

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПОДВИЖНОСТЬ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ГЕРМАНИИ, РАЗУПОРЯДОЧЕННОМ РАДИАЦИЕЙ

О.П.Ермолаев, Т.Ю.Микульчик

Белорусский государственный университет, пр. Ф. Скорины, 4, 220050, Минск, Беларусь,
тел. +375 172095116, e-mail: ermolaev@phys.bsu.unibel.by

Исследовались температурные зависимости удельного сопротивления и коэффициента Холла в германии, облученном большими флюенсами ($1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} < \Phi < 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$) быстрых реакторных нейтронов, при $7 \text{ K} < T < 30 \text{ K}$. Полученная из этих измерений холловская подвижность носителей заряда сравнивалась с существующими теоретическими моделями. Показано, что при $15 \text{ K} < T < 30 \text{ K}$ основной вклад в изменение подвижности вносит рассеяние на ионизированных радиационных дефектах. При понижении температуры ($10 \text{ K} < T < 15 \text{ K}$) наблюдается резкое уменьшение холловской подвижности. Одной из возможных причин наблюдаемого эффекта может быть изменение механизма проводимости - переход к прыжковой проводимости по мелким уровням радиационных дефектов.

Введение

Подвижность носителей заряда в германии, облученном большими флюенсами быстрых реакторных нейтронов, исследовалась ранее. Однако эти исследования проводились в узком интервале температур $77 \text{ K} < T < 300 \text{ K}$ (напр., [1-2]). Поэтому представляет интерес изучить поведение холловской подвижности носителей тока в германии, разупорядоченном радиацией, при более низких температурах.

При облучении германия быстрыми реакторными нейтронами образуются дефекты акцепторного типа с мелким уровнем [3]. Электрические свойства облученного германия определяются радиационными дефектами, несмотря на достаточно большие концентрации трансмутационно введенных при этом примесей [3-5]. Удобным способом установления особенностей дефектов является изучение поведения подвижности носителей заряда при низких температурах, когда доминирует рассеяние на примесях (заряженных и нейтральных центрах). Основная цель настоящей работы — сравнить экспериментально полученную при $7 \text{ K} < T < 30 \text{ K}$ холловскую подвижность носителей заряда в германии, разупорядоченном радиацией, с существующими теоретическими моделями.

Основная часть

Нами исследовались образцы германия, легированного мышьяком, с концентрацией доноров около $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Образцы, помещенные в кадмиевые пеналы толщиной около 1 мм, облучались различными интегральными потоками нейтронов реактора, при этом поток быстрых нейтронов с энергией $E \approx 0,1 \text{ МэВ}$ изменялся в пределах $1 \cdot 10^{15} - 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. В результате облучения все образцы стали низкоомными р-типа проводимости. Удельное сопротивление и коэффициент Холла измерялись в интервале температур 7-30 К.

Полученные в ходе эксперимента температурные зависимости холловской подвижности дырок в облученном германии (Ge(PD)) представлены на рис. 1. При анализе поведения подвижности свободных носителей заряда, обусловленной их рассеянием на ионизированных примесях, обычно используется

формула Брукса-Херринга (известный закон трех вторых) [6]

$$\mu_i = \frac{2^{1/2} (4\pi\epsilon)^2 (\kappa_B T)^{3/2}}{\pi^{3/2} e^3 m^{1/2} Z^2 N [\ln(1 - \beta) - \beta/(1 + \beta)]}, \quad (1)$$

где $\epsilon = \chi \cdot \epsilon_0$, χ - диэлектрическая проницаемость среды, ϵ_0 - электрическая постоянная вакуума, κ_B - постоянная Больцмана, T - температура, e - заряд электрона, m - эффективная масса носителей тока, Z - заряд иона примеси, N - концентрация ионов. Формула (1) дает завышенную оценку подвижности, причем наблюдается и качественное отличие от закона трех вторых. В ряде работ уже отмечалось, что температурные зависимости подвижности, описанные законом Брукса - Херринга, неудовлетворительно согласуются с экспериментальными данными [7-9]. Причина наблюдаемого несоответствия заключена в сильной зависимости концентрации заряженных центров от температуры в исследуемых образцах, тогда как закон Брукса - Херринга выполняется только для таких температур, для которых температурная зависимость концентрации заряженных центров не существенна. О температурной зависимости концентрации заряженных радиационных акцепторов можно судить по изменению концентрации дырок, обусловленных дефектами, так как связь между ними линейная.

