

# Определение параметров системы носителей заряда в $Pb_{1-x}Sn_xTe$ на основе совместного анализа температурных зависимостей четырех кинетических коэффициентов

Меглей Д., Алексеева С.

Институт Электронной Инженерии и Нанотехнологий имени Д. Гицу  
Кишинев, Молдова

E-mail: meglei@nano.asm.md, alexeeva@nano.asm.md

**Abstract** – experimental studies of transport phenomena in  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  provide the most complete information on the kinetics and energy spectrum of charge carriers over a wide range of charge carrier concentration, impurities, and temperature. Significant interest in studying the properties of narrow-gap semiconductors, particularly lead telluride–tin telluride single crystals, is attributed to wide possibilities of their practical use as detectors and radiation sources in the infrared spectrum, thermocouples, strain gauges, etc. At the same time, scientific interest in these materials is primarily associated with their unusual galvanomagnetic, thermomagnetic, and magneto-optical properties. The quality requirements for the samples under study are very high in order to obtain reliable experimental results: the volume distribution of the components must be uniform, and mechanical defects must be reduced to minimum. The most effective technique for preparing homogeneous  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  single crystals is the gas-phase growth method. We have developed a special technology for gas-phase growth of single crystals using high-purity Pb, Sn, and Te of the OSCh-0000 grade as initial materials (Te was purified by multiple zone recrystallization). Microstructural and spectral studies and Hall-effect measurements have confirmed the high quality of the prepared  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  ( $x = 0.18$ ) single crystals. In this study, the temperature dependences of the thermopower and Nernst-Ettingshausen coefficient of five  $Pb_{0.82}Sn_{0.18}Te$  samples at different carrier concentrations ( $0.52 \cdot 10^{17}$  to  $15 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) have been examined.

Большой интерес к изучению свойств узкозонных полупроводников и, особенно к монокристаллам теллурид свинца-теллурид олова объясняется как широкими возможностями их практического использования в качестве детекторов и источников излучения в инфракрасной области спектра, термоэлементов, тензодатчиков и т.д. Научный же интерес к этим материалам связан, прежде всего, с их необычными гальвано-магнитными, термо-магнитными и магнито-оптическими свойствами.

Расчет кинетических коэффициентов в полуметаллах и узкозонных полупроводниках в общем случае представляет собой весьма трудную задачу поскольку строго учесть все факторы сопутствующие переносу заряда в кристалле из-за сильной непараболичности зон и

сложности механизма рассеяния носителей заряда невозможно. Тем не менее экспериментальное изучение явлений переноса в таких полупроводниках дает наиболее полную информацию о кинетике носителей заряда и их энергетическом спектре при широкой вариации концентрации носителей заряда, примесей и температуры.

Комплексное исследование термоэдс, электропроводности, эффекта Холла и Нернста–Эттингсгаузена одних и тех же образцов на основе совместного анализа позволяет определить параметры носителей заряда кинетических параметров.

Для получения достоверных экспериментальных результатов, требования к качеству исследуемых образцов очень высокие: распределение компонент по объему должно быть равномерным, а механические дефекты минимальны. Наиболее эффективным методом получения однородных монокристаллов  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  является метод роста из газовой фазы. Для роста монокристаллов из газовой фазы нами была разработана специальная технология, а в качестве исходных материалов использовались высокочистые Pb, Sn, Te марки ОСЧ-0000 (Te очищался многократной зонной перекристаллизацией). Микроструктурные, спектральные исследования, а также измерения эффекта Холла подтвердили высокое качество полученных монокристаллов  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  ( $x=0,18$ ). Температурные исследования удельной электропроводности  $\sigma$  и коэффициента Холла проводились по стандартным методикам в температурном интервале 77–400К.

На полученных монокристаллах были изучены температурные зависимости кинетических коэффициентов (термоэдс, электропроводности, эффекта Холла и поперечного эффекта Нернста–Эттингсгаузена (ПЭНЭ))  $Pb_{0.82}Sn_{0.18}Te$  с концентрацией носителей заряда в диапазоне от  $10^{17}$  до  $10^{18}$ ,  $\text{cm}^{-3}$  и в интервале температур 100 - 400 К. В предыдущих наших работах [1, 2] были представлены температурные зависимости термоэдс, электропроводности и эффекта Холла.

Измерение четырех основных кинематических коэффициентов ( $\sigma$ ,  $R$ ,  $\alpha$ ,  $Q$ ) позволяет определить основные характеристики полупроводникового

материала, включая эффективный параметр рассеяния  $r_{\text{eff}}$ , с помощью формулы [3-5]

$$\frac{Q}{R\sigma\alpha} = \frac{r_{\text{eff}} - 0,5}{r_{\text{eff}} + 1}, \quad (1)$$

$R$  - коэффициент холла,  $\sigma$  -электропроводность,  $\alpha$  - коэффициент Зеебека и  $Q$  - коэффициент Нернста-Эттинггаузена

На рис.1 представлены температурные зависимости коэффициентов Нернста-Эттинггаузена образцов  $\text{Pb}_{0,82}\text{Sn}_{0,18}\text{Te}$  с различной концентрацией носителей заряда. Температурных зависимости образцов, представленные на рис.1 немонотонны и имеют максимум. При низких температурах ПЭНЭ минимален и с ростом температуры достигает максимального значения и начинает уменьшаться. Исключение составляет образец 5(не представлен на рисунке) с минимальной концентрацией дырок  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  у которого, при низких температурах ПЭНЭ максимален и с ростом температуры он резко падает.

