

Результаты эксперимента по определению вклада нейтронов и  $\gamma$ -квантов  $Po-Be$ -источника

Номер кристалла	$\delta_n$	$\delta_\gamma$	$\delta_{n+\gamma}$	$k_n$	$\delta'_{n+\gamma}$	$k'_n$	$\delta''_{n+\gamma}$	$k''_n$
1	1,58	0,414	1,19	0,666	0,850	0,375	0,780	0,314
2	1,83	0,426	1,25	0,586	1,00	0,408	0,860	0,309
3	1,98	0,462	1,51	0,663	1,05	0,389	0,950	0,324
4	2,45	0,660	1,87	0,676	1,38	0,401	1,22	0,313
5	2,51	0,615	1,89	0,673	1,43	0,430	1,27	0,316
Средние значения	2,09	0,515	1,57	0,655	1,14	0,401	1,02	0,315

но лишь в случае соизмеримых значений сигналов термолюминесценции от нейтронной и  $\gamma$ -компонент.

Поступило в Редакцию 9/III 1971 г.  
В окончательной редакции 18/X 1971 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. М. Куделин, В. Б. Булгаков, Г. Н. Попов. «Атомная энергия», 26, 385 (1969).

2. К. М. Куделин, В. Б. Булгаков, А. А. Лебедев. «Приборы и техника эксперимента», № 1, 69 (1968).

3. Э. Н. Брандес, К. М. Куделин, А. М. Шлагин. Труды метрологических институтов СССР. Вып. 124 (184). Издательство стандартов, 1970, стр. 224.

Экспериментальное определение чувствительности детекторов прямой зарядки (ДПЗ) в тепловой и эпитепловой области

Н. Д. РОЗЕНБЛУМ, Е. Н. БАБУЛЕВИЧ, А. Е. АЛЕКСЕЕВ, В. А. ЗАГАДКИН, В. С. КИРСАНОВ, Э. М. КУЗНЕЦОВ, А. А. КОНОНОВИЧ, М. Г. МИТЕЛЬМАН

УДК 539.1.074.88

Работа посвящена градуировке ДПЗ с эмиттерами из родия, серебра и ванадия в тепловой и эпитепловой областях.

Чувствительность в эпитепловой области была определена для ДПЗ с родиевым эмиттером диаметром  $0,5 \pm 0,01$  мм и длиной 100 мм. Изолятором эмиттера служил капилляр из кварца с толщиной стенки 0,15 мм. В качестве фильтра на ДПЗ был надет кадмиевый чехол длиной 200 мм и толщиной стенки 0,76 мм. Ток ДПЗ измеряли усилителем типа ПЭМУ-1 с суммарной погрешностью 5%. Нейтронный поток определяли с помощью метода золотых фольг [1].

Градулируемый детектор и золотая фольга в кадмиевом чехле поочередно помещались в одну и ту же точку реактора. Активность золотой фольги, обусловленная захватом эпитепловых нейтронов, определялась выражением

$$A = N_{Au} (1 - e^{-\lambda t_1}) e^{-\lambda t_2} \Phi_0 I F_{Cd}, \quad (1)$$

где  $N_{Au}$  — количество атомов золота в фольге;  $\lambda$  — константа радиоактивного распада золота;  $t_1$  — время облучения;  $t_2$  — время, прошедшее от конца облучения до измерения активности;  $\Phi_0$  — поток эпитепловых нейтронов;  $I = 1533 \pm 40$  барн — резонансный интеграл для золота [2];  $F_{Cd}$  — коэффициент кадмиевой поправки [2].

Максимально допустимая относительная погрешность в определении потока эпитепловых нейтронов определялась по формуле

$$\delta\Phi = \delta A + \delta N_{Au} + \delta(1 - e^{-\lambda t_1}) + \delta e^{-\lambda t_2} + \delta I, \quad (2)$$

она составляла  $\pm 7,7\%$ .

Поток эпитепловых нейтронов, измеренный по активации золотой фольги, составлял  $(1,9 \pm 0,15) \cdot 10^{11}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек; величина тока ДПЗ, экранированного кадмиевым фильтром,  $0,0062 \pm \pm 0,0005$  мка; чувствительность ДПЗ к эпитепловым нейтронам  $\phi = (3,3 \pm 0,6) \cdot 10^{-19}$  а·см<sup>2</sup>·сек/нейтр·м. Погрешность в определении чувствительности дана с учетом идентичности ДПЗ ( $\pm 2\%$ ).

