

Оптическое отражение в $\text{Pb}_{0.78}\text{Sn}_{0.22}\text{Te}$, легированном 3 at% индия

© А.Н. Вейс, С.А. Немов

Санкт-Петербургский государственный технический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 19 января 1998 г. Принята к печати 20 января 1998 г.)

Исследованы спектральные зависимости оптического отражения n - $(\text{Pb}_{0.78}\text{Sn}_{0.22})_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$ ($x = 0.02$ и 0.03) и p - $\text{Pb}_{0.78}\text{Sn}_{0.22}\text{Te}$, легированного 3 at% In и 1.5 at% Tl, при $T = 300$ К. Во всех экспериментальных спектрах наблюдались минимумы, связанные с плазменными колебаниями свободных носителей заряда. Методом Кухарского и Субашиева оценены концентрации электронов n и дырок p . Показано, что величина n существенно меньше холловской концентрации носителей тока только в n - $(\text{Pb}_{0.78}\text{Sn}_{0.22})_{0.97}\text{In}_{0.03}\text{Te}$, в котором, как это предполагалось ранее, прыжковый механизм проводимости является доминирующим. Это результат может рассматриваться как независимое экспериментальное подтверждение характера проводимости в твердых растворах n - $(\text{Pb}_{0.78}\text{Sn}_{0.22})_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$ с большим содержанием примеси.

Как известно [1], электрофизические и оптические свойства PbTe и твердых растворов $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$, легированных индием, при малых концентрациях примеси ($N_{im} \leq 1$ at%) могут быть объяснены в рамках модели квазилокального примесного уровня E_0 расположенного при 4.2 К вблизи дна зоны проводимости. При увеличении N_{im} характер температурных зависимостей кинетических коэффициентов в $\text{PbTe}:\text{In}$ и $\text{Pb}_{0.78}\text{Sn}_{0.22}\text{Te}:\text{In}$ заметно усложняется [2,3]. Для истолкования всего комплекса экспериментальных данных по явлениям переноса, полученным в PbTe и $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ с большим содержанием примеси In, были использованы представления о прыжковой проводимости по примесным состояниям In.

Несмотря на качественное подобие свойств PbTe и $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ с большим содержанием In, количественно они заметно различаются. Наиболее ярко это различие проявляется в температурных зависимостях коэффициента Холла R_H . Сопоставление данных [2,3] между собой показывает, что в сильно легированных индием образцах, при одинаковых концентрациях примеси и температурах, величины холловских концентраций электронов n_H ($n_H = (eR_H)^{-1}$) в $(\text{Pb}_{0.78}\text{Sn}_{0.22})_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$ оказываются существенно выше, чем в $\text{Pb}_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$. Более того, в $(\text{Pb}_{0.78}\text{Sn}_{0.22})_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$ при $x \geq 0.1$ величины n_H оказываются сравнимы и даже превышают концентрацию введенного индия. Это свидетельствует о том, что коэффициент Холла и его температурная зависимость в $(\text{Pb}_{0.78}\text{Sn}_{0.22})_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$ при высоких содержаниях примеси не отражают величину концентрации электронов в зоне проводимости. Такая ситуация возможна в условиях прыжковой проводимости [4].

Поэтому представляется целесообразным выполнить независимый эксперимент, позволяющий получить дополнительные сведения о характере проводимости в подобных материалах. Необходимость постановки такого эксперимента обусловлена также тем обстоятельством, что особенности температурных зависимостей каждого из изученных в [2,3] кинетических коэффициентов могут быть объяснены другим, альтернативным образом. Проверить высказанное в [2,3] предположение о прыжковом механизме проводимости можно, если определить не-

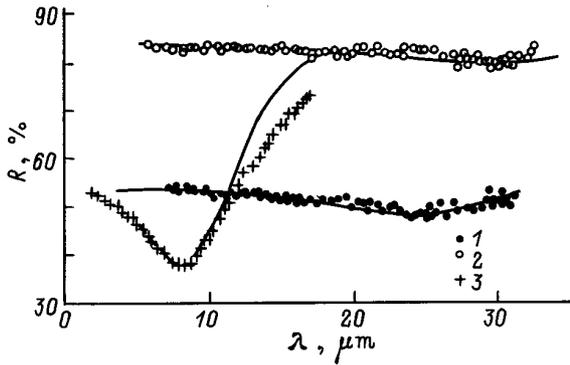
зависимым образом величину концентрации свободных носителей тока.

