

АНОМАЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ ТРОЙНЫХ СУЛЬФИДОВ МОЛИБДЕНА С ПРИМЕСЬЮ ЖЕЛЕЗА

Ю.Ф.Ельцев, В.М.Захосаренко, В.Р.Карасик,
В.И.Цебро

Показано, что введение примеси железа в тройные халькогениды молибдена типа $PbMo_6S_8$, наряду с обнаруженным ранее сильным подавлением сверхпроводимости, приводит к появлению минимумов значительной величины на температурной зависимости электросопротивления. Эффект коррелирует с величиной эффективного магнитного момента примеси и плотностью электронных состояний.

В работе [1] было показано, что сильное подавление сверхпроводимости примесью железа в тройных халькогенидах молибдена (ТХМ) формулы MMo_6S_8 ($M = Pb, Sn, Cu, Ag$) сопровождается большими значениями эффективных магнитных моментов $\mu_{эфф}$ на атом примеси, полученными из температурного хода магнитной восприимчивости в нормальном состоянии. Наблюдаемые значения $\mu_{эфф}$ тем больше, чем больше для данной системы коэффициент γ при электронном вкладе в теплоемкость, т.е. плотность электронных состояний $N(0)$ на уровне Ферми. Для исследованного ряда соединений $\mu_{эфф}$ изменяется от $2,5 \mu_B$ при растворении Fe в $AgMo_6S_8$ до $\sim 5 \mu_B$ в $PbMo_6S_8$. Последнее значение существенно превышает величину $\mu_{эфф}$ для металлического железа или, например, растворов $Mo - Fe$, уступая лишь в два раза значениям $\mu_{эфф}$ в случае растворов $Pd - Fe$.

Большие значения $\mu_{эфф}$ и их зависимость от $N(0)$ свидетельствуют о существенной роли взаимодействия электронов проводимости с электронами незаполненных $3d$ -оболочек железа, т.е. с магнитным момен-

том примеси. Представляло интерес исследовать влияние примеси Fe на температурный ход сопротивления $R(T)$, где это взаимодействие должно проявляться. С этой целью нами измерялись зависимости $R(T)$ образцов ТХМ указанных выше составов с концентрацией железа C от 0 до 1,3 ат. % ($0 \leq x \leq 0,2$ в формуле $\text{Fe}_x\text{MMo}_6\text{S}_8$).

Образцы $\text{Fe}_x\text{MMo}_6\text{S}_8$ приготавливались прямым синтезом из порошков исходных компонент с последующим гомогенизирующим отжигом. Отжигу предшествовала прессовка синтезированного материала под давлением 30 кбар в цилиндрические таблетки диаметром 5 мм и высотой 5 – 7 мм. Из таблеток вырезались образцы прямоугольного сечения размером $1 \times 1 \times 5 \text{ мм}^3$. Электросопротивление образцов измерялось стандартным четырехконтактным методом на постоянном токе в диапазоне температур от 2 до 300 К.

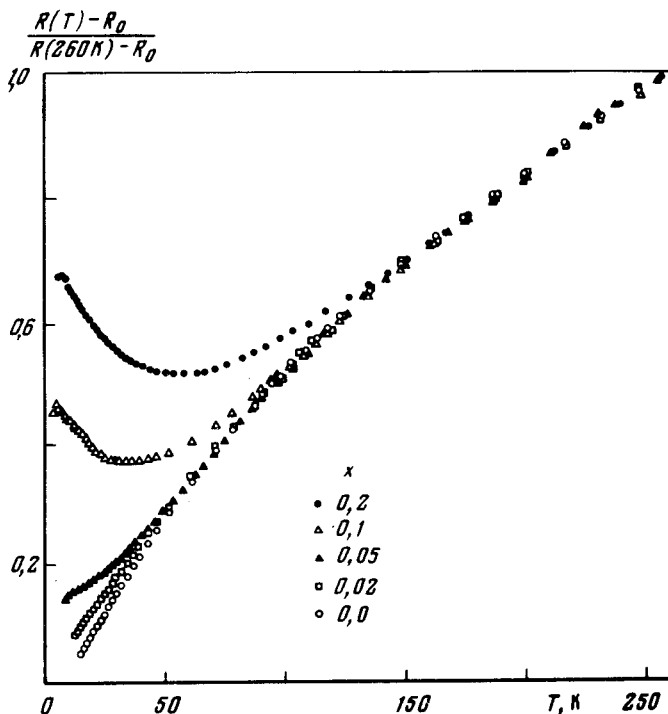


Рис.1. Нормированные температурные зависимости электросопротивления образцов $\text{Fe}_x\text{PbMo}_6\text{S}_8$ с различной концентрацией железа (○ — $x = 0$; ◻ — $x = 0,02$; ▲ — $x = 0,05$; △ — $x = 0,1$; ● — $x = 0,2$)

