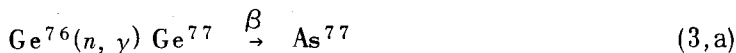
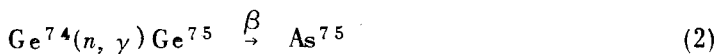
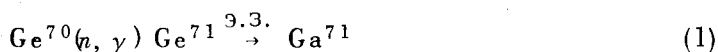


ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ КОМПЕНСАЦИИ НЕЙТРОННО ЛЕГИРОВАННОГО ГЕРМАНИЯ

А.Г.Забродский

Предложен и реализован "полупроводниковый" метод решения проблемы определения степени компенсации нейтронно легированного германия.

1. Как установлено в работах Ларк-Горовица (см., например, [1]), нейтронное легирование Ge при облучении медленными реакторными нейтронами состоит в вызванной реакциями (n, γ) радиационного захвата трансмутации изотопов Ge^{70} , Ge^{74} , и Ge^{76} с образованием электрически активных примесей Ga, As и Se:



Интерес к такому способу легирования Ge обусловлен высокой однородностью распределения введенных облучением примесей, возможностью точной дозировки уровня легирования и независимостью от этого уровня соотношения между количеством донорных $N_D = N_{\text{As}} + 2N_{\text{Se}}$ (Se^{77} — двухзарядный центр) и акцепторных $N_A = N_{\text{Ga}}$ состояний, т. е. постоянством стационарной степени компенсации

$$K = (N_{\text{As}} + 2N_{\text{Se}}) / N_{\text{Ga}} \quad (4)$$

Однако, до сих пор неизвестно, какова эта компенсация, поскольку в литературе для изотопов Ge известны лишь сечения поглощения тепловых нейтронов, да и то недостаточно точно. Так, если даже предполагать, что при наличии хорошего замедлителя легирование обусловлено лишь тепловыми нейтронами, то разброс сечений для них, взятых из разных источников [2 – 5] с учетом приведенной в них погрешности приводит к широкой области возможных значений K : $50\% \gtrsim K \gtrsim 17\%$. Идея настоящей работы состоит в решении проблемы определения K чисто "полупроводниковым" способом — из анализа кинетики нейтронного легирования Ge.

2. Кинетика эта определяется периодом полураспада T изотопов Ge^{71} , Ge^{75} , Ge^{77} и As^{77} . Наибольший период у Ge^{71} и составляет по разным данным от 10,5 до 12,5 суток [6]. У Ge^{75} $T = 82$ мин [2 – 5], а скорость реакции (3) лимитируется реакцией (3,б) с $T = 38,8$ час [5]. Поэтому в результате облучения вначале образуются доноры (As и затем Se) и

лишь по прошествии времени $t = t_0$ порядка нескольких суток после начала облучения количество акцепторной примеси N_A достигает N_D . Если исходная концентрация нескомпенсированных носителей в Ge много меньше N_D , то $K(t) \rightarrow 1$ и при $t = t_0$ должна произойти $n \rightarrow p$ -конверсия, $t \rightarrow t_0$.

после чего компенсация будет убывать со временем, асимптотически приближаясь к своему стационарному значению $K(4)$.

Будем интересоваться достаточно большими временами $t \geq t_0$, когда пройдут реакции (2) и (3,а) и, в основном, реакция (3,б). Концентрация еще не возникших по (3,б) донорных состояний в моменте t_0 , по нашей оценке, не превышает $0,01 N_D$. Таким образом, при $t \geq t_0$ в случае полной ионизации акцепторов зависимость от времени концентрации дырок $p(t)$ в валентной зоне p-Ge определяется лишь скоростью образования Ga, т.е. периодом $T_{Ge^{71}}$. Будем также полагать, что время облучения $t_1 \ll T_{Ge^{71}}$. В этом случае распадом Ge^{71} в ходе облучения можно пренебречь и при $t \geq t_0$:

$$p(t) = N_A [1 - \exp(-\lambda t)] - N_D, \quad (5)$$

где $\lambda = \ln 2 / T_{Ge^{71}}$ — постоянная распада.