В образцах с известным законом дисперсии указанная задача может быть решена посредством исследования спектров оптического отражения R в области плазменного минимума [5]. Поэтому в настоящей работе были изучены спектральные зависимости $R(\lambda)$ в $(\text{Pb}_{0.78}\text{Sn}_{0.22})_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$ с проводимостью n - и p -типов. Эксперименты выполнены при $T = 300$ К. Концентрация индия в исследованных образцах не превышала 3 at%. При таких концентрациях примеси, с одной стороны, можно не опасаться заметного влияния индия на величины основных параметров энергетического спектра $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$. С другой стороны, при $N_{im} = 3$ at% в $(\text{Pb}_{0.78}\text{Sn}_{0.22})_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$ уже наблюдаются все особенности в кинетических коэффициентах, которые были связаны с проявлением прыжковой проводимости [3].

Исследованные в работе образцы были изготовлены, как и в [2,3], металлокерамическим методом и подвергнуты гомогенизирующему отжигу в течение 100 ч при $T = 650^\circ\text{C}$. Концентрация индия, как и в [2,3], указана по закладке в шихту. Компенсация донорного действия индия в одном из исследованных образцов была осуществлена посредством введения акцепторной примеси таллия (1.5 at%).

Полученные в работе экспериментальные результаты приведены на рисунке. Из рисунка видно, что в спектрах $R(\lambda)$ всех исследованных образцов наблюдаются плазменные минимумы, которые смещаются в коротковолновую область при увеличении холловской концентрации электронов n_H и дырок p_H . Однако в образцах с электронным типом проводимости смещение плазменного минимума с ростом n_H невелико, несмотря на то что величины n_H в них различаются более чем на порядок ($1.27 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при $x = 0.02$ и $1.7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ при $x = 0.03$). Это свидетельствует о том, что концентрации свободных электронов n в этих образцах близки.

Для того чтобы оценить концентрации свободных носителей тока в исследованных образцах, был произведен расчет спектров $R(\lambda)$. С его помощью оказалось возможным определить величины высокочастотной диэлектрической проницаемости ϵ_∞ и плазменной частоты



Спектральные зависимости коэффициента отражения R в n -($\text{Pb}_{0.78}\text{Sn}_{0.22}$) $_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$ с проводимостью n - (1,2) и p - (3) типа при $T = 300$ К. x : 1,3 — 0.03, 2 — 0.02. Холловские концентрации электронов (или дырок) n_H (p_H) $\cdot 10^{18}$, см^{-3} : 1 — 17.0, 2 — 2.27, 3 — 102. Точки — эксперимент, линии — расчет по методу [6]. Для образца № 2 значения R увеличены на 30%.

$\omega_p = (4\pi n e^2 m_R^{-1} \varepsilon_\infty^{-1})^{1/2}$. Расчет зависимостей $R(\lambda)$ был выполнен по методу, развитому в [6]. Для оценки ε_∞ и ω_p в исследованных образцах был также использован способ, предложенный авторами [5]. Отметим, что оба метода определения ε_∞ и ω_p позволили получить близкие результаты. В частности, в изученных образцах ε_∞ оказалась равной 41.5 ± 2.5 , что соответствует имеющимся экспериментальным данным [7] для твердых растворов $\text{Pb}_{0.8}\text{Sn}_{0.2}\text{Te}$.

Для эффективной массы проводимости m_R в расчетах было принято значение $m_R = 0.05m_0$ (m_0 — масса свободного электрона). Оно является средним для образцов, обладающих концентрациями свободных электронов $n = (1 \div 5) \cdot 10^{18}$ см^{-3} , и было получено в рамках модели Кейна по формулам (6.43) и (A.3) работы [18]. При этом были использованы: величина эффективной массы на дне зоны проводимости PbTe $m_{d0}^* = 0.17m_0$ ($T = 300$ К), определенная в [9], и экстраполяционная формула для ширины запрещенной зоны в $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$

$$E_g(x, T) = 171.5 - 535x + [12.8^2 + 0.19(T + 20)^2]^{1/2} \text{ мэВ},$$

приведенная в [10].

