

Были проведены две серии измерений. В первой серии детектор приклеивали к колонке таким образом, чтобы поверхность алмаза, легированная бором, соприкасалась непосредственно с измеряемым раствором. Напряжение смещения  $+330$  В подавали на золотой контакт, второй контакт заземляли через электролит с помощью электрода из нержавеющей стали. Амплитудный спектр для этого случая показан на рис. 2, а. Во второй серии золотой контакт удаляли с детектора, пластинку алмаза приклеивали к шлифу колонки поверхностью, с которой было снято золотое покрытие. Таким образом,  $\alpha$ -активный раствор соприкасался непосредственно с поверхностью чистого алмаза. Напряжение смещения  $+450$  В подавали на борный контакт, заземление осуществляли через электролит с помощью внешнего электрода (рис. 2, б). При непосредственном контакте чистой поверхности кристалла алмаза с электролитом (золотой контакт удален) максимальная амплитуда спектра импульсов в 4,5 раза меньше максимальной амплитуды спектра, полученного при измерениях на детекторе, снабженном двумя контактами. Это, по-видимому, можно объяснить приконтактными явлениями на границе раздела алмаз — электролит.

Счетные характеристики алмазного детектора во времени проверяли при контактировании  $\alpha$ -активного раствора с поверхностью чистого алмаза. Для измерения, использовали растворы азотнокислого плутония концентрацией 10,3; 20,7; 52,4; 102,3 мкг/см<sup>3</sup>. Наблюда-

лась линейная зависимость между концентрацией плутония в растворе и числом импульсов, сосчитанных в единицу времени. При непрерывном контакте алмазного детектора с раствором азотнокислого плутония не было замечено каких-либо изменений его счетных характеристик в течение 10 сут.

Эксперименты показали принципиальную возможность использования алмазных детекторов в качестве погружных альфа-счетчиков как для алмаза, легированного бором, так и в случае непосредственного контакта с раствором чистого алмаза. Однако лучшими счетными характеристиками обладают погружные алмазные детекторы с химически стойкими контактами, полученными ионным легированием или карбидизацией.

Поступило в Редакцию 30/XII 1974 г.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конорова Е. А., Козлов С. Ф., Вавилов В. С. «Физика твердого тела», 1966, т. 8, с. 3.
2. Конорова Е. А., Козлов С. Ф. «Успехи физ. наук», 1969, т. 98, вып. 4, с. 735.
3. Конорова Е. А., Козлов С. Ф. «Физика и техника полупроводников», 1970, т. 4, вып. 10, с. 1865.
4. Cathey L., Jenkins W. «Trans. Nucl. Sci.», 1962, v. 9, N 3, p. 193.

УДК 539.1.08

## Чувствительность эмиссионных детекторов к гамма-излучению

КУЛАКОВ Г. В., МУХАЧЕВ Б. В.

Эмиссионный детектор представляет собой систему пространственно разделенных в вакууме электродов из различных материалов. Ток в детекторе создается в результате встречного переноса электронов, выбиваемых  $\gamma$ -квантами из электродов.

Цель настоящей работы — создание аналитических моделей и экспериментальное исследование чувствительности эмиссионных детекторов с кварцевой трубкой между электродами в полях стационарного  $\gamma$ -излучения высокой (до  $10^6$  Р/с) интенсивности. Основные преимущества таких детекторов — работа без внешних источников питания, высокая термо- и радиационная устойчивость, небольшие размеры и отсутствие верхнего предела величины измеряемой мощности экспозиционной дозы [1, 2].

Конструкция вакуумного эмиссионного детектора показана на рисунке. Для эмиттеров использовались тантал толщиной 0,3 мм, цирконий или нержавеющая сталь толщиной 0,7 мм. Внешний диаметр эмиттеров 5,4 мм. Изолятором служила кварцевая трубка диаметром 3,2 мм и толщиной стенки 0,5 мм. Остальные детали изготовлены из нержавеющей стали. Диаметр коллектора 1,8 мм. Длина чувствительной части 150 мм. Для передачи сигнала применялся терморезистивный кабель типа КТМС(С) с изоляцией из окиси магния и оболочкой из нержавеющей стали. Сборка детектора проводилась в вакууме  $5 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст.

