

## Проводимость с переменной длиной прыжка по примесным состояниям In в твердом растворе $Pb_{0.78}Sn_{0.22}Te$

© С.А. Немов, В.Э. Гасумянц, В.И. Прошин, Ю.И. Равич, Д.А. Потапова\*

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

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

(Получена 8 февраля 2000 г. Принята к печати 9 февраля 2000 г.)

Измерена термоэдс  $S$  в твердом растворе  $Pb_{0.78}Sn_{0.22}Te$ , легированном 3 ат% In при дополнительном легировании Cl до 3 ат% в широком интервале температур  $T < 100$  К. При температуре ниже 100 К знак температурной производной  $\partial|S|/\partial T$  изменяется с отрицательного на положительный. Теоретические оценки, произведенные на основе представлений о прыжковой проводимости по сильно локализованным состояниям In, показывают, что в области температур порядка 50–100 К должен происходить переход к проводимости с переменной длиной прыжка, что согласуется с полученными экспериментальными данными.

Примесь индия создает в теллуриде свинца и твердых растворах  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  глубокие резонансные электронные состояния, обладающие высокой степенью локализации (порядка  $10 \text{ \AA}$ ) [1]. Поскольку растворимость индия в  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  необычно велика для гетеровалентной примеси (выше 20 ат%), имеется возможность наблюдать и изучать прыжковую проводимость по сильно локализованным состояниям при высоких содержаниях примеси [2–5].

При увеличении содержания Sn в твердом растворе  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  примесные уровни In смещаются из зоны проводимости в сторону ее края и при  $x \approx 0.2$  переходят в запрещенную зону, превращаясь из квазилокальных в локальные. При  $x = 0.22$  уровни расположены вблизи границы запрещенной зоны с зоной проводимости, что благоприятно с точки зрения наблюдения явлений переноса, связанных с прыжковым механизмом проводимости.

Проводимость при температурах  $T$  в диапазоне 100–400 К, обусловленная перескоками электронов между соседними примесными атомами, имеет температурную зависимость активационного характера с энергией активации  $\varepsilon_h \approx 35 \text{ мэВ}$  при содержании индия  $N_{In} = 3 \text{ ат\%}$  [5]. Зависимость прыжковой проводимости от содержания индия также экспоненциальна, и ее анализ позволяет найти эффективный радиус волновой функции  $a \approx 6 \text{ \AA}$  [2]. Полученные параметры дают возможность сделать оценки, позволяющие судить, в какой мере выполняется условие, при котором перескоки происходят главным образом между ближайшими соседями. Это условие имеет вид [6]

$$2/N_{In}^{1/3} a > \varepsilon_h/kT. \quad (1)$$

В частности, при  $N_{In} = 3 \text{ ат\%}$  и  $T = 200 \text{ К}$  левая часть неравенства (1) равна 4.3, а правая — 2.1. Таким образом, при температурах выше 100 К проводимость осуществляется прыжками между соседними атомами, т.е. средняя длина прыжка не зависит от температуры. Однако при понижении температуры ниже 100 К неравенство (1) переходит в обратное, и должна наблюдаться

проводимость с переменной длиной прыжка [6], которая обладает более слабой температурной зависимостью, описываемой законом Мотта  $\sigma \propto \exp[-(T_0/T)^{1/4}]$ .