Расчетные зависимости $R(\lambda)$ показаны на рисунке линиями. Видно, что в широком спектральном интервале наблюдается достаточно хорошее согласие между экспериментальными данными и расчетными кривыми. Это позволило определить ω_p и оценить n . Оказалось, что величины концентраций свободных электронов в n - $\text{Pb}_{0.78}\text{Sn}_{0.22}\text{Te}:\text{In}$ действительно близки и составляют $(1.3 \pm 0.2) \cdot 10^{18}$ см^{-3} при $x = 0.02$ и $(2.4 \pm 0.3) \cdot 10^{19}$ см^{-3} при $x = 0.03$. Отметим, что первое из приведенных значений n согласуется с n_H , тогда как второе (для $x = 0.03$) резко расходится с холловскими данными.

В материале с проводимостью p -типа непосредственная оценка концентрации свободных дырок затруднена, поскольку параметры n - $\text{Pb}_{0.78}\text{Sn}_{0.22}\text{Te}$ известны недостаточно точно. Поэтому на основании полученных данных в n - $\text{Pb}_{0.78}\text{Sn}_{0.22}\text{Te}:\text{In}$ была определена величина m_R , со-

ответствующая холловской концентрации дырок. Оказалось, что в исследованном образце эффективная масса проводимости составляет $(0.19 \pm 0.02)m_0$ и находится в разумном согласии с результатами [7,11].

В заключение отметим, что заметное расхождение между холловской концентрацией электронов n_H и концентрацией свободных носителей, найденной из спектров $R(\lambda)$, наблюдается лишь в том образце, в котором ранее предполагалась существенная роль прыжкового механизма проводимости. Этот вывод согласуется с [4]. Поэтому полученные результаты являются независимым подтверждением развитых в [2,3] представлений о характере проводимости в PbTe и $\text{Pb}_{0.78}\text{Sn}_{0.22}\text{Te}$ с большим содержанием In .

Список литературы

- [1] В.И. Кайданов, Ю.И. Равич. УФН, **145**, 51 (1985).
- [2] С.Н. Лыков, Ю.И. Равич, И.А. Черник. ФТП, **11**, 1731 (1977).
- [3] С.А. Немов, Ю.И. Равич, А.В. Березин, В.Э. Гасумянц, М.К. Житинская, В.И. Прошин. ФТП, **27**, 303 (1993).
- [4] Н. Мотт, Э. Дэвис. *Электронные процессы в некристаллических веществах* (М., Мир, 1982) т. 1.
- [5] T.S. Moss, T.D.F. Hawkins, G.J. Burrell. J. Phys. C., **1**, 1435 (1968).
- [6] А.А. Кухарский, В.К. Субашиев. ФТТ, **8**, 753 (1966).
- [7] G. Dionne, J.C. Woolley, Phys. Rev. B, **6**, 3898 (1972).
- [8] Ю.И. Равич, Б.А. Ефимова, И.А. Смирнов. *Методы исследования полупроводников в применении к халькогенидам свинца: PbTe, PbSe, PbS* (М., Наука, 1968).
- [9] М.К. Житинская, В.И. Кайданов, И.А. Черник. ФТТ, **8**, 296 (1966).
- [10] G. Nimtz, B. Schlicht. *Narrow gap lead salts. Springertracts in modern physics* (1983) v. 98.
- [11] И.М. Несмелова, Н.С. Барышев, Ю.С. Харионовский, Ж.И. Ахмедова, В.И. Кошелева. ФТП, **9**, 991 (1975).

Редактор В.В. Чалдышев

Optical reflection in $\text{Pb}_{0.78}\text{Sn}_{0.22}\text{Te}$ doped with 3 at% of indium

A.N. Veis, S.A. Nемов

St.Petersburg State Technical University,
195251 St.Petersburg, Russia

Abstract Spectral dependencies of optical reflection in n -($\text{Pb}_{0.78}\text{Sn}_{0.22}$) $_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$ ($x = 0.02$ and 0.03) and $\text{Pb}_{0.78}\text{Sn}_{0.22}\text{Te}$ solid solutions doped with 3 at% In and 1.5 at% Pb have been investigated at $T = 300$ К. The minimums, connected with the plasma vibrations of free carriers were observed in all experimental spectra. The carrier density ($n(p)$) was estimated by the Kukharskii and Subashiev method. It was shown, that the value of n is far smaller, than that obtained from the Hall effect only for n -($\text{Pb}_{0.78}\text{Sn}_{0.22}$) $_{0.97}\text{In}_{0.03}\text{Te}$ in which, as it had been suggested earlier, the hopping conduction dominates. This result may be viewed as and independent experimental evidence of the unusual character of the conduction in n -($\text{Pb}_{0.78}\text{Sn}_{0.22}$) $_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$ solid solutions with high concentration of indium.