Поскольку в момент конверсии $p(t_0) = 0$, то

$$K = 1 - \exp(-\lambda t_0). \quad (6)$$

Прямому использованию полученной нами формулы (6) мешает большая погрешность величины λ . Покажем, как можно другим способом определить K , попутно существенно уточнив величину λ . Если концентрацию дырок находить из измерений эффекта Холла, то, как известно,

$$p(t) = r/qR(t), \quad (7)$$

где r — холл-фактор, который в области слабого легирования при фиксированной температуре не зависит от p и N_A , так как от них не зависит механизм рассеяния дырок; $q = |e|$, где e — заряд электрона; $R(t)$ — коэффициент Холла. Обозначим:

$$R \equiv \lim_{t \rightarrow \infty} R(t) = r/qN_A(1 - K). \quad (8)$$

Из (5), (7) и (8) получаем, что

$$\ln \{ q^{-1} [R^{-1} - R^{-1}(t)] \} = \ln(N_A/r) - \lambda t. \quad (9)$$

Обрабатывая экспериментальные результаты по формуле (9), можно, во-первых, найти точное значение λ , а, во-вторых, отношение N_A/r и далее по (8) определить K .

3. В силу замечания о величине r и из требования малой активности исследуемых образцов, т. е. малости N_D и N_A , для экспериментов был взят сверхчистый Ge. Облучение велось в канале реактора ЛИЯФ АН СССР, где отношение потока тепловых нейтронов к потоку быстрых с энергией $E \gtrsim 0,5$ МэВ составляло $30 + 50$. Радиационные дефекты отжигались при температуре 450°C [1] в течение $7 + 12$ час с последующим медленным охлаждением, чтобы не ввести термодфекты. Предварительно с этой же целью на поверхность образцов наносилось геттерирующее покрытие, которое сошлифовывалось после отжига. Хололовская ЭДС измерялась при температуре $77,4$ К с погрешностью, не превышавшей $0,3\%$. Результаты двух опытов сведены в таблицу. Как видно из нее, параметр λt_1 в нашем случае, действительно, весьма мал и N_A соответствует слабому уровню легирования.

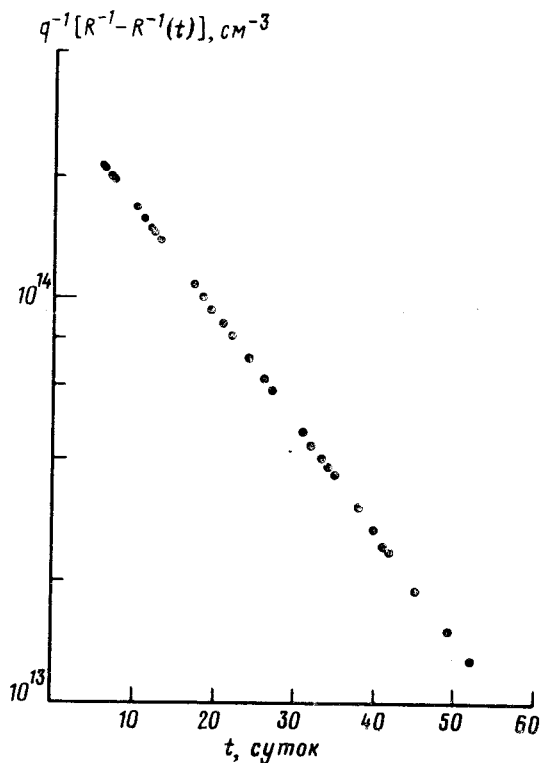


Рис. 1. Обработка экспериментальных данных для образца №2 в соответствии с формулой (9)

№ образца	$T_{\text{Ge}71}$ суток	K из (8),(9), %	t_0 суток	K из (6) %	λt_1	N_A/r , cm^{-3}
1	11,44	30,3	5,85	29,9	0,0008	$1,06 \cdot 10^{14}$
2	11,42	30,4	5,82	29,7	0,0013	$3,04 \cdot 10^{14}$

На рис. 1 показана обработка данных для одного из образцов по (9). Уточненный таким образом период полураспада $T_{\text{Ge}71} = 11,43 \pm 0,09$ суток. Определенная по (8), (9) величина $K = 30,3\%$.