На рис.1 и рис.2 представлены температурные зависимости сопротивления образцов $\text{Fe}_x\text{PbMo}_6\text{S}_8$ и $\text{Fe}_x\text{SnMo}_6\text{S}_8$ для различных значений концентрации магнитной примеси. По вертикальной оси отложена температурозависимая часть сопротивления, приведенная к фоновому сопротивлению при высоких температурах (R_0 — остаточное сопротивление). Для чистых образцов сразу выше T_c наблюдается линейный рост сопротивления с температурой несмотря на то, что образцы имеют очень малое отношение сопротивлений $R(300 \text{ K})/R_0 \lesssim 3$. Данная особенность температурного хода сопротивления чистых образцов PbMo_6S_8 и

SnMo_6S_8 отмечалась в работах [2, 3] и, по-видимому, связана с наличием в фоновом спектре этих соединений низкочастотного максимума, который был обнаружен в экспериментах по неупругому рассеянию нейтронов [4, 5].

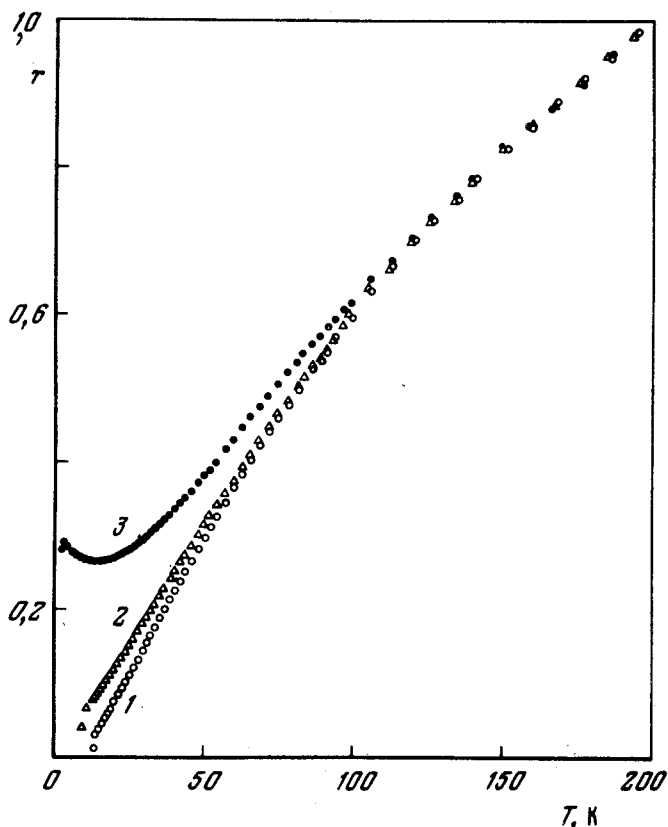


Рис.2. Нормированные температурные зависимости электросопротивления образцов $\text{Fe}_x\text{SnMo}_6\text{S}_8$ с различной концентрацией железа (о — $x = 0$; Δ — $x = 0,02$; \bullet — $x = 0,05$)

Как видно из приведенных на рис.1 и рис.2 данных, при введении железа появляется примесный вклад в сопротивление, величина которого растет с уменьшением температуры и ростом концентрации примеси, так что при $C \geq 0,3$ ат. % ($x \geq 0,05$) на зависимости $R(T)$ появляется отчетливый минимум. При дальнейшем увеличении концентрации C глубина минимума растет, а его положение смещается в сторону высоких температур. Магнитный вклад в сопротивление ρ_M в интервале температур от 15 до 50 К линейно зависит от $\ln T$, а приведенные зависимости $\rho_M(T)/C$ в пределах погрешности выделения ρ_M и определения концентрации укладываются на универсальную зависимость.

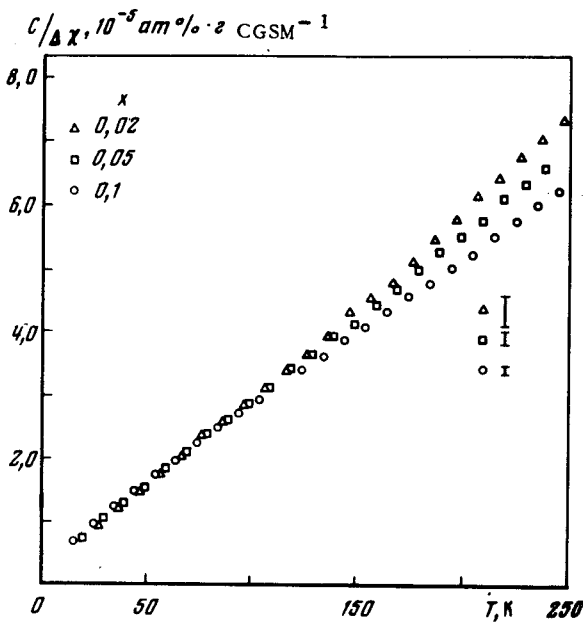


Рис.3. Приведенные температурные зависимости обратной магнитной восприимчивости образцов $\text{Fe}_x\text{PbMo}_6\text{S}_8$ с различной концентрацией железа ($\Delta - x = 0,02$; $\square - x = 0,05$; $\circ - x = 0,1$)

