

КРИСТАЛЛОХИМИЯ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ АНТИМОНИДОВ СОСТАВА $Gd_4Sb_3 - Ln_4Sb_3$ ($Ln = Tb, Dy$)

¹В.Д. Абулхаев, ²Х.Х. Назарзода, ³Х.А. Рахимов

¹Институт химии им. В.И. Никитина НАН Таджикистана, г. Душанбе, Республика Таджикистан

²Таджикский государственный университет коммерции, г. Душанбе, Республика Таджикистан

³Институт энергетики Таджикистана, р-н Кушониён, Республика Таджикистан

В работе представлены результаты синтеза и исследования кристаллохимии и магнитных свойств твёрдых растворов антимонидов состава $Gd_4Sb_3 - Ln_4Sb_3$ ($Ln = Tb, Dy$). Актуальность исследования обусловлена востребованностью материалов на основе редкоземельных элементов (РЗЭ) в высокотехнологичных областях - в частности, благодаря их выраженным магнитным, оптическим и электрофизическим характеристикам; такие соединения перспективны для применения в постоянных магнитах, логических элементах, системах памяти и магнитных холодильных установках. Синтез антимонидов Gd_4Sb_3 , Tb_4Sb_3 , Dy_4Sb_3 и твёрдых растворов на их основе выполнен на высокотемпературном комплексе ВДТА-8МЗ в условиях разряжения до $1,33 \times 10^{-2}$ Па при температуре до 1273 К (± 10 К) с использованием молибденовых тиглей. Оптимальным признан метод синтеза с применением предварительно полученных антимонидов в качестве прекурсоров: он позволяет надёжно фиксировать сурьму в химических связях, исключить её улетучивание и обеспечить соответствие стехиометрическому составу, а также сократить время синтеза. Фазовый состав и монофазность образцов подтверждены рентгенофазовым и микроструктурным анализами (дифрактометр «Дрон-2», микроскоп «Неофот-21»). Установлено, что все соединения имеют структурную аналогию и кристаллизуются в кубической сингонии (пространственная группа $I43d$, структурный тип анти- Th_3P_4). В ходе работы определены параметры элементарных ячеек, плотность и микротвёрдость исходных антимонидов и твёрдых растворов - показано плавное изменение параметров кристаллической решётки при варьировании состава. Магнитные свойства исследованы методом измерения магнитной восприимчивости на установке с маятниковыми весами в диапазоне температур 298–773 К.

Ключевые слова: сплавы и соединение РЗЭ, синтез, кристаллохимия, магнитные свойства, парамагнитная температура Кюри, антимониды и компоненты.

КРИСТАЛЛОХИМИЯ ВА ХОСИЯТҲОИ МАГНИТНИИ МАҲЛУЛҲОИ САХТИ СИСТЕМАИ $Gd_4Sb_3 - Ln_4Sb_3$ ($Ln = Tb, Dy$)

¹В.Д. Абулхаев, ²Х.Х. Назарзода, ³Х.А. Рахимов

¹Институти химии ба номи В.И. Никитини АМИТ, шаҳри Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

²Донишгоҳи давлатии тичорати Тоҷикистон, шаҳри Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

³Институти энергетикӣ Тоҷикистон, ноҳияи Кушониён, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Дар мақола натиҷаҳои синтез ва таҳқиқи кристаллохимия ва хосиятҳои магнитии маҳлулҳои саҳти антимонидҳои таркиби $Gd_4Sb_3 - Ln_4Sb_3$ ($Ln = Tb, Dy$) пешниҳод шудаанд. Муҳимияти таҳқиқот бо талаботи маводи дар асоси элементҳои нодирӣ заминӣ (ЭНЗ) асосёфта дар соҳаҳои балантехнологӣ вобаста мебошад, зеро онҳо дорои хусусиятҳои барҷастаи магнитӣ, оптикӣ ва электрофизикӣ мебошанд; чунин пайвастиҳои барои истифода дар магнитҳои доимӣ, унсурҳои мантиқӣ, системаҳои хотира ва дастгоҳҳои яхкунии магнитӣ умедбахш мебошанд. Синтези антимонидҳои Gd_4Sb_3 , Tb_4Sb_3 , Dy_4Sb_3 ва маҳлулҳои саҳти дар асоси онҳо бо истифода аз маҷмааи ҳароратбаланди ВДТА-8МЗ дар шароити вакууми то $1,33 \times 10^{-2}$ Па ва ҳарорати то 1273 К (± 10 К) бо истифодаи тигелҳои молибдёнӣ анҷом дода шуд. Усули оптималии синтез усули эътироф гардид, ки дар он антимонидҳои қаблан ҳосилшуда ҳамчун прекурсор истифода мешаванд; ин усул имкон медиҳад, ки сурма дар пайвастиҳои химиявӣ боэтимод нигоҳ дошта шуда, бухоршавии он пешгирӣ гардад, мувофиқати таркиби стехиометрӣ таъмин шавад ва вақти синтез кам карда шавад. Таркиби фазавӣ ва якфазагӣ будани намунаҳо бо усулҳои таҳлили рентгенофазавӣ ва микроструктурӣ (дифрактометри «Дрон-2», микроскопии «Неофот-21») тасдиқ карда шуданд. Муайян гардид, ки ҳамаи пайвастиҳои монандии сохторӣ дошта, дар зарфи кубӣ кристалл мешаванд (гурӯҳи фазавӣ $I43d$, навъи сохтории анти- Th_3P_4). Дар қарабни қор параметрҳои хуҷайраҳои элементарӣ, зичӣ ва саҳтии микроскопии антимонидҳои ибтидоӣ ва маҳлулҳои саҳт муайян карда шуданд; тағйирёбии ҳамвори параметрҳои панҷараи кристаллӣ ҳангоми тағйир додани таркиб нишон дода шуд. Хосиятҳои магнитӣ бо усули ченкунии ҳассосияти магнитӣ дар дастгоҳи дорои тарозуҳои маятникӣ дар диапозони ҳароратии 298–773 К таҳқиқ карда шуданд.