Рис. 2. иллюстрирует изменение концентрации основных носителей в n - и p -Ge (отнесенной к величине соответствующего холл-фактора) вблизи $n \rightarrow p$ -конверсии. Наблюдаемый "провал" связан с тем, что уровень Ферми последовательно проходит через глубокие уровни Se. Моменту конверсии соответствует правая стенка "провала": $t_0 = 5,84 \pm 0,05$ суток. Подставляя это значение t_0 и определенный выше период T_{Ge71} в (6), находим, что $K = 29,8\%$.

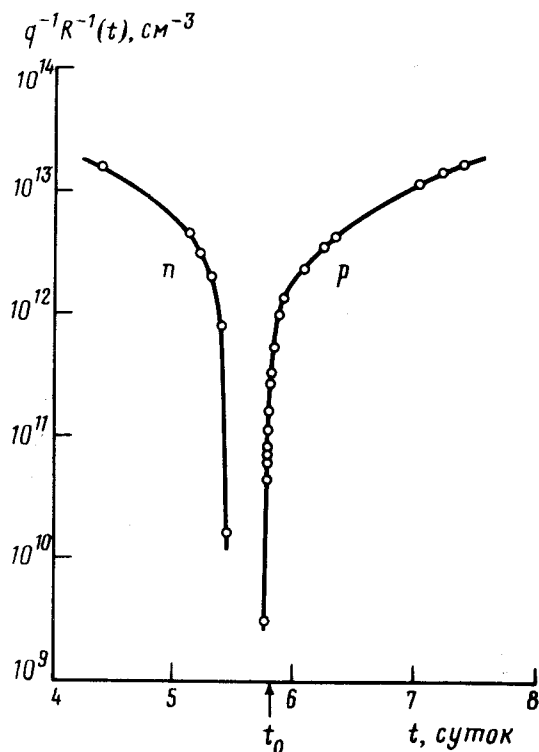


Рис. 2. Изменение концентраций основных носителей в n - и p -Ge вблизи $n \rightarrow p$ -конверсии в образце №2

Как видно, в двух опытах оба способа дали близкие результаты. Погрешность первого способа определяется точностью холловских измерений, а второго — погрешностями λ и t_0 . В обоих случаях абсолютная погрешность ΔK оказывается порядка $\pm 0,5\%$, а относительная $\Delta K/K \approx 0,02$.

Автор признателен С.М.Рывкину за поддержку работы и обсуждение результатов на руководимом им семинаре, Р.Ф.Коноплевой и В.В.Евсееву — за содействие в облучении, И.А.Измайловой — за помощь в некоторых технологических операциях.

Литература

- [1] К.Ларк-Горовиц. Сб. Полупроводниковые материалы. М., изд. ИЛ, 1954, стр. 62.
- [2] Р.Юз, Р.Шварц. Атлас нейтронных сечений, М., Атомиздат, 1959.
- [3] S.F.Mughabhab, D.E.Garber. Neutron cross sections I. New-York, Upton, 1973.
- [4] Brockhaus abc Physik, Leipzig, 1973.
- [5] H.C.Thomas, B.Covington. J. Appl. Phys., 46, 454, 1975.
- [6] Б.С.Джелепов, Л.К.Пекер. Схемы распада радиоактивных ядер, $A < 100$. М.-Л., изд. Наука, 1966.
-