

Ж 53
А92

АКАДЕМИЯ НАУК СОЮЗА ССР
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ
ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ
АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ СССР



Ежемесячный журнал
Год издания двенадцатый

АТОМИЗДАТ ■ МОСКВА ■ 1968

Том 24 ■ Май ■ Вып. 5

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

А. И. АЛИХАНОВ, А. А. БОЧВАР, А. П. ВИНОГРАДОВ, Н. А. ВЛАСОВ (зам. главного редактора), И. Н. ГОЛОВИН, Н. А. ДОЛЛЕЖАЛЬ, А. П. ЗЕФИРОВ, В. Ф. КАЛИНИН, Н. А. КОЛОКОЛЬЦОВ (зам. главного редактора), А. К. КРАСИН, А. И. ЛЕЙПУНСКИЙ, В. В. МАТВЕЕВ, М. Г. МЕЩЕРЯКОВ, М. Д. МИЛЛИОНЩИКОВ (главный редактор), П. Н. ПАЛЕЙ, Д. Л. СИМОНЕНКО, В. И. СМЕРНОВ, В. С. ФУРСОВ, В. Б. ШЕВЧЕНКО.

СОДЕРЖАНИЕ

СТАТЬИ

В. И. Баранов. Развитие радиогеологии в СССР . . .	419
Я. Богач, П. Квиттнер, Э. Сабо. Определение некоторых примесей в кремнии высокой чистоты методом активационного анализа без разрушения образцов	421
Я. Боужик, Е. Кубовский, С. Лятэк. Измерение материального параметра критической сборки «Анна»	425
Н. Г. Баданина, Ю. П. Сайков. Критерий сравнения состояния твэлов активной зоны реактора	429
Ю. В. Чухкин, Е. Ф. Давыдов, В. Н. Сюзёв, Т. М. Гусева, В. В. Колесов, М. Д. Дерибизов. Радиационная стойкость пластинчатых твэлов реактора СМ-2	432
Б. Г. Егнзаров, В. А. Зюбко, А. И. Новиков. Выбор оптимальной аналитической методики при инструментальном активационном анализе	435
В. И. Субботин, Д. М. Овечкин, Д. Н. Сорокин, А. П. Кудрявцев. Теплоотдача при кипении натрия в условиях свободной конвекции	437
В. П. Бобков, М. Х. Ибрагимов, В. И. Субботин. Расчет коэффициента турбулентного переноса тепла при течении жидкости в трубе	442
В. Я. Кудяков, М. В. Смирнов, Н. Я. Чукреев, Ю. В. Поеохин. Образование двухвалентного тория в среде расплавленного хлористого калия	448
Н. М. Зуева, Л. С. Соловьев. Равновесие и устойчивость плазмы в аксиально симметричных тороидальных системах	453

ПЕРСОНАЛИЯ

Исаак Константинович Кизкин (к 60-летию со дня рождения) 460

АННОТАЦИИ ДЕПОНИРОВАННЫХ СТАТЕЙ

Н. Е. Брезнева, Ю. И. Капшанинов, С. Н. Озипранер. Изучение кинетики электролитического выделения гидроокисных осадков редкоземельных элементов

А. С. Тшечкин. Вычислительное устройство для обработки γ -спектров	462
В. Е. Дроздов, Ю. С. Рябухин. К расчету мощностей поглощенных доз полоого цилиндрического облучателя с неравномерным распределением активности	463
М. Задубан, Л. Медвидь. Определение суммарной β -активности долгоживущих продуктов деления при помощи K^{40}	464
Г. П. Березина, Я. Б. Файнберг, А. К. Березин. Экспериментальное исследование потоков быстрых ионов, образующихся в системе пучок — плазма	465

ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

М. А. Сарычев, Ю. Н. Алексенко, Н. В. Звонков, В. И. Буйницкая, И. В. Рогожкин, А. А. Баталов, Ю. В. Александров. Распределение потока тепловых нейтронов в различных отражателях с каналами	467
Т. М. Гусева, Е. Ф. Давыдов, В. Н. Сюзёв, Ю. В. Чухкин. О возможном характере изменения объема тепловыделяющих композиций при твердом распухании	469
Е. М. Лобанов, Н. В. Зиновьев. Определение необходимой статистики при бескорреляционной расшифровке данных активационного анализа	471
С. Н. Вотинин, Т. М. Гусева, В. И. Клименков. О радиационной стойкости сплава циркония с 1% ниобия в условиях работы реактора СМ-2	473
А. Э. Шеми-заде. О сухих выпадениях продуктов ядерных испытаний	474
К. П. Захарова, Г. М. Иванов, В. В. Куличенко, Н. В. Крылова, Ю. В. Сорокин, М. И. Федорова. Об использовании тепла химических реакций для термической переработки жидких радиоактивных отходов	475

225381/м



п

ности стекол от потока тепловых нейтронов, времени обработки и концентрации НФ. Для увеличения чувствительности данного метода были изучены характеристики стекол, облученных с двумя слоями U^{235} , которые располагались по обе стороны стекла.

