

УДК 541-67; 863/868

## Термоэлектрическая добротность твердых растворов $(\text{SnSe})_{1-x}(\text{Er}_2\text{Se}_3)_x$

Дж. И. Гусейнов, М. И. Мургузов, Ш. С. Исмаилов, О. М. Гасанов, Т. А. Джафаров

*Комплексными методами физико-химического анализа был изучен характер взаимодействия и природа дефектности в системе  $\text{SnSe}-\text{Er}_2\text{Se}_3$ . Исследованы температурные и концентрационные зависимости электрических (электропроводность  $\sigma$ , коэффициент Холла  $R$ ), термоэлектрических (термоэдс  $S$ ) и тепловых (теплопроводность  $\chi_{\text{tot}}$ ) характеристик твердых растворов  $(\text{SnSe})_{1-x}(\text{Er}_2\text{Se}_3)_x$  ( $x = 0, 0,0005; 0,0025; 0,005; 0,0075; 0,01$ ) в интервале температур 300—950 К. По результатам  $\sigma$  и  $S$  рассчитаны термоэлектрическая мощность  $S^2\sigma$ , добротность  $Z$  и эффективность  $\delta$  для данных твердых растворов. Установлено, что при концентрации носителей тока  $n \cong 2,81 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  при комнатной температуре  $S^2\sigma$  и  $Z$  имеют максимальные значения.*

PACS: 72.15.Jf, 72.20.Pa

*Ключевые слова:* твердые растворы, электропроводность, коэффициент Холла, термоэдс, теплопроводность, добротность, эффективность.

### Введение

Развитие твердотельной электроники последних десятилетий показало, что ее перспективы в значительной степени определяются успехами в области полупроводникового материаловедения и, прежде всего, в области создания новых материалов, позволяющих улучшить параметры известных приборов и создать устройства с принципиально новыми функциональными возможностями.

Термоэлектрические материалы традиционно используются при создании устройств прямого преобразования тепловой энергии в электрическую, т. н. термоэлектрических генераторных устройств. Термоэлектрические генераторы достаточно давно используются в преобразователях солнечной энергии, безмашинных системах охлаж-

дения, радиоизотопных источниках и др. агрегатах благодаря простоте процесса, большому сроку службы, высокой надежности и стабильности параметров и другим привлекательным эксплуатационным свойствам [1].

В настоящее время основными используемыми материалами для термоэлектрических преобразователей, работающих при комнатной температуре, являются сплавы на основе теллуридов висмута и сурьмы [2]. Однако более широкое применение термоэлектрических охладителей и генераторов сдерживает невысокий коэффициент полезного действия (на уровне 8 %) [3]. Поэтому важной задачей является поиск новых материалов с высокой термоэлектрической эффективностью.

Одним из перспективных способов улучшения термоэлектрических свойств материала является модификация его химического состава путем приготовления его твердых растворов и сплавов или путем выращивания новых химических соединений на его основе. С точки зрения термоэлектрических применений, одним из основных преимуществ твердых растворов по сравнению с чистыми веществами является более низкая теплопроводность решетки, обусловленная рассеянием фононов на структурном беспорядке [4].

Известно, что введение различных добавок в исходные соединения может оказывать значительное влияние на электрофизические свойства получаемых материалов [5]. Одним из перспективных

Гусейнов Джахангир Ислам оглы, доцент.  
Мургузов Мирзали Исмаил оглы, профессор.  
Исмаилов Шариф Салех оглы, доцент.  
Гасанов Октай Маирович, доцент.  
Джафаров Тапдыг Аслан оглы, преподаватель.  
Азербайджанский государственный педагогический университет.  
Азербайджан, Az 1000, г. Баку, ул. Узеира Гаджибеки, 68.  
Тел. +99451 946-57-78.  
E-mail: cih\_58@mail.ru, 1959oktay@mail.ru

Статья поступила в редакцию 12 апреля 2016 г.