Калидвожаҳо: ҳуҷаҳо ва пайвастиҳои (ЭНЗ), синтез, кристаллохимия, хосиятҳои магнитӣ, ҳарорати парамагнитии Кюри, антимонидҳо и компонентҳо.

CRYSTAL CHEMISTRY AND MAGNETIC PROPERTIES OF SOLID SOLUTIONS OF ANTIMONIDES OF THE COMPOSITION $Gd_4Sb_3 - Ln_4Sb_3$ ($Ln = Tb, Dy$)

¹V.J. Abulhaev, ²Kh.Kh. Nazarzoda, ³Kh.A. Rakhimov

¹V.I. Nikitin Institute of Chemistry, National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan

²Tajik State University of Commerce, Dushanbe, Tajikistan

³Institute of Energy of Tajikistan, Bokhtar, Tajikistan

The paper presents the results of the synthesis and study of the crystal chemistry and magnetic properties of solid solutions of antimonides of the composition $Gd_4Sb_3 - Ln_4Sb_3$ ($Ln = Tb, Dy$). The relevance of the study is due to the demand for materials based on rare earth elements (REE) in high-tech areas, in particular, due to their pronounced magnetic, optical and electrophysical properties; such compounds are promising for use in permanent magnets, logic elements, memory systems and magnetic refrigeration units. The synthesis of antimonides Gd_4Sb_3 , Tb_4Sb_3 , Dy_4Sb_3 and solid solutions based on them was performed on a high-temperature complex VDTA-8M3 under vacuum conditions of up to 1.33×10^{-2} Pa at temperatures of up to

1273 K (± 10 K) using molybdenum crucibles. A synthesis method using pre-prepared antimonides as precursors was found to be optimal: it reliably immobilizes antimony in chemical bonds, prevents its volatilization, and ensures compliance with the stoichiometric composition, as well as reducing synthesis time. The phase composition and single-phase nature of the samples were confirmed by X-ray diffraction and microstructural analysis (Dron-2 diffractometer, Neofot-21 microscope). It was established that all compounds have structural similarities and crystallize in a cubic syngony (space group $\bar{1}43d$, structural type anti-Th₃P₄). During the study, the unit cell parameters, density, and microhardness of the starting antimonides and solid solutions were determined; a smooth change in the crystal lattice parameters with varying composition was demonstrated. The magnetic properties were studied by measuring magnetic susceptibility using a pendulum balance in the temperature range of 298–773 K. All the studied phases exhibit paramagnetic behavior, and the temperature dependences of the inverse molar magnetic susceptibility are consistent with the Curie–Weiss law. Data on the molar magnetic susceptibility (at 298 K), paramagnetic Curie temperature, and effective magnetic moments of rare-earth ions are systematized.

Keywords: rare earth alloys and compounds, synthesis, crystal chemistry, magnetic properties, paramagnetic Curie temperature, antimonides and components.

Введение

Востребованность сплавов и соединений на основе РЗЭ в данных сферах объясняется их уникальными физико-химическими характеристиками: магнитными, оптическими и электрофизическими. К примеру, магнитные параметры ортоферритов и ферритов-гранатов позволяют задействовать их в производстве постоянных магнитов, а также при разработке логических элементов и систем памяти. В то же время гадолиний и его интерметаллиды с железом, кремнием или германием служат рабочим телом в магнитных холодильных установках благодаря выраженному магнетокалорическому эффекту и оптимальной температуре Кюри [1, 2, 5].

