



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

1135 / 2-80

18 / 3-80
P8 - 12945

Е.И.Дьячков, А.Никитиу, Р.Херцог, И.С.Хухарева

ЗАВИСИМОСТЬ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ
И ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ Nb-Ti (НТ-50)
ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И МАГНИТНОГО ПОЛЯ

1979

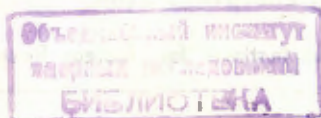
P8 - 12945

Е.И.Дьячков, А.Никитиу*, Р.Херцог, И.С.Хухарева

**ЗАВИСИМОСТЬ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ
И ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ Nb-Ti (HT-50)
ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Направлено в "Cryogenics" и на XVIII Междунар.
конференцию стран СЭВ по физике и технике низких
температур, Дрезден, 1979.

* Институт физики и технологии материалов,
Бухарест.



Дьячков Е.И. и др.

P8 - 12945

Зависимость теплопроводности и электросопротивления Nb-Ti (HT-50) от температуры и магнитного поля

Измерены теплопроводность и электросопротивление проволок диаметром 10 мкм и 112 мкм, входящих в состав сверхпроводящего кабеля, а также массивного образца технического сплава Nb-Ti типа HT-50. Измерения проведены в области температур от 4 до 25 К и при 78 К, 300 К, в магнитном поле до 7 Т и без него.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований, Дубна 1979

D'yachkov E.I. et al.

P8 - 12945

Thermal Conductivity and Electrical Resistivity of Nb-Ti (HT-50) as a Function of Temperature and Magnetic Field

Measurements have been made of the thermal conductivity and electrical resistivity for wires 10 μ and 112 μ in diameter from a composite superconducting cable and for a bulk sample of Nb-Ti of the HT-50 type. The temperature range of the measurements is 4K - 25K and the magnetic field up to 7T. It has been found that technical superconductors of the same type (HT-50) but of various geometrical constructions have different values of thermal conductivity, residual resistivity and critical temperature. The thermal conductivity in the superconducting state is field-independent at fields up to 7T, and it decreases for $T > T_c$ with increasing field. The residual resistivity is independent of fields up to 7T.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

ВВЕДЕНИЕ

Характерной особенностью физики сверхпроводимости в последние годы является растущая связь ее с задачами технического прогресса. Разработка в ЛВЭ ОИЯИ проекта ускорителя - нуклотрона на базе сверхпроводящих магнитных систем¹ привела к практической потребности в знании тепловых и электрических свойств сверхпроводников, входящих в состав комбинированных сверхпроводящих кабелей. Известные из литературы данные по тепло- и электропроводности ниобий-титана^{2,7} в ряде случаев сильно отличаются друг от друга. На рис. 1 воспроизведены температурные зависимости теплопроводности Nb-Ti, полученные разными авторами. Результаты Мортана² во всей области температур примерно на два порядка выше остальных. Несколько необычный характер носит зависимость