В работе [10] был предложен новый подход для вычисления подвижности при рассеянии на ионах примесей. В основу модели легло предположение о конечности времени кулоновского взаимодействия электрона (дырки) с примесным ионом, которое равно периоду прохождения электроном (дыркой) области, связанной с примесным ионом. Согласно [10] подвижность носителей заряда в однородных невырожденных полупроводниках описывается уравнением

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

где $\hbar$ - постоянная Планка, $F(\gamma)$ - функция, зависящая от N и T . Из рис. 1 видно, что при низких температурах между экспериментальными данными и формулой (2) существует

качественное согласие для всех исследуемых образцов, причем температурный интервал применимости (2) с уменьшением концентрации радиационных дефектов сдвигается в область более низких температур.

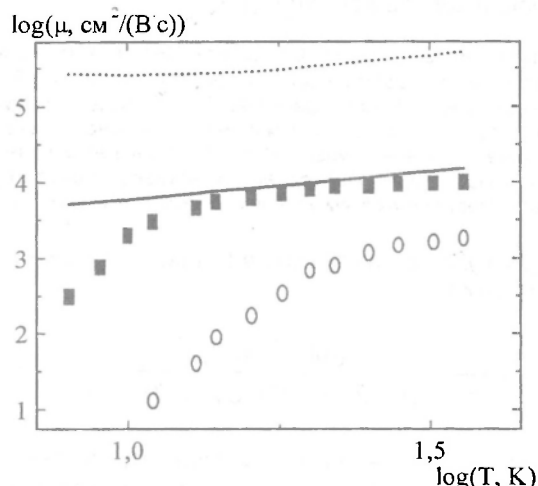


Рис. 1. Температурные зависимости подвижности. Пунктирная кривая – зависимость (1), сплошная линия – зависимость (2). Экспериментальные данные для Ge(PD): ■ – $N_{PD} = 7,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, ○ – $N_{PD} = 2,8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Для установления соответствия между формулой (2) и экспериментальными данными также были построены температурные зависимости разности обратных холловских подвижностей дырок в Ge(PD) для нескольких пар образцов с разными концентрациями дефектов и близкой компенсацией, что позволяет исключить решеточное рассеяние, значение которого при низких температурах неизвестно. Между экспериментальными данными и теоретической зависимостью, рассчитанной с помощью (2), наблюдается качественное согласие. Таким образом, можно заключить, что в Ge(PD) при низких температурах основное влияние на изменение подвижности вносит рассеяние на радиационных акцепторах. Итак, экспериментальные данные холловской подвижности в облученном германии удовлетворительно описываются теоретической моделью изменения подвижности носителей заряда, обусловленной рассеянием на ионах примесей.

С понижением температуры наблюдается отклонение экспериментальных данных от теоретической зависимости (2) (рис. 1). При облучении германия быстрыми реакторными нейтронами в объеме материала возникают разупорядоченные области. С уменьшением температуры роль рассеяния на разупорядоченных областях возрастает [1-2], и подвижность носителей заряда резко падает. Так как в наших экспериментах исследовались низкоомные образцы германия p-типа (вдали от

p-p конверсии), то такой механизм рассеяния маловероятен.

Как известно, при низких температурах причиной сопротивления материала может служить рассеяние носителей заряда на нейтральных примесных центрах. Если предположить, что рассеяние на нейтральных примесях играет роль, то согласно теоретическими оценками [11-12] подвижность носителей заряда падает с понижением температуры незначительно. Следовательно, резкое уменьшение подвижности носителей заряда при $10 \text{ K} < T < 15 \text{ K}$ связано с другими причинами, например, переходом к прыжковой проводимости по мелким уровням радиационных дефектов. Согласно [13], в области прыжковой проводимости подвижность носителей заряда очень мала. Замедление роста сопротивления исследуемых образцов с понижением температуры подтверждает предположение о смене механизмов проводимости.