В связи с этим изучение кристаллихимии (типы кристаллических решеток, параметры элементарной ячейки) и магнитных свойств твердых растворов на основе антимонидов редкоземельных элементов разного состава является актуальной работой.

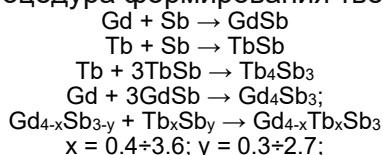
Целью данной работы являются синтез, исследование кристаллохимии и магнитных свойств твердых растворов антимонидов состава Gd_4Sb_3 - Ln_4Sb_3 ($Ln = Tb, Dy$).

Синтез антимонидов и твердых растворов

Экспериментальная часть по получению сложных антимонидов Gd_4Sb_3 , Tb_4Sb_3 , Dy_4Sb_3 и соответствующих твердых растворов на базе Gd_4Sb_3 - Ln_4Sb_3 ($Ln = Tb, Dy$) была реализована с применением высокотемпературного комплекса ВДТА-8М3. Термическую обработку проводили в условиях разряжения до $1,33 \times 10^{-2}$ Па. Мониторинг температурных показателей осуществлялся посредством термопары типа ВР 5/20 при достижении 1273 К отклонение не превышало (± 10 К). Использование молибденовых тиглей с герметичным затвором дало возможность минимизировать контакт реакционной смеси с внешней средой. Применение молибдена в качестве контейнерного материала подтверждено исследованиями [2–4], указывающими на его высокую коррозионную стойкость в контакте с расплавленными редкоземельными металлами.

Образование твердых растворов

Формирование твердых растворов в исследуемых системах может осуществляться путем прямого сплавления сурьмы с Gd, Tb или Dy. Альтернативный метод предполагает использование в качестве первичной шихты предварительно подготовленные антимониды типа Ln_4Sb_3 ($Ln = Gd, Tb, Dy$). Ниже детально описана процедура формирования твердых растворов Gd_4Sb_3 - Tb_4Sb_3 .



При получении твердых растворов наиболее целесообразным был признан второй метод синтеза, который имеет следующие преимущества:

- предварительно синтезированные антимониды надёжно обеспечивают получение твердых растворов;
- применение антимонидов в качестве прекурсоров позволяет надёжно зафиксировать сурьму в химических связях, что исключает её улетучивание из реакционного пространства. Такой подход обуславливает строгое соответствие полученных соединений по заданному стехиометрическому составу;
- применение заранее полученных антимонидов, как исходное сырьё, позволяет нагревать реакционную смесь с большой скоростью и одновременно сократить время синтеза продуктов [2, 4, 6].

В ниже представленной таблице приведены характеристики антимонидов Ln_4Sb_3 ($\text{Ln} = \text{Gd}, \text{Tb}, \text{Dy}$). Монофазные свойства приведенных веществ и изменённых продуктов, (модификации твердых растворов), были экспериментально доказаны методом МСА и методом рентгенофазового анализа.

Таблица 1 - Параметры кристаллической структуры и химические свойства антимонидов Ln_4Sb_3 ($\text{Ln} = \text{Gd}, \text{Tb}, \text{Dy}$)
Table 1 – Parameters of the crystal structure and chemical properties of Ln_4Sb_3 antimonides ($\text{Ln} = \text{Gd}, \text{Tb}, \text{Dy}$)

Антимониды	Структурный тип	Параметр элементарной ячейки, ±0.0005 нм			Плотность, кг/м³		Микротвердость, МПа
		a	b	c	эксперим	расчет.	
Антимониды РЗЭ							
Gd ₄ Sb ₃	-//-	0.9240			8420	8428	4860±130
Tb ₄ Sb ₃	-//-	0.9165			8665	8672	4950±150
Dy ₄ Sb ₃	-//-	0.9120			8921	8927	5100±80

Подтверждено, что соединения с сурьмой имеют полную структурную аналогию и при этом их кристаллическая архитектура соответствует пространственной группе $\bar{1}43d$ [7, 8] (кубическая сингония, структурный тип анти - Th_3P_4) [7, 8]. В нижеприведенной таблице изложены кристаллохимические параметры твердых растворов для изучаемых систем.

