma = \sqrt{N_{\text{ф}}}$ ) при продолжительности анализа  $\sim 2$  мин составляет 4 мкг (или  $\sim 7 \cdot 10^{-5}\%$  для образца весом 6 г), что выше пороговой чувствительности, достигаемой при нейтронноактивационном анализе.

В рудах и продуктах их переработки гафнию кроме циркония и алюминия могут сопутствовать Mg, Ca, Fe, Co, Se, Sr, Y, Mo, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Te, Ba, Ta, Pb, Bi и др., из которых мешающую наведенную активность по реакции ( $\gamma$ ,  $\gamma'$ ) образуют лишь иттрий ( $\text{Y}^{89m}$  — 16 сек и 915 кэв) и барий ( $\text{Ba}^{137m}$  — 2,6 мин и 662 кэв). Однако эти ядра, во-первых, обнаруживают по сравнению с  $\text{Hf}^{179m}$  более чем в 100 раз слабую наведенную активность, во-вторых, их вклад можно легко учесть, если построить зависимость числа отсчетов в каналах фотофикса  $\text{Hf}^{179m}$  от содержания иттрия или бария в образце.

Таким образом, использование реакции ( $\gamma$ ,  $\gamma'$ ) для определения содержания гафния в образцах руд и продуктов их переработки позволяет устранить недостатки как химических, так и нейтронноактивационных методов, обеспечивая высокую селективность анализа, так как при использованной здесь граничной энергии тормозного излучения такие компоненты гафнийсодержащих руд, как Zr, Al, Fe, Ti, Si и другие, вообще не обнаруживают никакой наведенной активности. В качестве примера на рисунке показан спектр  $\gamma$ -излучения образца циркониевого концентрата, содержащего 0,34%  $\text{HfO}_2$ , 20,6%  $\text{ZrO}_2$ , 4,90%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 4,17%  $\text{TiO}_2$ ,



Спектр  $\gamma$ -излучения образца циркониевого концентрата.

23,4%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , а также CaO, MgO и другие элементы. При анализе образцов с подобным «чистым» спектром погрешность определения будет состоять из ошибок, в основном связанных с измерительной аппаратурой и со статистическим распределением импульсов, которые обычно не превышают 3—5%. Об этом свидетельствует и хорошая сходимость результатов определения содержания гафния в пробах циркониевого концентрата (0,23—1,25%  $\text{HfO}_2$ , 14,0—65,6%  $\text{ZrO}_2$ , до 4,9%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 3,8%  $\text{TiO}_2$ , 24,7%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и другие компоненты) с данными искрового спектрографического метода, приведенными в таблице.

#### Результаты определения содержания гафния в пробах циркониевого концентрата

Содержание $\text{HfO}_2$ , %		Расхождение результатов, отн. %	Содержание $\text{HfO}_2$ , %		Расхождение результатов, отн. %
Искровой спектрографический метод	( $\gamma$ , $\gamma'$ )		Искровой спектрографический метод	( $\gamma$ , $\gamma'$ )	
0,230	0,232	+0,9	1,090	1,083	-0,6
0,250	0,252	+0,8	1,100	1,090	-0,9
0,270	0,270	0,0	1,100	1,048	-4,7
0,300	0,297	-1,0	1,110	1,111	+0,8
0,340	0,332	-2,4	1,110	1,070	-3,6
0,391	0,386	-1,0	1,131	1,126	-0,4
1,040	1,032	-1,0	1,250	1,261	+0,9
1,040	1,043	+0,3			

Результаты экспериментов показывают, что рассмотренный метод может быть успешно применен для анализа на гафний руд и продуктов их переработки.

