

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ В НЕЙТРОННО-ЛЕГИРОВАННОМ ГЕРМАНИИ НА ЭНЕРГИЮ АКТИВАЦИИ ПРЫЖКОВОЙ ПРОВОДИМОСТИ

Т.Ю. Микульчик

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

Сравнивались экспериментальные данные энергии активации ε_3 для нейтронно-легированного германия с теоретической зависимостью Шкловского-Эфроса. Обнаружено, что между экспериментальными данными и теоретической зависимостью наблюдается значительное количественное различие. Предполагается, что одной из возможных причин наблюдаемого различия может быть коррелированное распределение примесей (дефектов), неучитываемое в теории.

Введение

Как известно, при низких гелиевых температурах проводимость германия, трансмутационно легированного нейтронами, носит прыжковый характер [1-3]. При не слишком низких температурах в области прыжковой проводимости с постоянной энергией активации (ε_3) удельное сопротивление имеет вид

$$\rho = \rho_3 \exp \frac{\varepsilon_3}{kT}, \quad (1)$$

где ρ_3 - предэкспоненциальный множитель, который зависит от концентрации основной примеси (в данном случае от концентрации акцепторов N_A) и степени компенсации (K), k - постоянная Больцмана, T - температура. Энергия активации прыжковой проводимости ε_3 не зависит от температуры и имеет вид [4]

$$\varepsilon_3 = \left(\frac{e^2 N_A^{1/3}}{\chi} \right) F(K), \quad (2)$$

где e - заряд электрона, χ - диэлектрическая проницаемость, $F(K)$ - некоторая универсальная функция степени компенсации. В [4] были рассчитаны значения $F(K)$ для нескольких величин степени компенсации. Согласно [4] энергия активации ε_3 немонотонно зависит от степени компенсации, плавно достигая минимума в области умеренных компенсаций $K \approx 0.3$. Теория Шкловского-Эфроса [4] разработана для случайного распределения примесей и не учитывает возможные корреляции в распределении примесей.

Энергия активации ε_3 является чувствительной функцией концентрации примеси и степени компенсации. На величину энергии активации ε_3 влияет характер распределения примесей. Поэтому, изучая энергию активации ε_3 , можно попытаться сделать вывод о характере распределения примесей.

Неполное восстановление энергии активации ε_3 n-Ge, облученного быстрыми нейтронами после длительного отжига при $T=450^\circ\text{C}$ отмечалось

ранее [5]. В [5] в качестве одной из возможных причин было высказано предположение, что неполное восстановление энергии активации ε_3 может быть связано с возникновением некоторой корреляции в распределении примесей в результате облучения и отжига без изменения их общего числа.

В настоящее время для получения однородных материалов широко используется метод нейтронного трансмутационного легирования полупроводников. Нейтронно-легируемый германий служит удобным объектом для исследования фундаментальных проблем проводимости в примесной зоне и перехода диэлектрик-металл, а также является ведущим материалом для создания низкотемпературных термометров сопротивления и детекторов высокоэнергетических частиц. Присутствие в реакторном спектре быстрых нейтронов, длительный (24 ч) высокотемпературный отжиг ($T=450^\circ\text{C}$) могут приводить к образованию устойчивых радиационных дефектов или комплексов радиационных дефектов с технологическими примесями. В литературе имеются сообщения (напр., [6]) о существовании в германии, трансмутационно легированном надкадмиевыми (быстрыми) нейтронами, радиационных дефектов, устойчивых к длительному высокотемпературному отжигу.

Целью настоящей работы было количественно сравнить экспериментальные данные энергии активации ε_3 прыжковой проводимости для нейтронно-легированного германия с теоретической зависимостью Шкловского-Эфроса.

Методика эксперимента

Нами исследовались образцы нелегированного германия с концентрацией электронов $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и германия, легированного галлием с концентрацией $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. 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 толщиной стенок 0.5 мм. При облучении отношение флюенсов тепловых ($\Phi_{\text{т}}$) и быст-

рых нейтронов было около 10. После облучения образцы подвергались отжигу в течение 24 часов при температуре $+450^\circ\text{C}$. В результате облучения и отжига образцы стали обладать проводимостью р-типа, причем основной примесью являлся трансмутационно введенный галлий. Степень компенсации определялась из исследований постоянной Холла. Измерялось удельное сопротивление образцов в интервале температур $1.5\text{ K} < T < 4.2\text{ K}$.

Основная часть

Из наклона полученных в ходе эксперимента температурных зависимостей удельного сопротивления $\lg \rho = f(1/T)$ была определена энергия активации ϵ_3 в германии, трансмутационно легированном надкадмиевыми нейтронами. На рис. 1 представлены полученные экспериментальные данные и значения энергии активации ϵ_3 , рассчитанные в [4]. Как видно из рис. 1, значения энергии активации ϵ_3 исходных образцов германия согласуются с теоретической зависимостью, в то время как значения энергии активации ϵ_3 для германия, трансмутационно легированного надкадмиевыми нейтронами, намного меньше, чем рассчитанные по теории [4]. С увеличением степени компенсации различие увеличивается. Наблюдаемое количественное различие выходит за рамки погрешности определения энергии активации ϵ_3 .