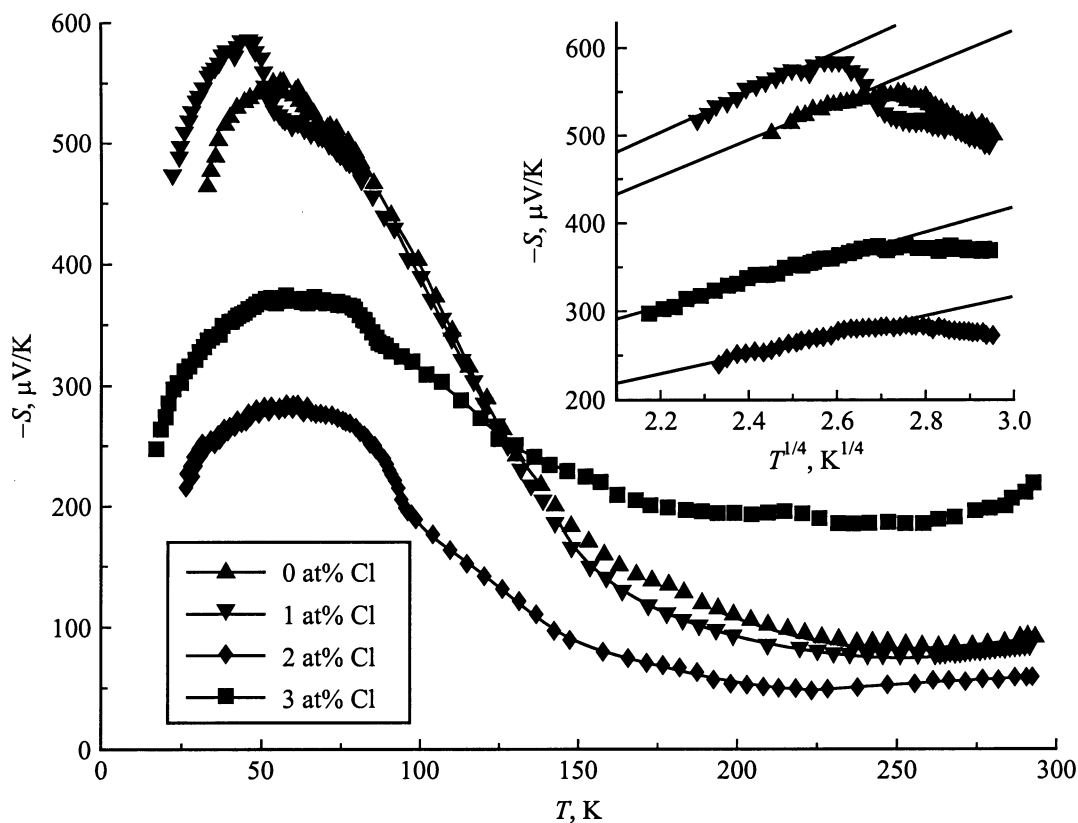
Наши измерения показали [5], что при температурах ниже 100 К имеется тенденция к ослаблению зависимости проводимости от температуры, однако результаты измерений, выполненных на различных образцах, обладают большим разбросом, по-видимому, вследствие межзеренных границ. Проводимости, подчиняющейся закону Мотта, наблюдать не удалось. Можно ожидать, что качество образцов влияет на бестоковый эффект Зеебека меньше, чем на электропроводность, и, таким образом, измерения термоэдс позволили бы обнаружить проводимость с переменной длиной прыжка в исследуемых материалах.

Экспериментальное исследование термоэдс в интервале температур 100–400 К [3] показало, что ее температурная зависимость имеет вид

$$S = A/T + BT, \quad (2)$$

характерный для ферми-стекол, если проводимость определяется прыжками между ближайшими соседями [7]. В частности, при относительно низких температурах (порядка 100–200 К в  $(Pb_{0.78}Sn_{0.22})_{1-y}In_yTe$ ), когда главным является первый член в (2), величина  $|S|$  убывает с ростом температуры. Переход к проводимости с переменной длиной прыжка должен качественно изменить характер температурной зависимости термоэдс: согласно теории [8], термоэдс растет с температурой, когда средняя длина прыжка зависит от температуры.

На рисунке приведены результаты измерений термоэдс в  $(Pb_{0.78}Sn_{0.22})_{0.97}In_{0.03}Te$  при дополнительном легировании хлором (до 3 ат%) в расширенном интервале температур, включающем область  $T < 100$  К. Как видно из рисунка, при  $T < 50$  К термоэдс растет с температурой, что характерно для проводимости с переменной длиной прыжка. Температура, при которой производная  $\partial|S|/\partial T$  изменяет знак, находится по порядку величины в соответствии с приведенной выше теоретической оценкой.



