

## ТЕМПЕРАТУРНЫЙ МИНИМУМ СОПРОТИВЛЕНИЯ В БЕРИЛЛИИ

В.С.Егоров, С.В.Варюхин

Наблюдается минимум в зависимости сопротивления от температуры  $\rho(T)$  в бериллии. Величина и местоположение минимума согласуются с оценками, полученными из теории Козлова и Флерова [1]. Предполагается, что возможный вклад, обусловленный аномалией Кондо [2], должен быть существенно меньше наблюдаемого эффекта.

Из квантовой теории процессов переноса [1] следует, что в металлах при низких температурах, когда характерная длина волны тепловых фононов становится больше длины пробега электронов, обусловленной рассеянием на немагнитных примесях, фононный вклад в сопротивление  $\rho(T)$  отрицателен и описывается формулой

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} \cong \frac{\rho(T) - \rho(0)}{\rho(0)} \cong -13,5\lambda \frac{\Theta_D}{E_{\phi}} \frac{\hbar^2}{(\tau E_{\phi})^2} \ln \frac{T_1}{T} \quad (1)$$

в области температур  $T$  таких, что

$$T_2 \ll T \ll T_1, \quad (2)$$

здесь  $\lambda$  – константа электронфононного взаимодействия,  $\Theta_D$  – температура Дебая,  $E_{\phi}$  – энергия Ферми,  $\tau$  – время релаксации электронов, обусловленное рассеянием на немагнитных примесях или дефектах,  $\hbar$  – постоянная Планка, первая квантовая температура  $T_1 = \Theta_D / \tau E_{\phi} \sim \sim c \Theta_D$ ,  $c$  – концентрация примесей или дефектов, вторая квантовая температура  $T_2 = T_1 \Theta_D / E_{\phi}$ ; при  $T \lesssim T_2$   $\Delta\rho(T) \rightarrow 0$  по квадратичному закону. Это должно приводить к минимуму сопротивления в зависимости

$\rho(T)$ , расположенному между температурами  $T_1$  и  $T_2$ , глубина которого определяется константой перед логарифмом в (1).

Для обычных металлов, у которых как правило  $\Theta_D \sim 300 \div 400 \text{ К}$  и  $E_{\phi} \sim 4 \cdot 10^4 \text{ К}$ , наблюдение этого эффекта представляет довольно сложную задачу. Исключением из этого правила является бериллий, для которого  $\Theta_D = 1416 \text{ К}$  [3] и  $E_{\phi} = 0,7 \text{ эв}$ . Для бериллия очень узок диапазон  $T_1/T_2 = E_{\phi}/\Theta_D = 5,5$ , и соотношение (2) не может осуществляться строго, поэтому поведение  $\rho(T)$  должно описываться более сложным выражением. Однако для сравнения с экспериментом можно пользоваться приближительной оценкой

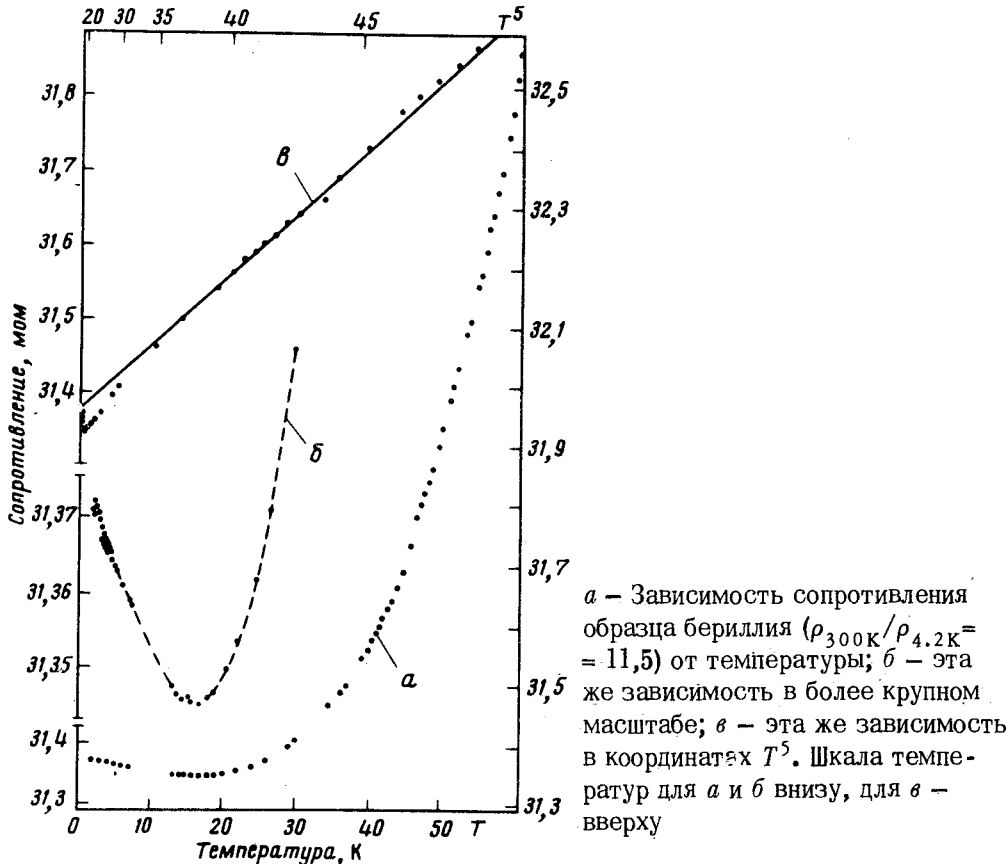
$$\Delta\rho_{\text{мин}}/\rho_0 \approx -10c^2\Theta_D/E_{\phi}.$$

Ясно, что наибольшую величину эффекта следует ожидать в бериллии на образце с большим содержанием примесей или дефектов, однако их должно быть все-таки не слишком много, чтобы не изменить величины  $\Theta_D$  и  $E_{\phi}$ .

