

## МАГНИТНОЕ СОСТОЯНИЕ ИОНОВ Tm В СИСТЕМЕ Tm<sub>x</sub>Sm<sub>1-x</sub>S

© И.А.Смирнов, А.В.Гольцев, Л.С.Парфеньева, А.В.Голубков

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
(Поступила в Редакцию 25 декабря 1995 г.)

В интервале температур 7.5–300 К измерена магнитная восприимчивость  $\chi$  системы Tm<sub>x</sub>Sm<sub>1-x</sub>S. Из анализа данных по  $\chi(T)$  следует, что во всей области концентраций  $0 < x < 1$  тулий имеет валентность +3. Показано, что магнитное поведение системы сильно зависит от характера взаимодействия момента Tm<sup>+3</sup> с электронами. В области  $0 < x < 0.16$ , где Tm<sup>+3</sup> образует донорный центр, взаимодействие момента Tm<sup>+3</sup> со связанным электроном при температуре  $T < 80$  К является ферромагнитным, поэтому полный момент донорного центра равен 6.5. В области  $T > 150$  К ионы самария меняют характер этого взаимодействия на антиферромагнитный, что приводит к полному моменту 5.5. Для  $0.16 < x < 0.25$  в низкотемпературной области характер магнитного взаимодействия Tm<sup>+3</sup> с электронами не меняется, что свидетельствует о сильной локализации электронов в узкой примесной зоне. Для концентраций  $0.25 < x < 1$  магнитное поведение Tm<sup>+3</sup> практически не зависит от температуры и соответствует поведению свободных ионов Tm<sup>+3</sup> с моментом 6.

Комплексное исследование структурных, электрических, термоэлектрических, гальваноэлектрических тепловых свойств и электрических свойств при гидростатическом давлении системы Tm<sub>x</sub>Sm<sub>1-x</sub>S проведено нами в работах [1–8].<sup>1</sup> На основании полученных результатов в Tm<sub>x</sub>Sm<sub>1-x</sub>S удалось выделить пять областей, в которых исследованные физические параметры обладали специфическими особенностями. Для удобства интерпретации полученных в настоящей работе результатов мы объединили области 3–5 в одну область III и будем рассматривать три области: I, II и III. Согласно [1,2,5,7,8], в области I ( $0 < x < 0.16$ ) тулий образует донорный центр с энергией связи  $\sim 55$  meV, имеет реальную и эффективную валентности соответственно +3 и +2.<sup>2</sup> Самарий в области I двухвалентен.

<sup>1</sup> В [1–8] исследуемые твердые растворы записывались в виде Tm<sub>1-x</sub>Sm<sub>x</sub>S. Используемое здесь иное обозначение системы как Tm<sub>x</sub>Sm<sub>1-x</sub>S удобнее для интерпретации полученных в настоящей работе результатов.

<sup>2</sup> Значение эффективной валентности +2 для Tm получено из данных по зависимостям постоянной кристаллической решетки и концентрации носителей тока от состава и удельного электросопротивления от температуры. Данные по измерению рентгеновских L<sub>III</sub>-спектров и сдвигов рентгеновских  $k$ -линий дают реальную валентность иона Tm, равную +3 [1].

В области II ( $0.16 < x < 0.25$ ) перекрытие волновых функций донорных центров приводит к образованию узкой примесной зоны. Валентность Tm равна +3, Sm +2. И наконец, в области III ( $0.25 < x < 1$ ) рассматриваемая система ведет себя как классическая система со смешанной валентностью редкоземельного иона, в данном случае иона Sm. Здесь валентность Tm также равна +3, а валентность Sm постепенно возрастает от +2.6 при  $x = 0.25$  до +3 для составов, близких к  $x = 1$ . При  $x = 0.16$  и  $0.25$  соответственно наблюдаются фазовые переходы полупроводник-металл и обычный металл-металл с переменной валентностью иона Sm.

Целями настоящего исследования были следующие: из данных по температурной зависимости магнитной восприимчивости  $\chi$  системы  $Tm_xSm_{1-x}S$  1) определить валентное состояние Tm в областях I, II и III и 2) проследить по всей системе характер взаимодействия магнитного момента  $Tm^{+3}$  с электронами, связанными на донорных центрах (область I), локализованными в примесной зоне (область II), находящимися в состоянии переменной валентности (область III).