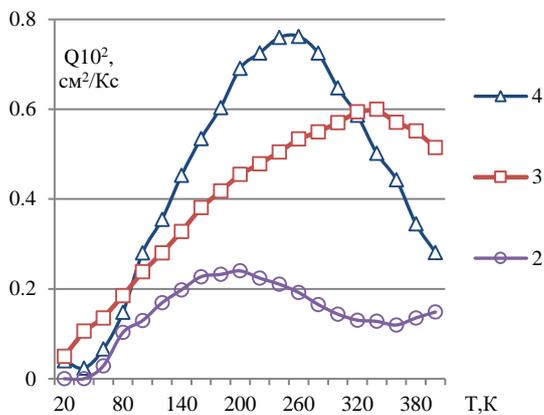


Рис.1. Температурная зависимость коэффициентов Нернста-Эттинггаузена образцов  $\text{Pb}_{0,82}\text{Sn}_{0,18}\text{Te}$  с различной концентрацией носителей заряда  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ : (2-15; 3-5,2; 4-2,6)

Экспериментальные температурные зависимости эффекта Холла и электропроводности  $\text{Pb}_{0,82}\text{Sn}_{0,18}\text{Te}$  с различными концентрациями носителей представлены на рис. 2,3.

Температурных зависимости образцов, представленные на рис. 2,3 немонотонны и имеют максимум.

Температурные зависимости эффективного параметра рассеяния  $r_{\text{eff}}$  на основе данных представленных на рис. 1,2,3и 4 могут быть рассчитаны по формуле 1.

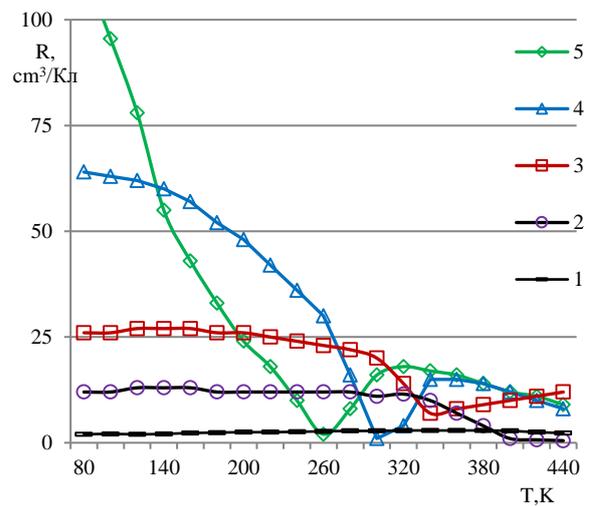


Рис.2. Температурная зависимость коэффициентов Холла образцов  $\text{Pb}_{0,82}\text{Sn}_{0,18}\text{Te}$  с различной концентрацией носителей заряда  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ : (1-200; 2-15; 3-5,2; 4-2,6; 5-0,52).

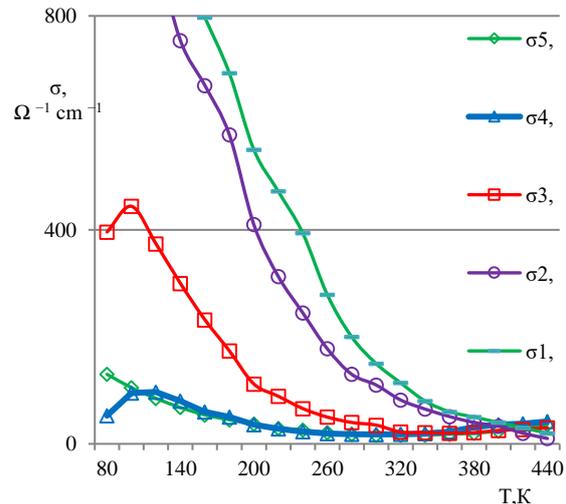


Рис.3. Температурная зависимость удельной электропроводности образцов  $\text{Pb}_{0,82}\text{Sn}_{0,18}\text{Te}$  с различной концентрацией носителей заряда  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ : (1-200; 2-15; 3-5,2; 4-2,6; 5-0,52).

На рис.4 представлены температурные зависимости термоэдс  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  ( $x=0,18$ ) при различных концентрациях носителей заряда. Для образцов с низкой концентрацией носителей заряда наблюдается инверсия знака термоэдс, что свидетельствует о переходе к области собственной проводимости (кривые 4 и 5). Инверсия знака термоэдс у образцов с более низкой концентрацией носителей заряда наблюдается при более низких температурах.