Таблица 2 - Кристаллохимические показатели твердых растворов $\text{Gd}_{4-x}\text{Ln}_x\text{Sb}_3$ ($\text{Ln} = \text{Tb}, \text{Dy}; x = 0.4 \div 3.6$)
Table 2 – Crystal-chemical parameters of $\text{Gd}_{4-x}\text{Ln}_x\text{Sb}_3$ solid solutions ($\text{Ln} = \text{Tb}, \text{Dy}; x = 0.4 - 3.6$)

Твердые растворы	Параметр элементарной ячейки, ± 0.0005 нм	Плотность, кг/м^3	
	a	экспер.	расчет.
Система $\text{Gd}_4\text{Sb}_3 - \text{Tb}_4\text{Sb}_3$			
$\text{Gd}_{3.6}\text{Tb}_{0.4}\text{Sb}_3$	0.9225	8418	8423
$\text{Gd}_{3.2}\text{Tb}_{0.8}\text{Sb}_3$	0.9220	8482	8486
$\text{Gd}_{2.8}\text{Tb}_{1.2}\text{Sb}_3$	0.9210	8510	8513
$\text{Gd}_{2.4}\text{Tb}_{1.6}\text{Sb}_3$	0.9206	8530	8536
$\text{Gd}_2\text{Tb}_2\text{Sb}_3$	0.9202	8548	8552
$\text{Gd}_{1.6}\text{Tb}_{2.4}\text{Sb}_3$	0.9195	8568	8577
$\text{Gd}_{1.2}\text{Tb}_{2.8}\text{Sb}_3$	0.9186	8602	8608
$\text{Gd}_{0.8}\text{Tb}_{3.2}\text{Sb}_3$	0.9182	8616	8619
$\text{Gd}_{0.4}\text{Tb}_{3.6}\text{Sb}_3$	0.9170	8662	8665
Система $\text{Gd}_4\text{Sb}_3 - \text{Dy}_4\text{Sb}_3$			
$\text{Gd}_{3.6}\text{Dy}_{0.4}\text{Sb}_3$	0.9230	8460	8464
$\text{Gd}_{3.2}\text{Dy}_{0.8}\text{Sb}_3$	0.9220	8506	8510
$\text{Gd}_{2.8}\text{Dy}_{1.2}\text{Sb}_3$	0.9210	8548	8555
$\text{Gd}_{2.4}\text{Dy}_{1.6}\text{Sb}_3$	0.9200	8562	8567
$\text{Gd}_2\text{Dy}_2\text{Sb}_3$	0.9190	8642	8648
$\text{Gd}_{1.6}\text{Dy}_{2.4}\text{Sb}_3$	0.9185	8676	8680
$\text{Gd}_{1.2}\text{Dy}_{2.8}\text{Sb}_3$	0.9175	8722	8726
$\text{Gd}_{0.8}\text{Dy}_{3.2}\text{Sb}_3$	0.9170	8754	8760
$\text{Gd}_{0.4}\text{Dy}_{3.6}\text{Sb}_3$	0.9165	8788	8791

Микроструктурный и рентгенофазовый анализы были проведены по стандартной методике. Рентгенографические исследования выполнялись на дифрактометре «Дрон-2» с применением CuK_α -излучения, прошедшего через никелевый фильтр. Анализ микроструктуры образцов выполнялся с помощью микроскопа «Неофот-21» в режимах поляризованного и отраженного света. В качестве травителей были использованы следующие реактивы: 1) 1% -ный раствор концентрированной HNO_3 в спирте; 2) раствор, содержащий 0,5 об. % HCl и 1 об. % HNO_3 в спирте [9, 10].

Магнитные свойства систем твердых растворов $Gd_4Sb_3 - Tb_4Sb_3$ и $Gd_4Sb_3 - Dy_4Sb_3$ исследовали методом измерения магнитной восприимчивости. Измерения выполнялись с использованием установки [11], функционирующей по принципу маятниковых весов.

Результаты исследования

Анализ магнитных характеристик показал парамагнитный характер как исходных фаз, так и сформированных на их основе твердых растворов во всем изученном тепловом диапазоне. Графики температурного хода величины $1/X_m$ для составов $Gd_{4-x}Ln_xSb_3$ ($Ln = Tb, Dy$; $x = 0.4 \div 3.6$) при нагреве от 298 до 773 К продемонстрированы на рис. 1, 2 (а, б). Характер полученных кривых указывает на то, что политермы обратной молярной магнитной восприимчивости беспрепятственно описываются классическим законом Кюри – Вейсса.

