

# ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $TlIn_{1-x}Yb_xS_2(Te_2)$

М.М. ЗАРБАЛИЕВ

Азербайджанский Индустриальный Институт  
373208, г. Сумгаит, 43-й квартал

Работа посвящена исследованию электропроводности, коэффициента Холла, термо-э.д.с. и холловской подвижности носителей заряда в твердых растворах систем  $TlInS_2(Te_2)$ - $Tl-YbS_2(Te_2)$ .

Обсуждается природа возрастания коэффициента Холла с ростом температуры и прохождения его через максимум, а также возрастание при этом значений термо-э.д.с. и электропроводности.

## Введение

Одной из особенностей электрических свойств полупроводников с одним типом носителей заряда является возрастание коэффициента Холла ( $R_x$ ) с температурой, которое соответствующим образом оказывает влияние на другие кинетические коэффициенты [1-5]. Однако, несмотря на внешнее сходство температурного хода  $R_x(T)$ , физическая природа данного явления может оказаться совершенно разной. В частности, это может быть обусловлено проводимостью по примесной зоне [1,2]; примесной зоной, расположенной в запрещенной зоне [3]; со снятием вырождения электронного газа [4]; при рассеянии на ионизированных примесях; влиянием более тяжелых зон, расположенных выше дна зоны проводимости или ниже потолка валентной зоны [5,6]; а также неквадратичным законом дисперсии носителей заряда [4,7]. Данная работа посвящена выявлению причины особенностей электрических свойств, обнаруженных в твердых растворах  $TlIn_{1-x}Yb_xS_2(Te_2)$ : возрастания  $R_x$  с температурой и прохождения его через максимум, завышенных значений при этом коэффициента термо-э.д.с. и электропроводности.

## Результаты и их обсуждение.

Методика эксперимента подробно описана в [8].

На рис. 1 представлены кривые  $R_x$  для твердых растворов  $TlIn_{1-x}Yb_xS_2(Te_2)$ , на которых четко видно возрастание  $R_x$  с ростом температуры. Исследованные образцы во всем температурном интервале обладали p-типом проводимости. Для состава  $TlIn_{0,98}Yb_{0,02}S_2$  возрастание  $R_x$  начинается с 625 К, по мере замещения атомов индия атомами иттербия начало температуры возрастания  $R_x$  смещается в область более высоких температур. Аналогичная зависимость  $R_x(T)$  наблюдается и для твердых растворов  $TlIn_{1-x}Yb_xTe_2$ , в которых возрастание  $R_x$  для образца с  $x=0,05$  начинается с температуры 500 К, а для  $x=0,08$  – с 525 К. Как видно, в обоих случаях возрастание  $R_x$  продолжается до некоторой температуры, затем происходит резкое убывание, то есть  $R_x$  проходит через максимум, причем с ростом содержания атомов лантаноида в составе фаз максимум  $R_x$  смещается в сторону более высоких температур. Как было замечено, наблюдаемые особенности могут быть обусловлены различными причинами. Поэтому, с целью проверки пригодности той или иной модели для исследованных объектов, необ-

ходимо более подробно раскрыть сущность каждой из перечисленных моделей.