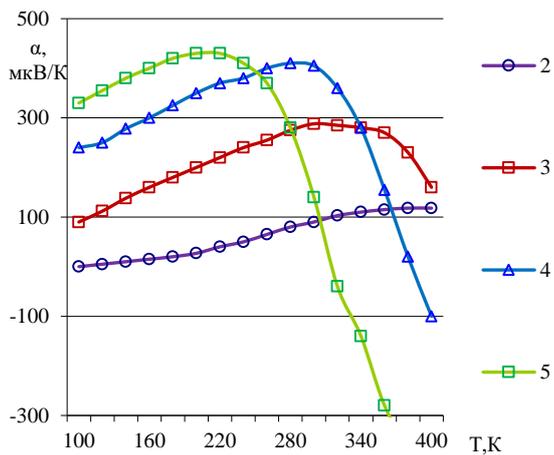


Рис.4. Температурная зависимость термоэдс образцов  $Pb_{0,82}Sn_{0,18}Te$  с различной концентрацией носителей заряда  $10^{17} cm^{-3}$ : (1-200; 2-15; 3-5,2; 4-2,6; 5-0,52).

Для интерпретации полученных экспериментальных данных была использована двухзонная модель, предложенная Готтвиком с линейным температурным членом [6-9]. В этом приближении предполагается что вблизи поверхности Ферми имеет место лоренцевский резонанс. Данная модель позволяет на основании экспериментальных данных определить энергию Ферми, а также положение и ширину резонанса.

Для теоретического анализа в рамках данной модели воспользуемся формулами:

$$S(T) = \frac{AT}{B^2 + T^2} \quad (2)$$

$$A = \frac{2(E_0 - E_F)}{e} \quad (3)$$

$$B^2 = 3 \frac{(E_0 - E_F)^2 + \Gamma^2}{\pi^2 k_B^2} \quad (4)$$

Параметры  $E_0$  и  $\Gamma$  определяются положением центра и шириной резонанса на энергетической оси соответственно.

Резонансный пик, даваемый формулой (2), хорошо описывает температурную зависимость  $S(T)$ . Термоэдс проходит через максимум в точке  $T=B$ . Таким образом мы можем определить  $B$  и рассчитать  $A$ ,  $E_0$ ,  $\Gamma$ .

Параметры  $A$ ,  $B$ ,  $E_0$ ,  $\Gamma$  рассчитанные по формулам 2-4

	$S(T)_{max}$	$B, K$	$A, \text{эВ/Кл}$	$E_f, \text{эВ}$	$E_0, \text{эВ}$	$\Gamma, \text{эВ}$
5	430	200	$5,38 \cdot 10^{17}$	0,066	0,043	0,021
4	410	280	$7,18 \cdot 10^{17}$	0,017	0,057	0,016
3	288	300	$5,40 \cdot 10^{17}$	0,03	0,043	0,0449

#### БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] D. Meglei and S. Alekseeva, *Mold. J. Phys. Sci.* 13 (1–2), 20, (2014).
- [2] D. Meglei and S. Alekseeva, *Mold. J. Phys. Sci.* 15 (3–4), 134, (2016).
- [3] С.А. Немов, Н.М. Благих, А. Аллаххах, Л.Д. Иванова ФТП, 49, 1346, (2015)
- [4] С.А. Немов, Н.М. Благих, А.А. Аллаххах, Л.Д. Иванова, М.Б. Джафаров, А.Е. Демченко ФТТ, 58, 2208, (2016)
- [5] В.Э. Гасумянц, О.А. Мартынова, Р.М. Дубровин ФТТ, 57, 2293, (2015)
- [6] Gottwick U, Gloss K, Horn S, Stegiich E, and Grewe A. // *J. Magn. Magn. Mater.* 1985. Vol. 47-48. P. 536
- [7] Shaban Reza Ghorbani Stockholm Doctoral Dissertation Royal Institute of Technology Solid State Physics Department of Physics & IMIT 2002, [https://www.researchgate.net/profile/S\\_Ghorbani/publication/267389946\\_Structural\\_and\\_Electrical\\_Transport\\_Properties\\_of\\_Doped\\_Nd-123\\_Superconductors/links/54cf6bb50cf298d656636e70/Structural-and-Electrical-Transport-Properties-of-Doped-Nd-123-Superconductors.pdf](https://www.researchgate.net/profile/S_Ghorbani/publication/267389946_Structural_and_Electrical_Transport_Properties_of_Doped_Nd-123_Superconductors/links/54cf6bb50cf298d656636e70/Structural-and-Electrical-Transport-Properties-of-Doped-Nd-123-Superconductors.pdf)
- [8] С.С. Рагимов, И.Н. Аскерзаде, *Журнал технической физики*, 2010, том 80, вып. 10, 150
- [9] О. С. Комарова, В.Э. Гасумянц, *Физика твердого тела*, 2010, том 52, вып. 4, 625