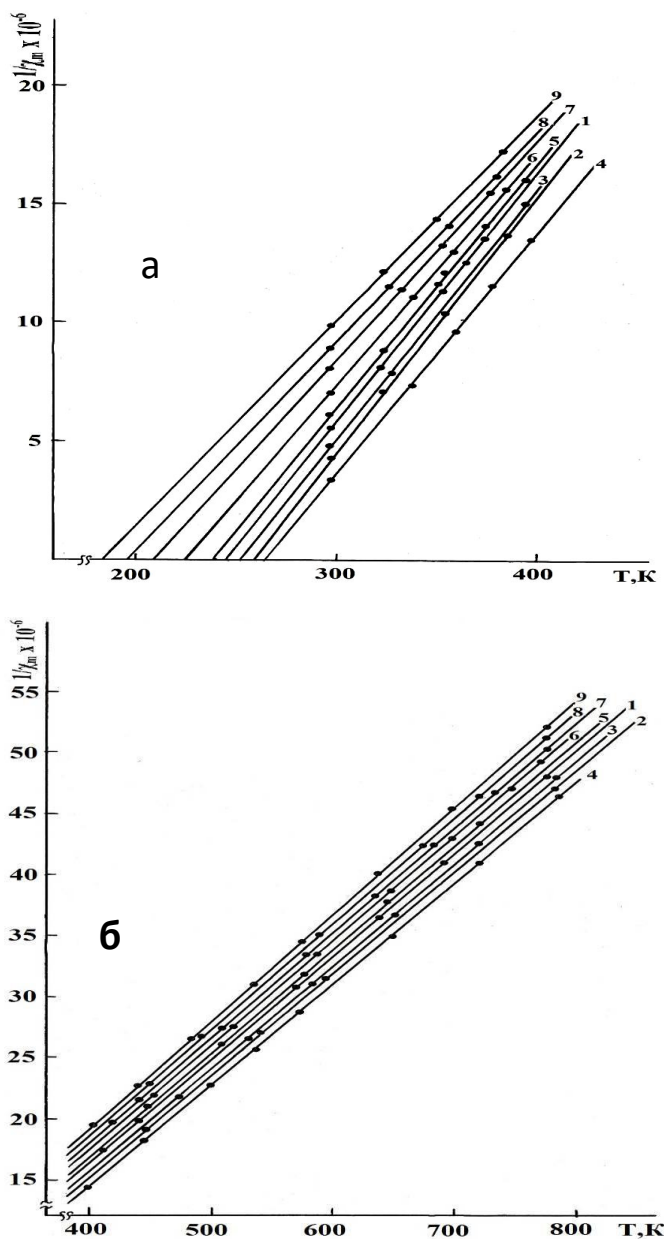


Рисунок 1 - Графики обратной магнитной восприимчивости твердых растворов $Gd_{4-x}Tb_xSb_3$, содержащих: 1- 10, 2- 20, 3-30, 4-40, 5-50, 6-60, 7-70, 8-80 и 9-90 мол.% Tb_4Sb_3 , в диапазоне температур 298 -400 К (а) и 400-773 К (б)
Figure 1 – Plots of inverse magnetic susceptibility of $Gd_{4-x}Tb_xSb_3$ solid solutions containing: 1 – 10, 2 – 20, 3 – 30, 4 – 40, 5 – 50, 6 – 60, 7 – 70, 8 – 80, and 9 – 90 mol.% Tb_4Sb_3 , in the temperature ranges of 298–400 K (a) and 400–773 K (b)

