

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P8-85-654

Н.М.Владимилова, Д.Лазэр,
Э.Фишер, И.С.Хухарева

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА
МЕЛКОДИСПЕРСНОГО СВЕРХПРОВОДНИКА
(NbTi-Cu) НИЖЕ T_c

Доклад на XXIV Международной конференции стран-участниц
СЭВ по физике и технике низких температур, ГДР, 1985 г.

1985

Сечение мелкодисперсного композитного сверхпроводника представляет собой двумерную систему чередующихся элементов сверхпроводящего и нормального металлов. В последнее время проявляется большой интерес к подобному рода системам как в экспериментальном^{/1-3/}, так и в теоретическом^{/4-5/} рассмотрении. Благодаря эффекту близости при понижении температуры возникает взаимодействие между сверхпроводящими элементами, так что вся система в конце концов переходит в сверхпроводящее состояние. Двумерные построения в работах^{/1-3/} были получены на пленках. Обычно на поверхность пленки из нормального металла напыляются в виде регулярной системы острова сверхпроводящего металла^{/1,2/} или сплава^{/3/}, имеющие макроскопические размеры и расстояния между соседними островами. В работе Абрахама и др.^{/3/}, например, подложкой служила медная пленка толщиной порядка 1000 Å, на которую были напылены в виде прямоугольной сетки квадратные острова из $Pb-5 \text{ ат.}\% \text{ Bi}$ толщиной 2000 Å с расстояниями между центрами островов 25 мкм и просветами между островами 6 мкм. Система содержала $\sim 10^6$ сверхпроводящих элементов. Характерной особенностью резистивного поведения подобных построений является двухступенчатый переход в сверхпроводящее состояние. При понижении температуры наблюдается сначала скачок сопротивления примерно до 0,7 от значения в нормальном состоянии, потом сопротивление плавно уменьшается на достаточно протяженном участке температур, пока не наступает окончательное падение его до нуля. Начальный скачок соответствует переходу островов в сверхпроводящее состояние, а плавное уменьшение сопротивления обусловлено проявлением эффекта близости. Конечный скачок сопротивления до нуля во всех работах подобного типа определяется как фазовый переход Костерлитца - Таулеса.

Подобного рода двойной переход, но на температурной зависимости переменной магнитной восприимчивости, был обнаружен группой японских физиков^{/6/} при исследовании композитного мелкодисперсного сверхпроводника, состоящего из $Nb-Ti$ нитей и медной матрицы и помещенного в виде пучка изолированных проволок в параллельное магнитное поле малой амплитуды.

Имея в виду полную аналогию сечения мелкодисперсного композитного сверхпроводника двумерной системе регулярных построений $S-N-S'$ переходов, мы предприняли изучение резистивного поведения таких проводников при пропускании измерительного тока перпендикулярно направлению сверхпроводящих нитей. На том же проводнике измерили магнитную восприимчивость в переменном магнитном поле малой амплитуды. В качестве образцов использовался технический композитный провод диаметром 1 мм, состоящий из 1045 нитей $Nb-Ti$ (HT-50) диаметром 19 мкм

каждая и медной матрицы (коэффициент заполнения 0,45); среднее расстояние между сверхпроводящими нитями ~ 8 мкм.

Сопротивление измерялось по четырехпроводной схеме на образцах, вырезанных из исходного проводника таким образом, чтобы сверхпроводящие нити были перпендикулярны длине образца. Образцы были длиной ~ 1 мм и имели прямоугольное сечение $\sim 0,5 \times 0,2$ мм². Для увеличения измеряемого напряжения в некоторых случаях несколько кусков провода, предварительно обточенных до прямоугольного сечения, спаивались в плоскую стопку^{7/}. Схематическое изображение измерявшихся образцов представлено на рис. 1. Напряжение с образца подавалось на усилитель типа Ф-118, на выходе которого стоял вольтметр с цифropечатающим устройством. При фиксированной температуре производилась запись напряжения при разных значениях измерительного тока от 50 мА до 1 А.