На рис. 2 приведены кривые зависимости матовости стекол M (в вольтах), облученных различными потоками тепловых нейтронов Φ_T , от времени обработки в 10%-ном растворе НФ. Аналогичные кривые были получены при обработке стекол в 0,1; 0,2 и 1,0%-ных растворах НФ. На основе их анализа были выбраны наилучшие режимы обработки стекол и определены пределы измерения потоков нейтронов.

Режимы обработки стекол и экспериментальные кривые зависимости матовости M от потока тепловых нейтронов приведены на рис. 3. Максимальная квадратичная ошибка измерений не превышала 10%.

Зависимость числа треков на 1 см^2 от потока тепловых нейтронов исследовали в диапазоне $5 \cdot 10^6 - 2 \cdot 10^8 \text{ нейтр/см}^2$. Облученные стекла обрабатывали в 10%-ном растворе НФ.

Число треков подсчитывали с помощью микроскопа типа БМИ-1. Среднее значение чувствительности стеклянных трековых детекторов составило $\sim 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ треков/нейтрон}$ с ошибкой не более $\pm 3\%$.

Стеклянные трековые детекторы позволяют измерять интегральные потоки тепловых нейтронов по величине матовости в диапазоне $7 \cdot 10^5 - 5 \cdot 10^{11} \text{ нейтр/см}^2$.

Малая длительность измерения (несколько секунд) дает возможность использовать этот метод в индивидуальной дозиметрии и в некоторых физических экспериментах. Метод счета числа треков под микроскопом позволяет определять интегральные потоки нейтронов в диапазоне $3 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^8 \text{ нейтр/см}^2$. Использование микроскопов с матовым экраном при подсчете числа треков по данной методике практически исключает субъективные ошибки счета.

Поступило в Редакцию 3/VII 1967 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. E. Silk, R. Barnes. *Philos. Mag.*, 4, 970 (1959).
2. R. Fleisher et al. *Phys. Rev.*, 133A, 1443 (1964).
3. В. П. Перелыгин и др. «Приборы и техника эксперимента», № 4, 78 (1964).
4. P. Price, R. Walker. *Phys. Rev. Lett.*, 3, 113 (1962).
5. R. Fleisher et al. *Rev. Sci. and Instrum.*, 37, 527 (1966).
6. J. Morry, R. Walker. 5th International Symposium Nuclear Track Photography. CERN, Geneva, 1964.
7. И. Брейдо. «Радио», № 7, 26 (1956).
8. K. Becker. *Health Phys.*, 12, 769 (1966).

Энергетическая зависимость собственного разрешения кристаллов NaJ(Tl)

Е. П. МОХИР, Н. Г. КРАВЧЕНКО, Ю. А. ЦИРЛИН, В. А. СУЛЫГА

УДК 535.373.1:539.1.074.3

Известно [1], что амплитудное разрешение сцинтилляционного спектрометра R определяется собственным разрешением кристалла r и фотоумножителем, входящих в него:

$$R^2 = r^2 + \frac{A}{V}, \quad (1)$$

где A/V — квадрат собственного разрешения фотоумножителя; V — амплитуда импульса на выходе счетчика; A — константа, зависящая от чувствительности фотокатода ФЭУ. Эта формула справедлива для случая, когда применяется ФЭУ с малой неоднородностью фотокатода (не более 20%).

