

СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ В $Tb_2Mo_3Si_4$

Ф.Г.Алиев, Н.Б.Брандт, В.В.Мошалоков,
Ю.К.Гореленко, О.В.Петренко

Найден новый антиферромагнитный сверхпроводник – соединение $Tb_2Mo_3Si_4$, в котором переход в сверхпроводящее состояние происходит при температуре $T_c = 0,5 - 1,2$ К, во много раз меньшей температуры магнитного перехода $T_N \approx 20$ К.

1. В последнее десятилетие успехи синтеза двойных и тройных соединений на основе редкоземельных соединений и актинидов привели к открытию "экзотических" сверхпроводников – сверхпроводящих систем с тяжелыми фермионами ¹, магнитных сверхпроводников ^{2,3} магнитных кондо-решеток, переходящих в сверхпроводящее состояние в сильном магнитном поле ⁴. Исследование "экзотических" сверхпроводников представляет большой интерес для выявления возможностей сосуществования сверхпроводимости и магнетизма. Во всех известных к настоящему времени магнитных сверхпроводниках температура сверхпроводящего перехода T_c , как правило, несколько выше температуры магнитного перехода. Исключением являются лишь соединения $Ho(Ir_xRh_{1-x})_4B_4$ ⁵ и системы Y_9Co_7 ⁶, $Cr - Re$ ⁷. Однако, у $Ho(Ir_xRh_{1-x})_4B_4$ температура Нееля T_N превышает T_c всего на один градус, а у Y_9Co_7 и $Cr - Re$ магнетизм имеет зонный характер. В то же время среди сверхпроводников, в которых локальный магнетизм сосуществует со сверхпроводимостью, не было известно ни одного соединения, в котором температура T_N значительно превышала бы температуру сверхпроводящего перехода. В настоящей работе сообщается об обнаружении "сверхпроводящего магнетика" – соединения $Tb_2Mo_3Si_4$, в котором $T_N \approx 20$ К \gg $T_c \approx 0,5 - 1,2$ К.

2. В области температур 4,2 – 300 К у поликристаллических образцов соединения $Tb_2Mo_3Si_4$, принадлежащего к структурному типу $U_2Mo_3Si_4$ ⁸, были исследованы температурные зависимости магнитной восприимчивости $\chi(T)$, удельного сопротивления $\rho(T)$ и теплоемкости $C(T)$ (рис. 1). Магнитная восприимчивость измерялась на вибрационном магнитометре в поле $H = 3$ кЭ. Для определения температурного хода $C(T)$ и $\rho(T)$ использовалась автоматизированная установка на базе ЭВМ ДЗ-28.

Высокотемпературные участки кривых $\chi(T)$ (рис. 1, а) хорошо описываются законом Кюри – Вейса с постоянной $\theta = - 30$ К и эффективным магнитным моментом $\mu_{3ф\phi} = 9,66 \mu_B$. Эти данные согласуются с результатами работы ⁸ и свидетельствуют о том, что магнитные свойства $Tb_2Mo_3Si_4$ определяются наличием локальных моментов на ионах тербия. При температурах $T = T_N \approx 20$ К на зависимостях $\chi(T)$ и $C(T)$ обнаружен резкий пик (рис. 1, а, в) соответствующий переходу из парамагнитного в антиферромагнитное состояние. Этот переход сопровождается также появлением излома на кривой $\rho(T)$ (рис. 1, б).

Магнитная восприимчивость $\chi(T)$ и удельное сопротивление $\rho(T)$ у $Tb_2Mo_3Si_4$ в антиферромагнитной фазе были исследованы вплоть до $T = 0,05$ К (рис. 2, 3). Величина $\chi(T)$ при $T = 0,05 - 2$ К измерялась в поле $H = 0,5$ Э с помощью сквида. Понижение температуры приводит к появлению диамагнитной аномалии $\chi(T)$ (рис. 2) и занулению $\rho(T)$ (рис. 3) Эти особенности $\chi(T)$ и $\rho(T)$ отвечают переходу в сверхпроводящее состояние и наблюдаются у различных образцов $Tb_2Mo_3Si_4$ в интервале температур $T = T_c \approx 0,5 - 1,2$ К.

