

ПОДВИЖНОСТЬ ДЫРОК В ГЕРМАНИИ, ТРАНСМУТАЦИОННО ЛЕГИРОВАННОМ НАДКАДМИЕВЫМИ НЕЙТРОНАМИ

О.П. Ермолаев¹⁾, Т.Ю. Микульчик¹⁾, С.А. Хахим²⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Ф. Скорины, 4, 220050, Минск, Беларусь, тел. +375 172265774 (e-mail: ermolaev@bsu.by)

²⁾Physics Department, Faculty of Science, Beny Suief Branch, Cairo University, Beny Suief, Egypt, (e-mail: samy11@main-scc.cairo.eun.eg)

Исследовалась холловская подвижность дырок в германии, трансмутационно легированном надкадмиевыми (быстрыми) нейтронами. Экспериментальные данные сравнивались с данными для германия, трансмутационно легированного тепловыми нейтронами. Анализ концентрационной зависимости подвижности дырок показал, что величина подвижности дырок в германии, трансмутационно легированном надкадмиевыми (быстрыми) нейтронами, меньше, чем в германии, трансмутационно легированном тепловыми нейтронами. При сопоставлении экспериментальных данных со значениями подвижности дырок, рассчитанными с помощью теоретической зависимости изменения подвижности носителей заряда, при рассеянии на ионизованных примесях, установлено, что наблюдаемое количественное различие нельзя объяснить большей степенью компенсации в германии, трансмутационно легированном надкадмиевыми (быстрыми) нейтронами.

Предполагается, что меньшее значение подвижности дырок в германии, трансмутационно легированном надкадмиевыми (быстрыми) нейтронами, обусловлено присутствием в объеме материала радиационных дефектов, устойчивых к длительному высокотемпературному отжигу. Делаются предположения о составе радиационных дефектов.

Введение

Метод трансмутационного легирования полупроводников привлекает внимание исследователей в связи с высокой точностью легирования и высокой однородностью распределения примесей. В результате трансмутационного легирования получается германий р-типа проводимости (основной примесью является галлий), причем степень компенсации (К) определяется энергетическим спектром реакторных нейтронов и его жесткостью [1]. Наличие в реакторном спектре быстрых нейтронов приводит к появлению в материале радиационных дефектов (РД), которые обычно удаляют длительным высокотемпературным отжигом, что является сложной технологической задачей, т. к. РД образуют комплексы с примесями, содержащимися в материале. В работах [2,3] сообщалось о существовании в германии, трансмутационно легированном надкадмиевыми (быстрыми) нейтронами, РД, устойчивых к длительному высокотемпературному отжигу.

Подвижность носителей заряда определяется как структурой материала, так и присутствием в нем примесей или дефектов. Исследование температурной и концентрационной зависимостей подвижности дырок в германии, трансмутационно легированном надкадмиевыми нейтронами, ранее не проводилось. Настоящая работа посвящена изучению подвижности дырок в германии, трансмутационно легированном надкадмиевыми нейтронами.

Методика эксперимента

Нами исследовались образцы нелегированного германия с концентрацией электронов $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Образцы облучались различными флюенсами реакторных нейтронов, при этом поток быстрых нейтронов с энергией $E > 0.1 \text{ МэВ}$ изменялся $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2} < \Phi_f < 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$. Для отсеки медленного компонента реакторного спектра нейтронов ($E < 0.5 \text{ эВ}$) и для ослабления факторов, связанных с ядерным легированием тепловыми нейтронами, образцы облучались в кадмиевых пеналах с тол-

щиной стенок 0.5 мм. При облучении отношение флюенсов тепловых и быстрых нейтронов было около 10. После облучения образцы подвергались отжигу в течение 24 часов при температуре $+450 \text{ }^\circ\text{C}$. Удельное сопротивление (ρ) и коэффициент Холла (R_H) измерялись в интервале температур $10 \text{ К} < T < 300 \text{ К}$. Концентрация основной примеси определялась по величине концентрации носителей заряда, полученной из измерений эффекта Холла.