© Гусейнов Дж. И., Мургузов М. И., Исмаилов Ш. С., Гасанов О. М., Джафаров Т. А., 2016

направлений синтеза новых термоэлектрических материалов является синтез твердых растворов и соединений на основе  $A^{IV}B^{VI}$  с участием редкоземельных элементов, характеризующихся низкими значениями теплопроводности. Одной из важных особенностей редкоземельных твердых растворов на основе  $A^{IV}B^{VI}$  является высокая дефектность их структуры. Положительное влияние самария на термоэлектрическую добротность твердых растворов  $Sm_xPb_{1-x}Te$  было показано в работе [6]. Исследования возможностей применения редкоземельных элементов для легирования термоэлектрических материалов в получении высокоэффективных термоэлектрических преобразователей дает возможность расширить рабочие диапазоны в сторону высоких температур [7].

В работе [8] увеличение отношения  $\frac{u}{\chi_{ph}}$  ( $u$  —

подвижность носителей заряда,  $\chi_{ph}$  — фононная теплопроводность) обосновывается изменением кинетических свойств кристаллов в процессе искажения кристаллической решетки, что является следствием образования дополнительных дефектов. Для таких материалов характерны интересные физические процессы, а именно: высокая подвижность носителей заряда, низкая теплопроводность и перспективы их функционирования в широких температурных и концентрационных диапазонах. С этой точки зрения, особый интерес вызывает случай, когда снижение интенсивности рассеяния фононов на фононах компенсируется возрастанием интенсивности рассеяния носителей заряда на дефектах [9]. Так как эффективная длина волны электронов больше, чем длина волны фононов, то это приводит к общему увеличению значения  $\frac{u}{\chi_{ph}}$ . Именно такая ситуация реализуется в твер-

дых растворах системы  $(SnSe)_{1-x}(Er_2Se_3)_x$ . Вышеизложенные особенности могут быть предпосылкой проявления высокой термоэлектрической добротности  $(SnSe)_{1-x}(Er_2Se_3)_x$ .

Целью данной работы являлось изучение характера взаимодействия и природа дефектности в системе  $SnSe-Er_2Se_3$  на базе комплексных методов физико-химического анализа.

### Методика эксперимента

Сплавы системы  $(SnSe)_{1-x}(Er_2Se_3)_x$  синтезировались из исходных элементов в эвакуированных до давления 0,1333 Па кварцевых ампулах. Синтез осуществляли в два этапа: первоначально ампулы с веществом нагревали со скоростью

4—5 град/мин. до температуры плавления селена и выдерживали при этой температуре 3—4 часа, после чего температуру повышали до 950—1000 °C (в зависимости от состава) и выдерживали 8—9 часов. При синтезе тройных сплавов системы  $SnSe-Er_2Se_3$  в качестве исходных компонентов использовали элементы особой чистоты: олово марки «В4-000», селен «ОС417-4» и химически чистый элементарный эрбий «ЭР-2».

Монокристаллы выращивались методом Бриджмена. Составы синтезированных образцов твердых растворов  $(SnSe)_{1-x}(Er_2Se_3)_x$  отвечали значениям  $x$ , а именно: образец № 1 —  $x = 0,0$ ; 2 —  $x = 0,0005$ ; 3 —  $x = 0,0025$ ; 4 —  $x = 0,005$ ; 5 —  $x = 0,0075$ ; 6 —  $x = 0,01$ ; (номера образцов соответствуют составам сплавов). Синтезированные образцы для комплексного физико-химического анализа и электрофизических исследований подвергали отжигу в течение 100—140 часов в зависимости от состава, причем время отжига увеличивалось с возрастанием содержания эрбия. Гомогенизирующий отжиг полученных однофазных образцов проводили в среде спектрально чистого аргона при 800 К. После отжига из слитков кристаллов на электроискровой установке вырезались образцы размерами  $2 \times 4 \times 18$  мм.

Взаимодействие в системе  $SnSe-Er_2Se_3$  изучали методами дифференциально-термического (ДТА), рентгенофазового (РФА), микроструктурного (МСА) анализов, а также измерением микротвердости и определением плотности. РФА проводили на рентгеновском приборе модели D-2 PHSER с использованием  $CuK_{\alpha}$ -излучения с Ni-фильтрами.

Термоэдс измеряли стационарным способом по методике, изложенной в [10]. Электропроводность и коэффициент Холла измеряли при постоянном токе и постоянном магнитном поле электромагнита [11]. Теплопроводность определялась абсолютно стационарным способом по методике, описанной [12]. Все измерения проведены в интервале температур 300÷950 К.

При определении коэффициента Холла и концентрации учитывалась смешанная проводимость и холл-фактор. Погрешность измерения термоэдс составила менее 4 %, коэффициента Холла ~2,7 %, а теплопроводности ~5,6 %.

### Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Полученные сплавы компактны, с металлическим блеском. С увеличением содержания эрбия цвет сплавов становится темно-серым, а далее меняется до черного. Образцы устойчивы по отно-

шению к воздуху и воде. Результаты ДТА сплавов системы SnSe-Er<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> показали, что все фиксированные эффекты на кривых нагревания и охлаждения обратимы.

В результате изучения микроструктуры выявлено, что вблизи SnSe имеется ограниченная область растворимости [15—17]. Анализ результатов МСА показал, что растворимость Er<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> в SnSe при комнатной температуре составляет 3,5 мол.%, а при температуре вблизи эвтектики доходит до 10 мол.%. В интервале 5—40 мол.% Er<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> все сплавы двухфазны. РФА сплавов показал, что на дифрактограммах в интервале концентраций 0—3,5 мол.% Er<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> дифракционные максимумы идентичны [16], причем с увеличением содержания эрбия в составе SnSe на дифрактограммах появляются новые, нехарактерные SnSe-максимумы, относящиеся к Er<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>.

В сплавах из области твердых растворов с увеличением концентрации эрбия в составе происходит увеличение плотности  $\rho$  и микротвердости  $H_{\mu}$ . Например, для образцов № 1, № 4 и № 6 для плотностей и микротвердостей получены следующие результаты:  $\rho_1 = 6,18$ ,  $\rho_4 = 6,20$  и  $\rho_6 = 6,22$  г/см<sup>3</sup>;  $H_{\mu 1} = 50$ ,  $H_{\mu 4} = 81$  и  $H_{\mu 6} = 91$  кг/мм<sup>2</sup>, которые хорошо соответствуют литературным данными [15, 16].

В работе исследовались температурные зависимости удельной электропроводности, коэффициентов Холла, термоэдс и теплопроводности в температурном интервале 300—950 К для сплавов (SnSe)<sub>1-x</sub>(Er<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>)<sub>x</sub>. Температурная зависимость электропроводности подобна исходному соединению SnSe и твердых растворов (SnSe)<sub>1-x</sub>(Er<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>)<sub>x</sub>, т. е. при низких температурах наблюдается относительно слабое увеличение электропроводности за счет электронов, перешедших из примесных уровней в зону проводимости. При комнатной температуре число носителей, перешедшие из примесных уровней в зону проводимости, стабилизируется, и, соответственно, электропроводность уменьшается в связи с ослаблением холловской подвижности. В области собственной проводимости электропроводность увеличивается из-за роста концентрации собственных носителей тока. Изменение коэффициента Холла с температурой хорошо согласуется с температурным изменением удельной электропроводности кристаллов (SnSe)<sub>1-x</sub>(Er<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>)<sub>x</sub>, т. е. при низких температурах  $R$  остается постоянным, а с наступлением собственной проводимости уменьшается с ростом температуры. Коэффициент термоэдс кристаллов при низких температурах в области примесной проводимости увеличивается, а с наступлением собственной проводимости уменьшается, что характерно для полупроводниковых соединений и твердых растворов со сложной зонной структурой [13].

Теплопроводность SnSe с вариацией катионного состава в направлении увеличения атомных весов катионов замещения закономерно уменьшается. Однако с переходом от SnSe с упорядоченным расположением атомов к твердым растворам замещения на его основе наблюдаются отклонения от обычной закономерности изменения теплопроводности в зависимости от атомного веса. По-видимому, это вызвано тем, что для кристаллов (SnSe)<sub>1-x</sub>(Er<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>)<sub>x</sub> превалирует рассеяние фононов на локальных точечных дефектах. Основным фактором, влияющим на тепловое сопротивление, является локальные изменения плотности и упругих свойств среды. Локальное изменение плотности в основном зависит от разницы средних атомных весов, а локальные изменения упругих свойств — от разности атомных радиусов растворителя и растворенного вещества.