С этой целью было проведено измерение  $\chi(T)$  восьми составов из системы  $Tm_xSm_{1-x}S$  (рис. 1):  $x = 0.1$  (образец № 1),  $0.14$  (№ 2),  $0.17$  (№ 3),  $0.19$  (№ 4),  $0.28$  (№ 5),  $0.5$  (№ 6),  $0.7$  (№ 7) и  $0.9$  (№ 8).

Образцы № 1 и 2 попадают в область I, образцы № 3 и 4 — в область II, образцы № 5–8 — в область III.

Все образцы исследовались нами ранее в работах [1–8]. О способе их приготовления, контроле состава см. в [1,2].

$\chi$  измерялась в интервале температур 7.5–300 К методом Фарадея на весах Кана при магнитных полях  $\sim 0.5T$ . Результаты измерения  $\chi$  представлены на рис. 2. Проанализируем полученные данные для  $\chi(T)$ .

Можно выделить три вклада в  $\chi(T)$ : 1) вклад магнитных конфигураций ионов Sm; 2) вклад ионов Tm; 3) вклады от взаимодействия между магнитными ионами Tm и Sm и обменного взаимодействия этих ионов со связанными и свободными электронами.

Рассмотрим последовательно поведение  $\chi(T)$  в областях I, II и III.

1) **Область I** ( $0 < x < 0.16$ ). В этой области, как отмечалось выше, ион Tm образует донорный центр. Из-за небольшой концентрации Tm вклад от обменного взаимодействия между различными донорными центрами здесь будет мал, и мы можем представить  $\chi(T)$  для  $Tm_xSm_{1-x}S$  в виде аддитивного вклада от тулиевых донорных центров ( $\chi_d(Tm)$ ) и остова решетки SmS ( $\chi(SmS)$ )

$$\chi(Tm_xSm_{1-x}S) = (1 - x)\chi_d(Tm) + x\chi(SmS). \quad (1)$$

Восприимчивость  $\chi(SmS)$  хорошо изучена (см., например, [9,10]). Она обусловлена наличием у иона  $Sm^{+2}$  возбужденного магнитного состояния мультиплета с моментом  $J = 1$ , отстоящего от основного состояния ( $J = 0$ ) на  $\Delta \sim 420$  К. В зависимости от вида соединения и его постоянной решетки изменяется лишь величина обменного взаимодействия момента  $Sm^{+2}$  с ближайшими соседями, а не значение  $\Delta$ .

Для выделения из восприимчивости  $\chi(T)$  состава  $Tm_xSm_{1-x}S$  ( $0 < x < 0.16$ ) вклада тулиевого донорного центра предположим, что

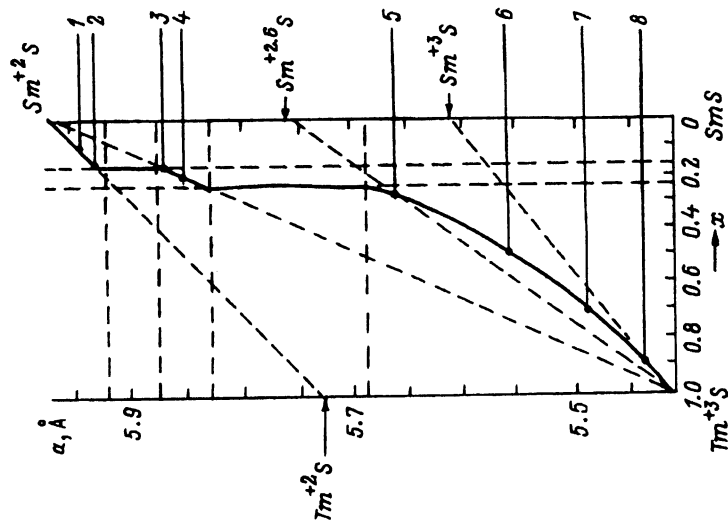


Рис. 1. Зависимость постоянной кристаллической решетки от состава в системе  $Tm_xSm_{1-x}S$  при 300 К [1]. Точками и цифрами 1-8 обозначены составы, исследованные в настоящей работе.