Поскольку в области энергий E падающего γ -излучения выше $\sim 200 \text{ кэВ}$ световой ход кристалла NaJ(Tl) пропорционален энергии с точностью до 5% [2], то формулу (1) можно записать в виде

$$R^2 = r^2 + \frac{A'}{E}. \quad (2)$$

Величина r в первом приближении не зависит от E . Многочисленные работы (см., например, [3]) подтверждают такую зависимость $R(E)$ при всех значениях энергии падающего γ -излучения, за исключением области энергий выше 1000 кэВ . Оказывается, что r также является функцией энергии. В работах [4–6] предлагается зависимость

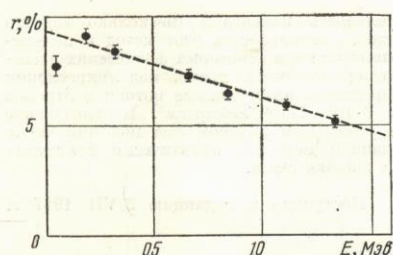
$$r = BE^{-1/4}, \quad (3)$$

однако величины коэффициента B , полученные в указанных работах, несколько различаются. Поскольку литературные данные относятся к единичным образ-

цам разных размеров, представляло интерес найти собственное разрешение большой группы кристаллов.

Цель настоящей работы — изучение энергетической зависимости собственного разрешения монокристаллов NaJ(Tl) размером $40 \times 40 \text{ мм}$ и нахождение простой эмпирической зависимости $r(E)$ и $R(E)$. В измерениях использовались 12 кристаллов NaJ(Tl), изготовленных на различных предприятиях. Собственное разрешение рабочего образца определяли тремя способами: методом однородных нейтральных фильтров, методом равномерной вспышки и методом сравнения. Измерения проводились на установке, включающей в себя фотоэлектронный умножитель ФЭУ-13 и амплитудный анализатор АИ-100. Источниками γ -излучения служили изотопы Co^{60} (1,33 МэВ), Zn^{65} (1,11 МэВ), Mn^{54} (0,84 МэВ), Cs^{137} (0,662 МэВ), Cr^{51} (0,32 МэВ), In^{114m} (0,19 МэВ), Ce^{141} (0,142 МэВ) и Pu^{239} (0,051 МэВ). В качестве источника равномерных вспышек использовался тиратрон ТХ-4Б (электрическая схема этого источника света аналогична схеме, приведенной в работе [7]). Для выделения света с длиной волны, близкой к длине волны света сцинтилляций от кристалла NaJ(Tl), между фотокатодом и вспышкой помещался синий фильтр СС-5.

Для повышения точности результатов собственное разрешение кристалла измерялось не менее 10 раз. Оказалось, что при энергиях падающего излучения более 300 кэВ способ определения r не влияет (в пределах ошибки эксперимента $\pm 0,3\%$) на значение этой величины. При малых энергиях метод однородных нейтральных фильтров применять трудно. Он дает большие погрешности, и, вероятно, из-за этого вели-



Зависимость собственного разрешения r кристалла NaJ(Tl) от энергии E падающего γ -излучения:

----- зависимость, полученная по формуле (4).

чина собственного разрешения, полученная этим способом, отличалась от величины, полученной двумя другими способами. Собственное разрешение остальных одиннадцати образцов определяли методом равноростной вспышки и методом сравнения.

На рисунке приведена типичная зависимость собственного разрешения кристалла № 11 от энергии (размер кристалла 40×40 мм). Для большинства кристаллов (9 из 12) на кривой зависимости $r(E)$ наблюдается максимум в области энергий 200—300 кэв.

Из формул (2) и (3) легко получить соотношение, позволяющее по известному разрешению датчика R_0 и собственному разрешению r_0 кристалла при облучении γ -квантами Cs^{137} определить величину общего разрешения R при облучении γ -квантами любой энергии в диапазоне 300—1300 кэв:

$$R = \sqrt{(2 + r_0 - 3,1E)^2 + (R_0^2 - r_0^2) \frac{E_0}{E}}, \quad (5)$$

где E_0 — энергия γ -квантов Cs^{137} , равная 662 кэв.

В таблице приведены результаты сравнения экспериментально полученных значений собственного разрешения кристалла и общего разрешения датчика с величинами, вычисленными по формулам (4) и (5). Как видно из таблицы, очень редко расхождения между значениями превышают 0,6% (ошибка эксперимента), причем эти расхождения можно объяснить случайными ошибками измерений.

Было проведено сравнение величин общего и собственного разрешений, полученных по формулам (4) и (5), с экспериментальными данными работ [4, 6, 8—10]. Оказалось, что результаты этих работ можно описать предлагаемыми эмпирическими формулами с точностью 10%.

Поступило в Редакцию 24/VIII 1967 г.