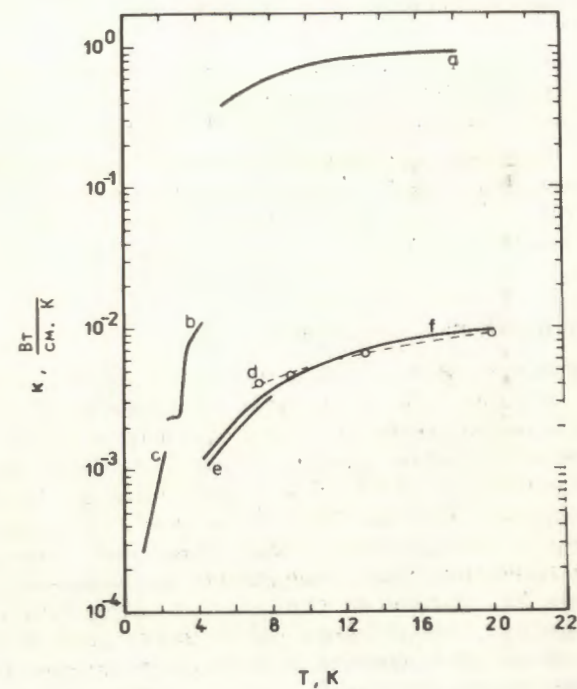


Рис. 1. Зависимость теплопроводности Nb-Ti от температуры. Обозначения: а/ Nb + 65 ат% Ti^{1/2}; б/ Nb + 67 ат.% Ti^{1/3}; с/ Nb + 55 ат.% Ti^{1/4}; д/ Nb + 56,5 вес% Ti^{1/5}; е/ Nb + 50 вес% Ti^{1/6}; ф/ Nb + 37 вес% Ti, массивный образец /данная работа/.

$K(T)$, полученная в работе '3', поэтому значение теплопроводности в районе 4К оказалось сильно завышенным. Результаты других авторов отличаются друг от друга не больше, чем на фактор 2. Как известно, теплопроводность определяется взаимодействием электронов и фононов между собой и с различного рода дефектами, примесями и неоднородностями, что приводит к сильному влиянию на нее условий приготовления образцов, их качества и степени обработки. Поскольку кривые рис. 1 получены на образцах, отличающихся не только составом, но и способом получения и обработки, разброс данных не представляется удивительным /за исключением отмеченных выше работ /2,3/ /.

В табл. 1 воспроизведены результаты измерений различными авторами критической температуры T_C и остаточного удельного сопротивления ρ_n . Значения T_C и ρ_n хорошо коррелируют с составом образцов, использованных в этих работах, исключение составляет несколько завышенное значение ρ_n из работы /3/.

Целью данной работы является измерение теплопроводности и электросопротивления образцов, непосредственно входящих в состав сверхпроводящего кабеля. В широком диапазоне температур и магнитных полей были измерены многожильные кабели с различными диаметрами сверхпроводящих нитей из сплава Nb-Ti типа HT-50, а также для сравнения - образец массивного технического сплава HT-50.

ОБРАЗЦЫ И ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЯ

Характеристики измерявшихся образцов представлены в табл. 2. Образцы 1 и 2 состояли из спаянных на концах кусков двухкомпонентной проволоки диаметром 0,5 и 1 мм соответственно. Каждая проволока состояла из большого числа ниобий-титановых нитей HT-50 в медной матрице /в образце №1 - 1050 штук, в образце №2 - 61 штука/. На измеряемом участке медь удалялась при помощи травления. Размеры и число нитей в проволоке были определены под микроскопом с ошибкой не более 2%. Массивный образец, на котором измеряли теплопроводность, представлял собой шестигранный стержень диаметром ~8 мм. Для измерения электросопротивления с этого стержня был срезан по сечению диск толщиной ≈ 1 мм, из которого вырезали прямоугольную пластину размером 0,28x0,98 мм². На концы пластины наносился электролитический слой меди, к которому припаивались токовые и потенциальные контакты. Измерение электросопротивления всех трех образцов производилось по обычной четырехконтактной схеме при

Таблица 1

Состав	Размер	Обработка	T_C , К	10^{-6} Ом.см	Источник
Nb +65 ат% Ti (49 вес% Ti)	35x5x0,2 мм ³	Холодн. деформ. х.д.+ отж. 500°C, 1ч	9,21 9,35	71 63	2
Nb +67 ат% Ti (51,2 вес% Ti)	\varnothing 0,25 см L= 2,5 см	холодн. деформ.	9,740,2	99	3
Nb +55 ат% Ti (38,6 вес% Ti)		отж. 500°C, 5 час. отж. 1600°C, 25 ч	10,270,1 10,170,1	53,3 48,5	4
Nb +56,5 вес% Ti Nb +50 вес% Ti	\varnothing 36 мкм, L=0,9см \varnothing 38 мкм, L=1,4см	холодн. деформ. "-	8,2 9,6	68 62	5
Nb +50 вес% Ti	\varnothing 9,5 мм, L=90 мм	отж. 900°C+х.д. на 90%	9,2		6
Nb +80 ат% Ti (67,3 вес% Ti)	(0,02+0,08)x 10,005x1,3 см ³	холодн. деформ.		97,2	
Nb +70 ат% Ti (54,6вес) Nb +57,5 ат% Ti (41вес%) Nb +40 ат% Ti (25,6вес%)				79,4; 85,7 58,7 42,2	7

