

Выходы изотопов N^{13} , C^{11} , F^{18} при облучении углерода и кислорода заряженными частицами

Н. Н. КРАСНОВ, П. П. ДМИТРИЕВ, З. П. ДМИТРИЕВА,
И. О. КОНСТАНТИНОВ, Г. А. МОЛИН

УДК 539.172.8

Как показано в работе [1], при определении примесей путем активационного анализа на заряженных частицах удобнее использовать значения выходов изотопов, а не сечений реакций. Это дает возможность получить простые соотношения для определения содержания примеси по величине активности образующихся изотопов как абсолютным, так и относительным методами.

Одной из перспективных областей применения активационного анализа на заряженных частицах является определение примесей углерода и кислорода в металлах. Эти примеси удобно регистрировать по величине активности изотопов N^{13} , C^{11} , F^{18} . В настоящей работе были измерены выходы этих изотопов при облучении углерода и кислорода протонами, дейтонами, ионами He^3 и α -частицами. Полученные зависимости выходов указанных изотопов от энергии позволяют выбрать тип и энергию частиц для каждого конкретного случая и определять примеси углерода и кислорода абсолютным методом.

Методика измерения выходов изотопов

Измерения проводились на циклотроне физико-энергетического института [2]. Для определения выходов изотопов из углерода облучению подвергался графит, а из кислорода — окись алюминия. Облучаемые образцы имели форму цилиндров диаметром 10 мм и толщиной 3—4 мм. Облучение осуществлялось на выведенном пучке циклотрона в специальном устройстве, позволявшем облучать одновременно три образца. Число частиц, попавших на образцы за время облучения, определялось с помощью медных мониторных фольг, устанавливаемых перед облучаемыми образцами. Активность мониторных фольг сравнивалась с активностью калибровочной фольги, облученной фиксированным током пучка. Сравнение активностей проводилось через 20—30 ч после облучения. Толщины фольг составляли ~ 20 мг/см². Энергия частиц варьировалась с помощью тормозящих фольг; зависимость энергии частиц от толщины тормозящих фольг рассчитывалась по данным работ [3, 4]. Для предотвращения

потерь изотопов в процессе облучения образцы устанавливались в хорошо охлаждаемом корпусе мишени и облучались небольшим током ($\sim 0,1$ мка) в течение 10 мин.

Измерение активности образцов осуществлялось на одноканальном сцинтилляционном гамма-спектрометре, калиброванном эталонными источниками из Sr^{85} . Поскольку в облученных образцах обычно образовывалось более одного изотопа, сначала измерялась зависимость активности образца от времени (кривая распада). Затем по кривой распада определялась активность каждого изотопа.

При анализе активности облученной окиси алюминия мешающим фактором было наличие изотопов O^{15} ($T_{1/2} = 2$ мин), Al^{28} ($T_{1/2} = 2,3$ мин), P^{30} ($T_{1/2} = 2,5$ мин), Mg^{28} ($T_{1/2} = 21,3$ ч), Na^{24} ($T_{1/2} = 15$ ч). Изотоп O^{15} образовывался также при облучении углерода α -частицами. Анализ кривой распада проводился через 30—40 мин после облучения, когда короткоживущие изотопы практически полностью распадались. Активность изотопов Na^{24} и Mg^{28} , образующихся из алюминия, в большинстве случаев оказывалась пренебрежимо малой по сравнению с активностью изотопов N^{13} , C^{11} , F^{18} , и при анализе кривой распада облученных образцов ею можно было пренебречь.

Величина активности изотопов, возникающих из алюминия, определялась путем облучения чистого алюминия. Например, при одинаковом облучении ионами He^3 активность образцов из чистого алюминия была в 200 раз меньше активности образцов из Al_2O_3 при сравнении их активности через 30 мин после облучения. Одновременно был измерен выход изотопа F^{18} , образующегося из алюминия в реакции $Al^{27}(He^3, 3\alpha)F^{18}$. При $E = 30$ Мэв выход F^{18} оказался равным $2,4 \cdot 10^6$ расп/сек · мка · ч. В случае облучения окиси алюминия дейтонами активность Na^{24} сравнима с активностью F^{18} . В этом случае кривая распада анализировалась по трем изотопам: N^{13} , F^{18} , Na^{24} .

Значения выходов изотопов вычислялись по формулам, приведенным в работе [1].

