

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ $\rho_f(H)$ ВБЛИЗИ $H_{c2}(T)$ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ ВТОРОГО РОДА

И. Н. Гончаров, И. С. Хухарева

Согласно теории [1, 2] в случае сверхпроводников второго рода с длиной свободного пробега электронов $\ell \ll \xi_0$ поведение дифференциального сопротивления $\rho_f(H, T)$ вблизи $H_{c2}(T)$ полностью определяется температурной зависимостью параметра

$$\kappa_2(T) \sim [d(M_s - M_n)/dH]_{H_{c2}(T)}^{-1/2}.$$

В случае экстремально высоких $H_{c2}(0)$, когда сильно сказывается спиновый парамагнетизм, теория [2] дает:

$$\frac{\rho_f}{\rho_n} = \left\{ 1 - \frac{4,95 \kappa_2^2(1)}{[2\kappa_2^2(t) - 1]} \left[1 - \frac{H}{H_{c2}(t)} \right] A(t) \right\} \quad (1)$$

откуда получается для производной

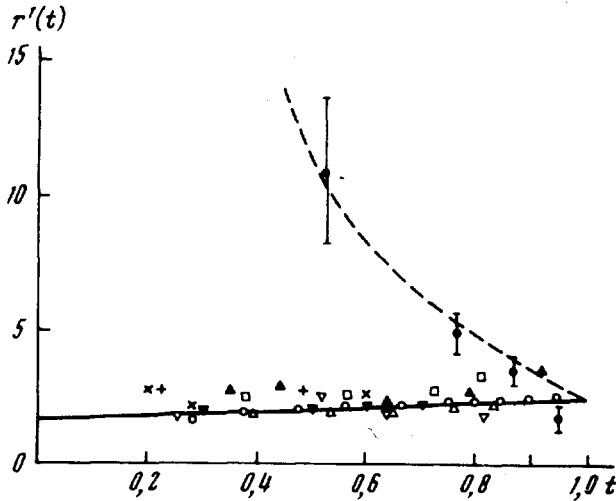
$$r'(t) \equiv \left[\frac{H}{\rho_n} \frac{\partial \rho_f}{\partial H} \right]_{H_{c2}(t)} = \frac{4,95 \kappa_2^2(1)}{2\kappa_2^2(t) - 1} A(t). \quad (2)$$

Здесь $A(t) = M_d / (M_s - M_n) \leq 1$; M_d - диамагнитный вклад в намагничение смешанного состояния.

До настоящего времени количественное сравнение экспериментальных значений $r'(t)$ с теорией проводилось только для сверхпроводников второго рода с относительно невысоким верхним критическим полем [6 - 8], для которых характерно незначительное монотонное увеличение $\kappa_2(t)$ при понижении температуры и соответственно слабое уменьшение $r'(t)$ от 2,5 при $T \sim T_c$ до 1,7 при $T \rightarrow 0$ (см. рисунок).

В случае экстремальных сверхпроводников второго рода при измерении намагниченности было обнаружено [3, 4] сильное уменьшение $\kappa_2(t)$ при понижении температуры, что находится в согласии с предсказаниями теории [5, 14], включающих рассмотрение спинового парамагнетизма и спин-орбитального рассеяния электронов. Такое поведение $\kappa_2(t)$ должно приводить к соответствующему росту $r'(t)$. Экспериментальной проверке этого факта посвящена настоящая работа, в которой исследовалась зависимость дифференциального сопротивления ρ_f от магнитного поля при разных температурах на ленточных образцах из сплава Nb - 80% Zr, подробно описанных в работе [12]. Техника измерения ρ_f описана в [13]. Для этих образцов $\kappa_2(1) \sim 60$, $H_{c2}^0(0) \sim 100$ кэ и параметр определяющий влияние спинового парамагнетизма, $a \approx 1,9$. На рисунке приведены результаты измерений $r'(t)$, а также предельная теоретическая кривая, посчитанная по формуле (2) на основании теоретической зависимости $\kappa_2(t)/\kappa_2(1)$ для $a^2 = 3,3$ [3, 14] и $\lambda_{s0} = 0$ (λ_{s0} - параметр, характеризующий спин-орбитальное рассеяние) в предположении $A(t) = 1$. Видно, что

экспериментальные точки качественно не противоречат предсказанному росту $r'(t)$ с понижением температуры. Подобную тенденцию в поведении $r'(t)$ можно заметить также в случае сплавов $Ti_{0,5}V_{0,5}$ и $Ti_{0,75}V_{0,25}$, хотя из опубликованных неполных кривых $\rho_f(H)$ [9] удалось оценить только нижний предел этой величины. Надо отметить, что предельная теоретическая кривая является завышенной по двум причинам. Во-первых, в действительности $A(t)$, хотя и слабо по сравнению с $\kappa_2(t)$, но уменьшается с понижением температуры [2]. Во-вторых, в случае наших образцов нельзя пренебрегать влиянием спин-орбитального рассеяния, учет которого приведет к менее значительному уменьшению $\kappa_2(t)$ [3, 5]. Оценка минимального значения параметра λ_{s_0} дала величину порядка $0,3^{1)}$, тогда как по теории [5] признаком сильного спин-орбитального рассеяния является условие $\lambda_{s_0} \gg 0,2^{2)}$.



