

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА PbTe ЛЕГИРОВАННОГО ТАЛЛИЕМ

Г.А. АХМЕДОВА, Г.З. БАГИЕВА, Н.Б. МУСТАФАЕВ, З.Ф. АГАЕВ

*Институт Физики НАН Азербайджана  
AZ 1143, Баку, пр. Г. Джавида 33*

В области температур 80-300К исследованы коэффициенты термоэдс ( $\alpha$ ), электропроводности ( $\sigma$ ), Холла (R), теплопроводности ( $\chi$ ) и подвижность носителей заряда ( $\mu$ ) образцов PbTe легированного атомами таллия до ~0,4 ат.%. Установлено, что характер зависимостей кинетических параметров от температуры и содержания примесей атомов таллия удовлетворительно объясняется влиянием второй валентной зоны PbTe.

In a temperature range 80-300K, thermo-e.m.f. ( $\alpha$ ), electrical conductivity ( $\sigma$ ), Hall (R) and heat conductivity ( $\chi$ ) coefficients and mobility of the charge carriers ( $\mu$ ) of PbTe samples, alloyed by thallium atoms up to ~ 0.4 at. %, have been investigated. It is established that character dependences of kinetic parameters on temperature and contents of thallium impurity atoms are satisfactorily explained by the influence of second valence zone of PbTe.

Примеси таллия в PbTe обладают акцепторным действием. Особенности электрофизических и оптических свойств PbTe, легированного таллием, объясняются влиянием резонансных (квазилокальных) состояний, связанных с примесью Tl, расположенных внутри валентной зоны PbTe [1]. В PbTe, легированном таллием, обнаружены ряд интересных явлений: сверхпроводимость с необычайно большой для полупроводников критической температурой, резонансное рассеяние дырок, аномалии сопротивления, сильная компенсация акцепторного действия таллия собственными дефектами кристаллической решетки и т.д. [2-4]. Выявление и исследование примесных состояний в PbTe позволяет управлять свойствами этих соединений, их рабочими характеристиками и представляет интерес как с научной, так и с практической точек зрения [5].

В настоящей работе исследованы коэффициенты электропроводности ( $\sigma$ ), термоэдс ( $\alpha$ ), теплопроводности ( $\chi$ ), Холла (R) и подвижность носителей заряда ( $\mu$ ) в PbTe легированного атомами таллия (Tl).

Образцы получались прямым сплавлением исходных компонентов (свинец марки С-0000 и зонно-очищенный теллур) в графитизированных кварцевых ампулах, откачанных до остаточного давления  $\sim 10^{-2}$  Па. Синтез образцов проводился в течение 6 часов при температуре  $\sim 1100^\circ\text{C}$  с применением вибрационного перемешивания. Образцы были легированы 0,005; 0,01; 0,05; 0,2 и 0,4 ат.% Tl и имели p-тип проводимости.

Образцы для измерения размерами  $(3 \times 5 \times 12)$  мм<sup>3</sup> вырезались из литых слитков на электроискровой установке. Для удаления нарушенного слоя образующегося на поверхности образца при резке, поверхности образцов после резки обрабатывали электрохимическим травлением в растворе KOH+C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>O+H<sub>2</sub>O при  $\sim 25^\circ\text{C}$ . Время электрохимического травления составляло 20-25 с при плотность тока, проходящего через образец в процессе травления, 0,5 А/м<sup>2</sup>.

Электрические контакты наносились сплавом состава масс. %: 57Вi +43Sn с помощью флюса ZnCl<sub>2</sub>+NH<sub>4</sub>Cl+NiCl<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O.

Коэффициенты электропроводности ( $\sigma$ ), термоэдс ( $\alpha$ ) и Холла (R) измерены на постоянном токе потенциометрическим, а теплопроводность ( $\chi$ ) - абсолютно стационарным методами, описанным в [6].