Экспериментальные результаты

На рис. 1 представлены температурные зависимости холловской подвижности дырок ($\mu = R_H/\rho$) в германии, трансмутационно легированном надкадмиевыми и тепловыми нейтронами. При $100 \text{ К} < T < 300 \text{ К}$ подвижность дырок подчиняется закону $\mu \sim T^{-1.5}$, и обуславливается рассеянием на акустических колебаниях решетки [4]. С уменьшением температуры происходит постепенный переход от рассеяния на колебаниях решетки к рассеянию на ионизованных примесях, и подвижность дырок описывается

$$\frac{1}{\mu} \approx \frac{1}{\mu_L} + \frac{1}{\mu_I} \quad (1)$$

где μ_I – подвижность дырок, обусловленная рассеянием на ионизованных примесях. Согласно [5] подвижность носителей заряда, обусловленная рассеянием на ионизованных примесях, определяется как

$$\mu_I = \frac{5}{2} \left(\frac{4\pi}{3} \right)^{1/3} \frac{\hbar (4\pi e)^2 k_B T}{e^3 m Z^2 N^{2/3} F(\gamma)} \quad (2)$$

где

$$F(\gamma) = 8 \int_0^{\gamma} (\sin^4 y / y) dy, \quad (3)$$

$$\gamma = \hbar^{-1} (3/4\pi N)^{1/3} (5m k_B T)^{1/2}$$

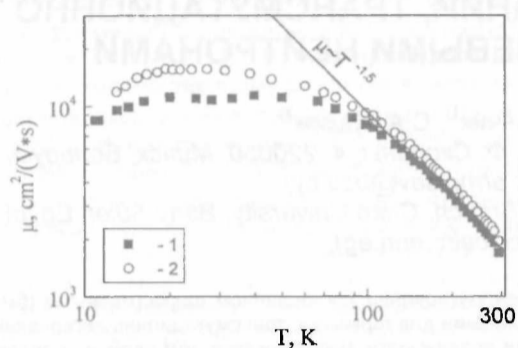


Рис. 1. Температурные зависимости подвижности дырок в германии, трансмутационно легированном надкадмиевыми (1) и тепловыми (2) нейтронами.
 $N_{Ga} = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$

где $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$, ε_r - диэлектрическая проницаемость, ε_0 - электрическая постоянная вакуума, k_B - постоянная Больцмана, e - заряд электрона, m - эффективная масса носителей тока, Z - заряд иона примеси, N - концентрация ионов, $\beta = 24mk_B T (L_S/\hbar)^2$, \hbar - постоянная Планка, L_S - радиус экранирования электростатического поля каждого иона. Если в материале присутствуют несколько типов рассеивающих центров, то

$$Z^2 N^{2/3} \rightarrow \sum_j \sum_z [z_j]^2 N_{jz} \left[\sum_j \sum_{z \neq 0} N_{jz} \right]^{1/3} \quad (4).$$

На рис. 2 представлены концентрационные зависимости подвижности дырок в германии, трансмутационно легированном надкадмиевыми и тепловыми нейтронами, при температурах 77 К и 300 К.

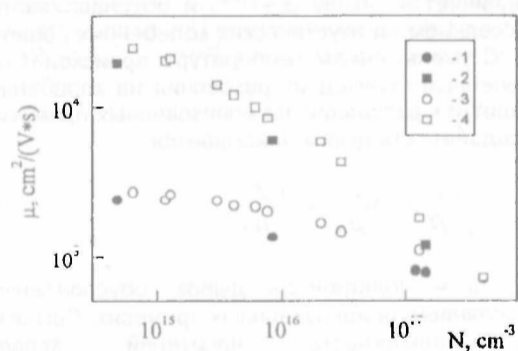


Рис. 2. Зависимость подвижности дырок от концентрации примесей при $T=77$ К и 300 К. 1, 2 - данные настоящей работы; 3, 4 - данные работы [6], скорректированные с учетом того, что $K=0.3$

Как видно из рис. 2, подвижность дырок в германии, трансмутационно легированном надкадмиевыми нейтронами, меньше, чем в германии, трансмутационно легированном тепловыми нейтронами. Однако при $T=300$ К различие в величине подвижности дырок меньше, чем при $T=77$ К.