Для измерения магнитной восприимчивости пучок изолированных проволок помещался в одну из двух измерительных катушек, включенных навстречу друг другу, а они, в свою очередь, располагались внутри соленоида так, чтобы магнитное поле было параллельно оси проволок. Соленоид запитывался от звукового генератора типа ГЗ-102. Измеряемый сигнал с катушек подавался на селективный нановольтметр, с выхода которого производилась запись с помощью цифropечатающего устройства. Измерения проводились либо при плавном изменении температуры, либо в отдельных точках по температуре и фиксированных значениях амплитуды и частоты переменного магнитного поля. При изменении частоты от 30 до 3000 Гц характер зависимости восприимчивости от температуры не менялся. Измерения сопротивления и магнитной восприимчивости были проведены в интервале температур от 15 К до 1,7 К.

По измеренным значениям удельного сопротивления образцов в нормальном состоянии ($T \approx 12$ К) была сделана оценка длины свободного пробега электронов в медной матрице:

$$l_e = 7,7 \cdot 10^{-16} \rho_{Cu}^{-1} \text{ Ом} \cdot \text{м}^2 / 8/$$

Получено значение $l_e \approx 2$ мкм.

Длина когерентности в меди была рассчитана по формуле^{9/}

$$\xi_{SN} = \frac{\hbar v_F}{2\pi k_B T} \quad \text{для} \quad \xi_{SN} \ll l_e.$$

При $T=4,2$ К $\xi_{SN} \approx 0,3$ мкм.

На рис. 2 представлены поперечное сопротивление и магнитная восприимчивость данного композитного сверхпроводника в зависимости от температуры. Видно, что эти величины меняются с температурой подобным образом. При понижении температуры сначала наблюдается достаточно резкий скачок, соответствующий переходу в сверхпроводящее состояние ниобий-титановых нитей. Далее, в интервале температур примерно от

7,5 К до 4 К сопротивление и магнитная восприимчивость плавно меняются с уменьшением температуры, что соответствует проявлению эффекта близости.

Уменьшение поперечного сопротивления с понижением температуры полностью аналогично поведению сопротивления двумерных построений при температурах выше перехода Костерлитца-Таулеса. В работе^{3/} зависимость $R(T)$ в этом интервале температур рассчитывается на основании следующей модели. Предполагается, что $S-N-S$ система имела бы ненулевой критический ток при всех температурах ниже T_C - критической температуры сверхпроводящих элементов, в отсутствие тепловых шумов, разрушающих фазовую когерентность сверхпроводящего параметра порядка в нормальном слое. Поэтому критический ток - $S-N$ контакта записывается в виде функции расстояния до сверхпроводника x , на котором выполняется условие, что энергия связи системы больше или равна тепловой энергии. Тогда на длине x медь будет сверхпроводящей, и общее сопротивление образца уменьшится на величину, пропорциональную x . Рассчитанная таким образом зависимость $R(T)$ с учетом геометрических особенностей наших образцов дала хорошее совпадение с экспериментальными точками^{10/}. При температурах ниже 4 К поведение $\chi(T)$ и $R_1(T)$ сильно зависит от амплитуды переменного магнитного поля в первом случае и величины измерительного тока во втором. На рис. 3 эта область для поперечного сопротивления представлена в увеличенном масштабе. Видно, что с уменьшением плотности измерительного тока зависимость $\rho_1(T)$ сильно видоизменяется, приобретая форму скачка для самого низкого значения $J_{изм.} = 9$ А/см². Такое поведение поперечного сопротивления в этой области нашло отражение на вольт-амперных характеристиках образца. Как видно на рис. 4, при $T = 4,2$ К имеет место линейная зависимость $U(I)$ при всех значениях измерительного тока. При более низких температурах на вольт-амперных характеристиках появляется начальный нелинейный участок, который хорошо описывается функцией $U \propto I^{\alpha}(T)$. Для $T = 1,8$ К получено значение $\alpha(T) = 2,35$.

Согласно^{11,12/} в точке, соответствующей $\alpha(T) = 3$, в двумерной системе слабо связанных сверхпроводящих элементов происходит фазовый переход, и ниже этой температуры система имеет ненулевой критический ток. Полученные нами значения α при $T \lesssim 3$ К близки к критическому. Это позволяет считать, что наблюдаемые при низких температурах аномалии в поведении $\rho(T)$ и $\chi(T)$ происходят в области фазового перехода Костерлитца-Таулеса.

