

Экспериментальные кривые выхода ^{73}As и ^{74}As представлены на рис. 2 и 3. Погрешность измеренных значений выходов равна $\pm 13\%$ и в основном обусловлена систематическими погрешностями в измерениях активности нуклидов и интегрального тока облучения. В табл. 3 приведены ядерные реакции, в которых образуются ^{73}As и ^{74}As , и выходы при максимальной энергии бомбардирующих частиц, а также данные других работ. Как видно из табл. 3, опубликованные данные весьма скудны и значительно ниже физических выходов, измеренных в настоящей работе. В работах [9—12] выход ^{73}As или ^{74}As измерялся для производственных мишеней, и наблюдаемое занижение выходов может быть вызвано следующими причинами:

а) потери нуклида при облучении (испарения нуклида и материала мишени);

б) часть регистрируемого пучка облучает конструкционные детали мишени;

в) потери при радиохимическом выделении нуклида. Поэтому выходы, измеренные в работах [9—12], являются технологическими выходами. В работе [13] выход ^{74}As получен интегрированием экспериментальной функции возбуждения реакции.

Из данных на рис. 1 и 2 следует, что наиболее эффективный способ получения ^{73}As — облучение германия протонами с энергией ≥ 22 МэВ. При получении ^{74}As можно рекомендовать облучение германия протонами с энергией 11 МэВ. Интенсивные пучки протонов такой энергии легко получить, ускоряя молекулярный водород в режиме ускорения дейтронов. Ввиду низкого сечения реакции $^{75}\text{As}(p,t)^{73}\text{As}$ можно получить ^{74}As с незначительной примесью ^{73}As (но в форме «носителя»), облучая мышьяк протонами с $E_p \leq 18,5$ МэВ ниже порога реакции $^{75}\text{As}(p, p2n)^{73}\text{As}$.

Авторы благодарят Г. Н. Гриненко и З. П. Дмитриеву за помощь в работе.

Поступило в Редакцию 4/XI 1975 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alvar K. «Nucl. Date Sheets», 1974, v. 13, N 3, p. 305.
2. Van Hise J., Papariello C. «Nucl. Phys.», 1972, v. A188, p. 148.
3. Raghavan R., Preiffer L. «Phys. Rev. Lett.», 1974, v. 32, p. 512.
4. Lederer C. e.a. Table of Isotopes. N 7. J. Willey a. Sons, 1967.
5. Дмитриев П. П. и др. «Атомная энергия», 1971, т. 31, вып. 2, с. 157; 1972, т. 32, вып. 5, с. 426.
6. Дмитриев П. П. и др. «Атомная энергия», 1968, т. 24, вып. 3, с. 279.
7. Дмитриев П. П., Краснов Н. Н. «Атомная энергия», 1965, т. 18, вып. 2, с. 184.
8. Porile N., Morrison D. «Phys. Rev.», 1969, v. 116, p. 1193.
9. Martin J. e.a. («Nucleonics», 1955, v. 13, p. 28.
10. Aten A., Halberstadt J. «Philips Tech. Rev.», 1954, v. 16, N 1.
11. Gruwerman I., Kruger P. «J. Appl. Rad. and Isotopes», 1959, v. 5, p. 21.
12. Гулдамашвили А. И. и др. «Атомная энергия», 1958 г., т. 5, вып. 6, с. 660.
13. Bowen L., Irvine J. «Phys. Rev.», 1962, v. 127, p. 1698.

УДК 539.106:543.843

Неразрушающий метод анализа содержания водорода в тонких поверхностных слоях материалов

ЧЕРНОВ И. П., КОЗЫРЬ В. В., МАТУСЕВИЧ В. А.

