

ПРЫЖКОВАЯ ϵ_3 -ПРОВОДИМОСТЬ ГЕРМАНИЯ, «ЛЕГИРОВАННОГО» РАДИАЦИОННЫМИ ДЕФЕКТАМИ

О.П.Ермолаев, Т.Ю.Микульчик

Белорусский государственный университет, пр. Ф.Скорины, 4, 220050, Минск, Беларусь, тел. +375 172687033, e-mail: Ermolaev@phys.bsu.unibel.by

Прыжковая проводимость с постоянной энергией активации ϵ_3 по ближайшим локализованным состояниям мелких радиационных акцепторов в германии, облученном быстрыми реакторными нейтронами. Теоретическая модель Шлоковского и Эфроса согласуются с экспериментальными данными для самых низких концентраций дефектов, меньше $N_{\max} = 7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Уменьшение энергии активации прыжковой проводимости при $N > N_{\max}$ может быть связано с переходом от режима перескоков по ближайшим состояниям к режиму прыжков с переменной длиной.

1. Введение

При низких гелиевых температурах проводимость германия, легированного мелкими водородоподобными примесями, носит прыжковый характер. Например, в германии р-типа при пониженных температурах проводимость свободных носителей, связанная с термической ионизацией мелких акцепторов (ϵ_1), переходит в прыжковую проводимость по ближайшим локализованным состояниям мелких примесей (так называемая прыжковая проводимость). Поэтому активационная проводимость при низких температурах часто может быть записана в виде суммы двух слагаемых

$$\sigma = \sigma_1 \exp(-\epsilon_1/kT) + \sigma_3 \exp(-\epsilon_3/kT). \quad (1)$$

В прыжковом слагаемом предэкспоненциальный множитель является экспоненциальной функцией концентрации основных примесей и боровского радиуса примеси (a). Для энергии активации прыжковой проводимости ϵ_3 теория Шлоковского и Эфроса [1] дает

$$\epsilon_3 = F(K) e^2 N^{1/3} / \chi, \quad (2)$$

где $F(K)$ - универсальная функция компенсации K , e - заряд электрона, N - концентрация основной примеси, χ - диэлектрическая проницаемость. При малых N энергия ϵ_3 растет с увеличением N . Однако при дальнейшем увеличении N функция $\epsilon_3(N)$ достигает максимума при $N = N_{\max}$ и затем убывает, что обычно связывают с влиянием перекрытия волновых функций примесей. При $K < 0,4$ величина N_{\max} может быть определена из условия [1]

$$N_{\max} a^3 = 2 \cdot 10^{-3}. \quad (3)$$

Обычно исследование прыжковой проводимости проводят в полупроводниках, легированных мелкими водородоподобными химическими примесями. В работе [2] была обнаружена прыжковая проводимость по мелким радиационным акцепторам в германии, облученном большими энергиями быстрых нейтронов реактора. Эти

концентрации дефектов в германии, «легированном» радиационными акцепторами.

2. Основная часть

Нами исследовались образцы германия n-типа с концентрацией электронов около $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, облученные различными флюенсами быстрых реакторных нейтронов. Для отсеки медленного компонента реакторного спектра нейтронов ($E < 0,7 \text{ эВ}$) и для ослабления факторов, связанных с ядерным легированием медленными (тепловыми) нейтронами, образцы облучались в кадмиевых пеналах с толщиной стенок около 1 мм. В результате облучения все образцы стали низкоомными образцами р-типа. Проводимость и коэффициент Холла измерялись в области температур 1,5-300 К. Степень компенсации образцов (особенно в области малых концентраций дефектов) не превышала 5%. Концентрация радиационных дефектов (РД) в основном определялась из измерений коэффициента Холла при комнатной температуре.

При температурах выше 1,5 К и низкой концентрации примесей (или дефектов) прыжковая проводимость в режиме перескоков по ближайшим состояниям характеризуется постоянной энергией активации

$$\epsilon_3 = d \ln \rho / d(1/kT), \quad (4)$$

где k - постоянная Больцмана, $\rho = 1/\sigma$.

В [2] была определена величина боровского радиуса радиационного акцептора, равная 40 Å. Так как известно, что боровский радиус сурьмы в германии имеет величину 43 Å, а галлия 90 Å, мы для сравнения построили зависимость $\epsilon_3 = f(N)$ для сурьмы, галлия и РД (рис.1). Экспериментальные значения энергии активации ϵ_3 рассчитывались с помощью (4). На рис.1 прямая 1 представляет собой зависимость (2) для $K=0$, а 2, 3, 4 - экспериментальные кривые для образцов германия легированного сурьмой $\{\text{Ge}(\text{Sb})\}$ радиационными дефектами $\{\text{Ge}(\text{РД})\}$ и трансмутированным германием $\{\text{Ge}(\text{Ga})\}$ соответственно. Концентрации как сурьмы, так

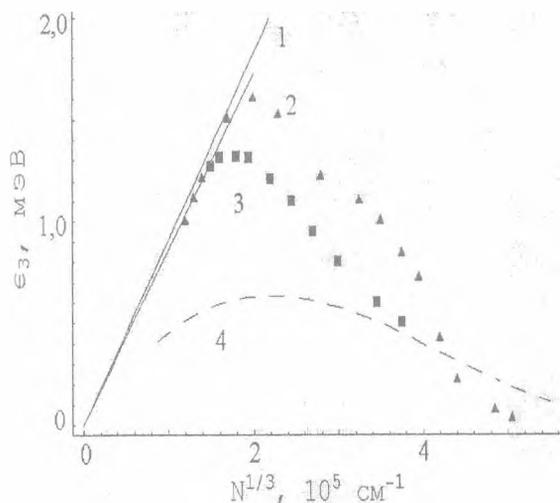


Рис.1. Зависимость энергии активации прыжковой проводимости от концентрации основных легирующих примесей (дефектов). 1 - теория, $K=0$ [1]; 2 - данные [3]; 3 - данные настоящей работы; 4 - данные [4] для $K=0,3$.

