

## АНОМАЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ВЕРХНЕГО КРИТИЧЕСКОГО ПОЛЯ В МАГНИТНОМ СВЕРХПРОВОДНИКЕ $\text{NdMo}_6\text{S}_8$

*Н.Е.Алексеевский, В.Н.Нарожный*

Показано, что зависимость  $H_{c2}(T)$  для  $\text{NdMo}_6\text{S}_8$  имеет максимум при  $T \sim 1,3\text{К}$ .

В последнее время большое число работ было посвящено изучению стехиометрических тройных соединений, в которых присутствуют магнитные ионы редкой земли. К таким соединениям относятся тройные халькогениды молибдена <sup>1, 2</sup>  $\text{REMo}_6\text{X}_8$  ( $\text{X} - \text{S}, \text{Se}$ ;  $\text{RE}$  — редкая земля), а также соединения состава  $\text{RERh}_4\text{B}_4$  <sup>3</sup>. Несмотря на наличие в решетке около 10% магнитных ионов, многие соединения из этих групп являются сверхпроводниками (см., например, <sup>4</sup>), что связано, по-видимому, с тем, что обменное взаимодействие в этих соединениях является достаточно слабым.

При исследовании электрических, магнитных и тепловых свойств таких сверхпроводников у некоторых из них был обнаружен ряд аномалий. Это позволило предположить, что у них происходит магнитное упорядочение при температурах ниже  $T_c$  <sup>3, 5, 6</sup>. Как показали измерения по рассеянию нейтронов, у соединений  $\text{ErRh}_4\text{B}_4$  <sup>7</sup> и  $\text{HoMo}_6\text{S}_8$  <sup>8</sup> действительно наблюдается ферромагнитное упорядочение ионов RE, приводящее к разрушению сверхпроводимости при  $T_m < T_c$ . В то же время в соединениях  $\text{DyMo}_6\text{S}_8$ ,  $\text{TbMo}_6\text{S}_8$  и  $\text{ErMo}_6\text{S}_8$  <sup>9</sup> антиферромагнитное упорядочение происходящее при  $T_m < T_c$  не разрушает сверхпроводимости, а приводит лишь к аномалии на зависимости верхнего критического поля от температуры  $H_{c2}(T)$ .

В настоящей работе сообщается об обнаружении аномальной температурной зависимости  $H_{c2}(T)$  для соединения  $\text{NdMo}_6\text{S}_8$ . Ряд измерений был проведен на образцах соединения  $\text{DyMo}_6\text{S}_8$ , которое было исследовано ранее <sup>6</sup>. Образцы были приготовлены прямым синтезом необходимых количеств Mo, S и NdS (шихтовый состав  $\text{Nd}_{1,2}\text{Mo}_6\text{S}_8$ ) при  $T = 900^\circ\text{C}$ . Для гомогенизации синтезированные образцы растирались в агатовой ступке, прессовались и отжигались при  $T = 1100^\circ\text{C}$  в течение около 20 часов.

Измерения при  $0,5 \div 1,5\text{К}$  были проведены на установке с откачкой паров He-3 в Международной лаборатории сильных магнитных полей и низких температур, г. Вроцлав, ПНР. Температура до  $0,05\text{К}$  получалась посредством адиабатического размагничивания иттрий-алюминиевого граната, частично замещенного эрбием <sup>10</sup>, в приборе с холодопроводом, аналогичном описанному в работе <sup>11</sup>.

На рис. 1 показано сопротивление  $r(T, H)$  образца  $\text{NdMo}_6\text{S}_8$  в зависимости от температуры при различных магнитных полях. При  $H = 0$  образец переходит в сверхпроводящее состояние при  $T_c = 3,4\text{К}$ . В магнитном поле до  $1\text{кЭ}$  при температуре ниже  $2\text{К}$  образец оставался полностью сверхпроводящим. При дальнейшем повышении магнитного поля наблюдался неполный сверхпроводящий переход и возрастание сопротивления при понижении температуры ниже  $1\text{К}$ . При  $T \sim 0,3\text{К}$  на зависимости  $r(T)$  наблюдался пологий максимум, положение которого не зависело от магнитного поля. В то же время температура, при которой сопротивление начинает расти перед максимумом на кривой  $r(T)$  существенно зависит от магнитного поля. Следует отметить, что измерения проводились при постоянном значении магнитного поля  $H$ , последовательное увеличение  $H$  проводилось после отогрева выше  $T_c$ .

