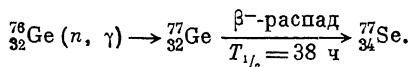
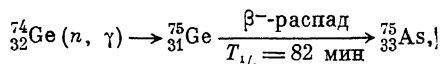
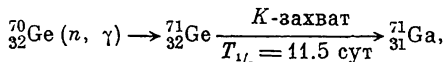


## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ НЕЙТРОННО-ТРАНСМУТАЦИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ ГЕРМАНИЯ

А. Н. Ионов, М. Н. Матвеев, Д. В. Шмигль

Метод нейтронно-трансмутационного легирования (НТЛ) германия, в котором примесные атомы образуются в результате ядерных трансмутаций атомов самого вещества, имеет преимущества перед металлургическими методами легирования в расплаве благодаря более высокой степени пространственной однородности в распределении примесей.

При облучении природного германия нейтронами основной вклад в легирование дают реакции типа  $(n, \gamma)$  по следующим схемам [1]:



При этом концентрация введенных примесных атомов определяется как

$$N_{\text{НТЛ}} = \varphi t \sum_i N_i \sigma_i^0 + \Delta N_p, \quad (1)$$

где  $N_i$  и  $\sigma_i^0$  — концентрация ядер  $i$ -изотопа и его сечение поглощения нейтрона,  $\varphi$  — плотность нейтронов в единицу времени с учетом эффективной нейтронной температуры,  $t$  — время экспозиции.

Хотя спектр реакторных нейтронов охватывает широкий диапазон энергий (от 1 до 10 МэВ), основной вклад в легирование дают тепловые нейтроны с энергией 0.025 эВ при  $T=300$  К, поэтому значение  $\sigma_0$ , как правило, приводится для тепловых нейтронов. Второе слагаемое  $\Delta N_p$  представляет собой вклад от быстрых (надкадмиевых) нейтронов и обусловлен в основном резонансным поглощением ядер соответствующих изотопов. Эта добавка зависит от отношения потока тепловых нейтронов к быстрым и, следовательно, может несколько отличаться для различных типов реакторов.

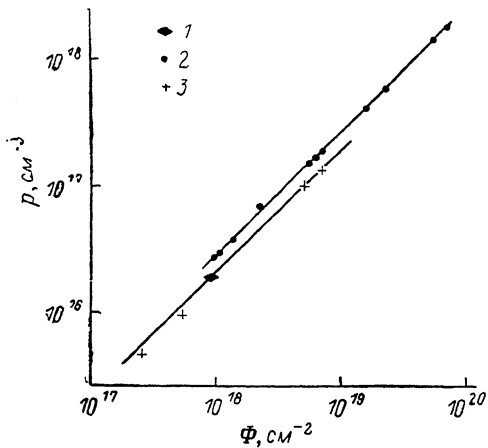
Точность попадания в заданный номинал концентраций примеси зависит от точности значений величин  $N_i$ ,  $\varphi$ ,  $t$ ,  $\sigma_0$ . Современный масс-спектрометрический анализ позволяет определить процентный изотопный состав полупроводника с относительной погрешностью, в ряде случаев меньше чем 1 %. Полученный образцами абсолютный интегральный поток  $\Phi = \varphi t$  по тепловым нейтронам определяется с точностью 5 % благодаря мониторам, хотя относи-

**Содержание изотопа (в %) и сечения поглощений (активаций) в барнах**

Композиции	${}^{70}_{32}\text{N}$	${}^{70}\sigma$	${}^{74}_{32}\text{N}$	${}^{74}\sigma$	${}^{76}_{32}\text{N}$	${}^{76}\sigma$	Литературные ссылки
1 (природный германий)	$20.64 \pm 0.23$	3.25	$36.78 \pm 0.32$	0.60	$7.74 \pm 0.03$	0.35	[7]
		$(3.42 \pm 0.35)$		$(0.143 \pm 0.016)$		[8]	
		3.4		0.62		[9]	
		$(3.45 \pm 0.16)$		$(0.20 \pm 0.02)$		[8]	
		3.68		0.45		0.20	[10]
				$(0.550 \pm 0.055)$		[8]	
2 (обогащенный)	$0.61 \pm 0.10$	$3.4 \pm 0.3$	$97.8 \pm 1.0$	$0.62 \pm 0.06$	$0.41 \pm 0.05$	$0.36 \pm 0.07$	[8]
		$3.43 \pm 0.23$		$0.383 \pm 0.074$		$0.142 \pm 0.03$	[11]
		$3.3 \pm 0.3$		$0.60 \pm 0.06$		$0.35 \pm 0.07$	[12]
		$3.43 \pm 0.02$		$0.51 \pm 0.08$		$0.15 \pm 0.02$	[13]
3 (обогащенный)	$10.9 \pm 0.3$		$66.5 \pm 0.6$		$4.0 \pm 1.0$		

тельное изменение потока можно определить с меньшей погрешностью, если за время облучения мощность реактора не меняется. В то же время значения сечений поглощения и активации, полученные различными авторами, варьируются в широких пределах, что не позволяет получить заданный уровень легирования с приемлемой точностью (см. таблицу).

