

## К ТЕОРИИ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ СПЛАВОВ С РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ПРИМЕСЯМИ

Б. П. Водопьянов, В. А. Жижарев

Показано, что в сплавах с редкоземельными примесями в синглетном основном состоянии в разрушении сверхпроводящих корреляций существенную роль играет рассеяние электронов на ядрах примесей. Объяснены результаты экспериментов [1, 2].

Влияние парамагнитных примесей на переход металлов в сверхпроводящее состояние обуславливается несохранением спина электрона при обменном рассеянии на локализованных магнитных моментах примесей, что приводит к конечному времени жизни куперовских пар [3]. Недавно [1, 2] при измерениях туннельной проводимости контактов  $Al - AlO_x - LaPr$  было обнаружено, что туннельная плотность состояний сплава  $LaPr$  не описывается теорией Абрикосова — Горькова (АГ) [3]. Этот факт связан с тем, что ионы  $Pr^{3+}$  в кристаллическом поле матрицы  $La$  имеют синглетное основное состояние. Поскольку при этом среднее значение спина иона  $S$  в основном состоянии равно нулю, приближение классического спина теории АГ [3] приводит к бесконечному времени спинового пробега электронов  $\tau_s$ . Механизм, который дает конечное  $\tau_s$  в случае немагнитного основного состояния примеси, предложен в работе [4]. Он состоит в неупругом рассеянии электронов на вышележащих уровнях примесного иона в кристаллическом поле. Однако, рассеяние электронов на возбужденных состояниях ионов приводит к характерной зависимости туннельной плотности состояний от частоты, которая не подтверждается результатами детального исследования контактов  $Al - AlO_x - LaPr$  [2].

В настоящем сообщении предлагается механизм разрушения сверхпроводящих корреляций, связанный с рассеянием электронов проводимости на ядерных спинах примесей и на его основе объясняются данные экспериментов [1, 2].

Наличие сверхтонкого взаимодействия  $\mathcal{H}_{SI}$  между электронным  $S$  и ядерным  $I$  моментами примесного иона (в простейшем, изотропном случае  $\mathcal{H}_{SI} = ASI$ ) и  $s-f$  обмена  $\mathcal{H}_{sf} = KS\sigma$  приводит к эффективному взаимодействию электронов проводимости с ядрами ионов:

$$\mathcal{H}_{\sigma I} = K \sum_i L_{\mu} \sigma_z I_z^i + K \sum_i L_{\perp} (\sigma_{-} I_{+}^i + \sigma_{+} I_{-}^i)$$

$$L_{\parallel} = 2A \sum_k \frac{|\langle 0 | S_z | k \rangle|^2}{E_0 - E_k}, \quad L_{\perp} = A \sum_k \frac{|\langle 0 | S_- | k \rangle|^2 + |\langle 0 | S_+ | k \rangle|^2}{E_0 - E_k}. \quad (1)$$

Рассеяние электронов, определяемое взаимодействием (1) является упругим и учет времени спинового пробега электронов  $\tau_s$  проводится в полной аналогии с методикой АГ для магнитных примесей. При интервале  $\delta$  между основным (немагнитным) и первым возбужденным уровнями иона время  $\tau_s$  определится выражением:

$$\frac{1}{\tau_s} = K^2 n \frac{m p_0}{2 \pi^2} I (I + 1) \left( \frac{A}{\delta} \right)^2, \quad (2)$$

где  $n$  — концентрация примесей.

Экспериментальная зависимость туннельной проводимости  $\sigma$  от напряжения  $V$  на контакте  $Al - AlO_x - LaPr$  (10% Pr), приведенная в работах [1, 2], соответствует, по нашим расчетам,  $(\tau_s \Delta)^{-1} = 8 \cdot 10^{-5}$ . Принимая  $K \approx 0,1$  эВ,  $I = 5/2$ , получим  $A/\delta = 7,5 \cdot 10^{-3}$ . Для сплавов  $LaPr$  константа сверхтонкого взаимодействия  $A \approx 0,1$  см $^{-1}$  [5], это даст для расщепления уровней  $\delta$  величину порядка 15К. Эта величина хорошо согласуется с экспериментальными данными, полученными из измерения восприимчивости [6].

Неупругое рассеяние электронов на виртуально возбужденных состояниях ионов [4] также имеет место. Однако, оно эффективно лишь в окрестности критической температуры  $T_c$  (в условиях работы [2]  $T_c = 3$ К), где играет главную роль в наблюдаемом понижении  $T_c$  с увеличением количества примесей. Соответствующее ему время  $\tau_s$  экспоненциально зависит от параметра  $\delta/T$  и при понижении температуры (в [2] эксперимент проводился при  $T = 1,2$ К) оно значительно превосходит время спиновой релаксации, определяемое выражением (2).

Таким образом, результаты измерений  $\sigma(V)$  [1, 2] достаточно хорошо описываются рассмотренным в настоящей работе "ядерным" механизмом разрушения сверхпроводящих корреляций. По-видимому, данные работ [1, 2] являются первым экспериментальным обнаружением существенного влияния ядерной спин-системы на сверхпроводящие характеристики редкоземельных сплавов.

Казанский физико-технический институт  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
8 августа 1980 г.

### Литература

- [1] H.Nicel, V.Elschner, P.Fulde. Sol. State Comm., 27, 205, 1978.
- [2] H.Nicel. Z.Physik, B38, 185, 1980.
- [3] А.А.Абрикосов, Л.П.Горьков. ЖЭТФ, 39, 1781, 1960.
- [4] P.Fulde, I.Peschel. Adv. Phys., 21, 1972.
- [5] С.А.Альтшуллер, Б.М.Козырев. Электронный парамагнитный резонанс. Приложение 1, § 11, М., изд. Наука, 1972.
- [6] H.Nagasawa, T.Sugawara. J. Phys. Soc. Japan., 23, 701, 1967.