Заключение

При низких температурах ($T < 30 \text{ K}$) в Ge(PD) доминирует рассеяние на радиационных акцепторах. Экспериментальные температурные зависимости холловской подвижности носителей заряда в Ge(PD) качественно согласуются с теоретической моделью изменения подвижности при рассеянии на заряженных примесных центрах в однородных невырожденных полупроводниках. Температурный интервал, где основным является рассеяние на радиационных акцепторах, с уменьшением уровня "легирования" сдвигается в область более низких температур.

При $10 \text{ K} < T < 15 \text{ K}$ наблюдается резкий спад экспериментальных кривых. Сильная температурная зависимость холловской подвижности носителей заряда позволила предположить, что рассеяние на нейтральных центрах не оказывает большого влияния на изменение подвижности, так как согласно теоретическим оценкам в противоположном случае подвижность носителей заряда с уменьшением температуры падала бы незначительно. Резкое уменьшение величины подвижности и ее сильная температурная зависимость связана с переходом к прыжковой проводимости по мелким уровням радиационных дефектов, о чем также свидетельствует замедление роста сопротивления исследуемых образцов с понижением температуры.

Список литературы

1. Коноплева Р.Ф., Литвинов В.А., Ухин Н.А. Особенности радиационного повреждения полупроводников частицами высоких энергий. – М.: Атомиздат, 1971. – 76 с.
2. Коноплева Р.Ф., Остроумов В.Н. Взаимодействие заряженных частиц высоких энергий с германием и кремнием. – М.: Атомиздат, 1975. – 128 с.
3. Dobrego V.P., Ermolaev O.P., Tkachev V.D. // Phys. stat. sol. (a) – 1977. – V. 44 – P.435.
4. Добрего В.П., Ермолаев О.П. // ФТП. – 1980. – № 5. – С.1120.
5. Кожух М.Л., Липкина Н.С., Шлимак И.С. // ФТП. – 1985. – № 2. – С.331.

6. Brooks H. // Phys. Rev. – 1951. – V. 83. – P.879.
7. Meyer J.R., Bartoli F.J. // Phys. Rev. B. – 1987. – V. 36. – P.5989.
8. Joshi R.P., Ferry D.K. // Semicond. Sci. Technol. – 1992. – V. 7. – P.B 319.
9. Grill. R. // J. Phys.: Condensed Matter. – 1995. – V. 7. – P.3565.
10. Poklonski N.A., Denisenko A.V, Lopatin, S. Yu., Siaglo. A.I. // Phys. stat. sol. (b). – 1998. – V. 206. – P.713.
11. McGill T.C., Baron R. // Phys. Rev. B. – 1975. – V. 11 – P.5208.
12. Meyer J.R, Bartoli F.J. // Phys. Rev. B. – 1981. – V. 24 – P.2089.
13. Шкловский Б.И., Эфрос А.Л. Электронные свойства легированных полупроводников. – М.: Наука, 1979. – 416 с.

LOW-TEMPERATURE MOBILITY OF THE CHARGED CARRIERS IN GERMANIUM DISORDERED BY RADIATION

O.P.Ermolaev, T.Y.Mikulchik

*Belarus State University, F. Scorina Avenue 4, 220050, Minsk, Republic of Belarus,
tel: +375 172095116, e-mail: ermolaev@phys.bsu.unibel.by*

Temperature dependences of the resistivity and Hall coefficient of germanium bombarded by the large fluences of fast reactor neutrons ($1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2} < \Phi < 2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$) were investigated in the temperature range from 7 to 30 K. Hall mobility obtained from the resistivity and Hall coefficient data were compared with the known theoretical models. It was found that the scattering from the ionized radiation defects dominates at $15 \text{ K} < T < 30 \text{ K}$. Below about 15 K for each sample the steep slope of the Hall mobility occurs. Analysis of the temperature dependence of the Hall mobility shows that the steep slope of the Hall mobility is probably connected with the transition to the hopping conductivity on the shallow levels of radiation defects.