



Функции возбуждения, полученные при облучении протонами мишеней из кремния, тантала и углерода (графита):

1, 2 — образцы кремния; 3 — мишень из тантала; 4 — функция возбуждения углерода; 5 — функция возбуждения кремния (без примеси углерода); 6 — функция возбуждения графита.

функцию 5, получаем функцию возбуждения углерода 4. На основании графика 4 было найдено значение Гэксперим, а на основании кривой выхода, обусловлен-

ной чистым графитом 6, — Г_т. По формуле (3) определили, что $\epsilon \approx 100$ кэв. Это соответствует слою образца кремния, загрязненного атомами углерода, толщиной $\leq 0,4$ мг/см². Поскольку нет заметного смещения сильного резонанса 620 кэв реакции $Si^{30}(p, \gamma)P^{31}$, можно сделать вывод о том, что слой $\leq 0,4$ мг/см² — не сплошная углеродная пленка, а слой кремния с небольшой примесью углерода. Это подтверждается также расчетным сравнением выхода γ -квантов, обусловленного предполагаемой углеродной пленкой, с реально происходящим выходом γ -квантов.

Получены также спектры γ -квантов при облучении одного из образцов кремния протонами двух энергий: 530 и 950 кэв. Если в первом случае четко различается пик, обусловленный γ -квантами с $E_{\gamma} \approx 2,4$ Мэв, то во втором он отсутствует. Это еще раз подтверждает тот факт, что углерод на уровне пороговой чувствительности (0,01—0,02%) загрязняет очень тонкий поверхностный слой.

Загрязнение углеродом поверхностных слоев образцов полупроводникового кремния определялось методом сравнения с эталоном, за который был принят образец с наибольшим содержанием углерода (0,6%). Содержание углерода в этом образце было найдено двумя способами: 1) по формулам (1) и (2) с учетом функции возбуждения чистого графита; 2) сравнением выходов продуктов реакции $C^{12}(p, \gamma)N^{13}(\gamma + \beta^+)$, обусловленных исследуемым и специально приготовленными образцами. Загрязнение углеродом поверхностных слоев достигало в некоторых образцах 0,2—0,4%.

Поступило в Редакцию 6/IV 1970 г.
В окончательной редакции 4/V 1970 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. S. Rubin, T. Passell, L. Bailey. *Analyt. Chem.*, 29, 736 (1957).
2. М. И. Гусева, Е. В. Иногин, С. П. Цытко. *ЖЭТФ*, 36, 3 (1959).
3. Н. А. Скакун, О. Н. Харьков. «Атомная энергия», 27, 351 (1969).
4. E. Möller, N. Starfelt. *Aktiebolaget atomenergi. Report No. 237. Stockholm, 1966.*

Использование ускоренных заряженных частиц (α и p) для определения содержания некоторых легких элементов

К. А. БАСКОВА, С. С. ВАСИЛЬЕВ, Ю. А. ДЖЕМАРДЬЯН, Г. И. МИХАЙЛОВ, Л. П. СТАРЧИК УДК 543.53+539.125

Для определения содержания легких элементов можно использовать реакции, возбуждаемые заряженными частицами низких и средних энергий, получаемыми на ускорителях. Так, для определения содержания бора и кислорода в полупроводниковом кремнии были применены протоны с энергией 6,25 Мэв и α -частицы с энергией 25 Мэв, получаемые на циклотроне.

Образцы кремния диаметром 20—30 мм и толщиной 0,5—1,5 мм облучали потоком частиц, соответствующим току пучка 1—2 мка. Измерение числа заряженных частиц, бомбардирующих образец, который устанавливался в цилиндр Фарадея, производили интегратором тока.

Для регистрации наведенной позитронной активности использовали спектрометр $\gamma\gamma$ -совпадений на двух кристаллах NaI(Tl) размером 40 × 40 мм.

Бор определяли по наведенной активности, обусловленной изотопом C^{11} с периодом полураспада 20,4 мин, который образуется по реакции $B^{11}(p, n)C^{11}$, имеющей порог 3 Мэв [1]. Изотоп C^{11} может образоваться и по реакции $N^{14}(p, \alpha)C^{11}$ с порогом ~ 3 Мэв, однако заметный выход этой реакции наблюдается лишь при энергиях протонов > 4 Мэв. Если содержания бора и азота в пробе равны, то отношение наведенной за счет бора активности к активности за счет азота при энергии протонов 4 Мэв равно 10^3 , при энергии протонов 5 Мэв — 10^2 [2, 3].