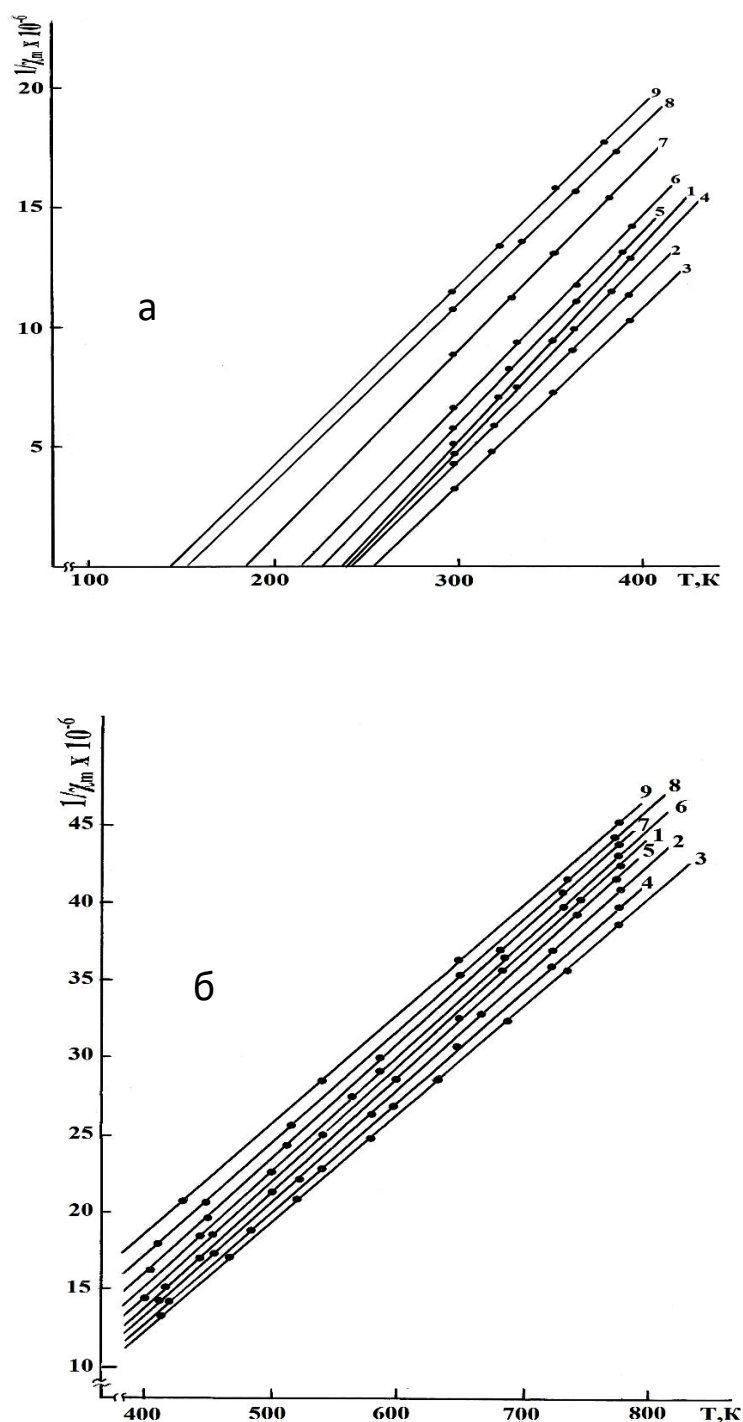


Рисунок 2 - Изменение обратной молярной магнитной восприимчивости твердых растворов $Gd_{4-x}Dy_xSb_3$, содержащих, а: 1- 10, 2-20, 3-30, 4-40, 5-50; б: 6-60, 7-70, 8-80 и 9-90 мол. % Dy_4Sb_3 в диапазоне температур 298-400 К (а) и 400-773 К (б)

Figure 2 – Variation of the inverse molar magnetic susceptibility of $Gd_{4-x}Dy_xSb_3$ solid solutions containing: (a) 1 – 10, 2 – 20, 3 – 30, 4 – 40, 5 – 50; (b) 6 – 60, 7 – 70, 8 – 80, and 9 – 90 mol.% Dy_4Sb_3 in the temperature ranges of 298–400 K (a) and 400–773 K (b)

Ниже в таблице представлены систематизированные экспериментальные данные по молярной магнитной восприимчивости (при $T = 298$ К), парамагнитной температуре Кюри и эффективным магнитным моментом редкоземельных ионов в составе твердых растворов.

Таблица 3 - Магнитные характеристики твердых растворов исследуемых систем Gd_4Sb_3 - Ln_4Sb_3 ($Ln = Tb, Dy$)
 Table 3 – Magnetic characteristics of solid solutions of the investigated Gd_4Sb_3 – Ln_4Sb_3 systems ($Ln = Tb, Dy$)

Твердые растворы	$\chi_m \times 10^6$ при 298 К	θ_p , К	$\mu_{эфф.} \times 10^{24}$, А·м ²
1	2	3	4
Твердые растворы системы Gd_4Sb_3 - Tb_4Sb_3			
$Gd_{3.6}Tb_{0.4}Sb_3$	150463.5	245	74.30
$Gd_{3.2}Tb_{0.8}Sb_3$	189156.4	254	75.95
$Gd_{2.8}Tb_{1.2}Sb_3$	216682.2	258	77.53
$Gd_{2.4}Tb_{1.6}Sb_3$	275615.2	265	79.38
$Gd_2Tb_2Sb_3$	164604.0	240	81.33
$Gd_{1.6}Tb_{2.4}Sb_3$	133286.4	226	81.61
$Gd_{1.2}Tb_{2.8}Sb_3$	116360.2	210	84.20
$Gd_{0.8}Tb_{3.2}Sb_3$	106957.2	198	86.24
$Gd_{0.4}Tb_{3.6}Sb_3$	98023.52	184	88.10
Твердые растворы системы Gd_4Sb_3 - Dy_4Sb_3			
$Gd_{3.6}Dy_{0.4}Sb_3$	150463.5	238	77.62
$Gd_{3.2}Dy_{0.8}Sb_3$	189156.4	242	77.34
$Gd_{2.8}Dy_{1.2}Sb_3$	216682.2	254	70.76
$Gd_{2.4}Dy_{1.6}Sb_3$	275615.2	240	78.17
$Gd_2Dy_2Sb_3$	164604.0	228	80.2
$Gd_{1.6}Dy_{2.4}Sb_3$	133286.4	216	77.8
$Gd_{1.2}Dy_{2.8}Sb_3$	116360.2	186	83.18
$Gd_{0.8}Dy_{3.2}Sb_3$	106957.2	154	96.54
$Gd_{0.4}Dy_{3.6}Sb_3$	98023.52	145	99.04