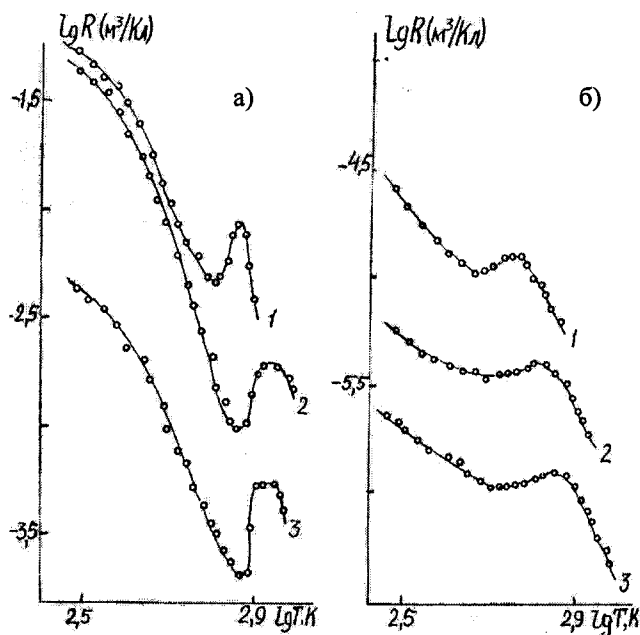


Рис. 1. Температурные зависимости коэффициента Холла твердых растворов  $TlIn_{1-x}Yb_xS_2$  (а): кривые 1 –  $x=0,02$ ; 2 –  $x=0,05$ ; 3 –  $x=0,10$  и  $TlIn_{1-x}Yb_xTe_2$  (б): кривые 1 –  $x=0,02$ ; 2 –  $x=0,05$ ; 3 –  $x=0,08$ .

В работе [3] было обнаружено, что при легировании  $PbTe$  атомами индия до 1 ат.%  $In$ , концентрация электронов возрастает до  $\sim 0,07$  ат.%, а дальнейшее добавление индия не приводит к росту концентрации электронов. Это отразилось на температурных и концентрационных зависимостях электрических свойств. Для объяснения данного явления авторами была предложена модель, согласно которой атомы индия в зоне проводимости  $PbTe$  создают квазилокальные уровни, с возрастанием концентрации которых образуется примесная зона. Начиная с определенной температуры, они играют роль «ловушек» для электронов проводимости, что приводит к уменьшению концентрации электронов и росту  $R_x$ , а при более высоких температурах, когда выполняется условие  $kT \geq E_g$  ( $E_g$  – ширина запрещенной зоны), концентрация электронов начинает расти, что и приводит к уменьшению  $R_x$ . Характерной особенностью квазилокальных уровней в зоне проводимости является то, что при достижении уровня Ферми ( $E_F$ ) квазилокальных состояний, концент-

рация электронов проводимости стабилизируется, и  $E_F$  в определенном интервале температур остается постоянной. Данный механизм в случае исследованных объектов не может иметь места, поскольку растворимость примесей в них в указанном интервале имеет непрерывный характер и соответствующие уровни расположены в запрещенной зоне, а не в валентной. Концентрационная зависимость кинетических коэффициентов и уровни Ферми не обладают какими-либо аномалиями.

В работах [5,6] максимум на  $R_x(T)$  объяснен наличием зоны тяжелых дырок в валентной зоне и зоны тяжелых электронов в зоне проводимости [6], расположенных на расстоянии  $\Delta E$  от потолка валентной зоны или дна зоны проводимости. В этом случае роль вышележащих зон в проводимости проявляется при достаточно высоких концентрациях носителей заряда, когда уровень Ферми в зоне проводимости (или в валентной зоне) подходит близко к тяжелым зонам, осуществляется переход легких носителей в тяжелые зоны, что приводит к уменьшению концентрации носителей заряда и росту  $R_x$ . При дальнейшем повышении температуры уровень Ферми входит в тяжелые зоны, происходит выравнивание уровней Ферми в обеих зонах и в некотором интервале температур стабилизируется  $E_F$ ,  $n(T)$  и  $R_x(T)$ . Только с наступлением собственной проводимости начинается изменение этих параметров и других кинетических коэффициентов. Если собственная проводимость наступает не при очень высоких температурах, то кривая  $R_x(T)$  проходит через острый максимум. Казалось, что эта модель может описать и наши данные. Но, во-первых, в исследованных кристаллах уровень Ферми во всем исследованном интервале температур и концентраций не выходит из запрещенной зоны, то есть вырождение носителей заряда не наступает. Во вторых, сведения о наличии подобной зоны в валентных зонах  $\text{TiInS}_2$  и  $\text{TiInTe}_2$  отсутствуют.

Имеются данные о возрастании  $R_x$  с температурой и в узкозонных полупроводниках [6,7], в которых обращено внимание на влияние сильной непараболичности зоны проводимости на Холл фактор  $R_x(T) = A_T / (en)$ . Количественными расчетами показано [6,7], что в случае рассеяния электронов на акустических фоновых,  $A_T$  сильно зависит от степени непараболичности  $\beta = k_0 T / \varepsilon_g$  и температурной зависимости  $\varepsilon_g(T)$ . В определенном сочетании этих параметров значения  $A_T$  и  $R_x$ , при рассеянии электронов на акустических фоновых, растут с температурой и с наступлением собственной проводимости уменьшаются, проходя через максимум. Следует подчеркнуть, что предложенная модель не может быть применена к нашим кристаллам, так как исследуемые кристаллы являются широкозонными.