Результаты измерений кинетических параметров приведены на рисунках и в таблице. Как следует из таблицы, с ростом содержания примесей атомов таллия концентрация дырок при 80К растет и при содержании 0,4 ат.% Tl составляет  $p=1,04 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>. Так как элемент III группы Tl имеет во внешней оболочке на один электрон меньше, чем замещаемый им атом Pb из IV группы то число состояний в валентной зоне растет. Следовательно, с ростом содержания атомов Tl концентрация дырок растет. Анализ температурных зависимостей коэффициента Холла показывает, что R (следовательно, концентрация носителей заряда) имеет очень слабую температурную зависимость. Для всех исследованных образцов с ростом температуры термоэдс ( $\alpha$ ) растет, а электропроводность ( $\sigma$ ) уменьшается. Причем с ростом содержания примесей Tl  $\alpha$  и  $\sigma$  по абсолютной величине уменьшаются. Аналогичная зависимость наблюдается также для теплопроводности ( $\chi$ ) образцов.

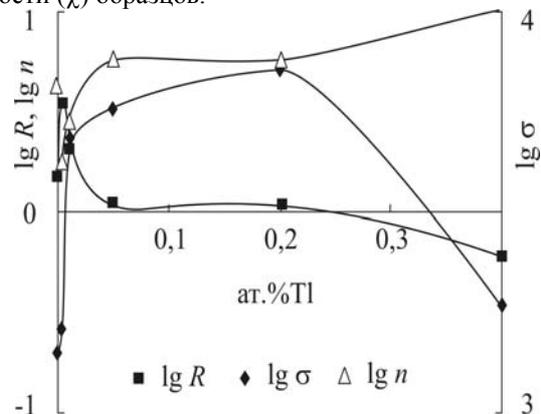


Рис. 1. Зависимость коэффициентов электропроводности, Холла и концентрации носителей заряда в PbTe от содержания примеси атомов таллия при температуре 80К.

На рис.1 представлена зависимость коэффициентов электропроводности, Холла и концентрации носителей заряда от содержания атомов таллия в PbTe при температуре 80К. Как следует из рисунка, с ростом ат.% Tl электропроводность  $\sigma$  проходит через максимум. Максимальное значение электропроводности соответствует  $\sim 0,2$  ат.% Tl.

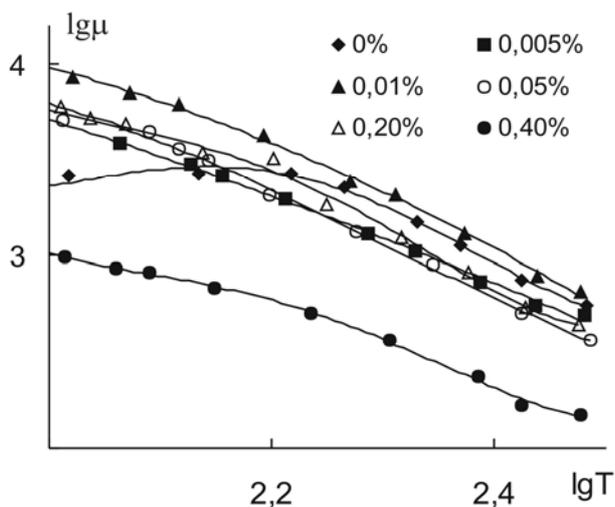


Рис. 2. Температурная зависимость подвижности носителей заряда в PbTe легированного атомами таллия.

На рис. 2 приведена температурная зависимость подвижности исследованных образцов. Для всех образцов подвижность с ростом температуры уменьшается. Температурная зависимость подвижности происходит по закону  $\mu \sim T^{-n}$ . Показатель степени температурной зависимости  $n$  изменяется в пределах от  $-2,1$  до  $-2,9$ . Эти значения объясняются превалирующей ролью рассеяния дырок на акустических колебаниях кристаллической ре-

шетки и ростом средней эффективной массы дырок с температурой. Такое поведение кинетических коэффициентов, по-видимому, связано с влиянием второй валентной зоны [7].

