

ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА В p -PbTe(Ag, Na)

Житинская М. К., Колодка С. В., Немов С. А.

В p -PbTe, легированном серебром, изучено влияние дополнительного легирования глубокой акцепторной примесью натрия на явления переноса. Содержание Ag в образцах было фиксированным (0.1 и 0.2 ат%), примеси Na — варьировалось от 0 до 2.5 ат%. Исследованы температурные зависимости основных кинетических коэффициентов удельной электропроводности σ , термоэдс S , Холла R и поперечного эффекта Нернста—Эттингсгаузена Q при $T=77-450$ К образцов PbTe(Ag, Na) с концентрациями дырок $p \sim 10^{19}-10^{20}$ см $^{-3}$. Сопоставление полученных данных с литературными не обнаружило заметных проявлений каких-либо квазилокальных (резонансных) состояний в рассматриваемом интервале энергий дырок. Количественные различия в величинах кинетических коэффициентов PbTe(Ag, Na) и PbTe(Na) связываются с влиянием примеси Ag на рассеяние дырок. Из данных по подвижности сделаны оценки сечения рассеяния дырок на примеси Ag: $S_{Ag} \sim 4 \cdot 10^{-16}$ см 2 .

Существенной особенностью образцов, легированных Ag, является наличие минимума на зависимости $\sigma(T)$, подобного наблюдавшемуся ранее в $Pb_{1-x}Ge_xTe$ и связанного с фазовым переходом.

В последнее время значительно возрос интерес к поведению примесей в полупроводниках $A^{IV}B^{VI}$. К настоящему времени достаточно подробно исследованы свойства PbTe, легированного элементами III группы. Действие элементов I группы (Na, Ag) представляет также научный и практический интерес. Примесь Na является традиционным глубоким акцептором в PbTe, позволяющим получать концентрации дырок вплоть до $(2-3) \cdot 10^{20}$ см $^{-3}$ и не создающим квазилокальных примесных состояний [1]. О легирующем действии Ag отсутствуют единые представления [2-5].

Из оптических данных [5] следует, что в запрещенной зоне PbTe(Ag) отсутствуют примесные уровни серебра. Однако не исключено [2], что Ag может давать квазилокальные состояния, расположенные на фоне валентной зоны. Поиск таких состояний можно осуществить методом двойного легирования (Ag и Na). Этот метод был ранее с успехом использован для изучения примесных состояний таллия в PbTe [6].

В настоящей статье приведены результаты исследований явлений переноса (электропроводности σ , коэффициентов Холла R , термоэдс S и поперечного эффекта Нернста—Эттингсгаузена Q) в диапазоне температур 77—450 К в образцах, состав которых соответствовал химической формуле $(Pb_{1-x-y}Ag_xNa_y)Te$. При фиксированном содержании Ag ($x=0.001$ и 0.002) количество натрия (y) изменялось в пределах 0.001—0.025. Образцы были изготовлены металлотермическим способом с последующим гомогенизирующим отжигом.

Основные результаты изображены на рис. 1—3. Как известно [1], примесь натрия замещает в PbTe свинец в его подрешетке и дает одну дырку на атом Na. Зависимость концентрации дырок (p) от содержания Na (N_{Na}) соответствует сплошной линии на рис. 1. Концентрация дырок в PbTe(Ag, Na) заметно меньше. Если предположить, что примесь серебра в PbTe(Na) проявляет донорное действие и каждый атом Ag дает один электрон, то для серии с $N_{Ag}=0.2$ ат% мы должны иметь зависимость, соответствующую штриховой кривой. Из рис. 1 видно, что данные для части образцов PbTe(Ag, Na) ложатся на эту кривую. Отклонения от нее можно связать с технологическими причинами.

Рассмотрим экспериментальные данные по явлениям переноса. Прежде всего следует отметить, что ярких проявлений квазилокальных примесных состояний Ag (таких как стабилизация уровня Ферми, сильное влияние степени заполнения этих состояний на характер температурных и концентрационных зависимостей R , σ , S , Q) мы не наблюдаем.

Сопоставление кинетических коэффициентов в $\text{PbTe}\langle\text{Ag}, \text{Na}\rangle$ и $\text{PbTe}\langle\text{Na}\rangle$ [7] при одинаковых холловских концентрациях дырок показало, что вид температурных зависимостей термоэдс и коэффициента ПЭНЭ Q одинаков. При равных концентрациях дырок $p = (eR_{77})^{-1}$ (R_{77} — величина коэффициента Холла при 77 К) численные значения коэффициента термоэдс (рис. 2) для большинства образцов (при 77–450 К) и холловской подвижности на лучших образцах при комнатной температуре в $\text{PbTe}\langle\text{Ag}, \text{Na}\rangle$ и $\text{PbTe}\langle\text{Na}\rangle$ совпадают.

