

**объединенный  
институт  
ядерных  
исследований  
дубна**

---

P8-84-261

**Н.М.Владими́рова, В.Н.Дробин,  
Д.Лазэр, И.С.Хухарева**

**ПРОЯВЛЕНИЕ ЭФФЕКТА БЛИЗОСТИ  
В КОМПОЗИТНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКАХ**

Направлено на XXIII Всесоюзное совещание  
по физике низких температур, Таллин, 1984 г.

---

**1984**

---



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<sup>/1-3/</sup>, так и в теоретическом<sup>/4-5/</sup> 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<sup>/1-3/</sup> были получены на пленках. Обычно на поверхность пленки из нормального металла напыляются в виде регулярной системы острова сверхпроводящего металла<sup>/1,2/</sup> или сплава<sup>/3/</sup>, имеющие макроскопические размеры и расстояния между соседними островами. В работе Абрахама и др.<sup>/3/</sup>, например, подложкой служила медная пленка толщиной порядка 1000 Å, на которую были напылены в виде прямоугольной сетки квадратные острова из Pb - 5 ат.% Bi толщиной ~ 2000 Å с расстояниями между центрами островов 25 мкм и просветами между островами 6 мкм. Система содержала ~10<sup>6</sup> S-N-S переходов. Характерной особенностью резистивного поведения подобных построений является двухступенчатый переход в сверхпроводящее состояние. При понижении температуры наблюдается сначала скачок сопротивления примерно до 0,7 значения в нормальном состоянии, потом сопротивление плавно уменьшается на достаточном протяжении участка 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.

1. Мы изучали резистивное поведение композитных сверхпроводников при пропускании измерительного тока перпендикулярно сверхпроводящим нитям. Были использованы технические проводники диаметром 1-0,5 мм, состоящие из большого числа  $N > 10^3$  тонких сверхпроводящих нитей HT-50 и медной матрицы. Для увеличения измеряемого напряжения 10-15 кусочков такого проводника спаивались в плоскую стопку, торцы которой затем стачивались до ширины в 1-1,5 мм<sup>/6/</sup>, припой с боковых поверхностей удалялся при помощи тонкой шлифовальной бумаги. Крайние проволоки стопки были более длинными и служили токовыми вводами. Потенциальные контакты осуществлялись с помощью тонких медных проволочек, впаянных между токовыми вводами и остальной частью стопки. На рис.1 представлено схематическое изображение торцевого сечения

Таблица

№ образцов	число спн	d спн мкм	b мкм	$\ell_e$ мкм	$T_{CS}$ К
2/13/	1045	10	~3	1,3	9,38
3/25/	2970	6	~1	0,5	9,20
4/3D/	9,4 10 <sup>6</sup>	~0,06	~0,07	0,35	9,35

образца, а в таблице даны характерные параметры использованных проводников. Длина свободного пробега электронов в медной матрице оценивалась по формуле<sup>/7/</sup>  $\ell_e = 7,7 \cdot 10^{-12} \rho_n^{-1}$  [см], в которой принимали  $\rho_n = 1,85 \rho_n / T \approx 12$  K/, где  $\rho_n$  - удельное сопротивление меди в продольном направлении. Коэффициент 1,85 учитывает анизотропию удельного сопротивления, возникающую при продольной деформации провода в процессе изготовления. Это значение получено нами на медной проволоке, диаметр которой /0,5 мм/ совпадает с исследовавшимися композитными сверхпроводниками. Напряжение с образца подавалось через усилитель типа Ф-116 на двухкоординатный самописец. Вольтамперные характеристики записывались при постоянных температуре и магнитном поле. Измерительный ток не превышал 100 мА. Температуру можно было изменять от 4,2 до 10-15 К, индукция магнитного поля менялась от 0 до 4Т. Вольтамперные характеристики во всех измерениях были линейными, и по ним определялось сопротивление образца. Так как удельное сопротивление припой и его зависимость от температуры и магнитного поля предварительно были измерены<sup>/8/</sup>, по общему сопротивлению стопки можно было вычислить поперечное удельное сопротивление композита  $\rho_{\perp}$ . Характерные зависимости  $\rho_{\perp} / T$  для разных значений В, полученные на одном из образцов /№3/, представлены на рис. 2а. Там же для сравнения приведен переход в сверхпроводящее состояние при В = 0 одиночного провода с продольным измерительным током ( $\rho_{\parallel}$ ). Видно, что в последнем случае сопротивление скачком падает до нуля. В присутствии магнитного поля продольное сопротивление также изменяется скачком. Поперечное сопротивление композита при В = 0 с понижением температуры сначала достаточно резко падает примерно до половины своего значения в нормальном состоянии, затем плавно уменьшается вплоть до предельной температуры измерения /~ 4,2 К/. При наличии внешнего магнитного поля зависимость поперечного сопротивления от температуры с ростом поля становится все более плавной. Если принять за  $T_C$  температуру, соответствующую  $R/R_n = 0,5$ , то зависимости  $T_C(B)$  в измеряемом интервале полей для обоих сопротивлений -  $\rho_{\perp}$ ,  $\rho_{\parallel}$  - представляются прямыми линиями /см. рис. 2б/. В случае поперечного сопротивления изменение  $T_C$  с полем сильнее.