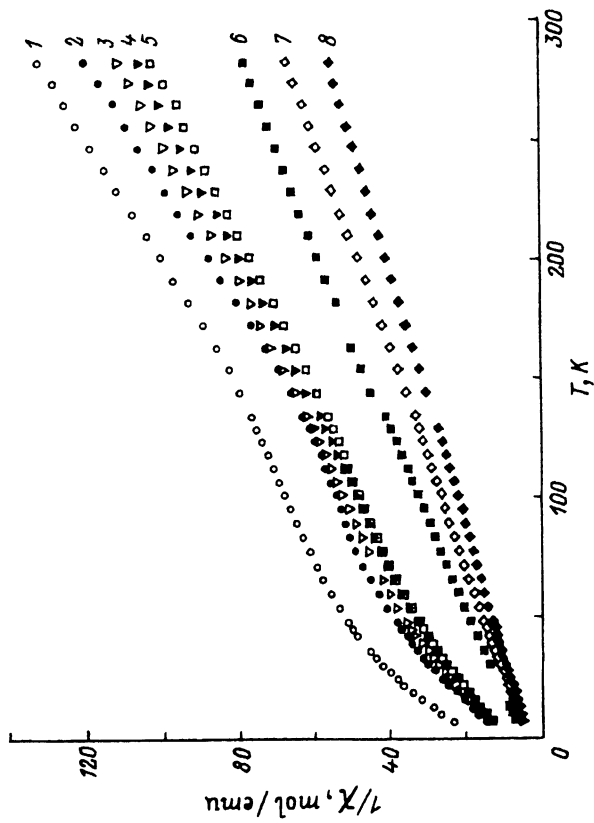


Рис. 2. Зависимость обратной магнитной восприимчивости  $\chi^{-1}$  от температуры для  $Tm_xSm_{1-x}S$ .  $x$ : 1 — 0.1, 2 — 0.14, 3 — 0.17, 4 — 0.19, 5 — 0.28, 6 — 0.5, 7 — 0.7, 8 — 0.9.

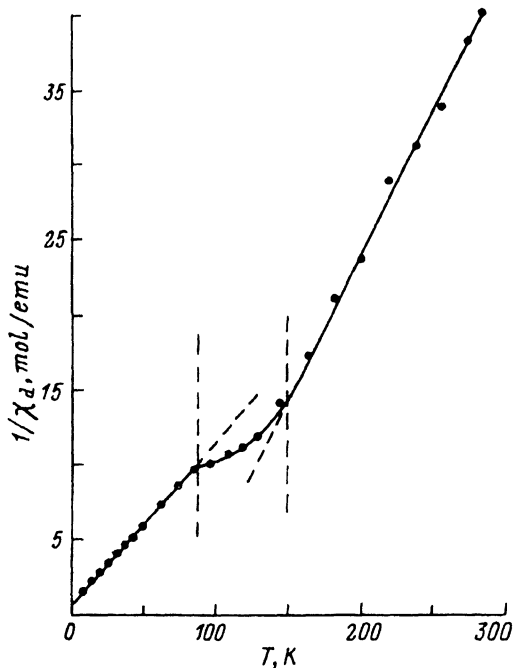


Рис. 3. Обратная магнитная восприимчивость  $\chi_d^{-1}$  донорных центров в  $Tm_xSm_{1-x}S$  ( $0 < x < 0.16$ ), выделенная с помощью (2) из экспериментальных данных, представленных на рис. 2 для концентраций  $Tm$   $x_1 = 0.1$  и  $x_2 = 0.14$ .

для двух близких концентраций  $Tm$  ( $x_1 = 0.1$  и  $x_2 = 0.14$ ) (рис. 1 и 2) изменением магнитной восприимчивости остова  $SmS$  можно пренебречь. В рамках такого приближения для двух близких концентраций  $x_1$  и  $x_2$ , согласно (1), восприимчивость  $\chi_d(Tm)$  можно определить из соотношения

$$\chi_d(Tm) = \frac{[(1-x_1)\chi(Tm_{x_2}Sm_{1-x_2}S) - (1-x_2)\chi(Tm_{x_1}Sm_{1-x_1}S)]}{[x_2(1-x_1) - x_1(1-x_2)]} =$$

$$= \frac{1-x_1}{x_2-x_1}\chi(Tm_{x_2}Sm_{1-x_2}S) - \frac{1-x_2}{x_2-x_1}\chi(Tm_{x_1}Sm_{1-x_1}S). \quad (2)$$

