

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



С 393<sub>2</sub>  
В-191

9/111-73  
P8 - 6915

50/2-73  
Б.В.Васильев, В.Г.Симкин

О ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ  
ТОЧЕЧНОГО ТУННЕЛЬНОГО ПЕРЕХОДА  
СВЕРХПРОВОДНИК - НОРМАЛЬНЫЙ МЕТАЛЛ -  
СВЕРХПРОВОДНИК

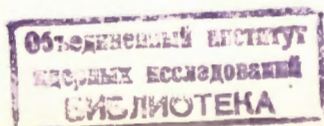
**1973**

**ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ**

P8 - 6915

Б.В.Васильев, В.Г.Симкин

О ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ  
ТОЧЕЧНОГО ТУННЕЛЬНОГО ПЕРЕХОДА  
СВЕРХПРОВОДНИК - НОРМАЛЬНЫЙ МЕТАЛЛ -  
СВЕРХПРОВОДНИК



Васильев Б.В., Симкин В.Г.

P8 - 6915

О вольт-амперной характеристике точечного туннельного перехода сверхпроводник - нормальный металл - сверхпроводник

Приведен теоретический расчет вольт-амперной характеристики сверхпроводящего точечного контакта и сравнение этого расчета с экспериментом.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований  
Дубна, 1973

Vasiliev B.V., Simkin V.G.

P8 - 6915

On Current-Voltage Characteristics of Point Tunnel Transition Superconductor-Normal Metal-Superconductor

Theoretical calculations of current-voltage characteristics of superconducting point contact are presented and compared with experiment.

Communications of the Joint Institute for Nuclear Research.  
Dubna, 1973

Туннельный контакт между двумя сверхпроводниками удобно описывать его вольт-амперной характеристикой /ВАХ/. В работах /1,2/ теоретически показано, что ВАХ туннельного контакта описывается уравнением:

$$V = R(I^2 - I_{кр}^2)^{1/2} \quad /1/$$

Здесь  $R$  - сопротивление контакта в нормальном состоянии,  $I_{кр}$  - критический ток контакта.

Цель настоящей работы - сравнить экспериментально полученные ВАХ контакты сверхпроводник - нормальный металл - сверхпроводник с теоретической зависимостью /1/ и выявить допустимость предположений, которые делаются при выводе формулы /1/.

Рассмотрим случай, когда в качестве точечного контакта между двумя сверхпроводниками использован нормальный металл с сопротивлением  $R$ . Следуя /1/, запишем полный ток через контакт как сумму сверхпроводящего джозефсоновского тока  $I_{дж.}$  и нормального тока  $I_n$ :

$$I = I_{дж.} + I_n \quad /2/$$

Согласно уравнениям Джозефсона,

$$I_{дж.} = I_{кр.} \sin \delta(t) \quad /3/$$

$\delta(t)$  определяется равенством:

$$V(t) = \frac{\hbar}{2e} \cdot \frac{d\delta(t)}{dt} = \frac{\hbar\omega}{2e} \quad /4/$$

В уравнении /2/ мы пренебрегли токами смещения  $I_{\text{см.}} = C\dot{V}(t)$ .  
/C - емкость контакта/, предположив, что

$$\frac{V(t)}{R} \gg C\dot{V}(t). \quad /5/$$

Используя уравнение /4/ и равенство  $V = R [I - I_{\text{кр}} \sin \delta(t)]$ ,  
можно преобразовать неравенство /5/ к виду:

$$I_{\text{кр}} R \ll \frac{\hbar}{2e} \cdot \frac{I}{CR}, \quad /6/$$

Рассмотрим случай, когда суммарный ток, стоящий в левой части уравнения /2/, есть константа, не зависящая от времени. Этот случай соответствует реальной экспериментальной ситуации, когда в цепь контакта включены источник тока и измерительные приборы, обладающие значительными индуктивностями.

В этом случае при токе  $I < I_{\text{кр}}$  постоянное напряжение на контакте равно нулю. При  $I > I_{\text{кр}}$  на контакте появляется напряжение  $V(t)$ , которое в силу /4/ приводит к осцилляции сверхпроводящего тока  $I_{\text{дж.}} = I_{\text{кр}} \sin \int V(t) dt$  и, следовательно, само осциллирует, так как мы рассматриваем случай  $I = \text{const}$ .

