

Плотность локализованных состояний в твердых растворах $(\text{Pb}_{0.78}\text{Sn}_{0.22})_{0.95}\text{In}_{0.05}\text{Te}$

© С.А. Немов, Д.А. Потапова*, Ю.И. Равич, С.Д. Ханин*

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

* Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена,
191186 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 15 февраля 2001 г. Принята к печати 16 февраля 2001 г.)

Измеряется прыжковая электропроводность и термоэдс в $\text{Pb}_{0.78}\text{Sn}_{0.22}\text{Te}$ с 5 ат% In при дополнительном легировании донорной примесью Cl. Экспериментальные данные сравниваются с аналогичными результатами, полученными при дополнительном легировании акцепторной примесью Tl. При температурах 150 К и выше положительный коэффициент термоэдс изменяет знак на отрицательный при введении в достаточном количестве как доноров, так и акцепторов. Анализ зависимости термоэдс от содержания дополнительных доноров и акцепторов дает плотность локализованных состояний индия как функцию энергии. Функция имеет существенно немонотонный характер и содержит как пик плотности состояний, так и минимум между пиком и зоной проводимости.

Прыжковая проводимость в твердых растворах $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ при легировании индием наблюдается при необычно высоких температурах и содержаниях примеси [1–4], причем в температурном интервале $T = 100\text{--}400$ К перенос осуществляется прыжками между ближайшими соседями. Анализ температурной зависимости электропроводности σ позволяет найти энергию активации прыжковой проводимости [1,2], а изучение термоэдс при дополнительном легировании донорами и акцепторами — плотность локализованных состояний как функцию энергии (ε) [3,4]. Применение метода дополнительного легирования примесями, не создающими локализованных состояний вблизи уровня химического потенциала, дает возможность перемещать химический потенциал μ относительно электронных энергетических состояний и таким образом зондировать спектр локализованных состояний электронов.

Использование термоэдс S для определения плотности локализованных состояний g основано на формуле, полученной методом эффективной среды [5],

$$S = -\frac{5}{6} \frac{k}{e} \left(\frac{\varepsilon_h^2}{2kT} + \frac{2}{3} \pi^2 kT \right) \left(\frac{d \ln g}{d \varepsilon} \right)_{\varepsilon=\mu}, \quad (1)$$

где ε_h — энергия активации прыжковой проводимости. Определив ε_h из температурной зависимости электропроводности, можно из термоэдс найти величину

$$f = \left(\frac{d \ln g}{d \varepsilon} \right)_{\varepsilon=\mu} \quad (2)$$

как функцию концентрации электронов n , которая равна разности концентраций доноров и акцепторов (если каждый электрически активный атом создает или поглощает один электрон, что имеет место для всех использованных примесей — In, Tl, Cl). Численное интегрирование по n дает плотность состояний g и химический потенциал μ как функции n , т.е. зависимость $g(\mu)$ в параметрической форме [4].

Выполненные ранее исследования [3,4] показали, что при содержании индия 3 ат% термоэдс отрицательна при всех температурах и концентрациях дополнительных примесей, поэтому плотность состояний, определенная методом дополнительного легирования донорной и акцепторной примесями, монотонно увеличивается с повышением энергии. Напротив, если содержание индия достигало 5 ат%, то термоэдс изменяла знак как при повышении температуры [2], так и при добавлении акцепторной примеси Tl [4]. Анализ полученных экспериментальных кривых позволил найти пик плотности локализованных состояний [4]. Следует ожидать, что между этим пиком и зоной проводимости расположен минимум плотности состояний (мягкая щель).

Для обнаружения минимума функции $g(\mu)$ в настоящей работе измеряются и анализируются электропроводность и термоэдс в твердом растворе с содержанием индия 5 ат% при дополнительном легировании примесью Cl, которая является однозарядным донором в соединениях типа $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$. Полученные экспериментальные данные анализируются вместе с результатами измерений, выполненных при дополнительном легировании таллием [4].

Энергия активации ε_h , определенная по наклону прямых линий, изображающих зависимость $\ln \sigma$ от T^{-1} , оказалась приблизительно одной и той же величиной (45 ± 5) мэВ во всех образцах, как с хлором, так и с таллием. Таким образом, дополнительное легирование как донорами, так и акцепторами при фиксированном содержании индия практически не влияет на разброс энергетических уровней, которым определяется энергия активации прыжковой проводимости.

Температурные зависимости термоэдс при дополнительном легировании хлором (до концентрации $N_{\text{Cl}} = 2.5$ ат%) и таллием (до концентрации $N_{\text{Tl}} = 2$ ат%) представлены на рис. 1. Обращает на себя внимание, что при относительно низких температурах (150 К и

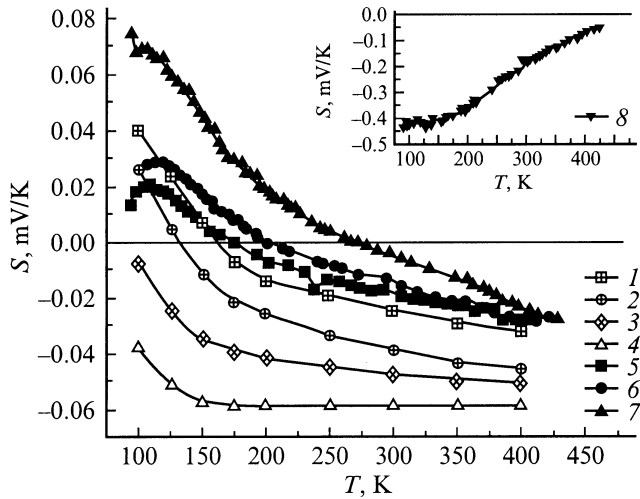


Рис. 1. Зависимость коэффициента термоэдс от температуры в образцах $(\text{Pb}_{0.78}\text{Sn}_{0.22})_{0.95}\text{In}_{0.05}\text{Te}$ при дополнительном легировании хлором и таллием. N_{Tl} , ат%: 1 — 0, 2 — 1, 3 — 1.5, 4 — 2; N_{Cl} , ат%: 5 — (0.6–1), 6 — 1, 7 — 2, 8 — 2.5.