Эффективность термоэлектрического преобразования определяется величиной  $Z = \frac{S^2\sigma}{\chi}$ ,

имеющую размерность обратной температуры. Величина  $Z$  зависит только от физических свойств материала преобразователя. Ее чаще пользуют в виде безразмерной величины комбината

$$ZT = \frac{S^2\sigma T}{\chi},$$

называемой термоэлектрической

добротностью. Из приведенных формул видно, что высококачественный термоэлектрический материал должен одновременно иметь высокую электропроводность, большую термоэдс и низкую теплопроводность. Термоэдс и проводимость определяются только электронными свойствами материала, и поэтому их часто объединяют в одну величину  $P = S^2\sigma$ , которую называют «фактором мощности».

Из полученных нами экспериментальных результатов следует, что в твердых растворах (SnSe)<sub>1-x</sub>(Er<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>)<sub>x</sub> с ростом содержания эрбия в составе электропроводность увеличивается, а теплопроводность убывает. Поэтому можно было ожидать, что в этой системе в определённых составах и в определенном температурном интервале термоэффективность достигнет значения, представляющего практический интерес.

Для выяснения механизма изменения термоэлектрической добротности  $Z$  в твердых растворах (SnSe)<sub>1-x</sub>(Er<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>)<sub>x</sub> проведен одновременный анализ всех трех параметров, определяющих  $Z(S, \sigma, \chi)$ . Результаты расчета при комнатной температуре приводятся в таблице. Как следует из таблицы, для состава (SnSe)<sub>0,995</sub>(Er<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>)<sub>0,005</sub> коэффициент термоэффективности оказывается высокой и представляет практический интерес.

Таблица

**Кинетические коэффициенты и термоэлектрические параметры  
твёрдых растворах  $(\text{SnSe})_{1-x}(\text{Er}_2\text{Se}_3)_x$  при  $T = 300 \text{ K}$**

	Составы сплавов $(\text{SnSe})_{1-x}(\text{Er}_2\text{Se}_3)_x$	$R, \text{см}^3/\text{Кл}$	$p(n), \text{см}^{-3}$	$\sigma, \text{Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$	$u, \text{см}^2/\text{В}\cdot\text{сек}$	$S, \text{мкВ}/\text{К}$	$\chi \cdot 10^3, \text{Вт}/\text{см}\cdot\text{К}$	$Z \cdot 10^3, \text{Г}^{-1}$	$ZT$	$\sigma, \text{К}\cdot\text{мВ}^{-1}$	$S^2 \cdot 10^{-3}, \text{Вт}/\text{мг}\cdot\text{К}^2$
1	$x = 0,0$	1,7	3,76	97	165	430	18,7	0,96	0,288	0,52	1,79
2	$x = 0,0005$	1,8	3,52	105	189	-449	15,8	1,34	0,402	0,64	2,1
3	$x = 0,0025$	2,4	-2,65	182	437	-392	13,6	2,06	0,618	0,97	2,8
4	$x = 0,005$	2,2	-2,81	217	477	-376	12,4	2,47	0,741	1,1	3,1
5	$x = 0,0075$	0,5	-12,7	176	111	-359	12,7	2,27	0,681	1,1	2,3
6	$x = 0,01$	0,32	-20,6	238	76	-292	13,2	2,03	0,609	1,3	2

Далее были исследованы температурные зависимости основных кинетических коэффициентов и термоэлектрической эффективности  $Z$  в интервале температур  $T = 300 \div 950 \text{ K}$  для расплавов, соответствующие оптимальному составу  $(\text{SnSe})_{0,995}(\text{Er}_2\text{Se}_3)_{0,005}$ . На рис. 1 приведены температурные зависимости термоэдс и теплопроводности для этих расплавов (образец № 4), а на рис. 2 — для электропроводности и термоэлектрической эффективности  $Z$ . Как видно из графиков, значение термоэдс, пройдя через локальный минимум в

интервале температур  $T = 540 \div 620 \text{ K}$ , далее продолжает уменьшаться, а электропроводность образца в этом же интервале температур проходит через незначительный максимум, причем при температуре  $T > 780 \text{ K}$  наблюдается интенсивный рост  $\sigma(T)$ . Как видно, из температурной зависимости теплопроводности образца  $(\text{SnSe})_{0,995}(\text{Er}_2\text{Se}_3)_{0,005}$ , наблюдается его незначительное увеличение в интервале температур  $T = 300 \div 700$ . При дальнейшем же увеличении температуры зависимость  $\chi(T)$  монотонно уменьшается.