Полная погрешность полученных значений выходов изотопов составляет $\pm 10\%$. Она определяется ошибками в измерении тока пучка и абсолютной активности изотопов. Можно

предполагать, что в районе порога реакций, особенно при низких энергиях, значения выходов могут быть завышены на большую величину, чем 10%, за счет разброса пробегов, что является известным недостатком метода тормозящих фольг.

Предварительно были проведены расчеты порогов ядерных реакций, приводящих к образованию изотопов N^{13} , C^{11} , F^{18} ; значения энергии связи ядер взяты из работы [5]. Полученные значения порогов реакций приведены в таблице. В четвертой колонке таблицы дано значение

Энергии реакции Q , кулоновские барьеры для падающих $U_{\text{пад}}$ и вылетающих $U_{\text{выл}}$ частиц и эффективные пороги реакции $E_{\text{пор.эфф}}$

Реакция	Энергия, Мэв				
	Q	$E_{\text{пор}}$	$U_{\text{выл}}$	$E_{\text{пор.эфф}}$	$U_{\text{пад}}$
$C^{12}(p, pn)C^{11}$	-18,7	20,2	1,8	22,2	1,8
$C^{12}(p, d)C^{11}$	-16,5	17,9	1,65	19,7	1,8
$C^{13}(p, t)C^{11}$	-15,2	16,3	1,57	18	1,8
$C^{12}(p, 2n)N^{11} \rightarrow C^{11}$	*	> 20,2	—	> 20,2	1,8
$C^{13}(p, n)N^{13}$	-3	3,2	—	3,2	1,7
$C^{12}(d, t)C^{11}$	-12,4	14,5	1,6	16,3	1,6
$C^{12}(d, n)N^{13}$	-0,26	0,3	—	0,3	1,6
$C^{13}(d, 2n)N^{13}$	-4,2	4,9	—	4,9	1,6
$C^{12}(He^3, \alpha)C^{11}$	+1,9	—	3	1,4	3,1
$C^{13}(He^3, \alpha n)C^{11}$	-3,1	3,8	3	7,5	3
$C^{12}(He^3, pn)N^{13}$	-5,8	7,2	2	9,8	3,1
$C^{12}(He^3, 2n)O^{13} \rightarrow N^{13}$	*	> 7,2	—	> 7,2	3,1
$C^{12}(\alpha, \alpha n)C^{11}$	-18,7	25	3	29	3,1
$C^{12}(\alpha, t)N^{13}$	-17,9	23,8	1,8	26,3	3,1
$C^{12}(\alpha, p2n)N^{13}$	-26,2	35	2	37,6	3,1
$C^{12}(\alpha, 3n)O^{13} \rightarrow N^{13}$	*	> 35	—	> 35,0	3,1
$O^{16}(p, \alpha)N^{13}$	-5,2	5,6	3,4	9,2	2,2
$O^{18}(p, n)F^{18}$	-2,4	2,6	—	2,6	2,1
$O^{16}(d, \alpha n)N^{13}$	-7,4	8,3	3,4	12,1	2
$O^{17}(d, n)F^{18}$	+3,4	—	—	—	2
$O^{18}(d, 2n)F^{18}$	-4,7	5,2	—	5,2	1,9
$O^{16}(He^3, 2\alpha)C^{11}$	-5,2	6,3	6,8	14,4	3,9
$O^{16}(He^3, p)F^{18}$	+2	—	2,4	0,5	3,9
$O^{18}(He^3, t)F^{18}$	-1,7	2	2,1	4,5	3,8
$O^{16}(He^3, n)Ne^{18} \rightarrow F^{18}$	-3,2	3,8	—	3,8	3,9
$O^{16}(\alpha, pn)F^{18}$	-17,8	22,3	2,4	25,2	3,7
$O^{16}(\alpha, 2n)Ne^{18} \rightarrow F^{18}$	-23,6	29,6	—	29,6	3,7

* Масса ядер N^{11} и O^{13} не определена.

