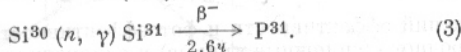


Измерение потока медленных нейтронов с помощью эффекта Холла в кремнии

В. А. ХАРЧЕНКО, С. П. СОЛОВЬЕВ,
Р. В. НОВГОРОДЦЕВ

УДК 539.125.162.2

В настоящей работе приведены результаты опытов по использованию кремния для оценки потока медленных нейтронов. Зависимость электрофизических параметров кремния от концентрации примесей хорошо изучена. В кремнии при захвате медленных нейтронов происходят следующие ядерные превращения:



Первые две реакции незначительно изменяют соотношение изотопов в естественной смеси [1]. Ядерные превращения, происходящие в результате реакции (3) при последующей выдержке после облучения в течение времени порядка суток, заканчиваются образованием стабильного изотопа P^{31} , который является донорной примесью в кремнии.

Здесь N — число ядер данного элемента в 1 см^3 ; σ_a — сечение активации; k — относительная распространенность данного изотопа. Отсюда можно определить общий поток, заменив $N_{\text{яд}}$ на концентрацию атомов фосфора. При этом погрешность определения nv зависит в основном от погрешности измерения величины p и составляет не более 10%. Дополнительная погрешность, обусловленная появлением примесей стабильных изотопов алюминия и магния в результате $(n, 2n)$ - и (n, α) -реакций, оказывается несущественной. Зная общий поток и время экспозиции, из формулы (5) нетрудно определить поток Φ , даже если реактор работал на переменной мощности.

Основным осложняющим фактором при определении потока по этому способу являются радиационные дефекты в кремнии, которые затрудняют измерение концентрации носителей по эффекту Холла. Поэтому после облучения образцы кремния необходимо отжигать [3, 4].

Результаты измерений потока медленных нейтронов в вертикальном канале реактора ВВР-Ц по эффекту Холла в кремнии и по методу активации фольг

Номер образца	До облучения		Заданный интегральный поток, нейтр. см ⁻²	После облучения		Поток $\Phi = nv$	
	тип носителей тока	концентрация носителей тока, см ⁻³		тип носителей тока	концентрация носителей тока, см ⁻³	по эффекту Холла	по методу фольг
1	p	3,5 · 10 ¹²	5,0 · 10 ¹⁷	n	8,0 · 10 ¹³	6,2 · 10 ¹³	} 6,2 · 10 ¹³
2		2,6 · 10 ¹²			8,0 · 10 ¹³		
3	p	1,2 · 10 ¹³	1,3 · 10 ¹⁸	n	2,1 · 10 ¹⁴		
4		1,3 · 10 ¹³			2,1 · 10 ¹⁴		
5	p	1,2 · 10 ¹³	2,0 · 10 ¹⁹	n	1,4 · 10 ¹⁵		
6		1,2 · 10 ¹³			1,4 · 10 ¹⁵		

Предполагая, что каждый атом примесного фосфора поставит один носитель в зону проводимости, по измеренным значениям концентрации носителей тока в полупроводнике можно определить с достаточной степенью точности концентрацию атомов образовавшегося фосфора. Если известен коэффициент Холла R_x , то концентрация p при преобладании одного типа носителей определяется из формулы

$$R_x = \pm \frac{r}{pq}, \quad (4)$$

где r — числовой множитель, зависящий от типа рассеяния носителей (мы приняли $r = \frac{3\pi}{8}$ [2]); q — заряд электрона.

С другой стороны, число ядерных превращений при захвате медленных нейтронов пропорционально потоку нейтронов $\Phi = nv$ и времени экспозиции t

$$N_{\text{яд. п}} = N\sigma_a \Phi t k. \quad (5)$$

В таблице приведены результаты измерений интегральных потоков в одном из вертикальных каналов реактора ВВР-Ц по описываемому методу, для сравнения даны также результаты, полученные методом активации фольг. Из данных таблицы следует, что значения потоков медленных нейтронов, которые были вычислены на основе измерений концентрации фосфора по эффекту Холла для шести различных образцов кремния и известного времени облучения, хорошо согласуются между собой, а также со значением потока, полученным независимо методом активации фольг. По сравнению с методом активации фольг [5] одно из достоинств данного метода состоит в том, что дозиметрическая информация неопределенно долго сохраняется в образце.

Поступило в Редакцию 16/X 1969 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. J. Crawford, J. Cleland. Radioisotopes in Phys., Sci. and Ind. Vol. 1, Vienna, IAEA, p. 269.

2. Р. С м и т. Полупроводники. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
3. В. С. В а в и л о в. Действие излучений на полупроводники. М., Физматгиз, 1963.
4. В. А. Х а р ч е н к о, С. П. С о л о в ь е в. Неорга-

- нические материалы в элементах микроэлектроники. Материалы научно-технической конференции. М., Изд. ин-та «Электроника», 1968, стр. 42.
5. В. П р а й с. Регистрация ядерного излучения. М., Изд-во иностр. лит., 1960.