$F(K)$ для $K < 5\%$, определенное нами экспериментальным путем. Из хода зависимости $\epsilon_3 = f(N)$ следует, что при $N < N_{\max}$ энергия активации ϵ_3 не зависит от величины борковского радиуса примеси (дефекта). Согласно рис.1 зависимость $\epsilon_3 = f(N)$ имеет максимум, значение N_{\max} можно оценить из условия (3). Величина N_{\max} , определенная из (3) с учетом того, что борковский радиус радиационного акцептора равен 40 \AA , близка к экспериментальному значению $7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Как видно из рисунка, для образцов Ge(Sb) и Ge(PД), максимумы зависимости $\epsilon_3 = f(N)$ примерно совпадают, что подтверждает вывод о независимости энергии активации от борковского радиуса примеси (дефекта). Ход же кривой 4 более плавный с неярко выраженным максимумом, значение ϵ_3 по сравнению с величинами ϵ_3 для Ge(Sb) и Ge(PД) меньше, и это связано со степенью компенсации $K=0,3$ и борковским радиусом $a=90 \text{ \AA}$. При $N > N_{\max}$ наблюдается уменьшение энергии активации ϵ_3 . Отметим, что при $N > N_{\max}$ область температур, где существует режим ϵ_3 -проводимости сужается. Вследствие этого возникают трудности в правильном определении ϵ_3 с помощью (4). Заметим, что, следуя работе [4], в трансмутационно легированном Ge(Ga) с $K=0,3$ энергия активации, измеряемая при $N > N_{\max}$, это не постоянная энергия активации

ϵ_3 , а ϵ_{\max} - максимальная энергия активации. Уменьшение ϵ_{\max} для трансмутационно легированного Ge(Ga) связывается в [4] с переходом к прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка. Наши экспериментальные данные и данные [5] также свидетельствуют о том, что при концентрации дефектов больше, чем N_{\max} проводимость начинает осуществляться путем перескоков с переменной длиной прыжка и, как следствие, уменьшающейся энергией активации.

3. Заключение

Прыжковую проводимость по ближайшим локализованным состояниям мелких неводородоподобных радиационных акцепторов $E_v + 0,016 \text{ эВ}$ в германии (то есть ϵ_3 -проводимость) можно наблюдать лишь в области малых концентраций РД, $N_{\text{РД}} < N_{\max} = 7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Значение функции $F(K)$ для малых компенсаций ($K < 5\%$), рассчитанное в [1], хорошо согласуется со значением $F(K) \approx 0,9$, найденным нами экспериментально из линейного участка зависимости $\epsilon_3 = f(N)$. Вид зависимости $\epsilon_3 = f(N)$ для сурьмы, галлия и РД показывает, что при $N < N_{\max}$ значение ϵ_3 практически не зависит от величины борковского радиуса примеси (дефекта). Оценка величины N_{\max} из условия $N_{\max} a^3 \approx 2 \cdot 10^3$, с учетом того, что величина борковского радиуса радиационного акцептора равна 40 \AA , близка к экспериментально найденному значению $7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. При $N > N_{\max}$ область температур, в которой существует режим ϵ_3 , сужается. Уменьшение ϵ_3 при $N > N_{\max}$, вероятно, связано с переходом от режима прыжковой проводимости по ближайшим локализованным состояниям дефектов к режиму перескоков с переменной длиной прыжка и с меньшей энергией активации.

Список литературы

1. Шкловский Б.И., Эфрос А.Л. // ФТП. - 1980. - Т.14, №6. - С.825.
2. Доброго В.П., Ермолаев О.П. // ФТП. - 1976. - Т.10, в.5. - С.999.
3. Fritzsche H. // J.Phys.Chem.Solids. - 1958. - Vol.6. - P.69.
4. Забродский А.Г., Андреев А.Г., Алексеенко М.В. // ФТП. - Т.26, в.3. - С.431.
5. Ермолаев О.П. // Весті АН Беларусі. - 1995. - №1. - С.70.

HOPPING ϵ_3 -CONDUCTIVITY OF GERMANIUM «DOPED» BY RADIATION DEFECTS

O.P.Ermolaev, T.Y.Mickulchik

Belarus State University, F. Scorina Avenue 4, 220050, Minsk, Republic of Belarus,

tel: +375 172687033 (e-mail: Ermolaev@phys.bsu.unibel.by)

The electroconductivity and Hall coefficient of germanium converted in a p-type material by the large fluences of fast reactor neutrons were investigated in the temperature range from 1,5 to 300 K. The hopping ϵ_3 -conductivity between the nearest localized states of the shallow nonhydrogenlike radiation acceptors, ($E_v + 0,016$) eV, was studied. It was found that the data of hopping ϵ_3 -conductivity activation energy were consistent with the values calculated by Shklovskii and Efros for the concentration of radiation defects ($N < N_{\max} = 7 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$). Behavior of the dependence $\epsilon_3 = f(N_{\text{RD}})$ shows that on Bohr radius of impurity (defect) at $N < N_{\max}$. Value of N_{\max} was determined from $N_{\max} a^3 \approx 2 \cdot 10^3$, where a is the value of Bohr radius of the radiation acceptors equals to 40 \AA . Experimental value of $N_{\max} = 7 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ was found to agree

This document has been edited with Infix PDF Editor - free for non-commercial use. To remove this notice, visit: www.iceni.com/unlock.htm