Известно, что содержание водорода в металлах, сплавах и полупроводниковых материалах во многом определяет их электрофизические свойства. Даже небольшое присутствие водорода в металлах ведет к ухудшению пластических свойств (водородная хрупкость), повышению электрического сопротивления, уменьшению магнитной проницаемости и т. п. Поэтому контроль за содержанием водорода имеет важное значение. Среди прочих методов известен и ядерно-физический метод определения водорода, основанный на особенностях рассеяния частиц с одинаковыми массами [1, 2]. Основным недостатком этого метода — анализ водорода только в пленках толщиной до десятка микрон. В настоящей работе предлагается метод определения содержания водорода в поверхностных слоях образцов произвольной толщины, основанный на регистрации ядер водорода, выбиваемых ускоренными ионами с поверхности образца.

Для понимания сущности метода рассмотрим особенности упругого рассеяния тяжелых ядер на легких. Пусть ускоренные ионы с массой M_1 падают на толстый образец, содержащий в поверхностном слое ядра с мас-

сой M_2 ($M_2 < M_1$). Имеется определенная вероятность для налетающего иона встретить ядро M_2 и рассеяться на нем. Ядра отдачи M_2 при этом будут вылетать под любым углом в передней полусфере, тогда как бомбардирующие ионы рассеиваются в конус, угол раствора которого $\theta_{1\text{ макс}} = \arcsin(M_2/M_1)$. В случае рассеяния водородом ионов ^4He и ^{12}C угол раствора равен $14,5$ и $4,75^\circ$. Поэтому рассеянные ионы в толстом образце теряют полностью свою энергию и останавливаются в нем. Ядра отдачи при соответствующем угле наклона образца к падающему пучку ($\theta < 90^\circ$) вылетают из мишени и могут быть зарегистрированы. Энергия ядер отдачи E_2 при заданном угле регистрации θ_2 определяется соотношением

$$E_2 = \frac{4M_1M_2}{(M_1 + M_2)} \cos^2(\theta_2) E_1. \quad (1)$$

Для определения содержания легчайших ядер могут быть использованы частицы того же сорта, что и интересующая нас примесь. Однако в этом случае необходимо выделять ядра отдачи на интенсивном фоне частиц,

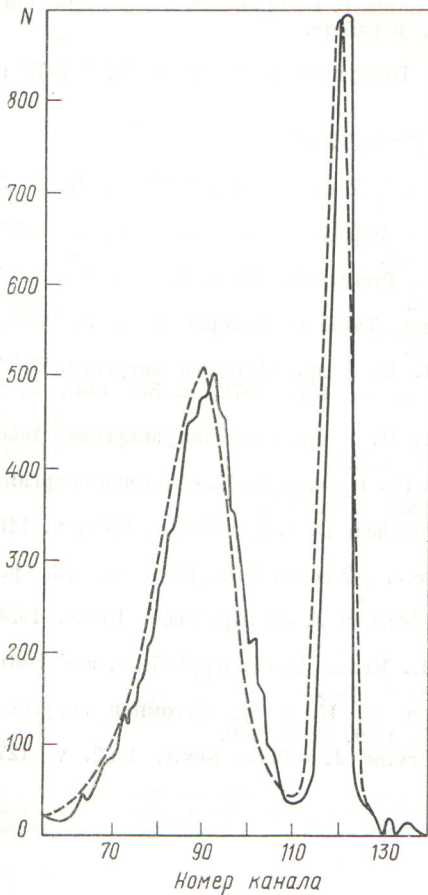


Рис. 1. Энергетические спектры ядер отдачи водорода в результате упругого соударения с α -частицами при энергии 18 МэВ и $\theta_{\text{лаб}} = 45^\circ$:
 --- от мишени из двух слоев лавсана (по 0,324 мг/см²) и алюминия (2,7 мг/см²); — от мишени, нанесенной на пластинку арсенида галлия

рассеянных ядрами матрицы, что делает задачу практически невыполнимой. В предлагаемом методе фоном, мешающим выделению полезной информации, являются ионы, упруго рассеянные ядрами матрицы, и легкие частицы, возникающие в результате ядерных реакций, вызываемых ионами на ядрах матрицы и примесных ядрах. Чтобы исключить первую составляющую фона, используют систему идентификации типа заряженных частиц. Вторая составляющая для матриц среднего и тяжелого атомного номера может быть исключена путем выбора энергии падающих ионов ниже кулоновского барьера.