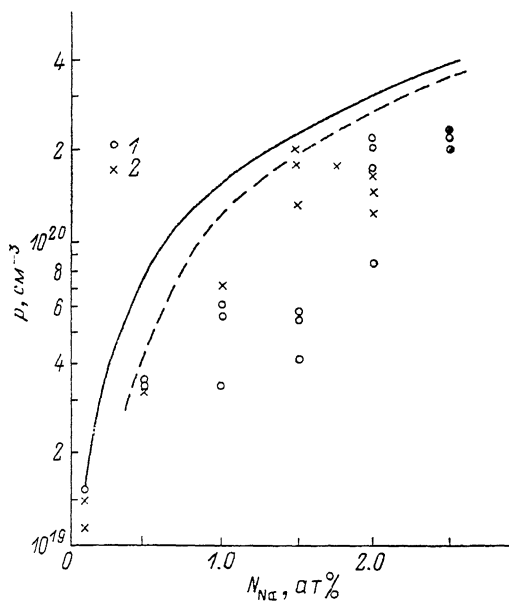


Рис. 1. Зависимость концентрации дырок p от содержания Na при фиксированном содержании Ag в образцах $(\text{Pb}_{1-x-y}\text{Ag}_x\text{Na}_y)\text{Te}$.

Сплошная кривая — данные [6] для $\text{PbTe}\langle\text{Na}\rangle$, штриховая — расчет $p = j(N_{\text{Na}})$ для $\text{PbTe}\langle\text{Ag}, \text{Na}\rangle$ ($N_{\text{Ag}} = 0.2$ ат%) с использованием уравнения нейтральности $n = N_{\text{Na}} - N_{\text{Ag}}$. Точками обозначены экспериментальные данные. N_{Ag} , ат%: 1 — 0.1, 2 — 0.2.

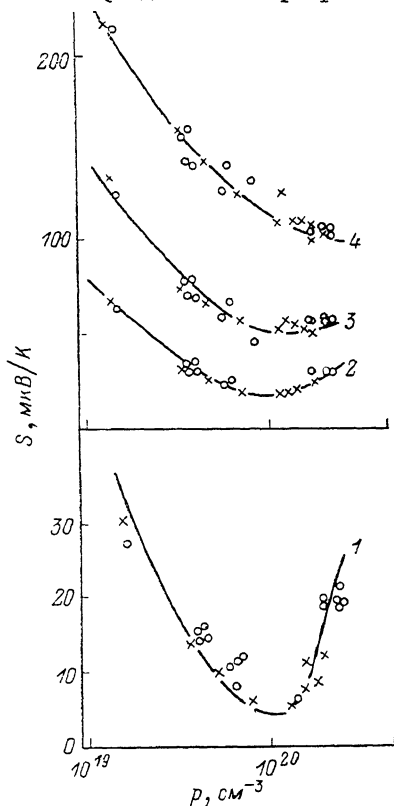


Рис. 2. Концентрационная зависимость коэффициента термоэдс в $\text{PbTe}\langle\text{Ag}, \text{Na}\rangle$.

Точки — экспериментальные результаты. Обозначения те же, что и на рис. 1. 1—4 — данные работы [6] для $\text{PbTe}\langle\text{Na}\rangle$. T , К: 1 — 120, 2 — 200, 3 — 300, 4 — 400.

Наблюдаемое снижение холловской ($R\sigma$) и нернстовской ($|Qe/k_0|$) подвижностей в $\text{PbTe}\langle\text{Ag}, \text{Na}\rangle$ при азотных температурах можно связать с рассеянием дырок на примеси Ag. Оценка соответствующего сечения рассеяния, сделанная при 77 К, дала величину $S_{\text{Ag}} \approx 4 \cdot 10^{-16}$ см², близкую к значениям сечения рассеяния дырок на примеси Na (из данных [7, 8] следует, что $S_{\text{Na}} \approx 3 \cdot 10^{-16}$ см²) и собственных дефектах в PbTe [1].

Характер температурной зависимости коэффициента Холла $R(T)$ в образцах $\text{PbTe}\langle\text{Ag}, \text{Na}\rangle$ аналогичен $\text{PbTe}\langle\text{Na}\rangle$ [7]. В серии образцов с $N_{\text{Ag}} = 0.2$ ат% наблюдается численное совпадение в зависимостях $R(T)$, кроме высоких температур ($T > 300$ К). Наблюдаемое небольшое уменьшение значения R_{max}/R_{77} в $\text{PbTe}\langle\text{Ag}, \text{Na}\rangle$ можно связать с изменением отношения подвижностей легких и тяжелых дырок из-за дополнительного рассеяния на примеси серебра.