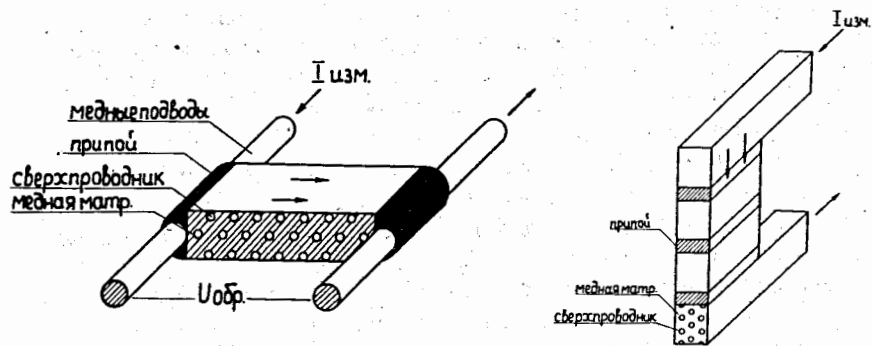


Рис. 1. Схематическое изображение образцов для измерения поперечного сопротивления.

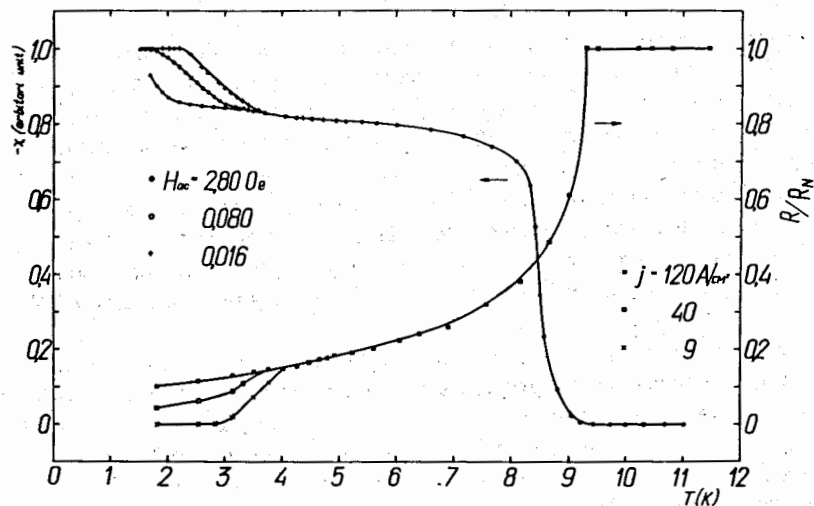


Рис. 2. Температурная зависимость поперечного сопротивления и переменной магнитной восприимчивости, представленная в относительных единицах.

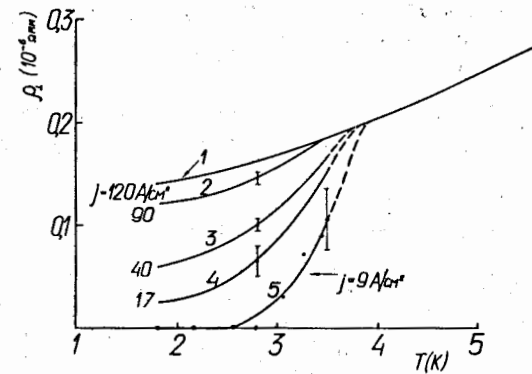


Рис. 3. Зависимость $Q_1(T)$ для разных значений плотности измерительного тока.