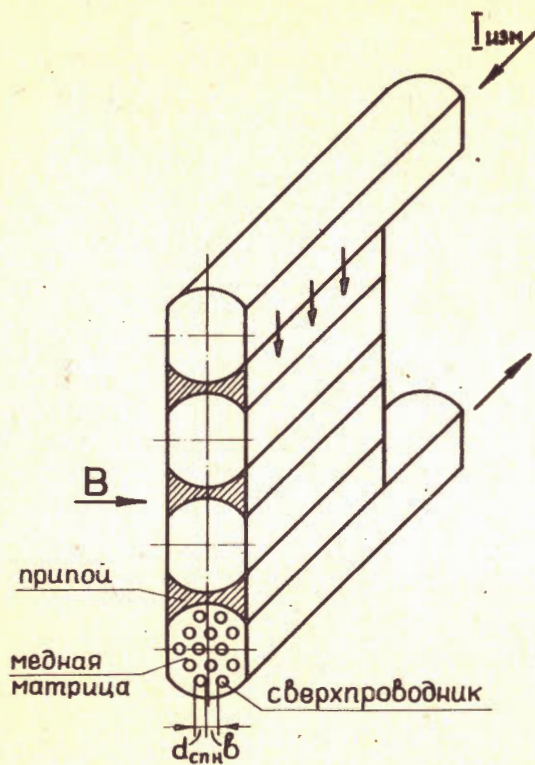


Рис.1. Схематическое изображение образца.

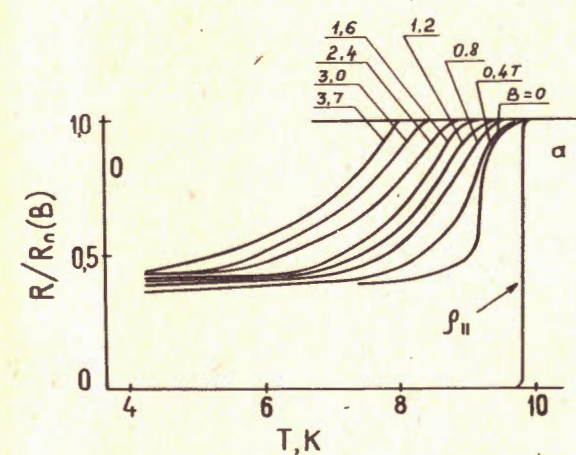
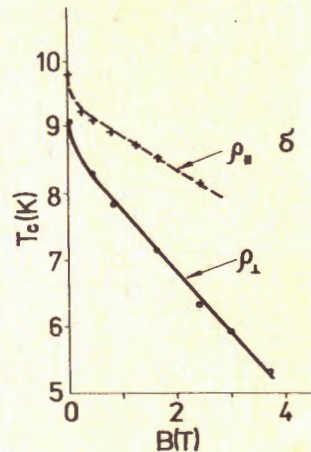


Рис.2. Зависимость поперечного сопротивления от температуры и магнитного поля.