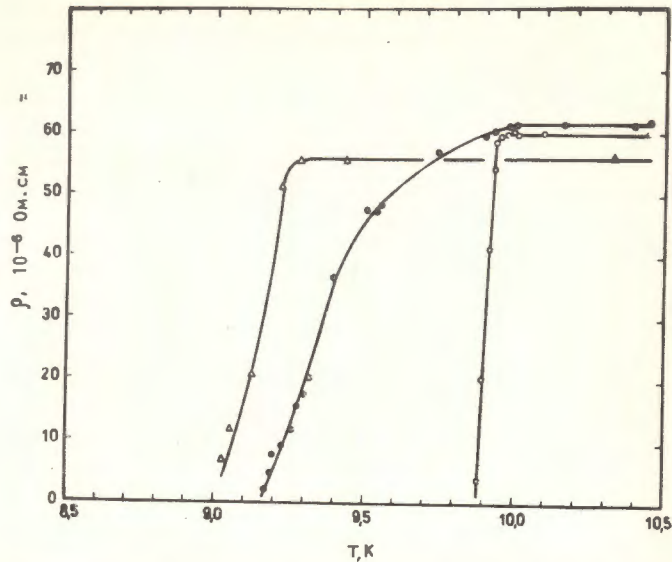


Рис. 2. Зависимость электросопротивления образцов от температуры. Обозначения: Δ - образец №1; \circ - № 2; \bullet - № 3 /см. табл.2/.

температурах 300 К; 78 К, затем от 20 К до T_C . Теплопроводность измерялась стационарным методом в приборе, описанном ранее ^{18/}. Абсолютная ошибка измерений не превышала 3%.

В качестве датчиков температуры использовались либо термопары /Au + 0,03 ат.% Fe / - хромель, либо термометры сопротивления фирмы Allen-Bradley с номинальным сопротивлением 56Ω и мощностью 1/8 Вт. При измерении зависимости теплопроводности от магнитного поля использовались термометры сопротивления, которые предварительно калибровались в магнитном поле.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

1. Измерения электросопротивления и теплопроводности в отсутствие магнитного поля

Результаты измерения T_C и удельного электросопротивления при температурах 300 К, 78 К, а также остаточного (ρ_n) даны в табл. 3. На рис. 2 представлены зависимости $\rho(T)$ в отсутствие магнитного поля. Видно, что для всех образцов электросопротивление в области от 25 К до начала перехода в сверхпроводящее состояние не зависит от температуры.

Таблица 2

№ образ.	Состав	Форма	Число с.п. нитей в образце	Длина, см	Измерение
1	Nb +47 вес% Ti	провол. $\phi 10$ мм	I050 I050x7	1,25 "-	электросопротивл. теплопроводность
2	Nb +51,6 вес% Ti	провол. $\phi 12$ мм	I0 61x4	2,1 1,05	электросопротивл. теплопроводность
3	Nb +37 вес% Ti	прямоугольный стержень $S = 0,27 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$ шестигранный стержень $S = 0,52 \text{ см}^2$	-	0,57 1,18	электросопротивл. теплопроводность

Таблица 3

№ образца	T_C , К	$\Delta T_C = T_C - T_{\rho=0}$	$\rho_{300 \text{ К}}$ 10^{-6} Ом.см	$\rho_{78 \text{ К}}$ 10^{-6} Ом.см	ρ_n 10^{-6} Ом.см	$\rho_{300 \text{ К}} / \rho_n$
1	9,20	0,28	67,82	58,62	56,14	1,208
2	9,91	0,13	74,77	64,67	60,25	1,241
3	9,37	0,85	68,30	63,79	61,49	1,110

