

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ
СПЛАВОВ Nb_3Al И Nb_3Ga

Н. Д. Кузьмичев, И. С. Левченко, Г. П. Мотулевич

УДК 537.312.62

Проведены измерения температурной зависимости электросопротивления сплавов Nb_3Al и Nb_3Ga в интервалах, соответственно, 18 К - 523 К и 20 К - 293 К. Полученные результаты обрабатывались методом наименьших квадратов по двум математическим моделям: $\rho(T) = \rho_0 + \rho_1 T + \rho_2 \exp(-T_{01}/T)$ и $\rho(T) = \rho_1 T + \rho_2 \exp(-T_{01}/T) + \rho_3 \exp(-T_{02}/T)$. Определены параметры моделей и среднеквадратичные отклонения.

I. Сплавы А-15, помимо рекордных сверхпроводящих характеристик, обладают также рядом аномалий в свойствах нормального состояния. Одной из особенностей этих сплавов является необычная температурная зависимость электросопротивления. В работе /1/ впервые для Nb_3Sn было установлено, что в зависимости $R(T)$ имеется член $\propto \exp(-T_0/T)$. Здесь $R(T)$ - электросопротивление при температуре образца T , T_0 - некая характерная температура. Необычная зависимость $R(T)$ для ванадиевых соединений с решеткой А-15 обнаружена авторами работы /2/. Позже член $\propto \exp(-T_0/T)$ наблюдался в сплавах Nb_3Al и Nb_3Ga /3,4/. Однако результаты работ /3,4/ можно считать лишь ориентировочными, поскольку при исследовании Nb_3Al использовался образец не стехиометрического состава, имеющий критическую температуру перехода в сверхпроводящее состояние $T_c \approx 13$ К. При исследовании Nb_3Ga использовался образец, напыленный на подложку из ниобиевой фольги, что затрудняет выделение истинного электросопротивления пленки. В настоящей работе были выполнены измерения $R(T)$ образцов стехиометрического состава, напыленных на рубиновые подложки.

2. Образцы пленок Nb_3Al и Nb_3Ga получались совместным испарением компонент в вакууме и осаждением на полированные подложки из рубина по методу, описанному в /4/. Характеристики образцов приводятся в таблице I.

Таблица I

Образец	T_c, K	$\Delta T_c, K$	$R(273 K)/R(20 K)$
Nb_3Al	17,2	0,2	3,9
Nb_3Ga	16,5	3,5	2,2

Здесь T_c - температура перехода в сверхпроводящее состояние, соответствующая середине скачка сопротивления, ΔT_c - ширина перехода.

3. Измерение электросопротивления производилось в температурных интервалах 18 K - 523 K для Nb_3Al и 20 K - 293 K для Nb_3Ga . Весь рабочий интервал для Nb_3Al делился на 2 подинтервала: 18 K - 273 K и 273 K - 523 K. В каждом подинтервале измерения проводились на специально изготовленных установках. Низкотемпературные измерения (18 K - 293 K) проводились в гелиевой атмосфере. Принимались специальные меры к устранению градиента температуры между термометром и образцом. В этом интервале температура измерялась платиновым термометром. Точность измерения температуры $\Delta T = \pm 0,01$ K. Высокотемпературные измерения (273 K - 523 K) проводились в масляной ванне. Использовалось безкислотное масло, позволяющее проводить многократные измерения $R(T)$ одного и того же образца. Температура измерялась термопарой медь-константан. Точность измерения температуры $\Delta T = \pm 0,1$ K. Измерение сопротивления выполнялось четырехконтактным методом. Для обеспечения стабильности контактов и устранения шумов, связанных с ними, напылялись алюминиевые контакты, к каждому из которых прижимались игольчатые буферные винты. Точность измерения сопротивления $\Delta R/R = 10^{-3}(0,1\%)$.

4. Полученные результаты приведены на рис. 1-2. Из-за малого масштаба по оси абсцисс для сплава Nb_3Al на рис. 1 приведены лишь 20-25% точек, равномерно распределенных по всему интервалу. При обработке экспериментальных данных использовались все точки. Обработка проводилась согласно двум математическим моделям:

$$\text{Модель I: } \rho(T) = \rho_0 + \rho_1 T + \rho_2 \exp(-T_{01}/T)$$

$$\text{Модель 2: } \rho(T) = \rho_0 + \rho_1 T + \rho_2 \exp(-T_{01}/T) + \rho_3 \exp(-T_{02}/T)$$

Здесь $\rho(T) = R(T)/R(273 \text{ K})$ для Nb_3Al и $\rho(T) = R(T)/R(293 \text{ K})$ для Nb_3Ga . Подбор параметров осуществлялся методом наименьших квадратов. Результаты обработки приводятся в таблице 2.