При облучении детектора электрический ток генерируется не только в чувствительной, но и в его переходной части, а также в кабеле. Для учета вклада этих

токов в чувствительность детектора проводились измерения с компенсационным детектором, который имел аналогичную конструкцию, но без чувствительной части.

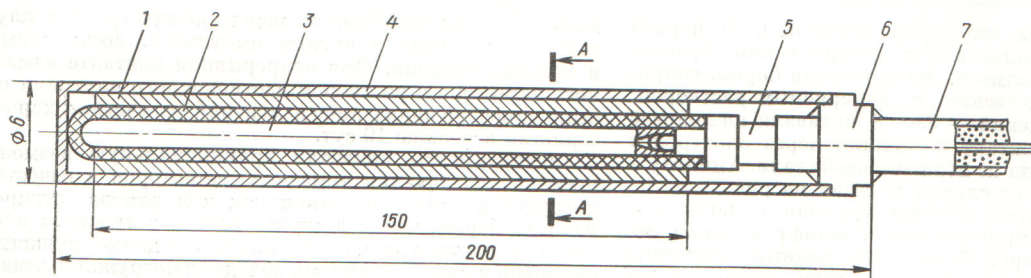
В работах [3, 4] показано, что основные характеристики эмиссионных детекторов хорошо описываются с помощью аналитической модели, предусматривающей разбиение спектра эмиттируемых электронов на быстрые ( $E > 50$  эВ) и медленные ( $E < 50$  эВ). При достаточно большой разности в атомных номерах материалов электродов вклад медленных электронов невелик (15—20%) и им можно пренебречь [4].

В настоящей работе, ввиду отсутствия данных по вторично-эмиссионным свойствам кварцевого стекла, вклад медленных электронов при построении аналитической модели не учитывался; считалось также, что чувствительность не зависит от угла падения  $\gamma$ -квантов на электроды [5] и что вероятность выхода электрона в направлении «вперед» равна половине вероятности выхода в 4 л ср.

С учетом этих предположений аналитические модели чувствительности, обусловленной быстрыми электронами, имеют следующий вид:

для детектора с кварцевой трубкой

$$S_{cal} = -(eN2\pi h/2) \{ F_1 R_1 T_{1;2} A_{2;3} + F_2 R_2 A_{2;3} - F_3 R_3 A_{3;2} [1 - A_{2;3} (1 - A_{3;2})] \}; \quad (1)$$



Вакуумный эмиссионный детектор:

1 — эмиттер; 2 — изолятор (кварцевая трубка); 3 — коллектор; 4 — вакуумная оболочка; 5 — металлокерамический спай; 6 — втулка; 7 — кабель

для детектора без кварцевой трубки

$$S_{\text{cal}} = -(eN2\pi h/2) \{F_1 R_1 A_{1;3} - F_2 R_3 A_{3;1} \times [1 - A_{1;3} (1 - A_{3;1})]\}, \quad (2)$$

где  $S_{\text{cal}}$  — расчетная чувствительность детектора,  $A/(P/c)$ ;  $e$  — заряд электрона ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  К/электрон);  $h$  — длина электрода, см;  $N$  — поток  $\gamma$ -квантов с энергией  $E_\gamma$ , МэВ, создающий единичную экспозиционную дозу, квант/( $P \cdot \text{см}^2$ );  $F_i$  — вероятность выхода в  $4\pi$  ср быстрого электрона на один  $\gamma$ -квант из  $i$ -го материала, электрон/квант;  $R_i$  — радиус  $i$ -го материала, см;  $T_{1;2}$  — вероятность попадания электрона с эмиттера в пространство между кварцевой трубкой и коллектором;  $A_{ij}$  — вероятность поглощения электронов  $i$ -го материала в  $j$ -м материале.