Зависимость термоэдс  $S$  от температуры в образцах  $(\text{Pb}_{0.78}\text{Sn}_{0.22})_{0.97}\text{In}_{0.03}\text{Te}$  при дополнительном легировании хлором.

Дополнительное легирование хлором позволяет смещать химический потенциал, изменяя тем самым плотность состояний  $g$  и ее энергетическую производную  $dg/d\varepsilon$  на уровне химического потенциала, определяющую величину термоэдс [7]. Анализ результатов измерения термоэдс при относительно высоких температурах 100–400 К с применением дополнительного легирования [4] показывает, что плотность состояний вблизи химического потенциала быстро изменяется с энергией, причем производная  $dg/d\varepsilon$  изменяется немонотонно. В случае, когда плотность состояний вблизи уровня химического потенциала можно считать приблизительно постоянной величиной, теория [8] дает закон  $S \propto T^{1/2}$  для температурной зависимости термоэдс. Поскольку в рассматриваемых материалах предположение о постоянстве плотности состояний несправедливо, нельзя ожидать количественного соблюдения упомянутой простой зависимости термоэдс от температуры. Действительно, как видно из рисунка, экспериментальная зависимость  $S(T)$  ближе к  $S \propto T^{1/4}$ , чем к  $S \propto T^{1/2}$  (см. вставку на рисунке).

Тем не менее общий характер немонотонной температурной зависимости термоэдс, включая область низких температур  $T < 100$  К, подтверждает предположение, что в исследуемых материалах имеет место прыжковая проводимость по сильно локализованным примесным

состояниям индия. При этом в области температур  $T \approx 100$  К и выше проводимость обусловлена прыжками между соседями, а при  $T \approx 50$  К и ниже наблюдается проводимость с переменной длиной прыжка в соответствии с теоретическими оценками.

## Список литературы

- [1] В.И. Кайданов, Ю.И. Равич. УФН, **145**, 51 (1985).
- [2] Ю.И. Равич, С.А. Немов, В.И. Прошин. ФТП, **29**, 1448 (1995).
- [3] С.А. Немов, В.И. Прошин, Ю.И. Равич. ФТП, **30**, 2164 (1996).
- [4] Т.Г. Абайдулина, С.А. Немов, В.И. Прошин, Ю.И. Равич. ФТП, **30**, 2173 (1996).
- [5] С.А. Немов, Ю.И. Равич, В.И. Прошин, Т.Г. Абайдулина. ФТП, **32**, 311 (1998).
- [6] Б.И. Шкловский, А.Л. Эфрос. *Электронные свойства легированных полупроводников* (М., Наука, 1979).
- [7] N.T.E. Whall. J. Phys. C: Sol. St. Phys., **14**, L887 (1981).
- [8] I.P. Zvyagin. In: *Hopping Transport in Solids*, ed. by B. Shklovskii, M. Pollak (Elsevier Science Publisher B.V., 1991) p. 143.

Редактор Т.А. Полянская

## Variable range hopping conduction via impurity states of In in $\text{Pb}_{0.78}\text{Sn}_{0.22}\text{Te}$ solid solution

S.A. Nemov, V.E. Gasumyants, V.I. Proshin,  
Yu.I. Ravich, D.A. Potapova\*

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

\* A.I. Herzen Russian State Pedagogical University,  
191186 St.Petersburg, Russia

**Abstract** The Seebeck coefficient  $S$  has been measured in  $\text{Pb}_{0.78}\text{Sn}_{0.22}\text{Te}$  solid solution doped with 3 at% In at the supplementary doping with Cl up to 3 at%, in a wide temperature range including that of  $T < 100$  K. The derivative  $d|S|/dT$  becomes positive when temperature  $T$  decreases below 100 K. Theoretical estimations have shown that the variable range hopping conduction must be observed at low temperatures, according to experimental data obtained.