Вклад рассеяния на ионизованных примесях в изменение подвижности дырок при $T=77$ К больше, чем при $T=300$ К. Согласно (2), (4) подвижность дырок, обусловленная рассеянием на ионизованных примесях, зависит концентрации рассеивающих центров и от их компенсации.

Как известно [1], степень компенсации в германии, трансмутационно легированном надкадмиевыми нейтронами ($K \approx 0.5$), превышает степень компенсации в германии, трансмутационно легированном тепловыми нейтронами ($K \approx 0.3$). Следовательно, наблюдаемое различие в величине подвижности дырок может быть связано с различной степенью компенсации. Согласно оценкам по формулам (2), (4) увеличение степени компенсации от 0.3 до 0.5 должно уменьшить величину подвижности дырок примерно на 10%. Однако, нами установлено, что экспериментальное различие в величине подвижности дырок в германии, трансмутационно легированном надкадмиевыми и тепловыми нейтронами, превышает оценку с помощью формул (2), (4) в 2-3 раза. Таким образом, при сравнении экспериментальных данных подвижности дырок со значениями подвижности дырок, рассчитанных по формулам (2), (4) обнаружено, что различие в величине подвижности дырок в германии, трансмутационно легированном надкадмиевыми и тепловыми нейтронами, при $T=77$ К и 300 К нельзя объяснить лишь увеличением степени компенсации. Как показали наши исследования, с увеличением концентрации примеси, а, значит, и флюенса нейтронов, различие в величине подвижности дырок увеличивается. Следовательно, одной из возможных причин наблюдаемого эффекта может быть введение при облучении быстрыми нейтронами РД, устойчивых к длительному высокотемпературному отжигу.

При исследовании низкотемпературной фотолюминесценции германия, трансмутационно легированном надкадмиевыми нейтронами, было установлено существование РД, устойчивых к длительному высокотемпературному отжигу [2]. Различными методами исследования показано, что в состав РД не входят атомы исходных легируемых примесей (Sb, As) [2, 7-9].

Известно, что даже в кристаллах высокочистого германия содержатся в значительных концентрациях такие неконтролируемые остаточные примеси как водород ($\approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$), кислород ($\approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$) и другие, играющие активную роль в образовании РД.

Установлено [10], что водород может растворяться в решетке германия в электрически неактивном состоянии в концентрациях $\geq 10^{16} \text{ см}^{-3}$. При этом он насыщает оборванные связи вблизи несовершенств кристаллической решетки. Вакансии и (или) межузельные атомы германия, образующиеся при облучении γ -квантами, могут взаимодействовать с примесью водорода, образуя электрически активные дефекты.

Так как облучение германия быстрыми нейтронами приводит к смещению собственных атомов германия и атомов исходных примесей в междоузлия [11], то возможен такой же процесс и

в германии, облученном быстрыми нейтронами. Следовательно, увеличится концентрация рассеивающих центров, а, значит, согласно (2) подвижность дырок должна уменьшиться, что и наблюдается в эксперименте.

Исследуемые образцы подвергались высокотемпературному отжигу при $T=450\text{ }^{\circ}\text{C}$, а это может приводить к образованию термических дефектов, в состав которых входят атомы кислорода. Так, например, при температурной обработке в интервале $300\div 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ в германии были обнаружены центры донорного типа, концентрация которых зависела от количества кислорода, присутствующего в исходных материалах [12]. При сравнении спектров фотолюминесценции при $T=4.2\text{ K}$ германия, легированного сурьмой с концентрацией $N_{\text{Sb}}=2\times 10^{14}\text{ см}^{-3}$ и с концентрацией кислорода менее $5\times 10^{15}\text{ см}^{-3}$, до и после длительного отжига (до 300 ч) при температурах $300\div 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ существенного изменения спектрального состава и интенсивности излучения не установлено [13]. Следовательно, можно предположить, что отжиг при $T=450\text{ }^{\circ}\text{C}$ не приводит к образованию термодоноров в значительных концентрациях в исследуемом нами материале.