Заклучение

Полученные и исследованные твердые растворы на основе соединений Gd_4Sb_3 , Tb_4Sb_3 и Dy_4Sb_3 демонстрируют магнитные свойства, близкие к свойствам чистых редкоземельных металлов, что выражается в высоких значениях парамагнитной температуры Кюри и эффективного магнитного момента. Полученные результаты свидетельствуют о возможности применения данных материалов в тех областях науки и техники, где используются редкоземельные материалы. В частности, они могут быть использованы в качестве наконечников магнитных сверхпроводящих соленоидов. Кроме того, твердые растворы с высокими значениями парамагнитной температуры Кюри, могут найти применение в криогенных устройствах для повышения магнитного потока в установках, работающих как при температурах жидкого азота, так и при гелиевых температурах. Также данные твердые растворы могут использоваться в качестве добавок к магнитным материалам для увеличения магнитной индукции [2, 4].

Рецензент: Тайбуллаева З.Х. — д.т.н., профессор кафедры «Технология химических производств» ТПУ имени академика М.С. Осими.

Литература

1. Белов, К.П. Редкоземельные магнетики и их применение. /К.П. Белов. -М.: Наука, 1980. – 239 с.
2. Назаров, Х. Х. Твердые растворы систем Gd_4Sb_3 - Ln_4Sb_3 ($Ln=Pr, Nd, Tb, Dy, Yb$) и Tb_4Sb_3 - Dy_4Sb_3 : специальность 02.00.04 "Физическая химия" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Назаров Хайрулло Холназарович. – Душанбе, 2006. – 122 с. – EDN NNRXFN.
3. Абулхаев, В. Д. Кристаллохимические характеристики и магнитные свойства антимонидов состава Gd_4Sb_3 - Ln_4Sb_3 ($Ln = Tb, Dy$) / В. Д. Абулхаев, Х. Х. Назарзода // Вестник Бохтарского государственного университета имени Носира Хусрава. Серия естественных наук. – 2025. – № 2-1(132). – С. 64-68. – EDN DZFHFK.
4. Назарзода, Х.Х. Твердые растворы антимонидов и висмутидов редкоземельных элементов. Дис... д-ра. тех. наук. /Х.Х. Назарзода. Душанбе. 2021.-310с.
5. Савицкий, Е.М. Металловедение редкоземельных металлов/ Е.М.Савицкий, В.Ф.Терехова. -М.: Наука. 1975. -270 с.
6. Диаграмма состояния системы Tb_4Sb_3 - Nd_4Sb_3 / В. Д. Абулхаев, М. А. Балаев, И. Н. Ганиев [и др.] // Известия Национальной академии наук Таджикистана. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук. – 2023. – № 3(192). – С. 91-96. – EDN ZEEGVR.
7. Абулхаев, В. Д. Кристаллохимические характеристики и магнитные свойства антимонидов состава Gd_4Sb_3 - Ln_4Sb_3 ($Ln = Tb, Dy$) / В. Д. Абулхаев, Х. Х. Назарзода // Вестник Бохтарского государственного университета имени Носира Хусрава. Серия естественных наук. – 2025. – № 2-1(132). – С. 64-68. – EDN DZFHFK.

8. Назарзода Х.Х. Твердые растворы на основе антимонидов Tb_4Sb_3 , Nd_4Sb_3 и их электрофизические свойства. /Абулхаев В.Д., Балаев М.А., Ганиев И.Н., Назарзода Х.Х., Сайдалиев Б.Д., Убайдов С.О.// Доклады НАНТ. Душанбе 2023г., том 66, №11-12 с 705-711.

9. Недома, И. Расшифровка рентгенограмм порошков /И. Недома. -М.: Металлургия. 1975. -423 с.

10. Миркин, Л.И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов /Л.И. Миркин. -М.: Физматгиз. 1961. -863 с.

11. Чечерников, В.И. Установка с использованием магнитных весов. Магнитные измерения/Чечерников В.И. - М.: Изд. МГУ. 1963. с. 92-94.