Таблица 2

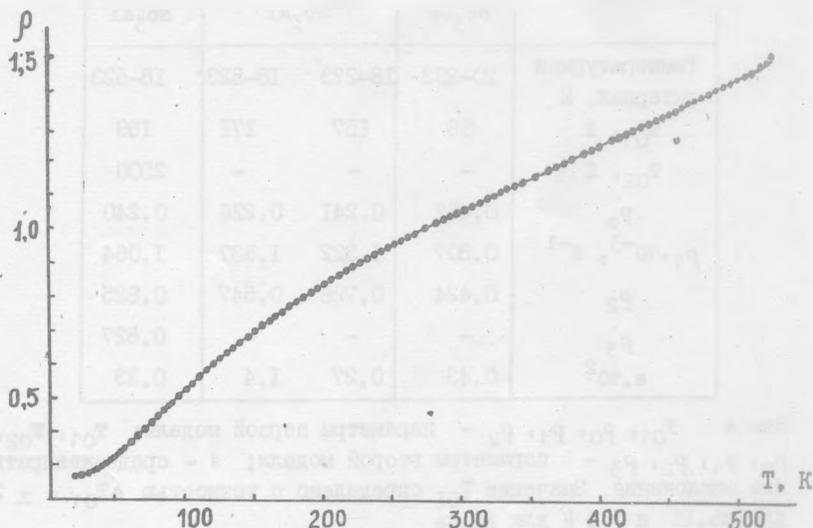
Параметры	Модель I			Модель 2
	Nb_3Ga	Nb_3Al		Nb_3Al
Температурный интервал, К	20-293	18-273	18-523	18-523
T_{01} , К	89	157	171	159
T_{02} , К	-	-	-	2500
ρ_0	0,462	0,241	0,226	0,240
$\rho_1 \cdot 10^{-3}$, K^{-1}	0,807	1,322	1,937	1,064
ρ_2	0,424	0,726	0,547	0,825
ρ_3	-	-	-	0,827
$s \cdot 10^2$	0,43	0,27	1,4	0,33

Здесь T_{01} , ρ_0 , ρ_1 , ρ_2 - параметры первой модели; T_{01} , T_{02} , ρ_0 , ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 - параметры второй модели; s - среднеквадратичное отклонение. Значение T_{01} определено с точностью $\Delta T_{01} = \pm 2 \text{ K}$ для Nb_3Al и $\pm 4 \text{ K}$ для Nb_3Ga .

Первая модель широко используется в литературе [1,3,4,5,7]. Нами она применялась к разным температурным интервалам.

Из таблицы 2 видно, что в низкотемпературном интервале $R(T)$ сплава Nb_3Al хорошо описывается моделью I (среднеквадратичное отклонение $s = 0,27 \cdot 10^{-2}$), а в полном интервале $s = 1,4 \cdot 10^{-2}$, т.е. значение s увеличилось в 5 раз, причем увеличение произошло в основном за счет значений $\rho(T)$ при $T > 400 \text{ K}$. Это показывает, что модель I хорошо описывает значения лишь в низкотемпературной области. Значения параметра T_0 для низкотемпературного и полного интервалов равны соответственно 157 К и 171 К. Для сплава Nb_3Ga измерения проводились в интервале 20 К - 293 К. Обработка данных велась лишь для этого интервала. Среднеквадратичное откло-

нение $\nu = 0,43 \cdot 10^{-2}$, что показывает хорошее согласие с моделью I в указанном интервале. Теоретическая зависимость $R(T)$ приводится на рис. 2 (сплошная кривая). Ориентировочные данные для T_{01} Nb_3Al и Nb_3Ga , полученные в работах /3,4/, составляли, соответственно, 140 К и 135 К. Эти значения имеют тот же порядок, что и значения, полученные в настоящей работе, но расхождения больше ошибок определения этих параметров. Причина расхождения указывалась во введении.