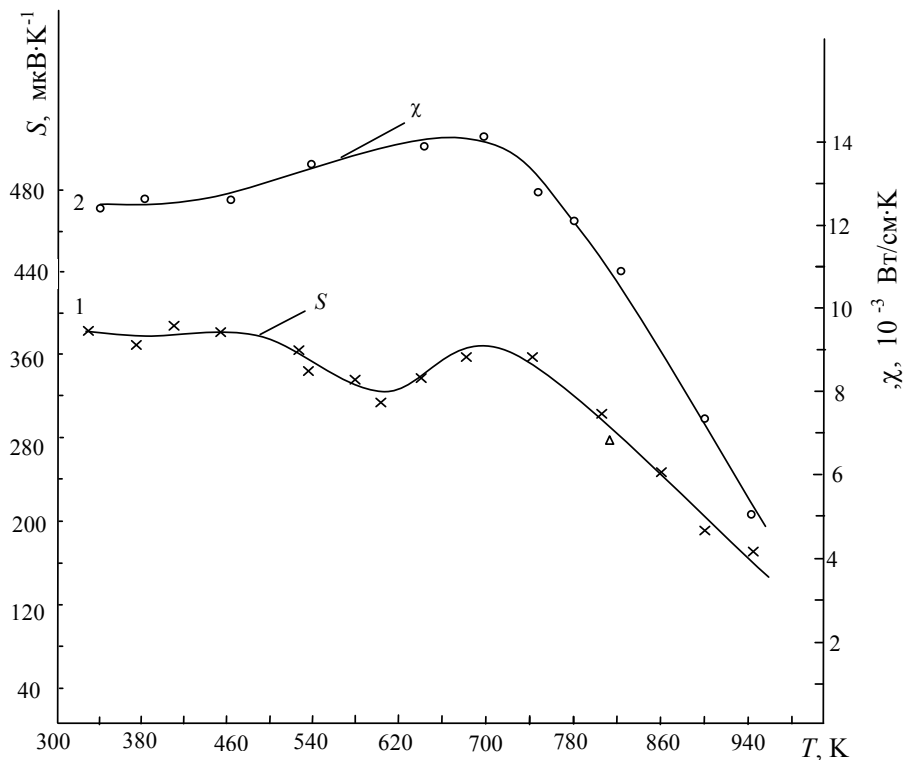


Рис. 1. Температурные зависимости для твёрдых растворов  $(\text{SnSe})_{0,995}(\text{Er}_2\text{Se}_3)_{0,005}$ : кривая 1 — коэффициент термоэдс  $S$ ; кривая 2 — теплопроводность  $\chi$ .

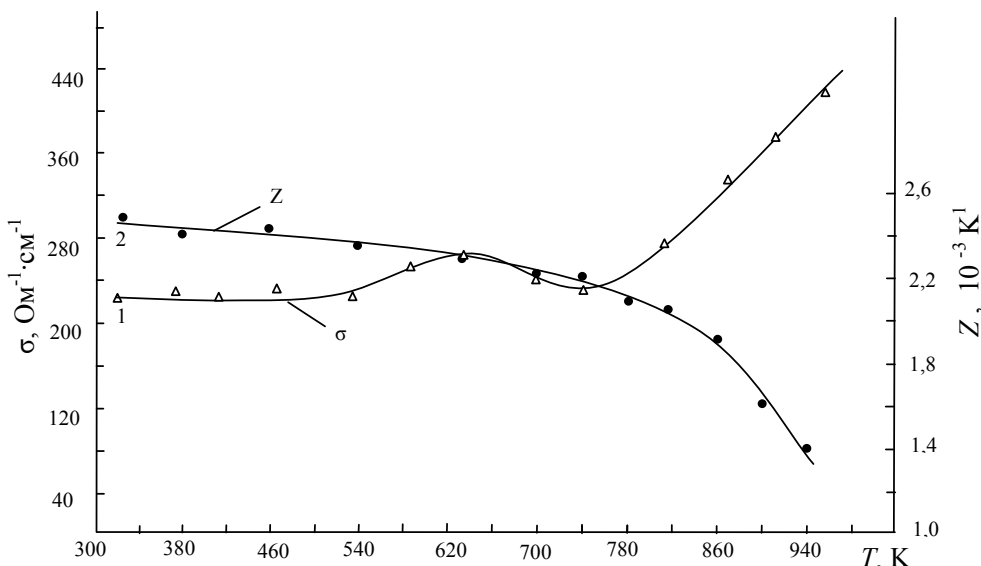


Рис. 2. Температурные зависимости для твердых растворов  $(SnSe)_{0,995}(Er_2Se_3)_{0,005}$ : кривая 1 — электропроводности  $\sigma$ ; кривая 2 — термоэлектрическая добротность  $Z$ .