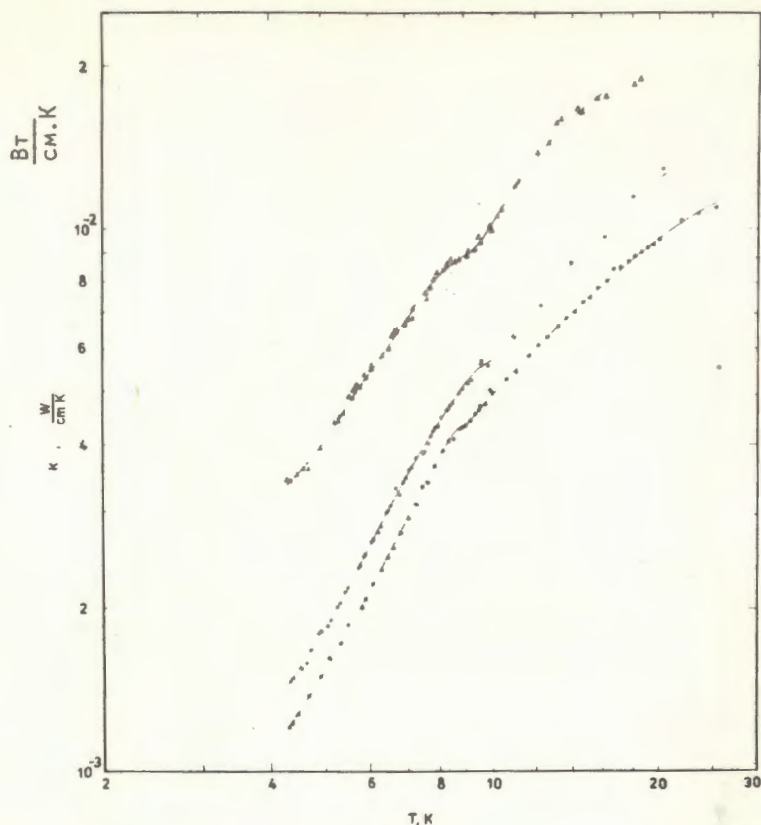


Рис. 3. Зависимость теплопроводности образцов от температуры. Обозначения те же, что и на рис. 2.

Абсолютные значения ρ_n не отличаются больше, чем на 10% друг от друга, хотя нельзя установить четкой корреляции с составом образцов или степенью их обработки. Значения T_C , вошедшие в табл. 3, соответствуют $\rho = 0,5\rho_n$. Для образцов №2 и №3 кривые $\rho(T)$, приведенные на рис. 2, были получены при предельно низких значениях плотности измерительного тока $|j_{изм.}| < 5 \cdot 10^{-2} \text{ A/cm}^2$, так что его изменение не влияло на значение ρ . Для образца №1 приведенная кривая $\rho(T)$ снята при измерительном токе $j_{изм.} = 6 \text{ A/cm}^2$, а значение T_C в таблице получено путем экстраполяции к нулевому измерительному току. Как видно из рис. 2, ширина сверхпроводящего перехода массивного образца существенно больше остальных: $\Delta T_C = 0,9 \text{ K}$ вместо $\Delta T_C = 0,3 \text{ K}$ для образца из проволок

$\phi 10 \text{ мкм}$ и $\sim 0,15 \text{ K}$ - из проволок $\phi 112 \text{ мкм}$ ($\Delta T_C = T_{\rho_n} - T_{\rho=0}$). Большая ширина перехода массивного образца, возможно, объясняется неоднородностью его по составу, т.к. в этой области концентраций изменение последней, например, на 10%, вызывает изменение T_C примерно на 0,5 K. В пользу такого объяснения говорит также более низкое значение отношения $\rho_{300 \text{ K}}/\rho_n$ в массивном образце.