При измерении  $r(T, H)$  у соединения  $\text{DyMo}_6\text{S}_8$  были получены результаты, хорошо согласующиеся с данными работы <sup>6</sup>. В полях больше  $1\text{кЭ}$  при понижении температуры ниже  $T_c$  на зависимости  $r(T)$  наблюдался острый максимум, положение которого не зависело от магнитного поля. В отличие от  $\text{NdMo}_6\text{S}_8$  для соединения  $\text{DyMo}_6\text{S}_8$  температура возрастания сопротивления перед максимумом практически не зависела от магнитного поля.

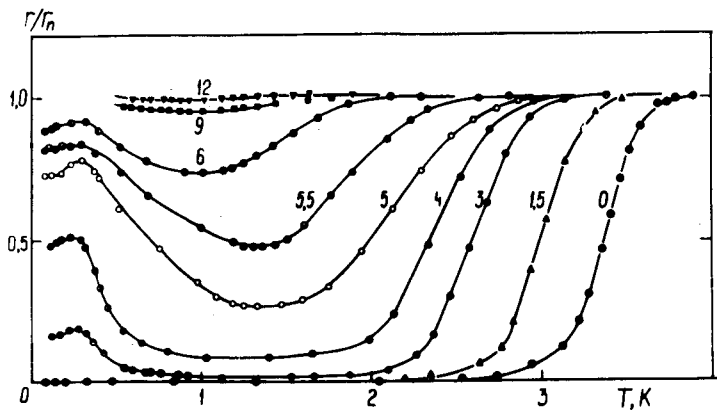


Рис. 1. Сверхпроводящие переходы для  $\text{NdMo}_6\text{S}_8$ . Цифры обозначают магнитное поле  $H$  в кЭ

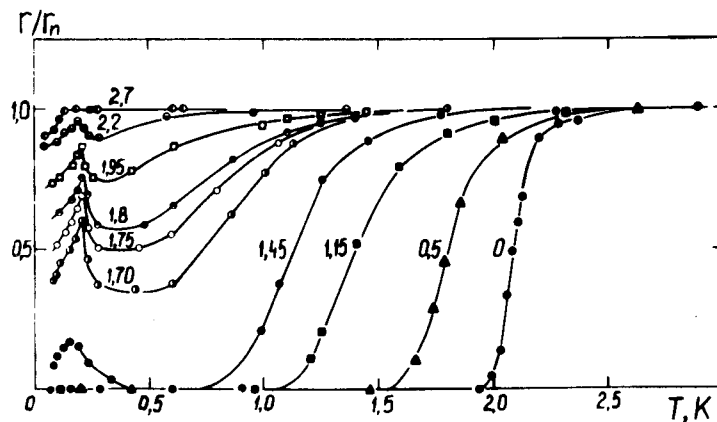


Рис. 2. Сверхпроводящие переходы для  $\text{DyMo}_6\text{S}_8$ . Цифры обозначают магнитное поле  $H$  в кЭ

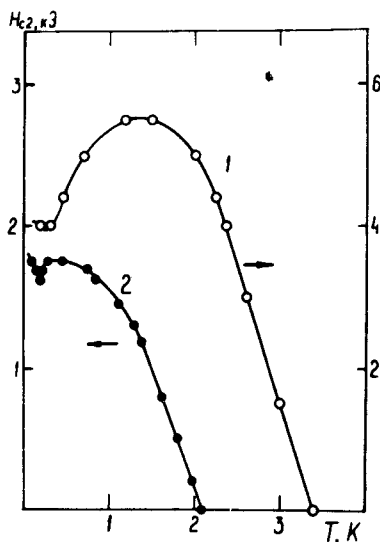


Рис. 3. Зависимость верхнего критического магнитного поля  $H_{c2}$  от температуры для  $\text{NdMo}_6\text{S}_8$  (1) и  $\text{DyMo}_6\text{S}_8$  (2)

Если построить зависимость  $H_{c2}(T)$  по серединам переходов, то получаются кривые с максимумом. Для  $\text{DyMo}_6\text{S}_8$  при  $T \sim 0,2\text{K}$  на  $H_{c2}(T)$  имеется характерный минимум. В отличие от результатов <sup>6</sup> при  $T < 0,2\text{K}$  нами наблюдался дальнейший рост  $H_{c2}(T)$  при понижении температуры. Для  $\text{NdMo}_6\text{S}_8$  при  $T \sim 0,2\text{K}$  на зависимости  $H_{c2}(T)$  наблюдалась гораздо более слабая особенность.