Сравнение экспериментальных значений разрешения спектрометра $R_{\text{эксп}}$ и собственного разрешения кристалла $r_{\text{эксп}}$ со значениями, полученными по формулам (4) и (5)

Номер кристалла	Cr51 (0,320 Мэв)				Mn54 (0,840 Мэв)				Zn65 (1,110 Мэв)				Co60 (1,330 Мэв)			
	$R_{\text{эксп}}$	$R_{\text{выч}}$	$r_{\text{эксп}}$	$r_{\text{выч}}$	$R_{\text{эксп}}$	$R_{\text{выч}}$	$r_{\text{эксп}}$	$r_{\text{выч}}$	$R_{\text{эксп}}$	$R_{\text{выч}}$	$r_{\text{эксп}}$	$r_{\text{выч}}$	$R_{\text{эксп}}$	$R_{\text{выч}}$	$r_{\text{эксп}}$	$r_{\text{выч}}$
1	12,7	12,5	9,2	9,0	8,9	9,1	7,0	7,4	7,7	8,0	6,2	6,6	7,4	7,3	6,1	5,9
2	15,1	15,1	11,4	11,6	11,7	11,8	10,1	10,3	11,3	10,7	9,9	9,5	10,0	10,0	9,1	8,8
3	12,2	12,3	8,2	8,9	8,9	9,0	7,1	7,3	8,0	8,0	6,6	6,5	7,3	7,3	5,9	5,8
4	11,7	12,0	7,4	8,5	8,5	8,7	6,6	6,9	7,6	7,6	6,1	6,1	6,8	6,9	5,3	5,4
5	13,1	12,8	9,6	9,3	9,2	9,4	7,4	7,7	8,1	8,3	6,7	6,9	7,6	7,5	6,2	6,2
6	11,7	11,2	8,1	7,8	8,3	8,0	6,6	6,2	7,5	6,9	6,1	5,4	6,8	6,2	5,4	4,7
7	13,0	12,6	9,4	9,0	8,8	9,2	6,9	7,4	7,9	8,1	6,4	6,6	7,1	7,3	5,6	5,9
8	13,6	13,3	9,6	9,6	9,6	9,7	7,5	7,7	8,4	8,5	6,9	6,9	7,8	7,8	6,4	6,2
9	12,1	11,9	7,9	8,7	8,7	8,9	6,8	7,1	7,9	7,8	6,4	6,3	6,9	7,0	5,0	5,6
10	11,7	12,2	7,9	9,3	9,0	9,1	7,2	7,7	8,3	8,1	7,2	6,9	8,1	7,3	7,0	6,2
11	12,0	11,8	8,4	8,4	8,2	8,5	6,4	6,8	7,3	7,4	5,9	6,0	6,6	6,7	5,2	5,3
12	14,7	14,4	9,6	9,1	10,5	10,2	7,9	7,5	9,2	9,0	7,0	6,7	—	—	—	—

Примечание. Разрешение приведено в процентах.

При достаточно больших энергиях собственное разрешение кристалла существенно влияет на разрешение сцинтилляционного спектрометра. Поэтому для практических применений необходимо знать зависимость $r(E)$ для энергий выше ~ 300 кэв, эмпирическая формула которой имеет вид

$$r = 2 + r_0 - 3,1E, \quad (4)$$

где r — собственное разрешение кристалла при облучении γ -квантами энергии E , %; r_0 — собственное разрешение кристалла при облучении γ -квантами Cs^{137} , %.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. О. Вяземский и др. Сцинтилляционный метод в радиометрии. М., Госатомиздат, 1961.
2. D. Engelkemeier. Rev. Sci. Instrum., 27, 589 (1956).
3. A. Bisì, L. Zappa. Nucl. Instrum. and Methods, 3, 17 (1958).
4. G. Kelley et al. IRE Trans. Nucl. Sci., 3, No. 4, 57 (1956).

5. Ю. А. Немиллов и др. «Изв. АН СССР. Серия физ.», XXIII, 257 (1959).
 6. J. S h a p e. IRE Trans. Nucl. Sci., 7, No. 2—3, 44 (1960).
 7. В. В. Матвеев, А. Д. Соколов. В сб. «Аппаратура для ядерной спектрометрии». М., Атомиздат, 1960, стр. 19.

8. P. Thieberger et al. Nucl. Instrum and Methods, 14, 225 (1961).
 9. R. Hill. Proc. Phys. Soc., 85, 1068 (1965).
 10. G. Narayan, J. Prescott. IEEE Trans. Nucl. Sci., 13, No. 3, 132 (1966).