Зависимость $r' = [(H/\rho_n)(\partial\rho_f/\partial H)]_{H_c2}(T)$ от температуры:
 • $Nb - 80\%Zr$, $\circ Nb_{80}Mo_{20}$ реферат [7], $\Delta V - B$ } рефе-
 $\nabla V - A$ } рат [8], $\square Pb - 24\%In$ реферат [10], $+ Nb_{90}Fa_{10}$ } рефе-
 $\times Pb_{90}In_{10}$ } рат [11], $\blacktriangle Nb_{0,1}Ta_{0,9}$ } реферат [9]. Сплошная и пунктир-
 $\blacktriangledown Nb_{0,5}Ta_{0,5}$ } ная кривые – теоретические, рассчитанные соответственно
 для обычных сверхпроводников второго рода [1] и "экстремальных" [2].

1) Эта оценка получена из сравнения экспериментальной величины $h_{min}^*(\alpha, \lambda_{s_0})_{t=0} = 0,693[H_{c2}^7(0)/H_{c2}^{глаг}(0)] = 0,425$ с теоретической зависимостью $h^*(\alpha, \lambda_{s_0})_{t=0}$ [15, 3]. Приведенное в [12] значение $\lambda_{s_0} = 8,45$ следует считать максимально возможным, так как оно рассчитано для $\ell_{s_0} = 2\ell$.

2) Заметим кстати, что приведенная в [5] формула (57) для вычисления $\kappa_2(\alpha, \lambda_{s_0}, t)$ очевидно, содержит ошибку, так как подстановка в нее соответствующих параметров приводит к абсурдному результату и не позволяет получить графика, приведенного там же.

Очевидно для проведения точных количественных сравнений с теорией необходимо экспериментально измерять не только $\rho_f(H)$, но и $(dM/dH)_{H_{c2}(t)}$ для определения $\kappa_2(t)$, а также γ и $\partial H_{c2}^0(t)/\partial t$, входящие в определение параметров теории.

Объединенный институт
ядерных исследований

Поступила в редакцию
12 декабря 1972 г.

Литература

- [1] С. Caroli, К. Maki. Phys. Rev., 164, 591, 1967.
- [2] К. Maki. Phys. Rev., 169, 381, 1968.
- [3] R. R. Hake. Phys. Rev., 158, 356, 1967; Appl. Phys. Lett., 10, 189, 1967.
- [4] J. A. Cape. Phys. Rev., 148, 257, 1966.
- [5] К. Maki. Phys. Rev., 148, 362, 1966.
- [6] J. A. Cape, I. F. Silvera. Phys. Rev. Lett., 20, 326, 1968.
- [7] К. Noto, К. Mori, Y. Muto. Доклад на советско-японском совещании по физике низких температур, Новосибирск, 1969; Physica, 55, 362, 1971.
- [8] N. Usui, T. Ogasawara, Kō Yasukōchi, S. Tomoda, J. Phys. Soc. Japan., 27, 574, 1969.
- [9] A. R. Strnad, C. F. Hempstead, Y. B. Kim. Phys. Rev. Lett., 13, 794, 1964. Y. B. Kim, C. F. Hempstead, A. R. Strnad. Phys. Rev., 139, A1163, 1965.
- [10] Н. Я. Фогель. Доклад на XVII Всесоюзном совещании по физике низких температур, Донецк, 1972; ЖЭТФ, 63, 1371, 1972.
- [11] J. Le G. Gilchrist, P. Moncean. Proc. of the Conf. on the A. C. Properties of Superconductors and their Applications, Coventry, England, 1968.
- [12] И. Н. Гончаров, И. С. Хухарева, ЖЭТФ, 62, 627, 1972.
- [13] И. Н. Гончаров, Г. Л. Дорофеев, Л. В. Петрова, И. С. Хухарева. Препринт ОИЯИ Р8-6260, 1972.
- [14] Д. Сан-Жам, Г. Сарма, Е. Томас. Сверхпроводимость второго рода, русский перевод, изд. Мир, 1970, стр. 220.
- [15] N. R. Werthamer, E. Helfand, P. C. Hohenberg. Phys. Rev., 147, 295, 1966.