Результат выделения  $\chi_d(Tm)$  с помощью (2) представлен на рис. 3. Как видно из этого рисунка, в  $\chi_d^{-1}(T)$  тулиевого донорного центра хорошо различаются высокотемпературная ( $T > 150$  К) и низкотемпературная ( $T < 80$  К) области, в которых  $\chi_d(Tm)$  хорошо описывается обычной восприимчивостью Кюри-Вейсса

$$\chi_d(T) = \frac{C}{T \pm \Theta}. \quad (3)$$

Константа Кюри  $C$  связана с эффективным магнитным моментом  $\mu_{\text{эф}}$  магнитных ионов соотношением

$$C = N_A \mu_B^2 \mu_{\text{эф}}^2 / 3k_B, \quad (4)$$

где  $N_A$  есть число Авогадро,  $\mu_B$  — магнетон Бора,  $k_B$  — константа Больцмана. Константу  $C$  можно определить из наклона  $\chi_d^{-1}(T)$ , а затем уравнение (4) позволяет вычислить  $\mu_{\text{eff}}$ . Оказалось, что для тулиевого донорного центра в области  $T < 80$  К  $\mu_{\text{eff}} = 8.6$ , а для  $T > 150$  К  $\mu_{\text{eff}} = 6.5$ . Эти значения  $\mu_{\text{eff}}$  заметно отличаются от эффективного магнитного момента свободного иона  $\text{Tm}^{+3}$  с моментом  $J = 6$ , который равен 7.56. Попытаемся дать объяснение обнаруженным различиям в значениях  $\mu_{\text{eff}}$ .

Напомним, что магнетизм  $\text{Sm}^{+2}$  обусловлен лишь тем, что первое возбужденное состояние мультиплета с  $J = 1$  является магнитным. В области низких температур ион  $\text{Sm}^{+2}$  находится в немагнитном состоянии  $J = 0$ , так что вклад в восприимчивость  $\chi(T)$  системы  $\text{Tm}_x\text{Sm}_{1-x}\text{S}$  для  $0 < x < 0.16$  при  $T < 80$  К можно ожидать лишь от магнитных тулиевых донорных центров. При  $T > 150$  К вклад в  $\chi(T)$  будет вносить уже и магнитные ионы Sm. Момент донорного центра образуется из момента  $J = 6$  иона  $\text{Tm}^{+3}$  и спина  $s = 1/2$  связанного электрона.<sup>3</sup>

Предположим, что для тулиевого донорного центра в области температур  $T < 80$  К взаимодействие между моментом  $\text{Tm}^{+3}$  ( $J$ ) и спином связанного электрона  $s$  является ферромагнитным ( $\uparrow J \uparrow s$ ). Экспериментальные данные на рис. 3 подтверждают это предположение. Тогда в области достаточно низких температур, меньших, чем энергия ферромагнитного обменного взаимодействия, донорный тулиевый центр будет вести себя как магнитная примесь с полным моментом  $J_{d1}$ , равным

$$J_{d1} = L + S + s = 6.5. \quad (4)$$

Этому моменту соответствует эффективный магнитный момент  $\mu_{\text{eff}} = 8.59$ , вычисленный по следующей формуле:

$$\mu_{\text{eff}} = g_J \sqrt{J(J+1)} = \left( 1 + \frac{J(J+1) + S'(S'+1) - L(L+1)}{2J(J+1)} \right) \sqrt{J(J+1)}, \quad (5)$$

где  $J = J_{d1} = 6.5$ ,  $L = 5$  и  $S' = S + s = 1.5$ .

В случае антиферромагнитного взаимодействия ( $\uparrow J \downarrow s$ ) ( $T > 150$  К) (рис. 3)<sup>4</sup> полный момент тулиевого донорного центра составляет

$$J_{d2} = L + S - s = 5.5. \quad (6)$$

Ему соответствует эффективный момент  $\mu_{\text{eff}} = 6.52$ , вычисленный также по формуле (5) для  $L = 5$ ,  $S' = S - s = 1/2$  и  $J = J_{d2}$ . Полученные из экспериментальных данных и из проведенных выше теоретических оценок  $\mu_{\text{eff}}$  для тулиевого донорного центра для  $T < 80$  К и  $T > 150$  К находятся в удивительном согласии (табл. 1).

2). О б л а с т ь II ( $0.16 < x < 0.25$ ). Как отмечалось выше, в этой области происходит перекрытие волновых функций тулиевых донорных центров, что приводит к образованию узкой примесной зоны.

<sup>3</sup> В свою очередь момент  $J$  является суммой орбитального момента  $L$  и полного спина  $S$  ( $J = L + S$ ). Для  $\text{Tm}^{+3}$   $L = 5$  и  $S = 1$ .