Для устранения влияния азота энергия протонов с помощью алюминиевых фольг снижалась до 4,5 Мэв. На ядрах изотопа O^{18} может происходить реакция $O^{18}(p, n)F^{18}$ с порогом 2,58 Мэв, приводящая к образованию F^{18} с периодом полураспада 110 мин. После

Пороговые чувствительности (анализ по высоте ступеньки на кривой выхода)

Элемент	Состав образца	Энергия протонов, <i>кэв</i>		Энергия γ -квантов	Доза облучения, <i>мкк</i>	Пороговая чувствительность, %	Пороговая чувствительность при дозе облучения 10^5 <i>мкк</i>
		E_{p_1}	E_{p_2}				
B	$B_2O_3 + Li_2O$	500	900	9,5—12,3	1000	0,15	$1,5 \cdot 10^{-2}$
Li	$Li_2O + B_2O_3$	300	500	16,5—20,0	1000	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$
Li	$Li_2O + SiO_2$	300	500	14,0—20,0	1000	$8,0 \cdot 10^{-3}$	$8,0 \cdot 10^{-4}$

облучения образца полупроводникового кремния на кривой распада можно четко выделить участок, который характеризует наличие изотопа F^{18} . Однако, как показали исследования, при снятии поверхностного слоя толщиной ~ 10 *мкм* после облучения образца активность, обусловленная F^{18} , в кремниевой матрице не наблюдается. Это указывает на значительное загрязнение поверхностного слоя кремния кислородом. Поэтому перед измерением активности образца необходимо удалять поверхностный слой.

В качестве эталонов использовались образцы кремния с содержанием бора 10^{18} — 10^{19} *атом/см³*. Время облучения образца и эталона было выбрано равным 20 *мин*, время охлаждения — 40 *мин*, время счета наведенной активности — 40 *мин*. Пороговая чувствительность определения бора составила 10^{-6} %.

Определение кислорода проводилось по изотопу F^{18} с периодом полураспада 110 *мин*, образующемуся по реакции $O^{16}(\alpha, d)F^{18}$ и $O^{16}(\alpha, pn)F^{18}$ с порогом 20,4 и 23,2 *Мэв* соответственно [4,5]. При энергии α -частиц 25 *Мэв* на ядрах атомов примесей осуществляются реакции $B^{10}(\alpha, n)N^{13}$, $C^{12}(\alpha, n)O^{15}$ и $N^{14}(\alpha, n)F^{17}$. Позитронноактивные ядра N^{13} , O^{15} и F^{17} имеют периоды полураспада 10,4; 2 и 1,1 *мин* соответственно. При охлаждении образца в течение 40 *мин* в случае отсутствия бора в нем вся активность будет обусловлена F^{18} . Анализ распределения кислорода по глубине образца показал, что в слое толщиной ~ 10 *мкм* содержание кислорода на порядок выше, чем в матрице. Как и в случае определения бора, с поверхности образца перед измерением удалялся слой толщиной 10 *мкм*.

В качестве эталона использовали оптический кварц. Время облучения образца составляло 110 *мин*, время счета наведенной активности — 110 *мин*. Чувствительность определения кислорода была равна $5 \cdot 10^{-6}$ %. При наличии в кремнии бора измерение активности образца производилось через 2 *ч* после облучения. Чувствительность определения кислорода в этом случае составляла 10^{-5} %. Воспроизводимость результатов при повторных измерениях была не хуже 20%.

Под действием протонов с энергией ~ 1 *Мэв* на ядрах легких элементов происходят реакции (p, γ) и $(p, \alpha\gamma)$, которые имеют ярко выраженный резонансный характер, что значительно облегчает возможность их селективного определения. По выходу γ -излучения этих реакций производилось определение лития [6], бериллия, бора [7], фтора и других элементов. Пороговые чувствительности при дозе облучения (общая сумма зарядов протонов, бомбардирующих мишень) порядка 10^3 *мкк* составляет $n(10^{-2} - 10^{-5})$ %.

Легкие элементы можно селективно определять по высоте резонансных ступенек, которые наблюдаются в ходе функций возбуждения. Высота ступенек пропорциональна концентрации анализируемого элемента. Таким образом, облучая пробу протонами с энергией ниже и выше одного из конкретных резонансов данного элемента, можно получить информацию о его количественном содержании. Данный способ анализа был применен для определения содержания лития и бора. Чувствительности определения приведены в таблице.

Поступило в Редакцию 6/IV 1970 г.
В окончательной редакции 4/V 1970 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. П. Калинин, А. А. Оглоблин, Ю. М. Петров. «Атомная энергия», 2, 171 (1957).
2. H. Rommel. *Analyt. chim. acta*, 34, 427 (1966).
3. C. Engelman, G. Cabane. *International conference, Modern trends in activation analysis*. USA, Texas, College Station, 331 (1965).
4. T. Nozaki et al. *Nature*, 190, 4770, 45 (1961).
5. K. Saito et al. *Int. J. Appl. Rad. and Isotopes*, 14, 357 (1963).
6. С. С. Васильев и др. «Атомная энергия», 25, 328 (1968).
7. С. С. Васильев и др. «Заводск. лаборатория», № 3, 299 (1969).

Получение интенсивных потоков нейтронов больших энергий на циклотроне при бомбардировке толстых мишеней из лития и бериллия дейтонами с энергией 22 *Мэв*

В. К. ДАРУГА, Н. Н. КРАСНОВ

УДК 621.384.633

В работе [1] приведены данные о выходе, энергетическом и угловом распределениях нейтронов при реакции $Li + d$. Показано, что бомбардировка дейтонами толстой мишени из вещества с малым z дает достаточно интенсивный поток нейтронов с энергией

10 *Мэв* и выше, пригодный для решения некоторых практических задач нейтронной физики и техники.

При обработке результатов в работе [1] была использована характеристика детектора $ZnS(Ag) +$ флюксиглас, взятая из работы [2]. Последующая проверка