На рис. 2 (кривая 2) представлена температурная зависимость термоэлектрической эффективности  $Z(T)$ . Как видно из кривой, для термоэлектрической эффективности образца № 4 полученные значения  $Z \geq 2 \cdot 10^{-3} K^{-1}$  в широком температурном интервале ( $T = 300 \div 820 K$ ) остаются стабильными.

Для сравнения на рис. 3 представлены температурные зависимости термоэлектрической эффективности  $Z(T)$  расплава  $(SnSe)_{0,995}(Er_2Se_3)_{0,005}$  и известных на данный момент других термоэлек-

трических материалов. Как видно из графиков, термоэлектрическая эффективность  $Z$  исследованных образцов состава  $(SnSe)_{0,95}(Er_2Se_3)_{0,05}$  (за исключением твердого расплава  $Bi_2Te_{2,7}Se_{0,3}$  [5]) остается стабильной в более широком температурном интервале относительно других составов и может быть использована как новый термоматериал. Преимущества этих сплавов перед другими широко используемыми состоят в том, что они недорогие, устойчивы к повышенным температурам, технологичны и не содержат ядовитых веществ.

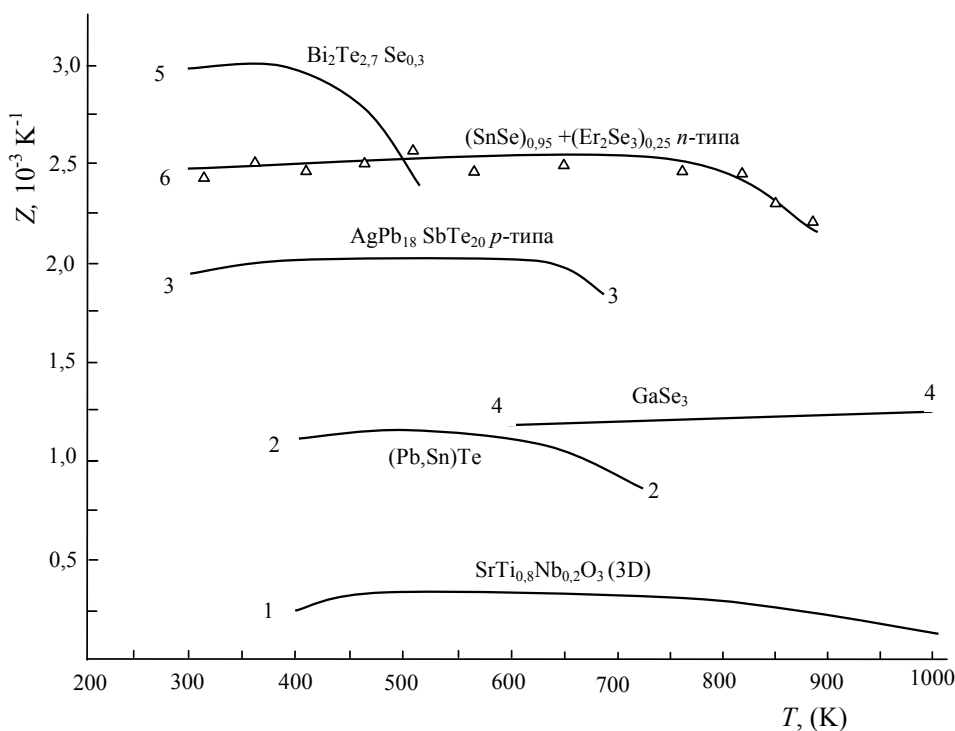


Рис. 3. Температурные зависимости термоэлектрической добротности некоторых распространенных и перспективных материалов.