Для градуировки детекторов с эмиттерами из родия и серебра сравнивались их показания с показаниями ДПЗ с эмиттером из родия диаметром 0,8 мм, который в данном случае служил эталоном. Чувствительность его к тепловым нейтронам, по данным работы [1], была равна  $(2,1 \pm 0,2) \cdot 10^{-19}$  а·см<sup>2</sup>·сек/нейтр·м. Взаимная градуировка детекторов проводилась на реакторе МР ИАЭ им. И. В. Курчатова.

Для учета влияния фоновых токов линии связи детектора при его изготовлении применялся двухжильный кабель типа КТМС-2 с магнетиальной изоляцией. Одна из жил кабеля использовалась как токоведущая, а вторая, находящаяся в условиях, идентичных первой, — как фоновая. Ток детектора определялся как алгебраическая разность токов. Величина фонового тока пропорциональна глубине погружения кабеля в активную зону реактора. Для уменьшения погрешности, вызываемой фоновым током, измерения проводились в верхней части активной зоны.

Было изготовлено пять ДПЗ, данные которых представлены в табл. 1.

Погрешность градуировки определяется по формуле

$$\delta\phi = \delta\phi_{Rh} + \delta i_{Rh} + \delta i_{gp}. \quad (3)$$

Градуируемые детекторы

Таблица 1

Номер ДПЗ	Эмиттер			Изолятор		Фильтр		
	Материал	Диаметр, мм	Длина, мм	Вес, г	Материал	Толщина, мм	Материал	Толщина, мм
733	Родий	0,8	150	0,888	Кварц	0,2	—	—
734	Ванадий	1,0	150	0,678	»	0,2	—	—
735	Серебро	1,0	150	1,177	»	0,2	—	—
471	»	1,0	150	1,175	»	0,2	—	—
472	Родий	0,8	150	0,888	»	0,2	Кадмий	0,75
							»	0,75

$\Phi_T^{Rh}$  — чувствительность детекторов к тепловым нейтронам;  $\Phi_T$  — поток тепловых нейтронов.  
Из выражения (1) следует, что

$$\frac{\Phi_T^{Ag}}{\Phi_T^{Rh}} = \frac{i_T^{Ag}}{i_T^{Rh}}, \quad (6)$$

т. е. отношение чувствительностей детекторов в тепловой области равно отношению их токов, определяемых тепловыми нейтронами.

Аналогично для эпитепловой области имеем:

$$\frac{\Phi_{\text{э}}^{Ag}}{\Phi_{\text{э}}^{Rh}} = \frac{i_{\text{э}}^{Ag}}{i_{\text{э}}^{Rh}}, \quad (7)$$

Результаты эксперимента

Таблица 2

Глубина погружения в активную зону, см	$i_T^{Rh}$ , мка	$i_{\text{э}}^{Rh}$ , мка	$i_T^{Ag}$ , мка	$i_{\text{э}}^{Ag}$ , мка	$i_V$ , мка	$\frac{i_T^{Ag}}{i_T^{Rh}}$	$\frac{i_{\text{э}}^{Ag}}{i_{\text{э}}^{Rh}}$	$\frac{i_V}{i_T^{Rh}}$
0	$1,34 \pm 0,21$	$0,19 \pm 0,037$	$0,87 \pm 0,08$	$0,88 \pm 0,016$	$0,083 \pm 0,003$	$0,61 \pm 0,155$	$0,42 \pm 0,16$	$0,062 \pm 0,12$
10	$1,86 \pm 0,23$	$0,44 \pm 0,022$	$1,3 \pm 0,19$	$0,23 \pm 0,025$	$0,1 \pm 0,005$	$0,7 \pm 0,19$	$0,52 \pm 0,083$	$0,054 \pm 0,094$
20	$2,73 \pm 0,23$	$0,59 \pm 0,027$	$1,7 \pm 0,17$	$0,34 \pm 0,021$	$0,16 \pm 0,018$	$0,62 \pm 0,114$	$0,58 \pm 0,063$	$0,058 \pm 0,11$
30	$3,41 \pm 0,2$	$0,78 \pm 0,022$	$1,98 \pm 0,17$	$0,42 \pm 0,021$	$0,21 \pm 0,015$	$0,58 \pm 0,083$	$0,54 \pm 0,042$	$0,061 \pm 0,08$
40	$3,8 \pm 0,18$	$1,0 \pm 0,022$	$2,22 \pm 0,16$	$0,53 \pm 0,02$	$0,23 \pm 0,014$	$0,58 \pm 0,07^*$	$0,53 \pm 0,03^*$	$0,06 \pm 0,065^*$

\* Величины, принятые в расчетах.