<sup>4</sup> При  $T > 150$  К начинает проявляться магнетизм ионов Sm. Возможно, из-за магнитного взаимодействия ионов Tm и ионов Sm в возбужденном магнитном состоянии происходит переход от ферромагнитного к антиферромагнитному поведению тулиевой подсистемы.

Значения  $\mu_{\text{eff}}$  для тулиевого донорного центра в  $\text{Tm}_x\text{Sm}_{1-x}\text{S}$  ( $0 < x < 0.16$ )

| Интервал температур | $\mu_{\text{eff}}$ |        |
|---------------------|--------------------|--------|
|                     | Эксперимент        | Теория |
| $T < 80 \text{ K}$  | 8.6                | 8.59   |
| $T > 150 \text{ K}$ | 6.5                | 6.52   |

Для выделения из восприимчивости  $\chi(T)$  системы  $\text{Tm}_x\text{Sm}_{1-x}\text{S}$  вклада, относящегося к тулиевой узкой примесной зоне  $\chi_{IV}$ , вновь воспользуемся формулой (2) и значениями  $\chi(T)$  для концентраций  $x_1 = 0.17$  и  $x_2 = 0.19$  (рис. 2). Для простоты будем считать, что обменным взаимодействием между магнитными моментами ионов Tm можно пренебречь. Результаты такого выделения  $\chi_{IV}$  представлены на рис. 4. Как видно из этого рисунка, разброс экспериментальных данных здесь оказался значительно бóльшим, чем в предыдущем случае (область I).

Для низкотемпературной области ( $T < 120 \text{ K}$ ) данные рис. 4 соответствуют  $\mu_{\text{eff}} = 8.3 \pm 0.5$ . Полученное большое значение для  $\mu_{\text{eff}}$  указывает на то, что тулиевый электрон в области низких температур достаточно сильно локализован вблизи иона  $\text{Tm}^{+3}$ , причем между магнитным моментом  $\text{Tm}^{+3}$  и спином электрона имеется ферромагнитное взаимодействие, как и в предыдущем случае для небольших концентраций Tm при наличии тулиевого донорного центра. Таким образом, в области концентраций  $\text{Tm}$   $0.16 < x < 0.25$  локализационные эффекты все еще очень сильны. Этому способствуют два фактора: 1) узость примесной зоны и 2) случайное распределение ионов в решетке.

В высокотемпературной области ( $T > 150 \text{ K}$ ) данные рис. 4 соответствуют  $\mu_{\text{eff}} = 7.5 \pm 0.5$ . Полученное значение близко к  $\mu_{\text{eff}}$  свободного иона  $\text{Tm}^{+3}$  ( $\mu_{\text{eff}} = 7.56$ ). Это указывает на то, что в области  $T > 150 \text{ K}$  электроны делокализованы.

Сравним магнитное состояние тулиевой подсистемы в двух рассмотренных выше областях I и II. В обоих случаях при низких температурах ( $T < 80-100 \text{ K}$ ) ферромагнитное взаимодействие между ионом  $\text{Tm}^{+3}$  и локализованным электроном приводит к образованию примесного магнитного центра или узкой примесной зоны с полным моментом  $J_d$ , равным 6.5, и эффективным магнитным моментом  $\mu_{\text{eff}} = 8.6-8.3$ . Различие в магнитном состоянии тулиевой подсистемы в областях I и II возникает лишь при высоких температурах ( $T > 150 \text{ K}$ ). Для области I повышение температуры не приводит к делокализации электрона, связанного в донорный центр с  $\text{Tm}^{+3}$ , так как энергия связи достаточно велика ( $E_d \sim 55 \text{ meV}$ ) [1]. Это подтверждается и оценками концентрации электрона из данных по эффекту Холла [1]. При переходе к высоким температурам меняется лишь характер обменного взаимодействия между электроном и  $\text{Tm}^{+3}$ , он становится антиферромагнитным, что приводит к значению  $J_d = 5.5$  и  $\mu_{\text{eff}} = 6.5$ .