Эффективность спектрометра излучений человека при неоднородном распределении изотопа в источнике

С. Ю. ПАВЛОВ, В. С. ЮЗГИН

УДК 539.1.074.3:539.122.164:539.12.08

По результатам измерений с помощью спектрометра излучений человека (СИЧ) можно рассчитать количество инкорпорированного радиоактивного изотопа и дозу внутреннего облучения критического органа или всего тела человека. Для таких расчетов необходимо знать эффективность или фотоэффективность регистрации γ -излучения детекторами используемого спектрометра. Эти величины существенно зависят от характера распределения γ -излучателя в теле человека. Многие радиоактивные изотопы распределены в теле неоднородно, локализуясь в тех или иных органах, например нерастворимые аэрозоли Co^{60} — в легких, I^{131} — в щитовидной железе, Po^{210} — в селезенке и т. д.

Для первых двух случаев неоднородного распределения радиоактивных изотопов в организме методом Монте-Карло была рассчитана фотоэффективность и эффективность СИЧ. При составлении алгоритма решения этой задачи использовали известные принципы метода Монте-Карло. Однако реализация их на ЭЦВМ М-20 потребовала минимизации логической схемы вычислений для того, чтобы использовать только оперативную память машины и получить приемлемые времена расчета вариантов.

В первом случае рассматривался изотоп Co^{60} (энергия квантов $E_{\gamma} = 1,17$ и $1,33$ Мэв, $E_{\beta} = 1,25$ Мэв), равномерно распределенный в грудной части фантома, имитирующего «стандартного» человека весом 70 кг [1]. Этот случай интересен потому, что при ремонтных работах на контуре первичного теплоносителя реактора в легкие работника вместе с вдыхаемым воздухом попадают аэрозоли, содержащие Co^{60} , который образуется в конструктивных материалах по реакциям $Co^{59}(n, \gamma) Co^{60}$ или $Ni^{60}(n, p) Co^{60}$. На рис. 1, а представлены результаты расчетов фотоэффективности и эффективности детектора с кристаллом NaI ($\varnothing 140 \times 100$ мм) в зависимости от положения над фантомом. Такие детекторы с 1968 г. используются на модернизированной установке СИЧ-1М, разработанной в ИАЭ им. И. В. Курчатова [2]. Из рисунка видно, что максимальное значение фотоэффективности при неоднородном распределении Co^{60} примерно на 25% больше, чем при однородном распределении. Статистическая стандартная ошибка расчетов не превышала 7%. Различия между значениями фотоэффективности для энергий γ -квантов, равных 1,17 и 1,33 Мэв, не выходит за пределы стандартной ошибки вычислений.

Во втором случае неоднородного распределения был рассмотрен изотоп I^{131} ($E_{\gamma} = 0,364$ Мэв). Этот излучатель, попадая в организм, концентрируется в щитовидной железе (~33% от общего содержания в теле) [1]. На рис. 1, б приведены результаты вычис-

лений эффективности и фотоэффективности для неоднородного (сплошные кривые) и однородного (пунктирные кривые) распределения I^{131} в фантоме. По кривым фотоэффективности рассчитана суммарная фотоэффективность четырехкристального СИЧ-1М [2]. Отношение фотоэффективностей, соответствующих неоднородному и однородному распределениям, равно ~1,24. Эта величина проверялась экспериментально.

Для измерений на СИЧ-1М был приготовлен фантом с равномерно распределенной активностью $q_1 = 0,66$ мккюри и смоделирована шея с щитовидной железой, содержащей I^{131} с $q_2 = 0,33$ мккюри.

На рис. 2 приведены полученные на СИЧ-1М распределения амплитуд импульсов: кривая 1 соответствует измерениям с однородным распределением активности (без имитации активности щитовидной железы) и кривая 2 — измерениям с неоднородным распределением I^{131} , т. е. с учетом активности щитовидной железы. Отношение площадей S под фотопиками этих кривых равно $S_2/S_1 = 1,79$. Это позволяет получить соответствующие отношения фотоэффективностей. Действительно,

$$S_1 = \epsilon_0 q_1, \quad (1)$$

$$S_2 = \epsilon_0 q_1 + \epsilon_{щ.ж} q_2 = \epsilon_H (q_1 + q_2), \quad (2)$$

где ϵ_0 и ϵ_H — фотоэффективности регистрации γ -излучения при однородном и неоднородном распределениях I^{131} в фантоме (или субъекте); $\epsilon_{щ.ж}$ — фотоэффективность регистрации γ -излучения изотопа I^{131} , локализованного только в щитовидной железе.

Тогда

$$\frac{\epsilon_{щ.ж}}{\epsilon_0} = \frac{q_1}{q_2} \left(\frac{S_2}{S_1} - 1 \right). \quad (3)$$

Используя данные эксперимента, находим, что

$$\epsilon_{щ.ж} = 1,6\epsilon_0$$

и

$$\frac{\epsilon_H}{\epsilon_0} = \frac{S_2}{S_1} \cdot \frac{q_1}{q_1 + q_2}, \quad (4)$$

откуда следует, что

$$\frac{\epsilon_H}{\epsilon_0} = 1,2.$$

Последнее соотношение находится в соответствии с теоретическим расчетом (с точностью до ошибок эксперимента и расчета). Таким образом, фотоэффективность четырехкристального спектрометра [2], полученная при калибровке СИЧ-1М на фантоме с однородным распределением I^{131} , примерно на 20% ниже фото-