Теплопроводность всех трех образцов при $H=0$ измерялась в области температур от 4 до 25 K. Результаты измерений представлены на рис. 3. Видно, что температурная зависимость теплопроводности всех образцов качественно совпадает. На кривых $K(T)$ наблюдается излом в районе T_C , так что при $T < T_C$ зависимость $K(T)$ близка к степенной, в области $T > T_C$ она имеет более сложный характер. Абсолютные значения теплопроводности образца №1 $\phi 10 \text{ мкм}$ на фактор 2-3, а №2 $\phi 112 \text{ мкм}$ - на фактор 1,2-1,6 выше, чем у массивного образца. Остаточные сопротивления этих образцов соответственно ниже, чем у массивного. Полученные нами значения теплопроводности достаточно хорошо совпадают с результатами других авторов /см. рис. 1/^{5,8,9}. Повышение тепло- и электропроводности тонкопроволочных образцов по сравнению с массивными, по-видимому, объясняется технологическим отжигом в процессе изготовления мелкодисперсного кабеля. Именно такая тенденция в изменении теплопроводности и электросопротивления после отжига образцов наблюдалась в работах ^{2,4}. Температуры сверхпроводящих переходов, определенные по изменению наклона кривых $K(T)$, хорошо совпадают с T_C , полученными в результате измерения электросопротивления.

2. ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

При температурах выше T_C с точностью до 1% было установлено отсутствие влияния магнитного поля до 7 T на величину ρ_n . Снимая кривые $\rho(T)$ при разных значениях $H = \text{const}$, получили зависимость $V_{C2}(T)$ вблизи T_C , на рис. 4 она представлена в относительных /по температуре/ единицах. Видно, что эта зависимость близка к линейной, и значение $dV_{C2}/d(T/T_C)_{T=T_C} = 22,5T$ в пределах ошибки измерения одинаково для всех трех образцов. Зависимость $V_{C2}(T)$ находится в хорошем согласии с результатами измерения Десорбо на Nb-50 ат.% Ti /34 вес %/¹⁰.

Для образца №1 была измерена зависимость теплопроводности от магнитного поля до 7 T при температурах $T < T_C$ и $T > T_C$. Результаты представлены на рис. 5.

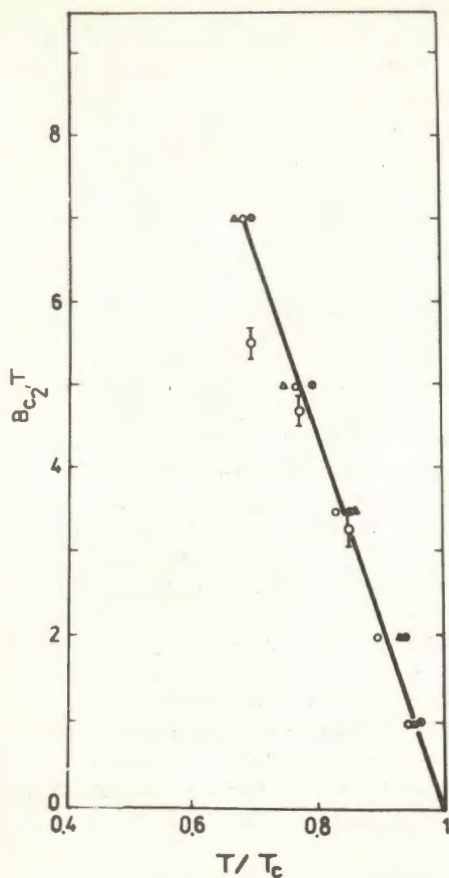


Рис. 4. Зависимость величины критического поля B_{C2} от относительной температуры T/T_c . Δ - образец № 1; \circ - № 2; \bullet - № 3; \circ получены по измерению теплопроводности образца № 1.