Целью настоящей работы является определение коэффициентов нейтронного легирования примесями германия по измерению холловской концентрации нескомпенсированных носителей тока у природного германия и обогащенного  $^{74}\text{Ge}$  до 97.8 %, облученных одним и тем же интегральным потоком нейтронов. Изотопный состав обогащенного германия был измерен на двух масс-спектрометрических установках: магнитном и типа масс-рефлектор. Обе серии измерений дали близкие результаты. Облучение проводилось как полным реакторным спектром на реакторе типа ВВР с отношением потока быстрых к тепловым, равным 0.1, так и только надкадмиевыми нейтронами, т. е. с энергией больше 0.4 эВ. Интегральный поток был выбран таким, чтобы, с одной стороны, концентрация введенной примеси значительно превышала исходную ( $10^{13} \text{ см}^{-3}$ ), с другой — чтобы холловское напряжение определялось с небольшой погрешностью.



Зависимость концентрации дырок от интегральной дозы тепловых нейтронов.

1 — доза по монитору; 2, 3 — дозы, определенные как  $\Phi = \varphi t$  в различных каналах реактора.

$T=450^\circ\text{C}$ ) в вакууме. В результате были получены серии образцов с проводимостью  $n$  и  $p$ -типов (соответственно обогащенный и природный Ge). Холловская концентрация нескомпенсированных носителей, определенная по  $n=1/R_x$  в пределе слабого магнитного поля (где  $R_x$  — постоянная Холла), составляла:  $n=2.99 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и  $p=1.85 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  при облучении реакторным спектром (р. с) и  $n=2.85 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ,  $p=1.84 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  при облучении тепловыми нейтронами (г. н).

Строго холловскую концентрацию следует определять с учетом Холл-фактора  $n=r/R_x$ . Согласно теоретическим представлениям,  $r=f(N_D, N_A)$  и, следовательно,  $r=f(\Phi)$ . Однако относительно величины  $r$  имеются расхождения. Так, согласно [4], при  $n=10^{16} \text{ см}^{-3}$  и  $T=77 \text{ K}$  предсказывается  $r=0.88$ , в то время как в [5]  $r=1.0$ . Наши исследования показали, что при  $T=300 \text{ K}$   $r$  с точностью до 5 % не зависит от  $\Phi$  как для природного, так и обогащенного Ge вплоть до тех концентраций, где теория предсказывает  $r=1$  (см. рисунок). Аналогичные выводы были ранее сделаны в [6].

Полученные значения для концентраций нескомпенсированных носителей позволяют написать систему уравнений

$$\begin{aligned} N_{\text{Ge}}\Phi ({}^{74}\sigma_{{}^{74}\text{N}_1} + {}^{76}\sigma_{{}^{76}\text{N}_1} - {}^{70}\sigma_{{}^{70}\text{N}_1}) &= n r_n, \\ N_{\text{Ge}}\Phi ({}^{70}\sigma_{{}^{70}\text{N}_2} - {}^{76}\sigma_{{}^{76}\text{N}_2} - {}^{74}\sigma_{{}^{74}\text{N}_2}) &= p r_p \end{aligned} \quad (2)$$

и определить сечения  ${}^{70}\sigma$  и  ${}^{74}\sigma$ , полагая, что  $r$  не сильно отличается от 1 ( $r=1.00 \pm 0.05$ ). Хотя вклады в легирование от  ${}^{76}\text{Ge}$  в природном и тем более в обогащенном германии незначительны, мы их все же учитывали, приписывая сечению усредненное значение  $0.27 \pm 0.09$  б из [1, 7-13] и полагая, что селен в германии образует один уровень [14]. Таким образом, были получены следующие значения для сечений поглощений: а)  ${}^{74}\sigma_{\text{p.c.}}=(0.802 \pm 0.06)$  б и  ${}^{70}\sigma_{\text{p.c.}}=(3.82 \pm 0.20)$  б, б)  ${}^{74}\sigma_{\text{г.н.}}=(0.76 \pm 0.06)$  б и  ${}^{70}\sigma_{\text{г.н.}}=(3.73 \pm 0.20)$  б. Полученное значение для

$^{70}\text{Ge}$  совпадает со значениями, полученными в ядерных экспериментах [8, 10-12], в то же время значение для  $^{74}\text{Ge}$  несколько больше.