Измерения были проведены на образце бериллия с отношением сопротивлений  $\rho_{300\text{К}}/\rho_{4,2\text{К}} = 11,5$ . Из сопоставления с образцами, использованными Вотсом [4], которые имели  $c = 0,4\%$  и отношение сопротивлений  $\rho_{300\text{К}}/\rho_{4,2\text{К}} = 30 \div 40$ , можно полагать, что для использованного нами образца  $c \approx 1,5\%$ . Это дает для оценок:  $T_1 = 21 \text{ К}$ ,  $T_2 = 4 \text{ К}$  и  $\Delta\rho_{\text{мин}}/\rho_0 = -4 \cdot 10^{-4}$ . Образец был вырезан электроискровым способом<sup>1)</sup> из монокристалла (на котором наблюдались квантовые осцилляции сопротивления, эффект Шубникова – де-Гааза, и термоэдс, при этом значения магнитной частоты совпадали с известными для бериллия величинами), в базисной плоскости (для большей прочности образца, так как бериллий хрупок, и скалывается вдоль гексагональной плоскости), в форме "серпантина" с поперечными размерами  $0,3 \times 0,1 \text{ мм}^2$ . Вырезанный образец был приклеен БФ-2 к массивному образцу из этого же монокристалла с размерами  $2 \times 8 \times 24 \text{ мм}^3$ , к которому сплавом Вуда был припаян корпус германиевого термометра сопротивления ТСГ-2, градуированного в диапазоне  $2 - 30 \text{ К}$ , а также был приклеен спай термопары (Au + 0,07%Fe – Cromel P, model S-7050, Thor Cryogenics LTD). Образец был помещен в медную капсулу, температура которой могла изменяться в широких пределах при помощи нагревателя. Точность измерения температуры в области  $T < 30 \text{ К}$  составляла  $0,05 \text{ К}$ , при  $T > 30 - 0,5 \text{ К}$ . Сопротивление образца измерялось четырехконтактным способом при помощи двухрядного потенциометра Р-348 с точностью  $2 \cdot 10^{-5}$ .

На рисунке приведены результаты измерений. Небольшой сдвиг точек при  $T \lesssim 4 \text{ К}$  обусловлен, по-видимому, небольшим перегревом образца измерительным током ( $I = 190 \text{ ма}$ ): верхние точки соответствуют измерениям в жидком гелии, нижние – в газообразном. На верхней кривой ( $\sigma$ ) эти же результаты приведены в координатах  $\rho = \rho(T^5)$  для  $T < 50 \text{ К}$ .

<sup>1)</sup> Авторы благодарны Ю.П.Гайдукову за любезно представленную возможность сделать это в его лаборатории.



$a$  – Зависимость сопротивления образца бериллия ( $\rho_{300\text{K}}/\rho_{4.2\text{K}} = 11,5$ ) от температуры;  $b$  – эта же зависимость в более крупном масштабе;  $c$  – эта же зависимость в координатах  $T^5$ . Шкала температур для  $a$  и  $b$  внизу, для  $c$  – вверху

Можно сказать, что поведение наблюдаемой зависимости  $\rho(T)$  качественно и даже количественно по порядку величины согласуется с результатами теории [1]. Вообще говоря, нельзя априори исключить здесь возможное влияние эффекта Кондо, тем не менее по ряду причин можно считать, что оно в этом случае не проявляется. Во-первых, содержание магнитных примесей в этом образце  $C_M \ll C$  и составляет около  $10^{-2}\%$ . Во-вторых, слева от минимума поведение очень трудно описать обычной в эффекте Кондо логарифмической зависимостью, с другой стороны, справа от минимума отрицательная добавка в сопротивление относительно закона Блоха  $\Delta\rho \sim T^5$  в очень узком диапазоне температур обращается в нуль, что не соответствует эффекту Кондо, но естественно следует из теории [1] и, хотя и затруднительно этот участок за недостатком точности сравнивать с логарифмом (1), объясняется узостью интервала между первой и второй квантовыми температурами в бериллии.

Авторы благодарны Н.А.Черноплекову за внимание к работе и А.Н.Козлову и В.Н.Флерову за обсуждение результатов.

Поступила в редакцию  
 7 декабря 1976 г.

### Литература

[1] А.Н.Козлов, В.Н.Флеров. Тезисы XIX Совещания по физике низких температур. Минск, 1976 г. стр. 200.

- [2] J.Kondo. *Sol. St. Phys.*, 23, 184, 1969.
- [3] Guenter Ahlers. *Phys. Rev.*, 145, 419, 1966.
- [4] B.R.Watts. *Proc. Roy. Soc.*, A282, 521, 1964.
-