### Заклучение

Исследование экстремумов  $Z$  и  $\delta$  в твердом растворе  $(\text{SnSe})_{0,995}(\text{Er}_2\text{Se}_3)_{0,005}$  показывает, что  $Z$  достигает максимального значения при концентрации носителей тока  $n \cong 2,81 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Показано, что увеличение  $\sigma$  и уменьшение  $\chi$  приводят к увеличению коэффициента мощности  $P = S^2 \sigma$  и  $Z$ . Однако самолегирование эрбием сильно влияет на  $Z$ , что, несомненно, связано с изменением количества собственных дефектов. Отметим, что аналогичная зависимость  $\chi(T)$  характерна для дефектных материалов [14]. За счет фонон-фононного и фонон-дефектного рассеяния  $\chi$  уменьшается по закону  $\chi \propto T^{-n}$ . Рост количества замещающих ионов  $\text{Er}^{3+}$  уменьшает  $\chi$  и показатель степени  $n$  в  $T^{-n}$ .

Лучшим составом по термоэлектрической эффективности среди исследуемых образцов  $(\text{SnSe})_{1-x}(\text{Er}_2\text{Se}_3)_x$  является твердый раствор, содержащий  $x = 0,005$  мол. %  $\text{Er}_2\text{Se}_3$ . Его эффективность  $ZT$  в диапазоне от 400 К и выше превышает 1, при температурах 670—800 К достигает максимального значения  $ZT$ , равного 1,8. Улучшены все параметры, определяющие величину  $Z$  при рабочих температурах, а именно: достигнуты высокие значения коэффициента термоэдс ( $S > 350 \text{ мкВ} \cdot \text{К}^{-1}$ ), низкие значения теплопроводности ( $\chi \leq 12,5 \times 10^{-3} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ ), и достаточно высокая для указанных температур электропроводность ( $\sigma > 180 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ ).

Таким образом, среди исследуемых образцов  $(\text{SnSe})_{1-x}(\text{Er}_2\text{Se}_3)_x$  образец с  $x = 0,005$  является наиболее перспективным рабочим материалом для изготовления приемников теплового излучения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Поздняков Б. С., Коптелов Е. А. Термоэлектрическая энергетика. — М.: Атомиздат, 1974.
2. Иванова Л. Д., Петрова Л. Е., Гранаткина Ю. В., Земсков В. С. и др. // Неорганические материалы. 2011. Т. 47. № 5. С. 521.
3. Булат Л. П., Иорданишвили Е. К., Пустовалов А. А., Федоров М. И. // Термоэлектричество. 2009. № 4. С. 7.
4. Шелимова Л. Е., Карпинский О. Г., Свечникова Т. Е. и др. // Неорганические материалы. 2004. Т. 40. № 12. С. 1440.
5. Дмитриев А. В., Звягин И. П. // УФН. 2010. Т. 180. № 8. С. 821.
6. Алиев Ф. Ф., Гасанов Г. А. // ФТП. 2012. Т. 46. № 3. С. 313.
7. Larson P., Mahanti S. D., Sportouch S., Kanatzidis M. // Phys Rev B, 1999. Vol. 59. No. 24. P. 15660.
8. Иоффе А. Ф. Полупроводниковые термоэлементы. — М.—Л., АН СССР, 1960.
9. Гуриева Е. А., Константинов П. П., Прокофьева Л. В. и др. // ФТП. 2003. Т. 37. № 3. С. 292.
10. Охотин А. С., Пушкарский А. С., Боровикова Р. П., Симонова В. А. Методы измерения характеристики термоэлектрических материалов и преобразователей. — М.: Наука, 1974.
11. Павлов Л. П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов. — Л., Наука, 1987.
12. Гусейнов Дж. И., Мургузов М. И., Исмаилов Ш. С. // Неорганические материалы. 2008. Т. 44. № 5. С. 542.
13. Аскеров Б. М. Кинетические эффекты в полупроводниках. — Л., Наука, 1970.
14. Оскотский В. С., Смирнов И. И. Дефекты в кристаллах и теплопроводность. — Л., Наука, 1972.
15. Гуришумов А. П., Кулиев Б. Б., Аббасов К. Х., Магеррамов Ю. Д. // Неорганические материалы, 1990. Т. 26. № 9. С. 1827.
16. Алиев И. И., Багиева М. Р., Бабанлы М. Б. и др. // Журнал неорганической химии. 2011. Т. 56. № 8. С. 1394.
17. Гусейнов Дж. И., Мургузов М. И., Исмаилов Ш. С. // ФТП. 2013. Т. 47. № 3. С. 298.