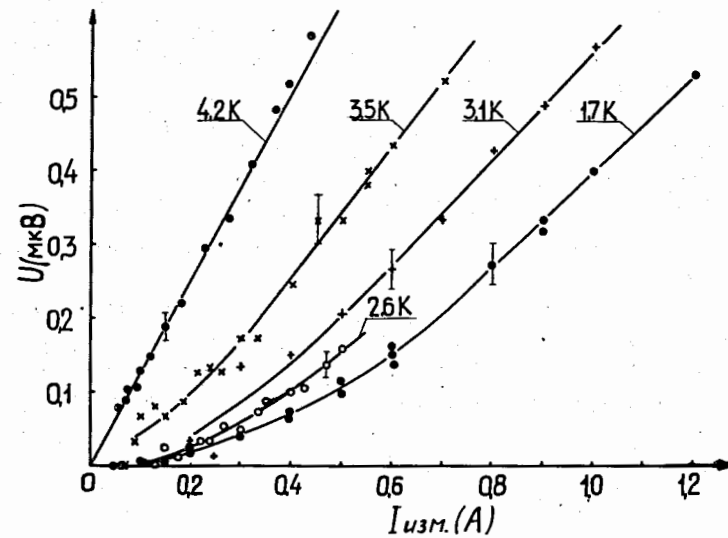


Рис. 4. Вольтамперные характеристики образца при разных значениях температуры.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 D J Resnick, J C Garland et al "Kosterlitz-Thouless Transition in Proximity-Coupled Superconducting Arrays", Phys Rev Lett, v 47, N 21, 1542. (1981)
- 2 D N Sanchez and J L Berchier "Properties of nxn Square Arrays of Proximity Effect Bridges", J Low Temp Phys, v 43, N 1/2, 65, (1981)
- 3 D W Abraham et al "Resistive Transition in two-dimensional arrays of superconducting weak links", Phys Rev "B", v 26, N 9, 5268, (1982)
- 4 C J Lobb, D W Abraham, and M Tinkham "Theoretical interpretation of resistive transition data from arrays of superconducting weak links", Phys Rev "B", v 27, N 1, 150, (1983)
- 5 J Riess "Proximity Effect and Branching in Superconducting Networks", J Low Temp Phys, v 52, N 3/4, 259, (1983)
- 6 T Ishida, H Mazaki "Third-Harmonic Response of a Superconductor Against Small AC Magnetic Field: Lattice of Proximity-Coupled Fibers" Proc of ICEC-8, (1980), 486.
- 7 В.М.Дробин, Е.И.Дьячков, В.Г.Дуппов, А.Никитиц, И.С.Хухарева "Прямое измерение поперечного сопротивления композитных сверхпроводников", Препринт ОИЯИ Р8-81-490, г. Дубна, 1981, 9 стр., Cryogenics, v 22, 115, (1982)
- 8 G Frenkl and J Olsen - Mater Sci Eng 4, 1969 p 61
- 9 G Deutscher P G. De Gennes - Superconductivity Ed Parks R D N 4, Marcel Dekker, Inc 1969 v 2, p 175
- 10 Н.М. Владимирова, В.М. Дробин, Д.Лазер, И.С.Хухарева "Проявление эффекта близости в композитных сверхпроводниках", Препринт ОИЯИ Р8-84-261 (1984), г. Дубна.
- 11 C Y Lobb "Phase Transitions in Arrays of Josephson Junctions". Physics B + C, N 1-3 (1984) 319
- 12 A F Hebard, A T Fiory "Critical-Exponent Measurements of a Two-Dimensional Superconductor" Phys Rev Lett v 50, N 20, (1983) 1673

Рукопись поступила в издательский отдел
5 сентября 1985 года.

Владими́рова Н.М. и др.

P8-85-654

Электрические и магнитные свойства мелкодисперсного сверхпроводника (NbTi-Cu) ниже T_c

Целью работы является исследование двумерной сверхпроводимости на образцах технического композитного сверхпроводящего провода, состоящего из тонких нитей ниобий-титана и медной матрицы. В интервале температур 12 К - 1,7 К измерялись вольтамперные характеристики при пропускании тока, перпендикулярного сверхпроводящим нитям, и магнитная восприимчивость во внешнем переменном поле малой амплитуды. Установлено, что поперечное сопротивление и магнитная восприимчивость меняются с температурой подобным образом, обнаруживая двухступенчатый переход в сверхпроводящее состояние. Верхний скачок соответствует сверхпроводящему переходу Nb-Ti, тогда как нижний скачок, по-видимому, является фазовым переходом Костерлитца - Таулеса, характерным для двумерных систем слабо связанных сверхпроводящих элементов.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1985

Перевод О.С.Виноградовой.

Vladimirova N.M. et al.

P8-85-654

Electrical and Magnetic Properties of Multifilament Superconductor (NbTi-Cu) Below T_c

Two-dimensional superconductivity of samples of a technical composite superconducting wire consisting of thin niobium-titanium filaments and a copper matrix is studied. At temperatures between 1,7 K and 12 K the magnetic susceptibility in an external alternating field of small magnitude and voltage-current characteristics are measured. The direction of the current flow is perpendicular to the filaments. The transverse resistance and magnetic susceptibility are found to depend on the temperature in similar manner exhibiting a two-step superconducting transition. The upper transition is the Nb-Ti transition, whereas the lower one seems to be the Kosterlitz-Thouless transition, which is typical for two-dimensional systems of weakly bound superconducting elements.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1985