Чувствительность метода при использовании для анализов α -частиц с энергией 12 МэВ и ионов углерода с энергией 20 МэВ составляет $4 \cdot 10^{12}$ и $1 \cdot 10^{12}$ ядер/см² соответственно. При этом ток ионов равен 0,1 мкА, время анализа 1 ч и телесный угол телескопа 10^2 ср.

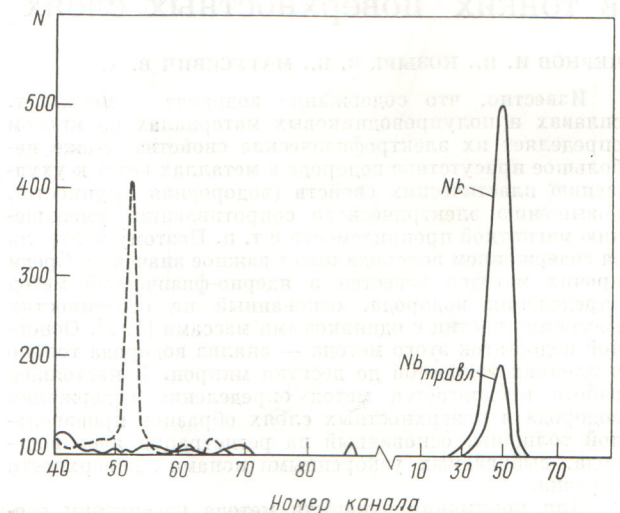
Возможности метода исследовались на примере определения водорода с помощью α -частиц с энергией 18 МэВ. Источником ускоренных α -частиц служил циклотрон НИИ ЯФ при Томском политехническом

институте. Ускоренные ионы из камеры ускорителя через ионопровод, где они фокусируются и коллимируются, попадают на образец, расположенный в центре камеры рассеяния. Плоскость поверхностного слоя образца располагалась под углом 30° к падающему пучку. Диаметр пучка ускоренных частиц на образце 2,5 мм. Частицы, вылетающие из образцов, регистрировались телескопом, состоящим из «тонкого» ΔE и «толстого» E полупроводниковых детекторов. Энергетическое разрешение спектрометра составляло 60 кэВ. Монитором падающих α -частиц служил полупроводниковый спектрометр, регистрирующий α -частицы, рассеянные тонкой, расположенной перед образцом пленкой.

На первом этапе исследований изучалась возможность использования метода для измерения профиля концентрации водорода (рис. 1).

Наблюдается два пика: первый — узкий, второй пик в результате разброса ионизационных потерь ядер отдачи водорода расширяется. Показано практическое отсутствие фона из реакции (α, p) на кислороде, углеороде и ядрах матрицы. Форма спектров протонов также существенно не изменяется вследствие присутствия толстой пластины.

На следующем этапе данный метод был применен для проведения анализов. При этом содержание водорода в образце определялось сравнением с эталоном — лавсановой пленкой толщиной 0,324 мг/см. Было определено содержание водорода в поверхностной пленке арсенида галлия, которая предварительно отжигалась в атмосфере водорода. Содержание водорода в ней составляет $9,7 \cdot 10^{17}$ ядер/см² (рис. 2). Здесь же представлен спектр ядер водорода, выбитых ионами ^4He из поверхности пластины, которая подвергалась отжигу в воздухе. Содержание водорода в ней было на уровне чувствительности метода ($\sim 4 \cdot 10^{12}$ ядер/см²). Показан энергетический спектр ядер водорода из ниобиевых пластин. Одна из них долгое время находилась на воздухе, другая перед анализом была подвергнута травлению. В первой пластине водорода содержалось $1,5 \cdot 10^{16}$ ядер/см², во второй — на порядок меньше. Следует заметить, что описанный метод может быть использован для



Р и с. 2. Энергетические спектры ядер отдачи водорода, вылетающих из поверхностного слоя арсенида галлия и ниобия (—); из арсенида галлия, отожженного в атмосфере водорода (---)

определения содержания тяжелых изотопов водорода и гелия.