Выходы изотопов N^{13} и C^{11} при облучении углерода

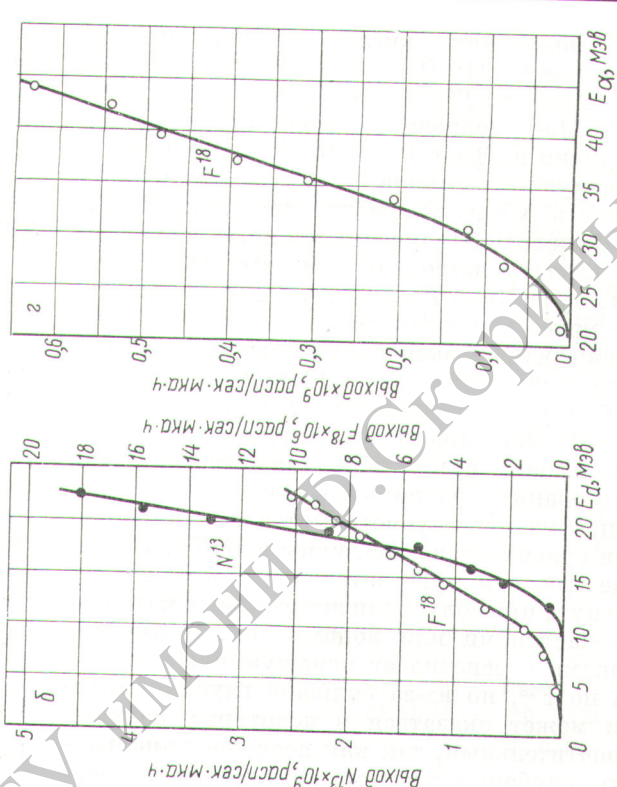
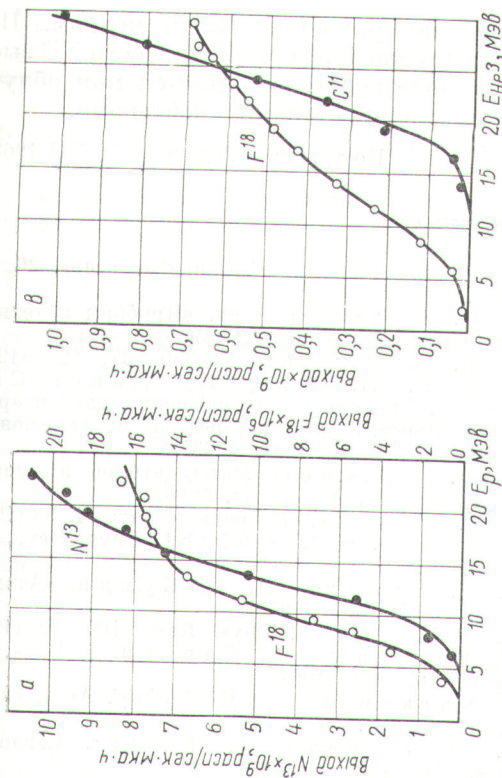
Экспериментальные данные по выходам изотопов N^{13} и C^{11} , образующихся при облучении углерода протонами, дейтонами, ионами He^3 и α -частицами, представлены на рис. 1. В литературе отсутствуют данные по выходам этих изотопов. Однако имеются работы, в которых были измерены функции возбуждения ядерных реакций при облучении углерода заряженными частицами. Используя графоаналитическое интегрирование функций возбуждения, можно получить значения выходов изотопов для этих реакций. Авторами настоящей работы было выполнено интегрирование следующих функций возбуждения из опубликованных работ: $C^{12}(He^3, \alpha)C^{11}$ [6], $C^{12}(He^3, \alpha)C^{11}$ и $C^{12}(He^3, pn)N^{13}$ [7], $C^{12}(d, n)N^{13}$ [8], $C^{12}(d, n)N^{13}$ и $C^{12}(d, t)C^{11}$ [9]. Значения выходов, рассчитанные по функциям возбуждения, оказались отличными от величин выходов, полученных в настоящей работе; по данным работы [6] — на +5% (при $E = 30$ Мэв), работы [7] — на +10% ($E = 24$ Мэв), работы [8] — на +20% ($E = 20$ Мэв), работы [9] — на +100% ($E = 22$ Мэв).

Рассмотрение экспериментальных данных, представленных на рис. 1, показывает, что все четыре типа частиц обеспечивают высокие выходы изотопов, а следовательно, и высокую чувствительность.