В [1,2] было показано, что в кристаллах GaAs и InP с  $n \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$  вследствие наличия проводимости в примесной зоне, расположенной вблизи дна зоны проводимости и в запрещенной зоне, на температурной зависимости  $R_x(T)$  при  $T < 100 \text{ K}$  наблюдалось возрастание  $R_x$  и прохождение его через максимум. В то же время, в образцах с  $n \geq 10^{18} \text{ см}^{-3}$  во всем интервале температур (2-300 K)  $R_x$  оставался постоянным. Механизм прохождения  $R_x$  через максимум описывается следующим образом: донорные уровни, расположенные на энер-

гетическом расстоянии  $\Delta E$  от дна зоны проводимости ведут себя как «ловушки» собственных электронов и в интервале температур, когда уровень Ферми входит в эту зону, происходит процесс «прилипания» электронов. При достаточно большой концентрации таких уровней образуется примесная зона, в которой осуществляется проводимость. При этом происходит уменьшение концентрации, что приводит к возрастанию  $R_x$ . С дальнейшим повышением температуры происходит насыщение примесных уровней, а при достижении условия  $kT \geq \Delta E$  начинается «испарение» электронов с этих уровней в зону проводимости, то есть возрастание концентрации носителей заряда и уменьшение  $R_x$ . При этом проявляются ряд других эффектов. В частности, в кристаллах типа  $A^3B^5$  с высокими подвижностями электронов наблюдается отрицательное магнитосопротивление -  $\Delta\rho$  и прохождение его -  $\Delta\rho(B)$  через максимум.

При высоких концентрациях примесей зона расщепляется, примесные уровни приближаются ко дну зоны проводимости, сливаются с ней и исчезают все наблюдаемые особенности.

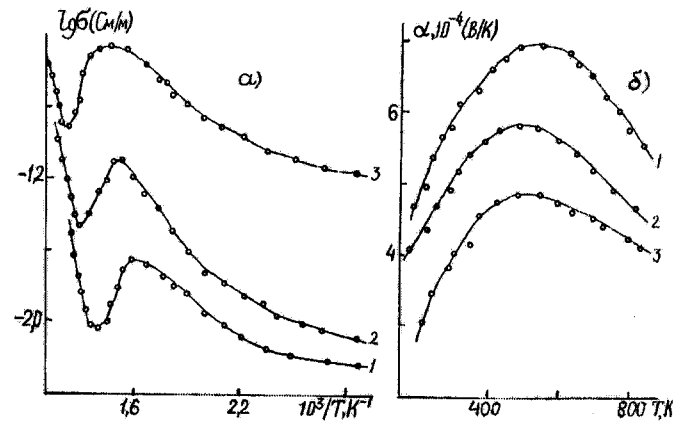


Рис. 2. Температурные зависимости электропроводности (а) и термо-э.д.с. (б) твердых растворов  $\text{Ti}_{1-x}\text{Yb}_x\text{S}_2$ : кривые 1 -  $x = 0,02$ ; 2 -  $x = 0,05$ ; 3 -  $x = 0,10$ .

Итак, из перечисленных моделей, описывающих наблюдаемые особенности электрических свойств, наиболее приемлемой для исследованных в данной работе материалов, является последняя. В этих кристаллах ширина

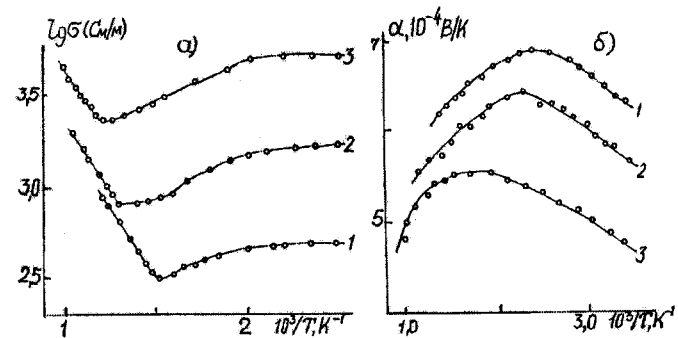


Рис. 3. Температурные зависимости электропроводности (а) и термо-э.д.с. (б) твердых растворов  $\text{Ti}_{1-x}\text{Yb}_x\text{Te}_2$ : кривые 1 -  $x = 0,02$ ; 2 -  $x = 0,05$ ; 3 -  $x = 0,08$ .