Здесь  $\delta\Phi^{Rh}$  — максимально допустимая погрешность в определении чувствительности эталонного родиевого детектора;  $\delta i_{Rh}$ ,  $\delta i_{\text{э}}^{Rh}$  — максимально допустимая погрешность в измерении токов эталонного и градуируемого детекторов:

$$\delta i = \delta i_{\text{пр}} + \delta i_{\text{пол}}, \quad (4)$$

где  $\delta i_{\text{пр}}$  определяется классом точности измерительного прибора;  $\delta i_{\text{пол}}$  определяется погрешность фиксации местоположения детектора ( $\pm 1$  см).

Результаты измерений с учетом токов линии связи представлены в табл. 2, где даны значения токов детекторов, определяемых тепловыми и эпитепловыми нейтронами, а также их отношения к току эталонного детектора.

Из табл. 2 следует, что разброс данных находится в пределах точности эксперимента, причем точки, соответствующие глубине погружения 30 и 40 см, имеют минимальную погрешность. В расчетах принимались именно эти точки.

Ток, определяемый тепловыми нейтронами, равен:

$$\begin{aligned} i_T^{Ag} &= \Phi_T^{Ag} \Phi_T, \\ i_T^{Rh} &= \Phi_T^{Rh} \Phi_T, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $i_T^{Ag}$ ,  $i_T^{Rh}$  — ток определяемый тепловыми нейтронами для родиевого и серебряного детекторов;  $\Phi_T^{Ag}$ ,

где  $\Phi_T^{Ag}$ ,  $\Phi_{\text{э}}^{Rh}$  — чувствительности ДПЗ в эпитепловой области;  $i_{\text{э}}^{Ag}$ ,  $i_{\text{э}}^{Rh}$  — токи ДПЗ, определяемые эпитепловыми нейтронами.

Зная чувствительность в тепловой области ДПЗ с эмиттером из родия, находим чувствительность для ДПЗ с серебряным эмиттером диаметром 1 мм:

$$\Phi_T^{Ag} = (1,2 \pm 0,26) \cdot 10^{-19} \text{ а.см}^2 \cdot \text{сек/нейтр.м.}$$

Из табл. 2 следует, что вклад эпитепловых нейтронов в показания родиевого ДПЗ не превышает 12% для глубины погружения 0 см и достигает 21% при погружении ДПЗ на 40 см.

Известно, что

$$\frac{I^{Rh}}{\sigma_T^{Rh}} \gg \frac{I^V}{\sigma_T^V}, \quad (8)$$

где  $I^{Rh}$ ,  $I^V$  — резонансные интегралы для родия и ванадия [2];  $\sigma_T^{Rh}$ ,  $\sigma_T^V$  — сечения активации для родия и ванадия в тепловой области [2].

Из соотношения (8) следует, что относительный вклад в показания ванадиевого ДПЗ от эпитепловых нейтронов намного меньше, чем для родиевого, и с точностью 2—4% можно считать, что его показания обусловлены лишь тепловыми нейтронами. Зная чувствительность в тепловой области эталонного ДПЗ и отно-

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Е. Алексеев и др. «Атомная энергия», 28, 139 (1970).
2. К. Бекурц, К. Виртц. Нейтронная физика. М., Атомиздат, 1968.

шение токов ванадиевого ДПЗ к эталонному, находим чувствительность ванадиевого ДПЗ с эмиттером диаметром 1 мм:

$$\Phi_T^V = (1,2 \pm 0,26) \cdot 10^{-20} \text{ а} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{сек} / \text{нейтр} \cdot \text{м}.$$

Поступило в Редакцию 23/II 1971 г.  
В окончательной редакции 15/VII 1971 г.

## Детекторы $\gamma$ -излучения из германия с $i$ -проводимостью

В. С. ВАВИЛОВ, Л. А. ГОНЧАРОВ, Т. И. ПАВЛОВА, Я. УХРИН, М. В. ЧУКИЧЕВ

УДК 539.1.074.55

До последнего времени германиевые детекторы для  $\gamma$ -спектрометрии изготавливались введением ионов лития в  $p$ -тип материал [Ge (Li)-детекторы] или компенсированием  $\gamma$ -квантами  $n$ -типа германия (радиационные детекторы). В случае Ge (Li)-детекторов поведение лития при комнатной температуре в кристаллической решетке германия требует непрерывного охлаждения, что усложняет их применение.