Расчеты [7-9] показывают, что главные экстремумы электронной и дырочной зон в PbTe расположены на краю зоны Бриллюэна в направлении (111). Анализ концентрационной и температурной зависимостей электрических и оптических свойств указывает на существование в PbTe второй валентной зоны (зоны тяжелых дырок) с относительно большой эффективной массой (около  $1,2 m_0$ ). Энергетический зазор между краями тяжелых и легких дырок при низких температурах равен  $\sim 0,17$  эВ и с ростом температуры уменьшается со скоростью  $-4 \times 10^{-4}$  эВ/К, так что энергетическое расстояние между краями зоны проводимости и зоной тяжелых дырок остается неизменным. Энергетический зазор между двумя валентными зонами при 0, 150 и 300К соответственно равен 0,17; 0,14 и 0,04 эВ. Это приводит к росту относительной концентрации тяжелых дырок с повышением температуры, в результате чего увеличивается средняя эффективная масса дырок. Другими словами, роль второй валентной зоны (зоны тяжелых дырок) в кинетических явлениях растет. Таким образом, температурная зависимость  $\sigma$  будет определяться как увеличением концентрации носителей тока, так и уменьшением их подвижности ( $\mu$ ) за счет увеличения эффективной массы дырок. Кроме этого, в указанном температурном интервале носители, в основном, рассеиваются на акустических колебаниях решетки, что также приводит к уменьшению  $\mu$  и  $\sigma$  с ростом температуры.

Рост коэффициента термоэдс во всей измеренной области температур обусловлен ростом средней эффективной массы дырок с температурой [10].

Таблица

Параметры PbTe легированного атомами таллия

ат. %Tl	77К					
	$\sigma, \text{Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$	$\alpha, \text{мкВ/К}$	$R, \text{см}^3/\text{Кл}$	$\chi, \text{Вт/м}\cdot\text{К}$	$p \cdot 10^{-18}, \text{см}^{-3}$	$\mu, \text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$
0	1415	74,5	1,5	9,7	4,2	2123
0,005	1604	102	3,5	8,6	1,8	5164
0,01	4874	81,7	2,1	9,6	2,97	10235
0,05	5689	58	1,1	6,9	5,7	6258
0,2	7135	36,5	1,1	8,6	5,7	7849
0,4	1852	74,5	0,6	6,4	10,4	1111
300К						
0	306	267	1,8	2,6	3,5	551
0,005	123	315	4	4,2	1,6	492
0,01	282	273	2,3	3,4	2,7	648
0,05	281	253	1,3	2,5	4,8	365
0,2	336	248	1,3	2,9	4,8	437
0,4	211	202	0,7	2,0	8,9	148

- [1]. *В.И.Кайданов, С.А.Немов, Ю.И.Равич, А.М.Зайцев.* ФТП, 1983, Т. 17, в. 9, с. 1613 – 1617.
- [2]. *В.И. Кайданов, Р.Б.Мельник, С.А.Немов* Тез. докл. I Всесоюз. науч.-техн. конф. «Получение и свойства полупроводниковых соединений типа  $A^{IV}B^{VI}$  и  $A^{IV}B^{VI}$  и твердых растворов на их основе». М.: Изд. Москов. Ин-та стали и сплавов, 1977, с. 172.
- [3]. *А.И.Вейс, В.И.Кайданов, С.А.Немов, С.Н.Емелин, А.Я.Ксендзов, Ю.К.Шалабутов.* ФТП, 1979, т.13, №7, с.1308.
- [4]. *В.И.Кайданов, С.А.Немов* ФТП, 1981, т.15, №3, с.542.
- [5]. *В.И.Кайданов, Ю.И.Равич* УФН, 1985, т.145, в.1, с.51
- [6]. *В.И.Охотин, А.С.Пушкарский, Р.П.Боровиков, В.А.Симонов* Методы измерения характеристик термоэлектрических материалов и преобразователей. М.: Наука, 1974, 168с.
- [7]. *R.N.Tauber, A.A.Machonis, I.B.Cadoff* J. Appl. Phys. 1966, v.37, №113, p. 4855 – 4860.
- [8]. *Е.Патли* Сульфид, селенид и теллурид свинца. Материалы, используемые в полупроводниковых приборах. М.: Мир. 1968. с.97-146.
- [9]. *Ю.И.Равич* О свойствах халькогенидов свинца. Материалы, используемые в полупроводниковых приборах. М.: Мир. 1968. С.271-276
- [10]. *З.Ф.Агаев, Э.А.Аллахвердиев, Г.М.Муртузов, Д.Ш.Абдинов* Выращивание и электрические свойства кристаллов твердых растворов  $Pb_{1-x}Mn_xTe$ . Неорг.материалы, 2003, т.39, №5, с.543-545

Received: 10.02.2007