3. Выясним, прежде всего, является ли сверхпроводимость в $Tb_2Mo_3Si_4$ собственной или примесной. Рентгенофазовый анализ позволил установить, что с точностью до 1 – 2 % сверхпроводящие примеси Mo ($T_c \approx 0,9$ К ⁹), Mo_3Si ($T_c \approx 1,4$ К ⁹) и $MoSi_2$ ($T_c < 0,3$ К ⁹) отсутствуют во всех шести исследованных образцах $Tb_2Mo_3Si_4$. Для оценки величины эффекта Мейсснера рядом с образцом $Tb_2Mo_3Si_4$ располагался примерно втрое меньшего размера образец алюминия 99,99 % чистоты. Было установлено (рис. 2), что диамагнитный скачок χ при сверхпроводящем переходе у $Tb_2Mo_3Si_4$, примерно в три раза больше, чем ска-

чок χ у Al, т.е. в области $T \lesssim T_c$ магнитное поле практически полностью выталкивается из образца $Tb_2Mo_3Si_4$. Этот результат, а также данные рентгенофазового анализа, доказывают существование собственной сверхпроводимости в соединении $Tb_2Mo_3Si_4$. Температура сверхпроводящего перехода изменяется от образца к образцу и составляет $T_c \approx 0,5 - 1,2$ К. Величина T_c зависит от способа термообработки образцов. Так, отжиг образцов при 800°C в течение 700 часов увеличивает T_c с 0,7 до 1,2 К, причем большим T_c соответствует и более размытый сверхпроводящий переход.

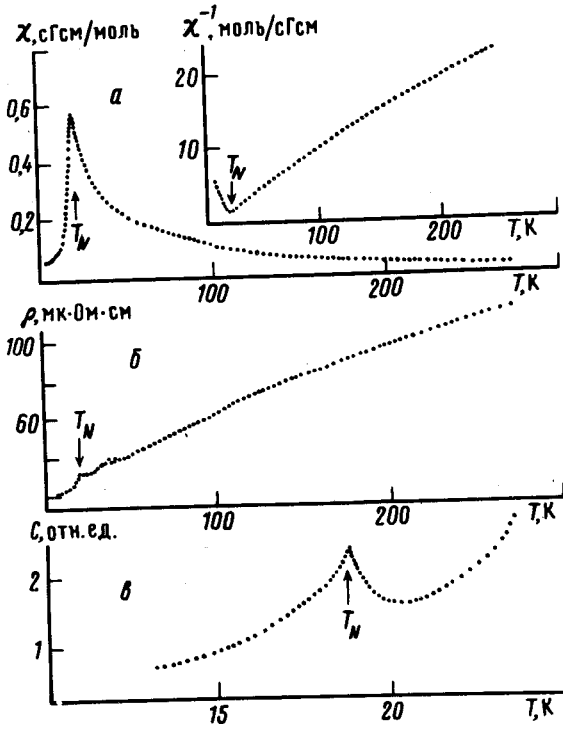


Рис. 1. Температурные зависимости магнитной восприимчивости (а), удельного сопротивления (б), теплоемкости (в) у соединения $Tb_2Mo_3Si_4$. На вставке показана температурная зависимость обратной восприимчивости $\chi^{-1}(T)$

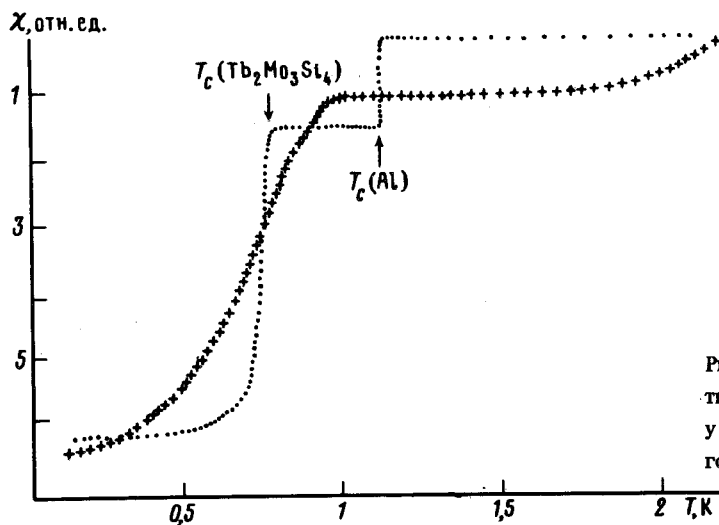


Рис. 2. Температурные зависимости магнитной восприимчивости $\chi(T)$ у $(Tb_2Mo_3Si_4 + Al)$ (•) и отожженного образца $Tb_2Mo_3Si_4$ (+)