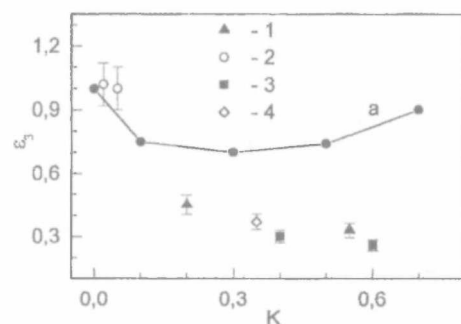


Рис. 1. Зависимость экспериментальных и расчетных значений энергии активации ϵ_3 (в единицах $e^2 N_A^{-1} / \chi$) от степени компенсации. 1 — германий, легированный надкадмиевыми нейтронами; 2 — исходные образцы; 3 — нейтронно-легированный изотопически обогащенный германий; 4 — данные из работы [8]; а — теоретическая зависимость [4]

В работе [7] исследовалось низкотемпературное инфракрасное поглощение в компенсированном $\text{Ge}(\text{Ga})$. Образцы $\text{Ge}(\text{Ga})$ были получены методом нейтронного трансмутационного легирования германия с контролируемым изотопическим составом, что позволило независимо друг от друга определять концентрацию основной (Ga) и неосновной (As) примесей. При анализе ширины спектральных линий в зависимости от концентрации ионизированных примесей было установлено, что при низких температурах распределение

ионизированных примесей является коррелированным.

Как видно из рис. 1 значения энергии активации ϵ_3 в таких материалах как в германии, легированном надкадмиевыми нейтронами, в германии, легированном тепловыми нейтронами, и в изотопически обогащенном германии, легированном методом нейтронного трансмутационного легирования, близки.

Важной характеристикой примесной зоны, описывающей корреляцию заряженных центров, является распределение внутренних электрических полей, создаваемых ионизированными донорами и акцепторами. При вычислении функции распределения электрического поля установлено, что в случае коррелированного распределения примесей наиболее вероятное поле значительно меньше поля, которое было бы при некоррелированном распределении примесей [4]. Следовательно, уменьшится величина энергии активации ϵ_3 , так как согласно определению по порядку величины она равна работе для переноса дырки с ближайшего к акцептору донора на бесконечно удаленный от него донор. Таким образом, можно предположить, что распределение примесей (дефектов) в германии, легированном надкадмиевыми нейтронами, и в германии, легированном тепловыми нейтронами, является коррелированным.

В [9,10] отмечалось, что распределение ионизированных примесей при низких температурах может быть коррелированным. Это коррелированное распределение возникает путем перераспределения электронов (дырок) среди случайно распределенных доноров (акцепторов) таким образом, что распределение ионизированных примесей является «замороженным» в состоянии с минимальной электростатической энергией [9]. Считается [7], что природа этой корреляции отличается от «технологической» корреляции, созданной в образце в процессе легирования.

Заключение

Нейтронно-легированный германий получают при облучении в реакторе, где всегда присутствует жесткая компонента энергетического спектра нейтронов. После облучения проводится длительный высокотемпературный отжиг. Это способствует образованию комплексов радиационных дефектов с технологическими примесями и может повлиять на характер распределения примесей. Экспериментальные значения энергии активации ϵ_3 для нейтронно-легированного германия сопоставлялись с теоретическими значениями энергии активации ϵ_3 , рассчитанными с помощью конструирования в памяти ЭВМ основного состояния электронов на донорах. Установлено, что между экспериментальными данными и теоретической зависимостью существует значительное количественное различие. В то же время экспериментальные значения энергии активации ϵ_3 в таких материалах как в германии, легированном надкадмиевыми нейтронами, в германии, легированном тепловыми нейтронами, и в

изотопически обогащенном германии, легированном методом нейтронного трансмутационного легирования, близки. Учитывая, что в изотопически обогащенном германии, легированном методом нейтронного трансмутационного легирования, распределение примесей является коррелированным, близость величин энергии активации ε_3 во всех исследуемых нами материалах позволяет предположить, что распределение примесей (дефектов) в германии, легированном надкадмиевыми нейтронами, и в германии, легированном тепловыми нейтронами, тоже является коррелированным. Предполагается, что одной из возможных причин, объясняющих значительное количественное различие между экспериментальными данными и теоретической зависимостью является коррелированное распределение примесей (дефектов).

Список литературы

1. *Fritzsche H., Cuevas M.* // Phys. Rev. – 1960. - V.119, № 4. - P. 1238.
2. *Кожух М. Л., Липкина Н. С.* // ФТП. – 1987. - Т. 21, № 2. - С. 284.
3. *Ермолаев О.П.* // ФТП. – 1994. - Т. 28, № 11. - С. 2021.
4. *Шкловский Б. И., Эфрос А. Л.* Электронные свойства легированных полупроводников. - М.: Наука, 1979. – 416 с.; // ФТП. – 1980. - Т. 14, № 5. - С. 825.
5. *Доброго В.П., Ермолаев О.П.* // ФТП. – 1977. - Т. 11, № 10. - С. 1897.
6. *Ермолаев О.П.* // ЖПС. – 1996. - Т. 63, № 1. - С. 167.
7. *Itoh K.M., Muto J., Walukiewicz W. et al.* // Phys. Rev. B. – 1996. – V.53. – P. 7797.
8. *Забродский А.Г., Андреев А.Г., Алексеев М.В.* // ФТП. – 1992. – Т. 26, №3. – С. 431.
9. *Fal'kov L.M., Cuevas M.* // Phys. Rev. – 1967. - V.164. - P.1025.
10. *Шкловский Б.И., Эфрос А.Л.* // ЖЭТФ. – 1971. - V.60. - P.867.

INFLUENCE OF IMPURITY DISTRIBUTION CHARACTER ON ACTIVATION ENERGY OF HOPPING CONDUCTIVITY IN NEUTRON-DOPED GERMANIUM

T.Y. Mikulchyk

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

Experimental data of the activation energy ε_3 in neutron-doped germanium were compared with the Shklovskii-Efros theoretical dependence. The large quantitative difference between the experimental data and theoretical dependence was found. It is assumed that the observed quantitative difference is caused by the correlated impurity(defect) distribution.