Выводы

Исследовалась холловская подвижность дырок в германии, трансмутационно легированном надкадмиевыми нейтронами. Анализировались концентрационные зависимости подвижности дырок в германии, трансмутационно легированном надкадмиевыми и тепловыми нейтронами, при $T=77\text{ K}$ и 300 K . Обнаружено, что величина подвижности дырок в германии, трансмутационно легированном надкадмиевыми нейтронами, меньше, чем в германии, трансмутационно легированном тепловыми нейтронами, при обоих температурах. Сравнение экспериментальных данных со значениями подвижности дырок, рассчитанными с помощью теоретической зависимости изменения

подвижности дырок, обусловленной рассеянием на ионизованных примесях, показало, что наблюдаемое количественное различие не объясняется большей величиной степени компенсации в германии, трансмутационно легированном надкадмиевыми нейтронами, за счет увеличения относительного выхода примеси селена. Предполагается, что причиной количественного различия может служить наличие в объеме материала различных РД, устойчивых к длительному высокотемпературному отжигу. Одним из видов РД могут быть, например, комплексы атомов водорода с вакансиями или межузельными атомами, образующимися при облучении германия быстрыми нейтронами.

Список литературы

1. Забродский А.Г., Алексеев М.В. // ФТП. – 1994. – Т. 28, №1. – С. 168.
2. Добрего В.П., Ермолаев О.П. // ФТП. – 1980. – Т. 14, №6. – С. 1120.
3. Ермолаев О.П. // ЖПС. – 1997. – Т. 64, №4. – С. 479.
4. Ehrenreich H., Overhauser A.W. // Phys. Rev. – 1956. – V.104, N3. – P. 649.
5. Poklonski N. A., Denisenko A. V., Lopatin S. Yu., Siaglo A. I. // phys. stat. sol. (b). – 1998. – V. 206, N 1. – P. 713.
6. Fritzsche H, Cuevas M. // Phys. Rev. – 1960. – V. 119. – P. 1238.
7. Добрего В.П., Ермолаев О.П. // ФТП. – 1977. – Т. 11, №10. – С. 1946.
8. Быковский В.А., Мудрый А.В., Поскребышев В.П., Ткачев В.Д. // ФТП. – 1983. – Т. 17, №8. – С. 1510.
9. Вукоский В.А., Долгих Н.И., Емтсев В.В. // Rad. Effects. – 1989. – V. 107, N 2-4. – P. 85.
10. Емцев В.В., Машовец Т.В., Назарян Е.Х., Халлер Е.Е. // ФТП. – 1982. – Т. 16, №2. – С. 291.
11. Ермолаев О.П. // ФТП. – 1994. – Т. 28, №11. – С. 2021.
12. Kaiser W., Frisch H.L., Reiss H. // Phys. Rev. – 1959. – V.112, N9. – P. 1546.
13. Быковский В.А., Мудрый А.В., Поскребышев В.П. // ФТП. – 1982. – Т. 16, №2. – С. 351.

HOLE MOBILITY IN GERMANIUM TRANSMUTATION DOPED BY EPICADMIUM NEUTRONS

O.P. Ermolaev¹, T.Y. Mikulchuk¹, S.A. El-Hakim²

¹Belarus State University, F. Scorina Avenue 4, 220050, Minsk, Republic of Belarus,
tel: +375 172265774, e-mail: ermolaev@bsu.by

²Physics Department, Faculty of Science, Beny Suief Branch, Cairo University, Beny Suief, Egypt,
e-mail: samy11@main-scc.cairo.eun.eg

The Hall mobility of holes in germanium transmutation doped by epicadmium (fast) neutrons has been studied. Experimental data were compared with the data for germanium transmutation doped by heat neutrons. Analysis of the concentration dependences of hole mobility shows that value of hole mobility in germanium transmutation doped by epicadmium (fast) neutrons is smaller than in germanium transmutation doped by heat neutrons. Comparison of the experimental data with the value of hole mobility calculated by the use of theoretical dependence of mobility limited by the scattering on ionized centers shows that the observed discrepancy is not determined only by the higher compensation degree in germanium transmutation doped by epicadmium (fast) neutrons.

It was believed that smaller value of hole mobility in germanium transmutation doped by epicadmium (fast) neutrons is caused by the presence of residual radiation defects stable at $450\text{ }^{\circ}\text{C}$. Some assumptions about structure of these defects were made.