## Thermoelectrical figure of merit of the $(\text{SnSe})_{1-x}(\text{Er}_2\text{Se}_3)_x$ solid solutions

*J. I. Huseynov, M. I. Murquzov, Sh. S. Ismailov, O. M. Hasanov, and T. A. Jafarov*

Azerbaijan State Pedagogical University  
68 U. Gadzhibekli str., Baku, 1000, Azerbaijan  
E-mail: cih\_58@mail.ru; 1959oktay@mail.ru

Received April 12, 2016

*Consideration is given to the character of the interaction in the system of  $\text{SnSe}-\text{Er}_2\text{Se}_3$  on base of complex methods of physical and chemical analysis. Temperature and concentration relationships of electric (conductivity  $\sigma$ , Hall coefficient  $R$ ), thermoelectric ( $S$ ) and heat ( $\chi_{\text{tot}}$ ) characteristics of  $(\text{SnSe})_{1-x}(\text{Er}_2\text{Se}_3)_x$  ( $x = 0.0; 0.0005; 0.0025; 0.005; 0.0075; 0.01$ ) solid solutions in the temperature range between 300—900 K are investigated. From data on  $\sigma$ ,  $S$  and  $\chi_{\text{tot}}$ , the thermoelectric power  $S^2 \sigma$ , figure of merit  $Z$  and efficiency  $\delta$  are calculated. It is found that  $S^2 \sigma$  and  $Z$  have maximum values at holes concentration of  $n \cong 2.81 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  and room temperature.*

PACS: 72.15.Jf, 72.20.Pa

*Keywords:* solid solutions, electrical conductivity, Hall coefficient, thermoelectric power, thermal conductivity, figure of merit, the efficiency.

## REFERENCES

1. B. S. Pozdyakov and E. A. Koptelov, *Thermoelectric Power* (Moscow, Atomizdat, 1974) [in Russian].
2. L. D. Ivanova, L. I. Petrova, Yu. V. Granatkina, et al., *Inorganic Materials* **47**, 459 (2011).
3. L. P. Bulat, E. K. Iordanashvili, A. A. Pustavalov, M. I. Fedorov, *Thermoelectricity*, No. 4, 7 (2009).
4. L. E. Shelimova, O. G. Karpinskii, T. E. Svechnikova, et al., *Inorganic Materials* **40**, 1264 (2004).
5. A. V. Dmitriev and I.P. Zvyagin, *Physics-Uspekhi*, **53**, 789 (2010).
6. F. F. Aliev and H. A. Hasanov, *Semiconductors* **46**, 298 (2012).
7. P. Larson, S. Mahanti, S. Sportouch, and M. Kanatzidis, *Phys Rev B* **59**, 15660 (1999).
8. A. F. Ioffe, *Semiconductor Thermoelements and Thermoelectric Cooling* (Infosearch: London, UK, 1957).
9. E. A. Gurieva, P. P. Konstantinov, L. V. Prokof'eva, et al., *Semiconductors*, **37**, 276 (2003).
10. A. S. Okhotin, A. S. Pushkarskiy, R. P. Borovikova, and V. A. Simonova, *Methods of Measuring the Characteristics of Thermoelectric Materials and Converters*. (Moscow, Nauka, 1974) [in Russian].
11. L. P. Pavlov, *Methods of Measurement of Parameters of Semiconductor Materials*. (Leningrad, Nauka, 1987) [in Russian].
12. D. I. Huseynov, M. I. Murguzov, and Sh. S. Ismailov, *Inorganic Materials* **44**, 464 (2008).
13. B. M. Askerov, *Electron Transport Phenomena in Semiconductors*. (World Scientific, Singapore, New Jersey, London, 1994).
14. V. S. Oskotsky and I. I. Smirnov, *Defects in the Crystals and Thermal Conductivity*. (Leningrad, Nauka, 1972) [in Russian].
15. A. P. Qurshumov, B. B. Kuluyev, K. X. Abbasov, and Yu. D. Maqerramov, *Inorganic Materials* **26**, 1827 (1990).
16. I. I. Aliev, M. P. Baqieva, M. B. Babnli, et al., *Journal of Inorganic Chemistry* **56**, 1394 (2011).
17. D. I. Huseynov, M. I. Murguzov, and Sh. S. Ismailov, *Semiconductors* **47**, 298 (2013).