Для области II повышение температуры  $T > 150 \text{ K}$  приводит к росту подвижности электронов в примесной зоне и полной их делока-

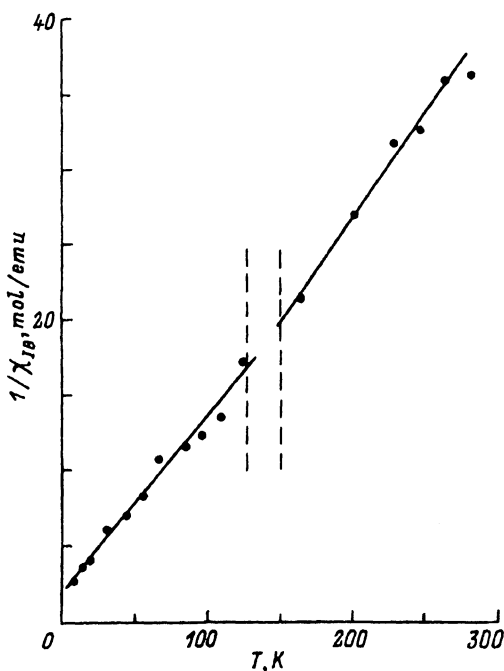


Рис. 4. Обратная магнитная восприимчивость  $\chi_{IV}^{-1}$  узкой примесной зоны, образованной ионами Tm в  $Tm_xSm_{1-x}S$  ( $0.16 < x < 0.25$ ), выделенная с помощью (2) из экспериментальных данных, представленных на рис. 2 для концентраций Tm  $x_1 = 0.17$  и  $x_2 = 0.19$ .

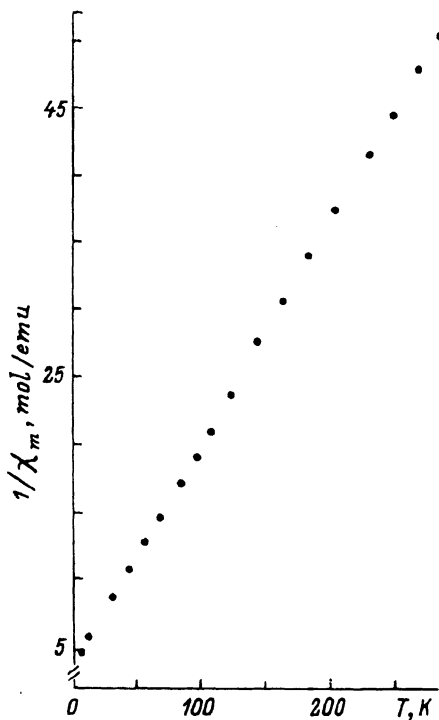


Рис. 5. Обратная магнитная восприимчивость  $\chi_m^{-1}$  подсистемы ионов Tm в  $Tm_xSm_{1-x}S$  ( $0.25 < x < 1.0$ ) в области концентраций, соответствующих состоянию Sm со смешанной валентностью.

Выделение вклада  $\chi_m^{-1}$  проводилось с помощью (2) для концентраций Tm  $x_1 = 0.7$  и  $x_2 = 0.9$ .

лизации. Это подтверждается появлением металлического характера температурного поведения электросопротивления (см. рис. 4) работы [4]. Если предположить теперь, что обменное взаимодействие между делокализованным электроном и  $Tm^{+3}$  ослабляется, то тогда можно понять, почему тулиевая подсистема для области II при  $T > 150$  К ведет себя как набор слабо взаимодействующих ионов  $Tm^{+3}$  с моментом  $J = 6$  и  $\mu_{\text{eff}} = 7.56$ .

3) О б л а с т ь III ( $0.25 < x < 1.0$ ). Согласно [1], в этой области система  $Tm_xSm_{1-x}S$  ведет себя как классическая система со смешанной валентностью иона Sm. Результаты выделения магнитного вклада ионов Tm  $\chi_m$  в  $\chi(T)$  для концентраций  $x_1 = 0.7$  и  $x_2 = 0.9$  представлены на рис. 5. Оказалось, что эффективный магнитный момент ионов Tm во всей исследованной области температур равен  $\mu_{\text{eff}} = 7.14$ .<sup>5</sup> Отличие этой величины от величины эффективного момента (7.56) для

<sup>5</sup> Такое же значение для  $\mu_{\text{eff}}$  ионов Tm получено нами для  $T < 80$  К из данных для  $\chi_m$ , выделенной из  $\chi(T)$  для  $x_1 = 0.5$  и  $x_2 = 0.7$ .