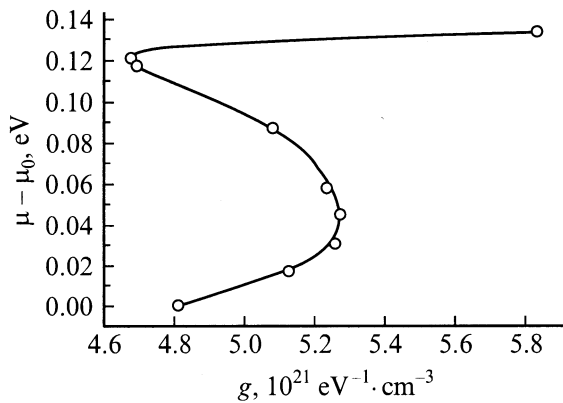


Рис. 2. Функция плотности локализованных состояний электронов в твердом растворе $(\text{Pb}_{0.78}\text{Sn}_{0.22})_{0.95}\text{In}_{0.05}\text{Te}$.

ниже), где без дополнительных примесей термоэдс положительна, легирование как акцепторами, так и донорами в достаточном количестве приводит к изменению знака термоэдс на отрицательный. Так, при содержании хлора 2.5 ат% коэффициент термоэдс отрицателен во всем диапазоне температур, в котором производились измерения.

Плотность локализованных состояний как функция энергии при температуре 150 К была вычислена методом, упомянутым выше и подробно описанным ранее [4]. Величина f как функция концентрации электронов n , полученная с использованием экспериментальной термоэдс S и энергии активации ε_h , определенной по температурной зависимости электропроводности, представлена в таблице. Функция плотности состояний $g(\mu)$ изображена на рис. 2. Кривая $g(\mu)$ имеет не только максимум, но

и минимум, расположенный на ~ 100 мэВ выше максимума. Полученный результат подтверждает выдвинутые ранее предположения о немонотонной зависимости плотности локализованных состояний от энергии.

Экспериментальные данные для термоэдс S при $T = 150$ К и функция $f(n)$ для $(\text{Pb}_{0.78}\text{Sn}_{0.22})_{0.95}\text{In}_{0.05}\text{Te}$ при дополнительном легировании Тl и Cl

№ образца	N_{Tl} , ат%	N_{Cl} , ат%	S , мкВ/К	n , 10^{20} см $^{-3}$	f , эВ $^{-1}$
C6		2.5	−400	11.25	34.08
C5		2	44	10.50	−3.749
C3		1	17	9.00	−1.448
C1		0	7	7.50	−0.596
T1	0		7	7.50	−0.596
T2	0.5		7	6.80	−0.596
T3	1		−12	6.00	1.022
T4	1.5		−35	5.30	2.982
T5	2		−58	4.50	4.941

Результаты исследований плотности локализованных состояний при содержаниях индия 3 и 5 ат% в настоящей работе и в работе [4] означают, что область локализованных состояний простирается в глубь запрещенной зоны на энергетическое расстояние по меньшей мере ~ 100 мэВ, которое заметно больше энергии активации прыжковой проводимости, равной 35–45 мэВ. Это различие можно понять, если учесть, что энергия активации прыжковой проводимости определяется средним энергетическим расстоянием между состояниями соседних примесных центров, в то время как ширина области локализованных состояний может быть увеличена крупномасштабными неоднородностями. Предположение о существовании крупномасштабного случайного потенциала привлекалось ранее [1] для объяснения зависимости энергии активации от содержания примеси In, создающей исследуемые локализованные состояния.

Список литературы

- [1] Ю.И. Равич, С.А. Немов, В.И. Прошин. ФТП, **29**, 1448 (1995).
- [2] С.А. Немов, В.И. Прошин, Ю.И. Равич. ФТП, **30**, 2165 (1996).
- [3] Т.Г. Абайдулина, С.А. Немов, В.И. Прошин, Ю.И. Равич. ФТП, **30**, 2173 (1996).
- [4] Ю.И. Равич, С.А. Немов. ФТП, **35** (2), 164 (2001).
- [5] T.E. Whall. J. Phys. C: Sol. St. Phys., **14**, L887 (1981).

Редактор Л.В. Шаронова

Density of localized states in solid solution **$(\text{Pb}_{0.78}\text{Sn}_{0.22})_{0.95}\text{In}_{0.05}\text{Te}$**

S.A. Nемов, D.A. Potapova*, Yu.I. Ravich,
S.D. Khanin*

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

* State Pedagogical Hertsen University,
191186 St. Petersburg, Russia

Abstract Hopping conductivity and Seebeck coefficient have been measured in $\text{Pb}_{0.78}\text{Sn}_{0.22}\text{Te}$ with 5 at% In and the supplementary doping with donor impurity Cl. Experimental data have been compared with results of the supplementary doping by the acceptor impurity Tl. At temperatures 150 K and higher, the positive Seebeck coefficient changes its sign becoming negative at a sufficient content of both donors and acceptors. An analysis of the dependence of thermopower on the content of supplementary donors and acceptors gives the energy dependence of the density of localized states. This function is essentially unmonotonous having both a maximum and a minimum between the maximum and the conduction band.