Вероятность выхода быстрых электронов  $F_i$  из материалов эмиттеров, коллектора и кварцевого стекла для различной энергии  $\gamma$ -квантов рассчитана на основании данных работ [4, 6]. Вероятность  $T_{1;2}$  получена в предположении, что все электроны вылетают в плоскости, перпендикулярной к оси детектора (см. рисунок):

$$T_{1;2} = \left( \int_0^{\theta_{\text{макс}}} d\theta \int_{E_{\text{мин}}}^{E_{\text{макс}}} dE \Psi(\theta, Z_1) \times \right. \\ \left. \times m(E, Z_1) P_{1;2} \right) / \left( \int_0^{2\pi} d\theta \int_{E_{\text{мин}}}^{E_{\text{макс}}} dE \Psi(\theta, Z_1) m(E, Z_1) \right). \quad (3)$$

Здесь  $P_{1;2}$  — вероятность прохождения кварцевой трубки электроном, падающим на нее под углом  $\phi$  с энергией  $E$  [7]; угловое распределение быстрых электронов

принято в виде  $\Psi(\theta, Z_1) = \cos^2 \theta$  для  $Z_1 < 50$  и  $\Psi(\theta, Z_1) = \cos^2 \theta + 0,717 \cos \theta$  для  $Z_1 \geq 50$ ;  $m(E, Z_1)$  — распределение электронов по энергии [8] (при этом для тантала принято энергетическое распределение свинца, а для циркония и нержавеющей стали — распределение меди);  $\theta = \arcsin(R_2 \sin \phi / R_1)$  — угол вылета электронов из эмиттера [на кварцевую трубку попадают электроны, угол вылета которых  $\theta \leq \theta_{\text{макс}} = \arcsin(R_2 / R_1)$ ].

Вероятность поглощения быстрых электронов  $A_{ij}$  получена из аналогичных соображений:

$$A_{ij} = \frac{\int_0^{\theta_{\text{макс}}} d\theta \int_{E_{\text{мин}}}^{E_{\text{макс}}} dE \Psi(\theta, Z_i) m(E, Z_i) \times [1 - g(\Psi_{ij}, E, Z_j)]}{2\pi \int_0^{2\pi} d\theta \int_{E_{\text{мин}}}^{E_{\text{макс}}} dE \Psi(\theta, Z_i) m(E, Z_i)}, \quad (4)$$

где  $g$  — дифференциальный (по углу и энергии) коэффициент неупругого отражения быстрых электронов [4].

Результаты расчетов чувствительности эмиссионных детекторов с кварцевой трубкой и без нее по аналитическим моделям (1) и (2) приведены в таблице. Экспериментальная чувствительность эмиссионных детекторов определялась на мощных гамма-установках  $^{60}\text{Co}$  [9] согласно формуле

$$S_{\text{exp}} = -(Y - Y_c) / \bar{P}, \quad (5)$$

где  $Y$  и  $Y_c$  — токи детектора и компенсационного детектора, А;  $\bar{P}$  — усредненное по длине чувствительной части детектора значение мощности экспозиционной до-

Чувствительность эмиссионных детекторов,  
пА/(Р/с)

| Материал<br>эммитера | Энергия,<br>МэВ | Расчет     |           | Эксперимент     |
|----------------------|-----------------|------------|-----------|-----------------|
|                      |                 | без трубки | с трубкой |                 |
| $^{73}\text{Ta}$     | 1,25            | 2,34       | 2,60      | $2,32 \pm 0,18$ |
|                      | 0,661           | 5,70       | 2,82      | —               |
|                      | 0,412           | 5,60       | 1,82      | —               |
| $^{40}\text{Zr}$     | 1,25            | 0,62       | 0,73      | $0,60 \pm 0,04$ |
|                      | 0,661           | 1,01       | 0,50      | —               |
|                      | 0,412           | 4,32       | 1,81      | —               |
| $^{26}\text{Fe}$     | 1,25            | 0,14       | 0,82      | $0,22 \pm 0,03$ |
|                      | 0,661           | 0,13       | 0,92      | —               |
|                      | 0,412           | 0,07       | 1,82      | —               |

зы, равное 1240 и 1640 Р/с для установок К-120000 и К-200000 соответственно.