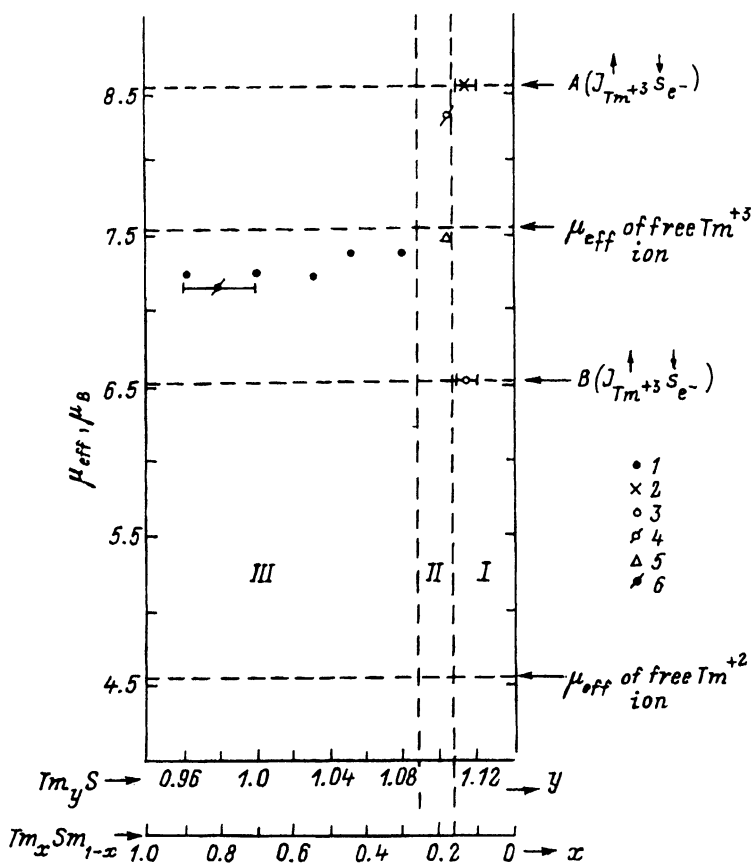


Рис. 6. Зависимость эффективного магнитного момента иона Tm от состава в  $Tm_xSm_{1-x}S$  (суммарный график).

A — значение  $\mu_{eff}$ , отвечающее тулиевому донорному центру, при ферромагнитном взаимодействии между моментом  $Tm^{+3}$  и спином связанного электрона, B — значение  $\mu_{eff}$ , отвечающее тулиевому донорному центру, при антиферромагнитном взаимодействии между моментом  $Tm^{+3}$  и спином связанного электрона, A и B — теоретические данные, 2-6 — экспериментальные значения  $\mu_{eff}$ , полученные для следующих значений концентраций  $x_1$  и  $x_2$ : 2, 3 — 0.1 и 0.14, 4, 5 — 0.17 и 0.19, 6 — 0.7 и 0.9. 2, 4 —  $T < 80$  K, 3, 5 —  $T > 150$  K, 6 — для всех T. Для сравнения на рисунке приведены данные  $\mu_{eff}$  ионов Tm в области гомогенности этого соединения ( $Tm_yS$ ) [11].

свободного иона  $Tm^{+3}$ , вероятно, связано с неучетом нами изменения магнитного состояния ионов Sm вследствие изменения их валентности. Однако полученная оценка магнитного момента иона Tm, несомненно, свидетельствует о валентном состоянии  $Tm^{+3}$  в этом интервале концентраций x.

В заключение можно отметить следующее.

1) На основании анализа температурного поведения вклада ионов тулия в полную магнитную восприимчивость системы  $Tm_xSm_{1-x}S$  можно сделать вывод о том, что во всей области концентраций  $0 < x \leq 1$  ион Tm имеет валентность +3 и момент  $J = 6$ .

2) Показано, что магнитное поведение системы  $Tm_xSm_{1-x}S$  сильно зависит от характера взаимодействия момента  $Tm^{+3}$  с электронами.