Изучение радиационной стойкости окиси бериллия при температуре до 100°С

А. В. ХУДЯКОВ, Н. А. МАРАКУЕВА, В. И. КЛИМЕНКОВ, Г. С. БАЛАНДИН

УДК 621.039.532.5:621.039.531

Окись бериллия является хорошим материалом для применения в реакторе в качестве замедлителя, отражателя или электроизолятора, однако ее использование ограничено из-за невысокой радиационной стойкости при низких температурах. Так, известно [1, 2], что при облучении интегральными потоками $(0,2 \div 1) \times 10^{21}$ нейтр/см² * (при температуре до 100°С) изделия из окиси бериллия разрушаются, превращаясь в порошок.

Исследование механизма разрушения показывает, что оно происходит в основном под действием внутренних напряжений, возникающих вследствие резко анизотропного роста кристаллов. Если линейное распухание поликристалла достигает 2—5%, то соотношение линейных расширений по двум главным кристаллографическим направлениям (*a* и *c*) равно 8—16. Несмотря на непереложную закономерность распухания, которое происходит в результате накопления радиационных дефектов, можно попытаться, опираясь на знание механизма разрушения, повысить стойкость окиси бериллия путем подбора ее свойств. Перспективным направлением в улучшении радиационной стойкости окиси бериллия считается уменьшение величины зерна и создание текстуры [1]. Однако и наиболее стойкие образцы [1, 2] выдерживают интегральные потоки не выше $(2 \div 3,5) \cdot 10^{21}$ нейтр/см².

В настоящей работе приводятся данные исследований микроструктуры различных образцов окиси бериллия, подвергшихся облучению потоком нейтронов до $4 \cdot 10^{21}$ нейтр/см². Многочисленные исследования (например, [1, 2]) показывают, что микрорастрескивание — самая характерная черта в поведении окиси бериллия при облучении, с которой связаны изменения почти всех физико-механических свойств. Так, с началом растрескивания резко увеличивается скорость распухания зерен и поликристалла в целом, снижаются теплопроводность, прочность и т. д. Поэтому наиболее наглядной и убедительной характеристикой послерадиационного состояния окиси бериллия является ее микроструктура.

Для радиационных испытаний были приготовлены различные образцы окиси бериллия (см. таблицу). Образцы имели весьма разнообразную форму и размеры: цилиндры с диаметром и длиной в пределах 15—60 мм и 20—250 мм соответственно, параллелепипеды $25 \times 60 \times 130$ мм, кубики с ребром 8—10 мм и малые гагаринские образцы.

Образцы окиси бериллия облучали в реакторе СМ-2 при температуре ~100°С. После облучения на образцах по обычной технологии изготавливали

* Здесь и далее интегральные потоки приводятся для нейтронов с энергией $E \geq 1$.

шлифы, которые просматривали при оптических увеличениях до 1000 раз.

Характеристики облучаемых образцов окиси бериллия

Номер партии	Материал	Способ формирования изделий	Относительная плотность, %	Размер зерна, мк
I	BeO	Горячее литье	97	30—40
II	BeO + 0,25 вес.% Al ₂ O ₃	Холодное прессование	93,5	35
III	BeO + 0,5 вес.% Al ₂ O ₃	Горячее литье	93,5	35
IV	BeO	Горячее прессование	95,5—98,5	3—5
V	BeO + 3 вес.% Al ₂ O ₃ ; SiO ₂ ; CaO	Горячее литье	96	80—100

Экспериментальные результаты

Начало микрорастрескивания в крупнозернистых высокоплотных образцах из чистой окиси бериллия, изготовленных горячим литьем из парафинсодержащих суспензий [3], наблюдалось при интегральном потоке 10^{20} нейтр/см². После облучения потоком 4×10^{20} нейтр/см² образцы рассыпаются в порошок при слабых сжимающих напряжениях. На шлифах таких образцов (рис. 1, б) видна сплошная сетка микротрещин. В крупнозернистых с пониженной плотностью образцах BeO + 0,25% Al₂O₃, изготовленных холодным прессованием с последующим спеканием [4], заметное растрескивание в основном по границам зерен обнаружено после облучения потоком выше $5 \cdot 10^{20}$ нейтр/см² (рис. 2, а). Поток $7 \cdot 10^{20}$ нейтр/см² сильно разрушает образцы (рис. 2, б), которые, однако, еще сохраняют свою форму. Полное разрушение происходит при потоке 10^{21} нейтр/см².

В образцах BeO + 0,5% Al₂O₃, исходные свойства которых аналогичны образцам BeO + 0,25% Al₂O₃,