На рис. 3 показано подавление сверхпроводимости у $Tb_2Mo_3Si_4$ в магнитном поле. Верхнее критическое поле у $Tb_2Mo_3Si_4$ составляет $H_{c2}(0) \approx 3$ кЭ.

Таким образом, можно заключить, что при $T = T_c \approx 0,5 - 1,2$ К соединение $Tb_2Mo_3Si_4$ переходит из антиферромагнитного состояния в сверхпроводящее. Особенностью $Tb_2Mo_3Si_4$ является то, что в нем, в отличие от всех ранее известных магнитных сверхпроводников, температура сверхпроводящего перехода во много раз меньше температуры Нееля. Для сверхпроводников с $T_c \ll T_N$, которые можно назвать "сверхпроводящими магнетиками", в ¹⁰ предсказан ряд необычных эффектов, в частности, возможна весьма сильная зависимость T_c от длины свободного пробега. Бесспорно, что дальнейшие исследования "сверхпроводящего магнетика" $Tb_2Mo_3Si_4$ представляются весьма интересными.

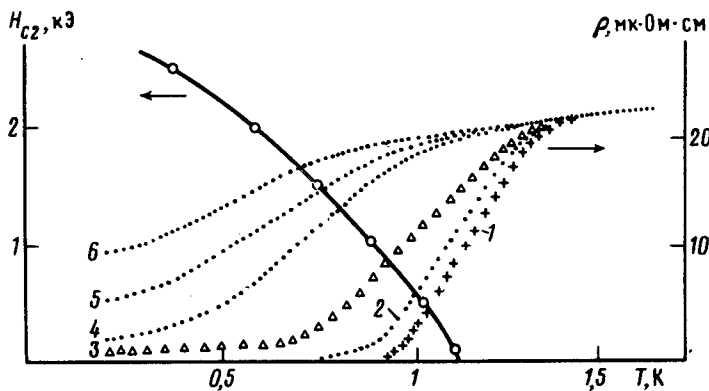


Рис. 3. Температурные зависимости удельного сопротивления $\rho(T)$ при сверхнизких температурах; (1 - $H = 0$ кЭ; 2 - 0,25 кЭ; 3 - 0,6 кЭ; 4 - 1,5 кЭ; 5 - 2 кЭ; 6 - 2,5 кЭ); кривая $H_{c2}(T_c)$ (○) соответствует серединам сверхпроводящих переходов

В заключение авторы выражают искреннюю признательность А.И.Буздину за обсуждение результатов, М.К.Залялютдинову, В.Ковачику и Н.Е.Случанко — за помощь в измерениях, Р.В.Сколоздре — за рентгенофазовый анализ образцов.

Литература

1. Brandt N.B., Moshchalkov V.V. Advances in Physics, 1984, 33, 373.
2. Machida K. Appl. Phys., 1984, 35, 193.
3. Буздин А.И., Булаевский Л.Н., Кулич Н.Л., Панюков С.В. УФН, 1984, 144, 597.
4. Lin C.L., et. al. Phys. Rev. Lett., 1985, 54, 2541.
5. Ku H.C. et. al. Phys. Lett., 1980, 76 A, 399.
6. Sarkissyan B.V. J Appl. Phys., 1982, 53, 8070.
7. Nishihara et al. J. Phys. Soc. Jap., 1983, 52, 2301.
8. Бодак О.И., Гореленко Ю.К., Яровец В.И., Сколоздр Р.В. Известия АН СССР, 1984, 5, 853.
9. Charnig I.M. Phys. St. Sol., 1984, 123, к183.
10. Буздин А.И., Булаевский Л.Н. УФН, 1986, №3.