Подобными свойствами, как известно, обладают так называемые кондо-системы. Магнитная восприимчивость таких систем, см., например, [6], следует закону Кюри – Вейсса $\chi \sim \mu_{\text{эфф}}^2 / (T - \Theta)$, где Θ – отрицательная величина порядка температуры Кондо T_K (по данным [6] $\Theta \cong (2,5 \div 10) T_K$). На основании приведенных в [1] результатов измерения $\chi(T)$ железосодержащих образцов ТХМ можно показать, что обусловленная примесью добавка $\Delta \chi_M$ к магнитной восприимчивости чистых образцов ($\Delta \chi_M(T) = \chi(T) - \chi_0(T)$, где $\chi_0(T)$ – восприимчивость чистого образца) в интервале температур от 4,2 до 100 К строго следует единому для различных концентраций примеси закону Кюри – Вейсса. Иллюстрацией к сказанному служит рис.3, на котором приведены температурные зависимости $(\Delta \chi_M(T)/C)^{-1}$ для трех концентраций Fe в системе PbMo_6S_8 . Видно, что для всех C значения $(\Delta \chi_M/C)^{-1}$ при $T \leq 100$ К ложатся на одну прямую, которая пересекает ось температур в точке $\Theta = -10 \pm 3$ К и имеет наклон, соответствующий значениям $\mu_{\text{эфф}} = 4,6 \pm 0,2 \mu_B$. Отсюда следует, что значения Θ и $\mu_{\text{эфф}}$ в исследованной области концентраций не зависят от C . Расхождение при высоких температурах, по-видимому, связано с тем, что при введении железа растет независимый от температуры вклад в χ , (например, из-за увеличения $N(0)$, см. [7]), который становится заметным при высоких температурах.

В отличие от PbMo_6S_8 и SnMo_6S_8 примесь Fe в исследованной области концентраций не оказывает заметного влияния на ход $R(T)$ образцов $\text{Cu}_2\text{Mo}_6\text{S}_8$ и AgMo_6S_8 , т.е. сильное влияние примеси Fe на

ход $R(T)$ наблюдается только в тех системах, в которых $N(0)$ особенно велика.

Таким образом, в данной работе показано, что примесь Fe в ТХМ с большими значениями $N(0)$ приводит к аномалиям температурного хода электросопротивления подобно тому, как это имеет место в кондосистемах. Однако, рассмотрение невзаимодействующих спинов примеси в нашем случае вряд ли правомерно, так как, во-первых, концентрация Fe, при которой начинают проявляться отчетливые минимумы $R(T)$ достаточно велика (возможно, из-за сильного фононного вклада в сопротивление при низких температурах); во-вторых, примесь Fe растворена в матрице с очень высокой плотностью состояний $N(0)$, что, казалось бы, должно приводить к проявлению косвенного обмена между спинами примеси. Следует отметить, что на образцах $RbMo_6S_8$ при $x > 0,1$ рост сопротивления с уменьшением температуры при $T \lesssim 5 + 6$ К сменяется падением R , т.е. наблюдается низкотемпературный локальный максимум $R(T)$, который может быть связан с образованием магнитного порядка типа спинового стекла.

Авторы благодарны Н.Е.Алексеевскому и А.И. Русинову за интерес к работе и полезные критические замечания

Физический институт им. П.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
25 апреля 1980 г.

Литература

- [1] Н.Е. Алексеевский, Г.Вольф, Н. М. Добровольский, Ю.Ф. Ельцев, В.М.Закосаренко, В.И.Цебро. Письма в ЖЭТФ, 29, 138, 1979.
- [2] N.E.Alekseevskii. Proc. of Int. Symposium "Physical Properties of Solids in High Magnetic Fields", May 19 - 20, 1978, Wroclaw (Poland), p. 37.
- [3] J.A.Woollam, S.A.Alterovitz. Solid State Comm., 27, 571, 1978.
- [4] S.D.Bader, G.S. Knapp, S.K.Sinha, P.Schweiss, B.Renker. Phys. Rev. Lett., 37, 344, 1976.
- [5] S.D.Bader, S.K.Sinha, R.N.Shelton. Proc. 2-nd Rochester Conf. on Superconductivity in d- and f- band Metals, ed. by D.H.Douglass. N.-Y., 1976, p.209.
- [6] M.D.Daybell in Magnetism, vol. 5, ed. G.Rado and H.Suhl, Academic Press, N.-Y., 1973, p.121.
- [7] N.E.Alekseevskii, G. Wolf, S.Krautz, V.I.Tsebro. J. Low Temp. Phys., 28, 381, 1977.