Преимуществом метода компенсации германия радиационными дефектами является возможность получения стабильных при комнатной температуре детекторов. Однако технология изготовления спектрометрических детекторов связана с большими трудностями.

Новым этапом развития полупроводниковой спектрометрии  $\gamma$ -квантов является создание детектора на основе высокочистого германия с проводимостью, близкой к собственной [1]. Поскольку терминология для такого типа детекторов еще не установлена, предлагается называть его  $i$ -германиевый гамма-детектор.

Благодаря работам Р. Холла по очистке германия [2] появилась возможность изготавливать монокристаллы с  $N_D - N_A$  до  $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ , что теоретически позволяет получить чувствительный слой толщиной более 10 см и хорошее энергетическое разрешение при отсутствии глубоких рекомбинационных центров и центров захвата. Однако Р. Холл при оценке степени чистоты (или остаточной концентрации примесей) ограничивается лишь значением разностной концентрации электрически активных примесей. Ввиду этого дальнейший прогресс применения  $i$ -германия для изготовления детекторов Холл связывает лишь с глубокой очисткой материала, приводящей к уменьшению  $N_D - N_A$ , и не рассматривает при этом влияние суммарной концентрации примесей.

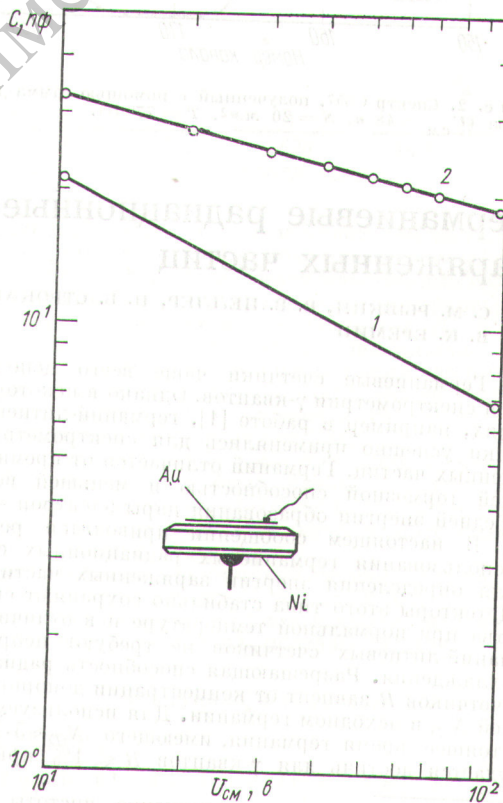
Признавая необходимость проведения дальнейших работ по более глубокой очистке германия, не следует под «чистотой» в строгом смысле подразумевать лишь низкое значение  $N_D - N_A$ .

В работе [3] показано, что при  $N_D - N_A \approx 10^{12} \div 10^{11} \text{ см}^{-3}$  общая концентрация примесей ( $N_D + N_A$ ) может достигать  $\sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , что характеризует высокий уровень компенсации. При высоком уровне компенсации возрастает рассеяние носителей на заряженных центрах и объемная неоднородность материала, что даже при отсутствии эффектов прилипания будет приводить к ухудшению разрешающей способности детектора. Поэтому исследование влияния степени компенсации на характеристики  $i$ -детекторов представляется весьма целесообразным.

В нашем эксперименте использовался германий с  $N_D - N_A = 1,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  и  $\mu = 3,8 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{в} \cdot \text{сек}$  при 77° К. Кроме того, была измерена суммарная концентрация  $N_D + N_A = 1,35 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Значения ( $N_D - N_A$ ),  $\mu$  и ( $N_D + N_A$ ) измерялись на образцах, вырезанных из пластины, непосредственно прилегаю-

щей к образцу, использованному для изготовления  $i$ -германиевого детектора. Ориентация оси роста кристалла была  $\langle 111 \rangle$ , диаметр 28 мм при плотности дислокаций  $2 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$ .

При изготовлении детектора после обычной механической обработки образца был нанесен никель химическим способом. Задняя поверхность образца защищалась маской, и никель с остальной поверхности снимался азотной кислотой. Образец травили в CR4A (три раза по 1 мин) и обмывали деионизированной водой. После этого его травили в смеси HF : H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (1 : 1), время травления 2 мин. Затем образец тщательно промывали деионизированной водой. На травленную поверх-



Р и с. 1. Вольт-емкостная характеристика  $i$ -Ge-гамма-детектора:

1 — емкость детектора; 2 — емкость детектора и криостата.