В серии образцов с содержанием серебра 0.1 ат% наблюдаются более существенные изменения в $R(T)$. На температурной зависимости коэффициента Холла

практически всех образцов в области низких температур ($T \sim 120$ К) наблюдается небольшой дополнительный максимум (рис. 3) с $R_{\max}/R_{77} \approx 1.2$. В этой же области температур наблюдается характерная особенность на температурной зависимости удельной электропроводности в образцах обеих серий (рис. 3). Эту особен-

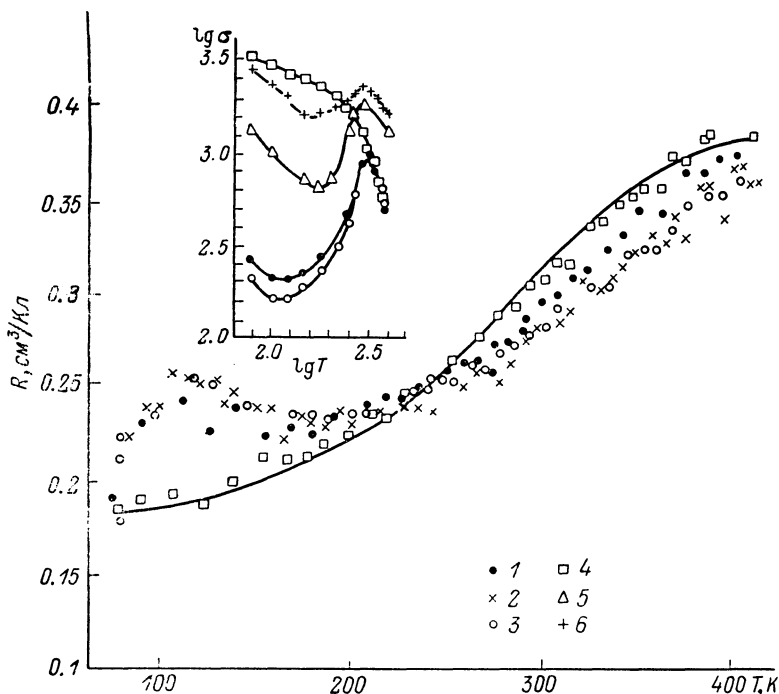


Рис. 3. Температурная зависимость коэффициента Холла в $\text{PbTe}\langle\text{Ag}, \text{Na}\rangle$.

Точки — экспериментальные данные. N_{Ag} , ат%: 1—3 — 0.1; 4 — 0.2. $p \cdot 10^{19}$, см^{-3} : 1 — 3.5, 2 — 3.8, 3 — 3.6, 4 — 3.4. Сплошная линия — зависимость $R(T)$ для $\text{PbTe}\langle\text{Na}\rangle$ с $p = 3.6 \cdot 10^{19}$ см^{-3} . На вставке — зависимость удельной электропроводности σ от температуры T в $\text{PbTe}\langle\text{Ag}, \text{Na}\rangle$. Параметры образцов: 1—4 — то же, что и на рис. 3; N_{Ag} , ат%: 5 — 1, 6 — 0.1; N_{Na} , ат%: 5, 6 — 2; $p \cdot 10^{19}$, см^{-3} : 5 — 3.1, 6 — 4.5.

ность трудно связать с технологическими причинами. (Более подробно вопрос о влиянии технологии на $\sigma(T)$ рассматривался в работе [9]).

Наблюдаемое резкое уменьшение электропроводности подобно данным для $\text{Pb}_{1-x}\text{Ge}_x\text{Te}$, в котором оно обусловлено дополнительным рассеянием при фазовом переходе [10].

Авторы благодарны Ю. И. Равичу за участие в обсуждении результатов работы.

Список литературы

- [1] Равич Ю. И., Ефимова Б. А., Смирнов И. А. Методы исследования полупроводниковых материалов в применении к халькогенидам свинца PbTe , PbSe , PbS . М., 1968. 384 с.
- [2] Dawar A. L., Paradkar S. K., Kumar P., Taneja O. P., Mathur P. C. // Phys. St. Sol. (a). 1981. V. 68. N 1. P. 227—232.
- [3] Кайданов В. И., Равич Ю. И. // УФН. 1985. Т. 145. В. 1. С. 51—86.
- [4] Ковальчик Т. Л., Маслаковец Ю. П. // ЖТФ. 1956. Т. 22. В. 11. С. 2417—2431.
- [5] Вейс А. Н., Гриневич А. В., Кайданов В. И., Мельник Р. Б., Немов С. А. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 1. С. 174—173.
- [6] Кайданов В. И., Немов С. А., Равич Ю. И., Зайцев А. М. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 9. С. 1613—1617.
- [7] Черник И. А., Кайданов В. И., Виногоградова М. Н., Коломоец Н. В. // ФТП. 1968. Т. 2. В. 6. С. 773—781.
- [8] Allgaier R. S., Houston B. V. // Proc. Int. Conf. Semicond. Exeter, 1962. P. 172—178.
- [9] Кайданов В. И., Немов С. А., Равич Ю. И., Зайцев А. М. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 7. С. 1288—1290.
- [10] Абдуллин Х. А., Лебедев А. И. // ФТТ. 1983. Т. 25. В. 12. С. 3571—3576.