References

1. Belov, K.P. Rare-Earth Magnets and Their Applications. Moscow: Nauka Publ., 1980. 239 p.

2. Nazarov, Kh.Kh. Solid Solutions of the Gd_4Sb_3 – Ln_4Sb_3 ($Ln = Pr, Nd, Tb, Dy, Yb$) and Tb_4Sb_3 – Dy_4Sb_3 Systems: Dissertation for the Degree of Candidate of Technical Sciences, specialty 02.00.04 “Physical Chemistry”. Dushanbe, 2006. 122 p. EDN NNRXFN.

3. Abulkhaev, V.D., Nazarzoda, Kh.Kh. Crystal-Chemical Characteristics and Magnetic Properties of Antimonides of the Gd_4Sb_3 – Ln_4Sb_3 ($Ln = Tb, Dy$) Composition // Bulletin of Nosir Khusrav Bokhtar State University. Series of Natural Sciences. – 2025. – No. 2-1(132). – P. 64–68. EDN DZFHFK.

4. Nazarzoda, Kh.Kh. Solid Solutions of Antimonides and Bismuthides of Rare-Earth Elements: Dissertation for the Degree of Doctor of Technical Sciences. Dushanbe, 2021. 310 p.

5. Savitsky, E.M., Terekhova, V.F. Metallurgy of Rare-Earth Metals. Moscow: Nauka Publ., 1975. 270 p.

6. Abulkhaev, V.D., Balaev, M.A., Ganiev, I.N. et al. Phase Diagram of the Tb_4Sb_3 – Nd_4Sb_3 System // Proceedings of the National Academy of Sciences of Tajikistan. Department of Physical-Mathematical, Chemical, Geological and Technical Sciences. – 2023. – No. 3(192). – P. 91–96.

7. Abulkhaev, V.D., Nazarzoda, Kh.Kh. Crystal-Chemical Characteristics and Magnetic Properties of Antimonides of the Gd_4Sb_3 – Ln_4Sb_3 ($Ln = Tb, Dy$) Composition // Bulletin of Nosir Khusrav Bokhtar State University. Series of Natural Sciences. – 2025. – No. 2-1(132). – P. 64–68.

8. Nazarzoda, Kh.Kh. Solid Solutions Based on Tb_4Sb_3 and Nd_4Sb_3 Antimonides and Their Electrophysical Properties / V.D. Abulkhaev, M.A. Balaev, I.N. Ganiev, Kh.Kh. Nazarzoda, B.D. Saidaliev, S.O. Ubaidov // Reports of the National Academy of Sciences of Tajikistan. – Dushanbe, 2023. – Vol. 66. – No. 11–12. – P. 705–711.

9. Nedoma, I. Decoding of X-Ray Diffraction Patterns of Powders. Moscow: Metallurgiya Publ., 1975. 423 p.

10. Mirkin, L.I. Handbook on X-Ray Structural Analysis of Polycrystals. Moscow: Fizmatgiz Publ., 1961. 863 p.

11. Chechernikov, V.I. Magnetic Balance-Based Installation. Magnetic Measurements. Moscow: Moscow State University Publ., 1963. P. 92–94.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФ – СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ –INFORMATION ABOUT AUTHOR

TJ	RU	EN
Абулхаев Владимир Чалолович	Абулхаев Владимир Джалолович	Abulkhaev Vladimir Jalolovich
доктори илмҳои кимиё, профессор	доктор химических наук, профессор	Doctor of Chemical Sciences, Professor,
Институти кимиёи АМИТ ба номи В.И. Никитин	Институт химии им. В.И. Никитина НАНТ	Institute of Chemistry named after V.I. Nikitina NAST
E. mail: abulkhaev-48@mail.ru		
TJ	RU	EN
Назарзода Хайрулло Холназар	Назарзода Хайрулло Холназар	Nazarzoda Khayrullo Kholnazar
доктори илмҳои техника, профессор	доктор технических, профессор	doctor of technical sciences,
Донишгоҳи давлатии тиҷорати Тоҷикистон	Таджикский государственный университет коммерции	Tajik state university of commerce
E. mail: nazarov-h2013@mail.ru		
TJ	RU	EN
Раҳимов Хуршед Абдуллоевич	Рахимов Хуршед Абдуллоевич	Rakhimov Khurshed Abdulloevich
номзади илмҳои техника	кандидат технических наук	Candidate of Technical Sciences.
Донишқадаи энергетикӣ Тоҷикистон	Институт энергетикӣ Таджикистана	Institute of energy of Tajikistan
E. mail: kh.rakhimov.69@mail.ru		