запрещенной зоны достаточно велика, концентрация носителей заряда для исходных кристаллов мала, они легко легируются и небольшие отклонения от стехиометрии

также создают акцепторные уровни. Для подтверждения наличия в них акцепторной зоны были проанализированы кривые  $R_x(T)$ ,  $\alpha(T)$  и  $\sigma(T)$  (рис. 2,3). По спадающей части максимума  $R_x$  была вычислена ширина запрещенной зоны. В [1,2,6,7] показано, что по возрастающей части максимума, носящей также активационный характер, можно вычислить энергетический зазор между примесной зоной и потолком валентной зоны (или дном зоны

проводимости). В тройном соединении  $TlInS_2$  и в твердых растворах на его основе  $TlIn_{1-x}Yb_xS_2(Te_2)$  для энергии активации примесных уровней были получены значения  $0,2 \pm 0,06$  эВ, которые хорошо согласуются со значениями, полученными на основании данных электрических свойств в сильных электрических полях [8,9].

Автор благодарит профессора С.А. Алиева за ценные советы при обсуждении результатов.

- [1] С.А. Алиев, Ф.П. Кесаманлы, Т.С. Лагунова и Д.Н. Наследов. Phys. Stat. Sol., 1966, 17, 105.  
 [2] О.В. Емельяненко, Т.С. Лагунова, Д.Н. Наследов и Г.В. Талалакин. ФТП, 1965, 7, с. 1315.  
 [3] А.А. Аверкин, В.И. Кайданов, Р.Б. Мельник. ФТП, 1971, 5, в. 1, с. 91.  
 [4] Б.М. Аскеров. В кн. «Кинетические эффекты в полупроводниках», М., «Наука», 1970, с. 303.  
 [5] А.А. Андреев, В.Н. Радионов. ФТП, 1967, т.1, в.1, с. 183.

- [6] С.А. Алиев, Д.А. Багиров, С.А. Зейналов. Неорганические материалы, 1988, т.24, с. 1212.  
 [7] С.А. Алиев, А.А. Мовсумзаде, С.С. Рагимов. Fizika, 1998, с. 4, № 1, с. 8-10.  
 [8] М.М. Зарбалиев. Fizika, 1997, с. 3, № 3, с. 30-32.  
 [9] М.М. Зарбалиев, Э.М. Годжаев, В.А. Гаджиев. Неорганические материалы, 1980, т.16, №11, с.929-1931.

**М.М. Zərbəliyev**

## **$TlIn_{1-x}Yb_xS_2(Te_2)$ TƏRKİBLİ BƏRK MƏHLULLARIN ELEKTRİK XASSƏLƏRİNİN XÜSUSİYYƏTLƏRİ**

İş  $TlInS_2(Te_2)$ - $Tl$ - $YbS_2(Te_2)$  sistemlərinin bərk məhlullarının elektrik keçiriciliyi, Holl və termo -e.h.q. əmsallarının və yükdaşıyıcılarının Holl yürüklüklərinin tədqiqinə həsr olunmuşdur.

Holl əmsalının temperatur yüksəldikcə artması və onun maksimumdan keçməsinin, həmçinin bu zaman termo-e.h.q. və elektrik keçiriciliyinin yüksəlmiş qiymətə malik olmalarının səbəbləri təhlil olunmuşdur.

**M.M. Zarbaliyev**

## **SINGULARITIES OF ELECTRICAL PROPERTIES OF SOLID SOLUTIONS $TlIn_{1-x}Yb_xS_2(Te_2)$**

This work is devoted to the analysis of electric conductivity, Hall coefficient, thermoelectromotive force and Hall mobility of charge carriers of solid solutions  $TlInS_2(Te_2)$ - $Tl$ - $YbS_2(Te_2)$ . It is discussed the nature of the Hall coefficient increase with temperature increase and its passage through maximum and also the increase of thermoelectromotive force and electric conductivity values.