Полученные нами зависимости  $r(T, H)$  и  $H_{c2}(T)$  для  $\text{NdMo}_6\text{S}_8$  в основном качественно аналогичны зависимостям, полученным в <sup>6</sup> для  $\text{ErMo}_6\text{S}_8$ . Для  $\text{ErMo}_6\text{S}_8$  антиферромагнитное упорядочение наблюдалось по рассеянию нейтронов в поле 250 Э при  $T \sim 0,2\text{K}$  <sup>9</sup>. Зависимость  $H_{c2}(T)$  с максимумом, аналогичная полученной нами для  $\text{NdMo}_6\text{S}_8$ , в работе <sup>6</sup> объяснялась возрастанием при понижении температуры эффективного внутреннего "распаривающего" поля, связанного с ростом магнитной восприимчивости подрешетки ионов  $\text{Er}^{3+}$ , который предшествует магнитному упорядочению. Аналогичным образом можно, по-видимому, объяснить и зависимость  $H_{c2}(T)$  для  $\text{NdMo}_6\text{S}_8$ , наблюдающуюся в данной работе.

Измерение рассеяния нейтронов <sup>9</sup> показало, что соединение  $\text{DyMo}_6\text{S}_8$  переходит в антиферромагнитное упорядоченное состояние при  $T \sim 0,4\text{K}$ .

Таким образом, для соединения  $\text{NdMo}_6\text{S}_8$ , нами обнаружена аномальная зависимость  $H_{c2}(T)$  (с максимумом), аналогичная наблюдавшейся ранее <sup>6</sup> для соединения  $\text{ErMo}_6\text{S}_8$ . Указанная аномалия связана, по-видимому, с антиферромагнитным упорядочением при  $T \sim 0,3\text{K}$  в системе ионов  $\text{Nd}^{3+}$ , при этом соединение остается в сверхпроводящем состоянии.

Авторы благодарят Ю.А.Денискина, Е.П.Хлыбова, А.С.Руденко и Х.Медге за помощь в проведении эксперимента.

### Литература

1. Fischer  $\phi$ ., Treyvaud A., Chevrel R., Sergent M. Solid State Comm., 1975, 17, 721.
2. Shelton R.N., McCallum K.W., Adrian A. Phys. Lett., 1976, 56A, 213.
3. Fertig W.A., Johnston D.C., DeLong L.E., McCallum K.W., Maple M.B., Matthias B.T. Phys. Rev. Lett., 1977, 38, 987.
4. Matsumoto H., Umezawa H. Cryogenics, January, 1983, 37.
5. Ishikawa M., Fischer  $\phi$ . Solid State Comm., 1977, 23, 37.
6. Ishikawa M., Fischer  $\phi$  Solid State Comm., 1977, 24, 747.
7. Moncton D.E., McWhan D.B., Eckert J., Shirane G., Thomlinson W. Phys. Rev. Lett., 1977, 39, 1164.
8. Lynn J.W., Moncton D.E., Thomlinson W., Shirane G., Shelton R.N. Solid State Comm., 1978, 26, 493.
9. Thomlinson W., Shirane G., Moncton D.E., Ishikawa M., Fischer  $\phi$ . Phys. Rev. B, 1981, 23, 4455.
10. Alekseevskii N.E., Dodokin A.P., Bazan C., Bagdasarov Kh.S., Fedorov E.A., Belyaev L.M. Cryogenics, October 1981, 598.
11. Алексеевский Н.Е., Гайдуков Ю.П. Письма в ЖЭТФ, 1953, 25, 383.

Институт физических проблем  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
28 марта 1984г.