2. Плавное уменьшение поперечного сопротивления с температурой после перехода в сверхпроводящее состояние ниобий-титановых нитей при  $B = 0$  имеет место как и в случае двумерных

построений при температурах выше перехода Костерлитца-Таулеса. В<sup>3/</sup> 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  $T_{CS}$  - 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, согласно которому 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. Результаты сравнения для одного из образцов представлены на рис.3. Входящая в расчетное значение  $R(T)$  длина когерентности в меди представлялась в виде<sup>9/</sup>

$$\xi_n = \left[ \frac{\hbar v_F l_e}{6 \pi K_B T} \right]^{1/2} \text{ для } l_e \ll \xi_n.$$

3. Таким образом, поведение поперечного сопротивления композитных сверхпроводников при температурах ниже сверхпроводящего перехода ниобий-титановых нитей такое же как и в случае двумерных построений в соответствующей области температур и хорошо объясняется проявлением эффекта близости и возникновением связи между сверхпроводящими элементами.

К сожалению, ограниченные возможности измерительной аппаратуры и недостаточно низкие температуры измерения не позволили нам наблюдать переходов Костерлитца-Таулеса, что мы надеемся сделать в дальнейшем.

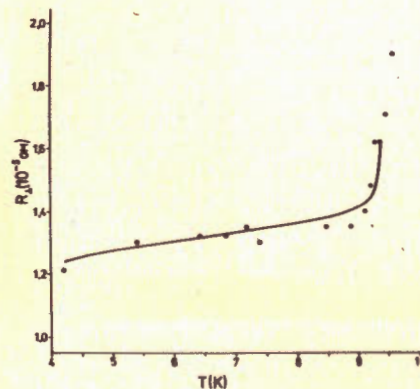


Рис.3. Сравнение экспериментальных значений  $R(T)$  образца №2 с расчетной кривой.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Resnick D.J. et al. Phys.Rev.Lett., 1981, vol. 47, No. 21, p. 1542.
2. Sanchez D.H., Berchier J.-L. J.Low Temp. Phys., 1981, vol. 43, No. 1/2, p. 65.
3. Abraham D.W. et al. Phys.Rev. "B", 1982, vol. 26, No. 9, p. 5268.
4. Lobb C.J. Phys.Rev."B", 1983, vol. 27, No. 1, p. 150.
5. Riess J. J.Low Temp.Phys., 1983, vol. 52, No. 3/4, p. 259.
6. Дробин В.М. и др. ОИЯИ, P8-81-490, Дубна, 1981; Cryogenics, 1982, vol. 22, p. 115.
7. Brandl G., Olsen J. Mater.Sci.Eng., 1969, 4, p. 61.
8. Дробин В.М. и др. ОИЯИ, P8-80-594, Дубна, 1980.
9. Deutscher G., De Geenes P.G. Superconductivity, Ed. Parks R.D. No. 4; Marcal Dekker, Inc., 1969, vol. 2, p. 1005.

Рукопись поступила в издательский отдел  
19 апреля 1984 года.

Владимирова Н.М. и др.

P8-84-261

Проявление эффекта близости в композитных сверхпроводниках

Сечение мелкодисперсного композитного сверхпроводника представляет собой двумерную систему чередующихся элементов сверхпроводящего и нормального металлов. При пропускании через такой проводник тока перпендикулярно сверхпроводящим нитям возникает ситуация, характерная для двумерных построений. Мы использовали для измерений технические проводники диаметром 1-0,5 мм, состоящие из большого количества тонких сверхпроводящих нитей NbTi-50 и медной матрицы. Зависимость поперечного сопротивления наших образцов от температуры аналогична температурной зависимости сопротивления двумерных построений. В частности, после сверхпроводящего перехода нитей NbTi-50 при понижении температуры наблюдается плавное уменьшение сопротивления за счет эффекта близости в соответствии с моделью, развитой для двумерного построения.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1984

Перевод О.С.Виноградовой.

Vladimirova N.M. et al.

P8-84-261

On the Proximity Effect in Composite Superconductors

The cross section of a multifilamentary superconducting wire represents a two-dimensional system of alternating portions of superconducting and normal metals. If a current is passed through such a wire perpendicular to superconducting filaments, the state comes into being which is specific to two-component two-dimensional resistive arrangements. In such a type of measurements we used commercial wires having diameters between 0.5 and 1.0 mm and consisting of a great number of thin superconducting filaments of NbTi-50 alloys in a copper matrix. The temperature dependence of the transverse resistance of our samples was analogous to that of the resistance of a two-component two-dimensional system. Thus, after the superconducting transition of the NbTi-50 filaments, a decrease in the temperature leads to a monotonous decrease of the resistance due to the proximity effect which is in good accord with a mathematical model developed for such two-component two-dimensional systems.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1984