Вычислим среднее по времени значение  $V(t)$ , так как именно эта величина может быть измерена экспериментально с помощью вольтметра "постоянного тока". Среднее во времени может быть вычислено как среднее за период осцилляции

$$\langle V(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt. \quad /7/$$

Используя равенство /4/, получим:

$$\langle V(t) \rangle = \nu \frac{\hbar}{2e} \int_0^{2\pi} \frac{d\delta(t)}{dt} dt = \nu \frac{\hbar}{2e} 2\pi = \frac{\hbar \nu}{2e}. \quad /8/$$

Частоту осцилляций  $\nu$  определим из уравнения /2/, используя равенство /4/:

$$dt = \frac{\hbar}{2eR} \cdot \frac{d\delta(t)}{[I - I_{\text{кр}} \sin \delta(t)]} \quad /9/$$

Интегрируя в пределах периода, получим

$$T = \frac{1}{\nu} = \frac{1}{R} \cdot \frac{\hbar}{2e} \int_0^{2\pi} \frac{d\delta(t)}{I - I_{\text{кр}} \sin \delta(t)} = \frac{2\pi \left(\frac{\hbar}{2e}\right)}{R(I^2 - I_{\text{кр}}^2)^{1/2}} \quad /10/$$

Подставляя это выражение для  $\nu$  в равенство /8/, получаем, что средняя величина напряжения на туннельном переходе при  $I \geq I_{\text{кр}}$  есть

$$\langle V(t) \rangle = R(I^2 - I_{\text{кр}}^2)^{1/2}. \quad /11/$$

Зависимость, даваемая уравнением /11/ при  $I_{\text{кр}} = 115 \text{ мкА}$  и  $R = 1,54 \text{ Ом}$ , показана точками на рис. 1. Сплошной линией показана экспериментально определенная статическая вольт-амперная характеристика контакта ниобий - ниобий. Методика приготовления туннельного контакта и измерения статической вольт-амперной характеристики описана в работе /3/.

Для того, чтобы проверить справедливость условия /6/, в нашем случае преобразуем правую часть этого неравенства к виду:

$$\frac{\hbar}{2e} \cdot \frac{I}{CR} = \frac{\hbar}{2e} \cdot \left(\frac{4\pi\ell}{S}\right) \cdot \left(\frac{S}{\rho\ell}\right) = \frac{\hbar}{e\rho}. \quad /12/$$

Здесь  $S$  и  $\ell$  - площадь и длина контакта,  $\rho \approx 10^{-6} \text{ Ом.см.}$  - нормальное удельное сопротивление ниобия при гелиевой температуре /4/.

Используя /12/, получим, что формула /2/ применима пока

$$RI_{\text{кр}} \ll 4 \cdot 10^{+2} \text{ в.}$$

Влияние собственной индуктивности контакта было обсуждено ранее в работе /5/, и, вероятно, за счет нее можно отнести малые отклонения экспериментальной ВАХ от теоретической в самом начале резисторного участка. Согласно между вычисленной ВАХ и полученной экспериментально позволяет сделать вывод о применимости данного теоретического рассмотрения к процессам в точечных ниобий-ниобиевых контактах, изготовленных по способу, описанному в работе /3/, что позволяет судить о качестве контактов и о возможности их использования в сверхпроводящем квантовом магнитометре.

Авторы благодарны В.К.Игнатовичу за обсуждение и ценные замечания.

## Литература

1. R. de Bruyn Ouboter, A.Th.A.M. de Waele. *Progress in Low Temperature Physics*, v. VI, p. 243 (1970).
2. Л.Г.Асламазов, А.И.Ларкин. *Письма в ЖЭТФ*, п.9, в. 2, стр. 150 /1969/.
3. Б.В.Васильев, В.Г.Симкин. *Сообщения ОИЯИ*, 13-5894, Дубна, 1971.
4. J.E.Zimmerman and A.H.Silver. *Phys.Rev.*, v. 141, No. 1, p. 367 (1966).
5. D.E.McCumber. *Journ. of Appl. Phys.*, v. 39, No. 7, p. 3113 (1968).

Рукопись поступила в издательский отдел  
25 января 1973 года.

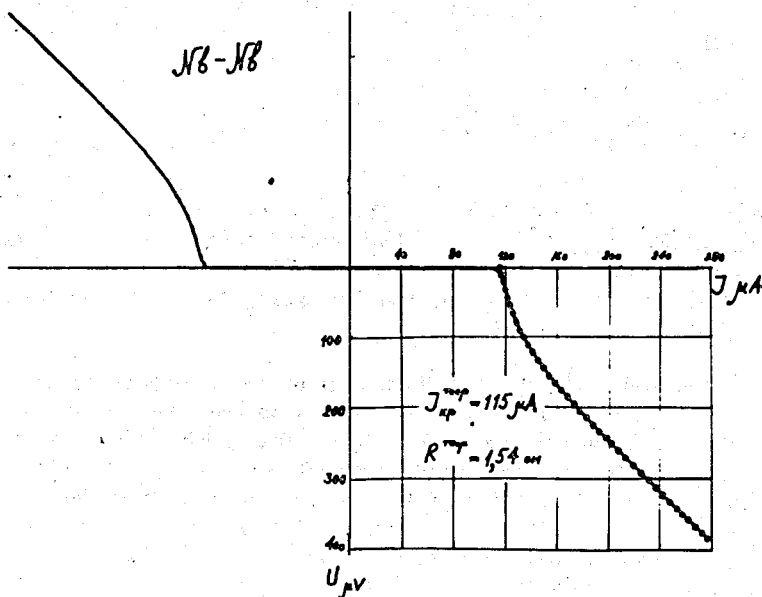


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика точечного контакта ниобий-ниобий, снятая на постоянном токе при температуре 4,2 К.