Экспериментальные значения  $\mu_{\text{eff}}$  для тулиевой подсистемы  
в  $\text{Tm}_x\text{Sm}_{1-x}\text{S}$ .  $\mu_{\text{eff}}$  (свободный ион  $\text{Tm}^{+3}$ ) = 7.56

| Области концентраций в $\text{Tm}_x\text{Sm}_{1-x}\text{S}$ | Низкие температуры          | Высокие температуры         | Состояние носителей тока   |
|---|-----------------------------|-----------------------------|--|
| I ( $0 < x < 0.16$ )  | 8.6 ( $T < 80$ K)           | 6.5 ( $T > 150$ K)          | Тулиевый донорный центр  |
| II ( $0.16 < x < 0.25$ )                                    | 8.3 ± 0.5<br>( $T < 120$ K) | —                           | Узкая примесная зона, образованная за счет перекрытия волновых функций тулиевых донорных центров |
|   | —                           | 7.5 ± 0.5<br>( $T > 150$ K) | Делокализованные из узкой примесной зоны электроны   |
| III ( $0.25 < x < 1.0$ )                                    | ~ 7.14                      | (7.5–300 K)                 | Зонные носители тока   |

а) В области I ( $0 < x < 0.16$ ) при  $T < 80$  K, когда  $\text{Tm}^{+3}$  образует донорный центр, взаимодействие момента  $\text{Tm}^{+3}$  со связанным электроном является ферромагнитным. При  $T > 150$  K ионы Sm меняют характер этого взаимодействия на антиферромагнитный. б) В области II ( $0.16 < x < 0.25$ ) при  $T < 120$  K при наличии узкой примесной зоны характер магнитного взаимодействия  $\text{Tm}^{+3}$  и электронов не меняется, что обусловлено сильной локализацией электронов в примесной зоне. При  $T > 150$  K электроны делокализуются из примесной зоны, и их магнитное взаимодействие с моментом  $\text{Tm}^{+3}$  становится несущественным. с) В области III ( $0.25 < x < 1.0$ ), когда система  $\text{Tm}_x\text{Sm}_{1-x}\text{S}$  ведет себя как классическая система со смешанной валентностью (за счет ионов Sm), магнитное поведение  $\text{Tm}^{+3}$  не зависит от температуры.

В табл. 2 и на рис. 6 суммированы полученные в настоящей работе значения  $\mu_{\text{eff}}$  для тулиевой подсистемы в  $\text{Tm}_x\text{Sm}_{1-x}\text{S}$  для всей исследованной области температур.

Авторы благодарны профессору Р.Трочу (Институт низких температур и структурных исследований ПАН, Вроцлав) за предоставление возможности провести измерения магнитной восприимчивости на его аппаратуре, А.М.Гуревич за помощь в измерениях.

Исследования, представленные в этой публикации, стали возможными благодаря частичной поддержке гранта N NUK 300 Международного научного фонда.

#### Список литературы

- [1] Smirnov I.A., Popov V.V., Goltsev A.V., Golubkov A.V., Shaburov V.A., Smirnov Yu.P., Kasymova A.G. J. All. Comp. **219**, 1–2, 168 (1995).
- [2] Смирнов И.А., Попов В.В., Голубков А.В., Гольцев А.В., Буттаев Б.М. ФТП **29**, 5/6, 857 (1995).
- [3] Попов В.В., Касымова А.Г., Буттаев Б.М., Голубков А.В., Смирнов И.А. ФТТ **35**, 11, 2935 (1993).

- [4] Popov V.V., Kasymova A.G., Golubkov A.V., Smirnov I.A. Properties of f-electron compounds / Ed. A.Szytula. Inst. of Phys. Jagellonian Univ. (1994). С. 51.
- [5] Смирнов И.А., Степанов Н.Н., Попов В.В., Голубков А.В. ФТТ **38**, 5, 1387 (1996).
- [6] Попов В.В., Смирнов И.А., Голубков А.В., Парфеньева Л.С., Касымова А.Г. ФТТ **38**, 5, 1505 (1996).
- [7] Smirnov I.A., Popov V.V., Golubkov A.V., Goltsev A.V. Abstracts of the 11 Int. Conf. on Solid Compounds & Transition Elements. Wroclaw (1994). С. 33.
- [8] Smirnov I.A., Popov V.V., Golubkov A.V., Buttaev B.M. Abstracts 2nd Int. Conf. on f-Elements. Helsinki, (1994). С. 93.
- [9] Nathan M.I., Holtzberg F., Smith J.E., Torrance J.B., Tsang J.C. Phys. Rev. Lett. **34**, 8, 467 (1975).
- [10] Shapiro S.M., Birgeneau R.J., Bucher E. Phys. Rev. Lett. **34**, 8, 470 (1975).
- [11] Буттаев Б.М., Голубков А.В., Жукова Т.Б., Романова М.В., Романов В.В., Сергеева В.М., Смирнов И.А. ФТТ **32**, 8, 2354 (1990).