При температурах, меньших T_c , теплопроводность остается постоянной до значения поля, равного B_{C2} для данной температуры. При дальнейшем увеличении поля теплопроводность резко падает. Полученные таким образом значения B_{C2} , как видно из рис. 4, хорошо совпадают с измерениями этой величины по $\rho(T)$. Надо отметить, что в литературе относительно мало представлено измерений теплопроводности сверхпроводников 2-го рода в магнитном поле. Так, в работе^{/3/} теплопроводность Nb - 67 ат.% Ti - измеряли при температурах 2,2К-4,2К в магнитном поле до 0,6Т, и так же, как у нас, зависимости от величины поля не было обнаружено. Уменьшение теплопроводности с ростом поля выше H_{C1} , наблюдали только на Nb+0,87 ат.% кислорода^{/8/} и Pb - 21 ат.% In^{/11/}, что авторы объяснили

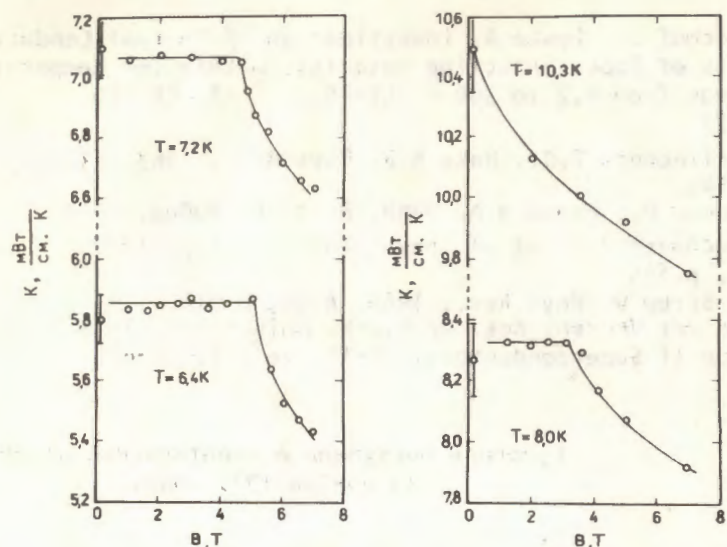


Рис. 5. Зависимость теплопроводности образца №1 от магнитного поля.

дополнительным рассеянием фононов на флюксоидах. Для сплава Nb-Ti длины пробегов электронов и фононов настолько малы, что появление центров рассеяния в виде флюксоидов не дает дополнительного вклада.

Как видно из рис. 5, в нормальном состоянии $T = 10,3$ К/ с ростом магнитного поля теплопроводность уменьшается. Так как электросопротивление при этом остается неизменным, такое поведение теплопроводности объясняется рассеянием фононов на электронах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балдин А.М. и др. В кн.: Труды 4 Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. "Наука", М., 1975, т.2, с.4-8.
2. Morton N. et al. J.Phys. F: Metal.Phys., 1975, 5.
3. Dubeck L., Setty K.S.L. Phys.Lett., 1968, 27A, No. 6.
4. Ikebe U. et al. Solid St. Comm., 1977, 23, p.189.
5. Schmidt C. Rev.Sci. Instrum., 1979, 50(4), 454.

6. Bischof J., Ryska A. Investigation of Thermal Conductivity of Superconducting Materials within the Temperature Range from 4,2 to 300 K. LT-15, 1, C6-675, 1977.
7. Berlinconrt T.G., Hake R.R. Phys.Rev., 1963, 131, 1, p.140.
8. Херцог Р., Малюк В.А. ОИЯИ, 8-12120, Дубна, 1979.
9. Flachbart J.K. et al. phys.stat.sol. (b), 1978, 85, p.545.
10. De Sorbo W. Phys.Rev., 1965, A104, p.914.
11. Can der Veeren. Kes. de Klerb. Anisotropic in a Dirty Type II Superconductors. LT-15, vol. 1, C6-673.

Рукопись поступила в издательский отдел
23 ноября 1979 года.