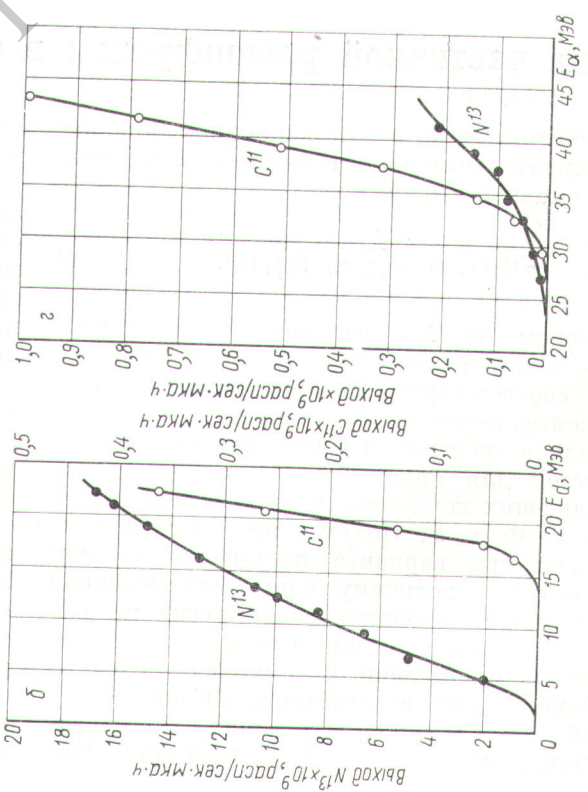
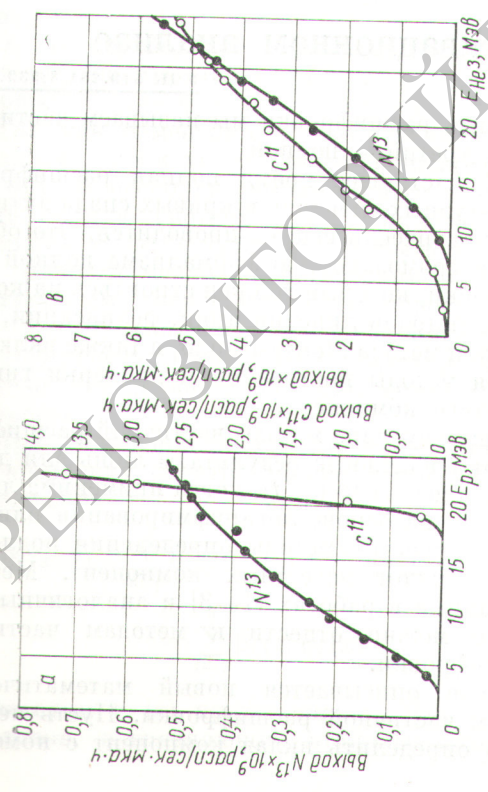
Выходы изотопов N^{13} , C^{11} и F^{18} при облучении кислорода

Экспериментальные данные по выходам изотопов N^{13} , C^{11} и F^{18} при облучении кислорода протонами, дейтонами, ионами He^3 и α -частицами приведены на рис. 2. Сравнение найденных значений выходов изотопов с результатами других работ, как и предыдущем случае, возможно лишь путем интегрирования опубликованных функций возбуждения, так как прямых данных по выходам этих изотопов не имеется. Авторами настоящей работы было выполнено интегрирование функций возбуждения $O^{16}(\alpha, pn)F^{18}$, $O^{16}(He^3, p)F^{18}$ и $O^{16}(p, \alpha)N^{13}$ из работ [10–12] соответственно. Рассчитанные таким способом значения выходов оказались отличными от результатов, полученных в настоящей работе: по данным работы [10] — на +30% (при $E = 40$ Мэв), работы [11] — на -15% ($E = 30$ Мэв), работы [12] — на -5% ($E = 15$ Мэв).

эффективного порога реакции $E_{\text{пор.эфф}}$. Эта величина определяет ту минимальную энергию падающих частиц, начиная с которой сечение реакции резко возрастает.



Р и с. 2. Выходы изотопов N^{13} , C^{11} , F^{18} при облучении кислорода протонами (а), дейтонами (б), ионами He^3 (в) и α -частицами (г).



Р и с. 1. Выходы изотопов N^{13} и C^{11} при облучении углерода протонами (а), дейтонами (б), ионами He^3 (в) и α -частицами (г).