Требования к абсолютным значениям становятся более жесткими, когда в результате НТЛ компенсация  $K = N_{\text{неосн}}/N_{\text{осн}} \rightarrow 1$ , поэтому для проверки полученных результатов была пролегирирована реакторными нейтронами третья композиция германия (см. таблицу). Такая изотопная композиция при определенных нами  $^{70}\text{Ge}$  и  $^{74}\text{Ge}$  должна иметь  $K = 0.77$ , проводимость  $n$ -типа и концентрацию носителей  $(6.7 \pm 1.5) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  при облучении  $\Phi = (1.0 \pm 0.1) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ . После отжига радиационных дефектов образцы получились действительно  $n$ -типа с  $n = 8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , что удовлетворительно согласовалось с расчетом. В то же время подстановка значений из [13], где приведена наименьшая погрешность для сечений, приводила даже к  $p$ -типу, что противоречило эксперименту и указывало на заниженное отношение  $^{74}\text{Ge}/^{70}\text{Ge}$ .

Таким образом, мы получили следующие коэффициенты для НТЛ природного германия при облучении его тепловыми нейтронами:

$$^{70}\text{Ge}(n, \gamma) N_{\text{Ga}} = (3.4 \pm 0.22) \cdot 10^{-2} \Phi,$$

$$^{74}\text{Ge}(n, \gamma) N_{\text{As}} = (1.24 \pm 0.10) \cdot 10^{-2} \Phi,$$

$$^{76}\text{Ge}(n, \gamma) N_{\text{Se}} = (9.2 \pm 3.2) \cdot 10^{-4} \Phi$$

с результирующей концентрацией носителей  $p = (2.06 \pm 0.24) \cdot 10^{-2} \Phi$  и компенсацией  $K_{\text{т.н}} = 0.39 \pm 0.04$ . Полученная компенсация полностью совпадает с результатом, приведенным в [15], и не совпадает с результатом работы [16], где значение  $K = 0.30 \pm 0.05$  определялось по динамике изменения концентрации носителей тока по мере трансмутации атомов Ge. Это несоответствие, по-видимому, обусловлено тем, что в [16] перед измерениями концентрации в процессе распада не проводился отжиг радиационных дефектов, обусловленных  $\beta$ -распадом изотопов германия.

Авторы выражают благодарность И. С. Шлимаку за полезное обсуждение результатов.

### Литература

- [1] Ларк-Горовиц К. // Полупроводниковые материалы. М.: ИЛ, 1954. С. 62—95.
- [2] Беда А. Г., Вайнберг В. В., Воробкало Ф. М., Зарубин Л. И. // ФТП. 1981. Т. 15. Вып. 8. С. 1546—1549.
- [3] Рывкин С. М., Кожух М. Л., Трунов В. А., Шлимак И. С. // Тр. Междунар. конф. по радиационной физике полупроводников и родственных материалов. Тбилиси, 1978. С. 123.
- [4] Бабич В. М., Баранский П. И., Даховский И. В., Самойлович А. Г. // УФЖ. 1969. Т. 14. № 3. С. 418—422.
- [5] Даховский И. В., Левинзон Д. И., Шершель В. А. // ФТП. 1969. Т. 3. Вып. 7. С. 1067—1068.
- [6] Емцев В. В. Автореф. канд. дис. Л., 1974.
- [7] Cleland J. W., Lark-Horovitz K., Pigg J. C. // Phys. Rev. 1950. Vol. 78. P. 814—815.
- [8] Меднис И. В. Справочные таблицы для нейтронно-активационного анализа. Рига: Зинатне, 1974. 412 с.
- [9] Schweinler H. C. // J. Appl. Phys. 1959. Vol. 30. P. 1125—1126.
- [10] Thomas H. C., Covington B. // J. Appl. Phys. 1975. Vol. 46. P. 4541—4544. Ibid. 1977. Vol. 48. P. 3434—3438.
- [11] Mughabghab S. F., Garbei D. E. Neutron cross sections. New York, 1973. 325 p.
- [12] Справочник по ядерной физике. М.: Физматгиз, 1963. 257 с.
- [13] Mughabghab S. F., Divadeenam M., Holden N. E. // Neutron cross sections. New York, 1981. Vol. 1. Pt A. P. 1—60.
- [14] Осипьян Ю. А., Прокопенко В. М., Тальянский В. И. // ЖЭТФ. 1984. Т. 87. Вып. 1 (7). С. 269—278.
- [15] Нейтронное трансмутационное легирование полупроводников / Под ред. Дж. Миза. М.: Мир, 1982. 264 с.
- [16] Забродский А. Г. // Письма в ЖЭТФ. 1981. Т. 33. Вып. 5. С. 258—262.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе АН СССР  
Ленинград

Поступило в Редакцию  
6 мая 1988 г.