Поступило в Редакцию 16/VI 1971 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Металлургия графния. Под ред. Д. Е. Томаса и Е. Т. Хейса. Перев. с англ. Под ред. Ф. М. Перельмана. М., «Металлургия», 1967.
2. R. Necker, W. Herr. *Nucleonik*, **4**, 19 (1962).
3. Е. М. Лобанов, Р. И. Хускутдинов. «Докл. АН УзССР», **1**, 31 (1966).
4. B. Chinaglia et al. *Energia Nucl.*, **9**, 503 (1962).
5. Г. В. Леушкина и др. «Атомная энергия», **26**, 381 (1969).
6. В. Т. Тустановский, У. Орифходшаев. «Заводск. лаборатория», **36**, 1482 (1970).
7. H. Lukens et al. *IJARI*, **11**, 30 (1964).
8. С. Кодир, Л. П. Старчик. «Заводск. лаборатория», **36**, 191 (1970).
9. С. Кодир. Диссертация. М., 1970.

## Номограммы для определения потери энергии при прохождении заряженной частицы сквозь слой поглотителя

Г. Н. ПОТЕТЮНКО

УДК 539.121.72/75:518.3

Аппроксимируя кривую пробег—энергия полиномом [1]

$$R = a_0 + a_1 E + a_2 E^2, \quad (1)$$

получаем два следующих уравнения:

$$\Delta E^2 - 2 \left( \frac{a_1}{2a_2} + E_1 \right) \Delta E + \frac{\Delta R}{a_2} = 0, \quad (2)$$

$$\Delta E^2 + 2 \left( \frac{a_1}{2a_2} + E_2 \right) \Delta E - \frac{\Delta R}{a_2} = 0. \quad (3)$$

Уравнение (2) связывает потерю энергии частицы  $\Delta E$  с толщиной поглотителя  $\Delta R$  и энергией частицы  $E_1$  перед поглотителем, а уравнение (3) связывает  $\Delta E$  с  $\Delta R$  и  $E_2$ —энергией частицы после поглотителя.

Из уравнений (2) и (3) получаем:

$$\Delta E = \left( \frac{a_1}{2a_2} + E_1 \right) - \sqrt{\left( \frac{a_1}{2a_2} + E_1 \right)^2 - \frac{\Delta R}{a_2}}, \quad (4)$$

$$\Delta E = - \left( \frac{a_1}{2a_2} + E_2 \right) + \sqrt{\left( \frac{a_1}{2a_2} + E_2 \right)^2 + \frac{\Delta R}{a_2}}. \quad (5)$$

Коэффициенты полинома (1) находились при помощи номограммы [2]. Они определены для пробега ионов водорода, гелия и лития в кремнии и для пробега ионов от гелия до аргона в алюминии; их значения приведены в таблице. Чтобы получить значения  $a_i$

для какого-либо изотопа, необходимо табличные данные умножить на  $M$ —массу изотопа, выраженную в атомных единицах массы. Величина  $a_1/(2a_2)$  для всех изотопов одного химического элемента постоянна.

Данные по пробегам в кремнии брались из работы [3], по пробегам ионов от гелия до магния в алюминии — из работы [4], по пробегу ионов аргона в алюминии — из работы [5].

Коэффициенты  $a_1$  и  $a_2$ , а также величина  $a_1/(2a_2)$  оказались плавными функциями атомного номера элемента. Это позволило определить коэффициенты  $a_i$  для ионов тех элементов (от алюминия до хлора), для которых данных по пробегам в нашем распоряжении не было.

На рис. 1 и 2 (см; стр. 432) приведены номограммы формулы (2), а на рис. 3 и 4 (см. стр. 433) — номограммы формулы (3).

Коэффициенты  $a_1$  и  $a_2$  можно определить и экспериментальным путем. Для этого необходимо при фиксированном  $\Delta R$  и различных  $E_1$  (или наоборот) измерить соответствующие  $E_2$ , после чего воспользоваться уравнением  $\Delta R = a_1 \Delta E + a_2 \Delta E (E_1 + E_2)$ .

Настоящая работа выполнена в 1969 г. в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. Пользуясь случаем, выражаем искреннюю благодарность В. В. Волкову, Я. Вильчинскому и Г. Н. Зорину за постановку задачи, ценные советы и замечания.

Поступило в Редакцию 10/VI 1971 г.