При облучении кислорода ионами He^3 по реакциям $\text{O}^{16}(\text{He}^3, \alpha d)\text{N}^{13}$ ($E_{\text{пор.эфф}} = 19,4 \text{ Мэв}$) и $\text{O}^{16}(\text{He}^3, \alpha pn)\text{N}^{13}$ ($E_{\text{пор.эфф}} = 23,3 \text{ Мэв}$) должен образовываться изотоп N^{13} . Однако на фоне высокой активности более долгоживущих изотопов C^{11} и F^{18} обнаружить активность N^{13} путем разложения кривой распада не удалось. Полученные данные позволяют лишь сделать вывод о том, что выход N^{13} в этом случае (при $E = 30 \text{ Мэв}$) меньше выхода C^{11} не менее чем в 100 раз.

Рассмотрение экспериментальных данных, представленных на рис. 2, показывает, что для обнаружения примеси кислорода методом активационного анализа на заряженных частицах пригодны все четыре типа частиц. При использовании радиохимического выделения изотопов из исследуемого материала наиболее удобен сравнительно долгоживущий F^{18} . В этом случае высокая чувствительность может быть достигнута при облучении исследуемых материалов α -частицами или ионами He^3 . Облучение протонами обеспечивает меньшую чувствительность по F^{18} , но из-за большой глубины активации может оказаться в некоторых случаях предпочтительным, так как позволяет анализировать глубокие слои материала, не подвер-

гающиеся поверхностным загрязнениям. При обнаружении кислорода по активности N^{13} высокая чувствительность достигается при облучении материалов протонами и дейтонами.

Поступила в Редакцию 16/VII 1968 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Н. Краснов. «Атомная энергия», 26, 284 (1969).
2. Н. Н. Краснов и др. «Приборы и техника эксперимента», № 4, 22 (1965).
3. М. З. Максимов. ЖЭТФ, 37, 127 (1959).
4. Люк К. Л. Юан, Ву Цзянь-Сюнь. Принципы и методы регистрации элементарных частиц. Перев. с англ. под ред. Л. А. Арцимовича. М., Изд-во иностр. лит., 1963.
5. Б. В. Кравцов. Массы атомов и энергии связи ядер. М., Атомиздат, 1965.
6. О. Д. Брилли, Л. В. Сумин. «Атомная энергия», 7, 377 (1959).
7. D. Cochran, J. Knight. Phys. Rev., 128, 1281 (1962).
8. О. Д. Брилли, Л. В. Сумин. «Атомная энергия», 7, 377 (1959).
9. D. Wilkinson. Phys. Rev., 100, 32 (1955).
10. M. Furukawa, S. Tanaka. J. Phys. Soc. Japan, 16, 129 (1961).
11. S. Markowitz, J. Mahony. Anal. Chem., 34, 329 (1962).
12. A. Whitehead, J. Foster. Canad. J. Phys., 36, 1276 (1958).

Теория частичной расшифровки в активационном анализе

Н. В. ЗИНОВЬЕВ

УДК 519.281.3:539.16.08

Рассматриваемые в активационном анализе экспериментальные данные математически можно представить выражением

$$\Phi(x, t) = \sum_{i=1}^k \alpha_i(t) f_i(x), \quad (1)$$

в котором $\alpha_i(t)$ — величина компоненты; $f_i(x)$ — амплитудная или экспоненциальная форма соответствующей компоненты; x, t — измеряемые переменные величины.

Методика эксперимента не дает простых возможностей для определения числа основных составляющих компонент и их вклада в общий результат $\Phi(x, t)$. Поэтому при расшифровке возникают три варианта постановки задачи: 1) определить величину одной определенной компоненты на сложном фоне других неизвестных компонент, 2) определить величину не нескольких определенных компонент на сложном фоне других неизвестных, 3) определить полный состав присутствующих компонент и величину их вклада в $\Phi(x, t)$. Первые два

варианта расшифровки мы называем частичными, а третий — полной.

В настоящее время полная расшифровка амплитудных спектров и кривых спада активности практически еще не проводится. Это объясняется громоздкостью формализма полной расшифровки, который должен строиться на комбинации методов линеаризации, релаксации, градиента и метода Монте-Карло, а также включать в себя методы построения и проверки гипотез о составе компонент.

Существующие методы частичной расшифровки дают надежные результаты лишь для достаточно простых $\Phi(x, t)$, когда применима линеаризация на основе логарифмирования или возможны простые методы определения подложки под вкладом известных компонент. Методы, описанные в работах [1—3] и аналогичные им, также можно отнести к методам частичной расшифровки.

Ниже описывается новый математический прием частичной расшифровки. Пусть необходимо определить вклад компонент с номерами