Авторы благодарят В. В. Сохореву за помощь в подготовке мишеней и А. А. Ятиса за участие в обсуждении результатов.

Поступило в Редакцию 4/XI 1975 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артемов К. П. и др. «Атомная энергия», 1973, т. 34, вып. 4, с. 265.
2. Cohen B., Fink C., Deghan J. «J. Appl. Phys.», 1972, v. 43, N 1, p. 19.

УДК 539.175.2

Аномальный изотопный состав ксенона и криптона в минералах природного ядерного реактора

ШУКОЛЮКОВ Ю. А., АШКИНАДЗЕ Г. Ш., ВЕРХОВСКИЙ А. Б.

В урановом месторождении Окло (Габон, Африка) $1,8 \cdot 10^9$ лет назад функционировал природный ядерный реактор [1].

В настоящей работе исследовано пять проб урановой руды этого месторождения (скважина SC20): одна проба непосредственно из зоны цепной реакции и четыре — на последовательно увеличивающемся расстоянии

от этой зоны (см. таблицу). Определения концентрации урана (погрешность $\pm 5\%$ при малом содержании) сделаны методом изотопного разбавления на масс-спектрометре МИ-1311.

На этом же приборе определено содержание ^{235}U в смеси изотопов урана; погрешность определения изотопного состава $\pm(1,0 \div 1,5)\%$.

Изотопный состав ксенона и криптона из природного ядерного реактора

Номер образца; температура отжига, °С	Расстояние от зоны реакции, м	Количество, %		Вычисленный по выгоранию ^{235}U флюенс $\times 10^{20}$, нейтр./см ²	Количество ^{136}Xe , 10^{-9} , см ³ /г	Изотопный состав Xe и Kr								
		урана	^{235}U в смеси изотопов			136	134	132	131	130	129	86	84	83
1348 а; 400 750 1000 1150 1350	0 (зона реакции)	26,85	0,557	~ 4	334 1000 2979 6786	1,00 1,00 1,00 1,00	1,44 1,36 1,28 1,24	2,21 1,69 0,725 0,685	1,04 0,760	0,014 ≤ 0,0014	0,260 0,219	1,00 1,00 1,00 1,00	0,602 0,568 0,526 0,532 0,531	0,331 0,304 0,268 0,280 0,272
1348 б; 300 500 800 1065 1160	0 (зона реакции)	26,85	0,557	~ 4	243 473 1027 3920 4135	1,00 1,00 1,00 1,00 1,00	1,28 1,27 1,31 1,24 1,25	0,922 1,375 1,06 0,701 0,708	0,528 0,702 0,598 0,462 0,428	0,0022 0,0037 0,0047 0,0011 0,0009	0,157 0,228 0,186 0,127 0,122	— — — — —	— — — — —	— — — — —
1361; 1350	0,85	0,050	0,609	~ 2,5	224	1,00	1,24	0,722	0,453	0,0035	0,131	—	—	—
1364; 1350	1,35	0,00082	—	—	98	1,00	1,26	0,736	0,460	0,0016	0,126	—	—	—
1368; 1350	2,0	0,0026	0,740	—	26	1,00	1,23	0,704	0,453	0,0009	0,114	—	—	—
1371; 1350	2,5	0,00048	—	—	19	1,00	1,23	0,698	0,449	0,0035	0,126	—	—	—
$^{235}\text{U} + n_{\text{тепл.}}$	—	100	—	—	—	1,00	1,25	0,689	0,410	—	0,11	1,00	0,517	0,279
$^{238}\text{U} + n_{\text{спонт.}}$	—	100	—	—	—	1,00	0,82	0,579	0,082	—	0,002	1,00	0,140	0,0034
$^{239}\text{Pu} + n_{\text{тепл.}}$	—	—	—	—	—	1,00	1,15	0,808	0,578	—	0,232	1,00	0,633	0,390
Атмосфера	—	—	—	—	—	1,00	1,18	3,03	2,39	0,460	2,98	1,00	3,28	0,665