Токи детекторов регистрировались электрометром ДФГ-20, мощность экспозиционной дозы измерялась дозиметром ДРГ-03 с выносной ионизационной камерой. Экспериментальная погрешность определения чувствительности для детекторов с эмиттерами из тантала, циркония и нержавеющей стали равна  $\pm 8$ ,  $\pm 9$  и  $\pm 10\%$  соответственно.

Как видно из таблицы, для детекторов с эмиттерами из тантала и циркония соответствие расчета и эксперимента при энергии  $\gamma$ -квантов 1,25 МэВ вполне удовлетворительное. Это подтверждает правильность нашего предположения о том, что чувствительность такого

типа детекторов определяется в основном быстрыми электронами. Для детектора с эмиттером из нержавеющей стали, как и следовало ожидать, расхождение расчетной и экспериментальной чувствительности значительно. Эмиттер и коллектор этого детектора имеют одинаковый атомный номер, поэтому в расчетах чувствительности необходимо учитывать вклад медленных электронов. Детектор с эмиттером из тантала и с кварцевой трубкой между электродами имеет наименьшую зависимость чувствительности от энергии  $\gamma$ -квантов. Отклонение его чувствительности от средней величины не превышает  $\pm 25\%$ . Детекторы без кварцевой трубки имеют гораздо более сильную зависимость чувствительности от энергии  $\gamma$ -квантов.

Поступило в Редакцию 10/1 1975 г.

В окончательной редакции 20/X 1975 г.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мухачев Б. В. и др. В сб.: Ядерное приборостроение. Вып. XVII. М., Атомиздат, 1972, с. 63.
2. Мухачев Б. В. и др. In: Proc. IAEA Symp. «Dosimetry in Agriculture, Industry, Biology and Medicine». Vienna, May 1972, p. 515.
3. Иванов В. И. и др. Там же, p. 663.
4. Кулаков Г. В. Канд. дис. М., МИФИ, 1973.
5. Кулаков Г. В. и др. «Измерительная техника. Метрология», 1974, № 5, с. 69.
6. Смирнов В. В. и др. В сб.: Прикладная ядерная спектроскопия. Вып. 3. М., Атомиздат, 1972, с. 161.
7. Mar B. Boing Rep. D2-90414, 1963.
8. Oda N., Sudzuki H. «J. Phys. Soc. Japan», 1960, v. 15, p. 2365.
9. Бререр А. Х. и др. Основы радиационно-химического аппаратостроения. М., Атомиздат, 1967.

УДК 550.424:553.492

К вопросу о миграции радиогенного свинца  
при гидротермальном метаморфизме урановых минералов

ЕРШОВ В. М.

В большинстве урановых и урансодержащих минералов свинец присутствует в двух формах и имеет коэффициенты диффузии  $10^{-6}$  и  $10^{-20}$  см<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup>. Около половины радиогенного свинца, содержащегося в этих минералах, может легко покидать минеральный агрегат без видимых его изменений [1—4]. В связи с возможностью формирования ореолов вокруг зон урановой минерализации вопрос о миграции радиогенного свинца приобретает практическое значение.

Гидротермальный метаморфизм урановых минералов докембрийских месторождений привел к выделению части радиогенного свинца в самостоятельную минеральную фазу [4—6]. На изучаемом объекте минерализация имеет возраст около 1800 млн. лет. Более поздний метаморфизм, протекавший, как установил А. И. Тугаринов, в палеозойский период обусловил образование галенита с радиогенным свинцом. При этом агрегаты настурана и уранинита в основном сохранили форму своих первичных выделений. Следовательно, можно говорить о преимущественной миграции радиогенного свинца.

Для исследуемой минерализации расчетное значение отношения радиогенного свинца к урану равно  $0,306 \approx 0,31$ . Доля радиогенного свинца в минерализован-

Отношение Pb/U  
в технологических пробах

Таблица 1

| Тип минерализации               | Pb/U  |
|---------------------------------|-------|
| Силикатный                      | 0,308 |
| Железкарбонатный                | 0,298 |
|                                 | 0,274 |
| Карбонатный                     | 0,306 |
|                                 | 0,296 |
| Среднее . . . $0,297 \pm 0,013$ |       |