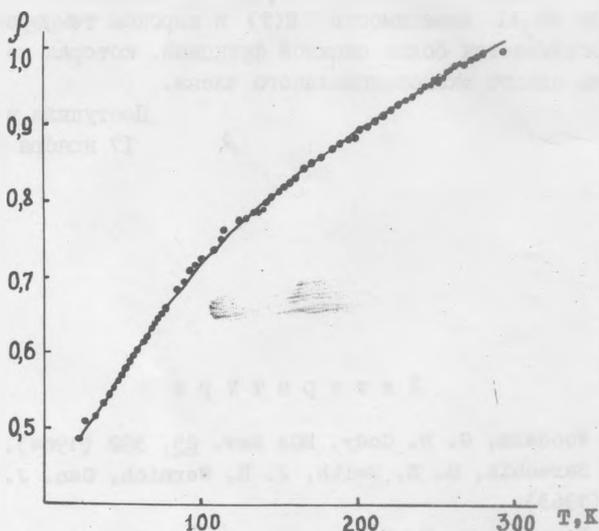


Р и с. 1. Зависимость $\rho = R(T)/R(273 \text{ К})$ для Nb_3Al . • - экспериментальные точки; сплошная кривая - результаты модели 2

В работах /8,9/ экспоненциальный член связывался с наличием низкочастотных мод в фононном спектре. Для Nb_3Sn положение низкочастотной моды /9/ хорошо согласуется с T_0 /1,6/. В сплаве Nb_3Al нейтронные измерения /10/ не показывают наличие низкочастотных мод. Первый максимум находится при $T = 215 \text{ К}$.

Данными о фононном спектре Nb_3Ga мы не располагаем.

Если связывать T_{01} с максимумами плотности фононных состояний,



Р и с. 2. Зависимость $\rho = R(T)/R(293 \text{ К})$ для Nb_3Ga . • - экспериментальные точки; сплошная кривая - результаты модели I

то можно было бы ожидать улучшения совпадения теории с экспериментом при использовании модели с двумя экспонентами, где T_{01} и T_{02} близки к максимумам плотности состояний. Для проверки этого предположения рассматривалась модель 2. Результаты обработки экспериментальных данных по модели 2 для сплава Nb_3Al приводятся в таблице 2 и на рис. 1 (сплошная кривая). В полном интервале среднеквадратичное отклонение $\varepsilon = 0,33 \cdot 10^{-2}$, что указывает на хорошее совпадение теоретической кривой с экспериментальными значениями. Увеличение ε для полного интервала по сравнению с ε для низкотемпературного интервала (18 К - 273 К) вызвано с уменьшением точности измерения температуры в интервале (273 К - 523 К). Значение T_{01} почти не изменилось. Однако значение $T_{02} = 2500 \text{ К}$, что уже нельзя отнести к области фононных частот.

В данной работе уточнены значения T_{01} для проверки Nb_3Al и Nb_3Ga . Для Nb_3Al зависимость $R(T)$ в широком температурном интервале оказывается более сложной функцией, которая не сводится к введению одного экспоненциального члена.

Поступила в редакцию
17 ноября 1978 г.

Л и т е р а т у р а

1. D. W. Woodard, G. D. Cody, RCA Rev. 25, 392 (1964).
2. M. P. Sarachik, G. E. Smith, J. H. Wernich, Can. J. Phys. 41, 1542 (1963).
3. А. И. Головашкин, И. С. Левченко, Г. П. Мотулевич, ФТТ 16, 2100 (1974).
4. А. И. Головашкин, И. С. Левченко, Г. П. Мотулевич, Труды ФИАН 82, 72 (1975).
5. Л. Тестарди, М. Вегер, И. Гольдберг, "Сверхпроводящие соединения со структурой β -вольфрама", "Мир", М., 1977 г.
6. А. И. Головашкин, И. С. Левченко, Г. П. Мотулевич, ФММ 33, 1213 (1972).
7. А. И. Головашкин, Препринт ФИАН № 148, 1977 г.
8. С. И. Веденеев, А. И. Головашкин, Г. П. Мотулевич, Письма в ЖЭТФ 16, 216 (1972).
9. Karlsruhe group, 1974, 1975, Progress Report KFK 2054, KFK 2183, Gesellschaft für Kernforschung, М.В.М., Karlsruhe, Germany.
10. E. Schneider, P. Schweiss, W. Reichardt, Proc. of the Conf. on Neutron Scattering, Gatlinburg, Tennessee, USA, June, 6-10, 1976, v. 1, p. 223.