

## ЗАВИСИМОСТЬ ИЗБЫТОЧНОГО ТОКА В СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ТОЧЕЧНЫХ КОНТАКТАХ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И НАПРЯЖЕНИЯ

Ю.Я. Дивин, Ф.Я. Надь

Экспериментально установлено, что в соответствии с имеющейся микроскопической теорией для коротких сверхпроводящих контактов избыточный ток в области напряжений  $V > \Delta/e$  возрастает по закону  $\text{th}(eV/2kT)$  и его максимальная величина при больших напряжениях ( $eV \gtrsim 5kT$ ) зависит от температуры так же, как величина энергетической щели  $\Delta(T)$ . Из полученных результатов следует, что теоретически рассмотренный механизм избыточного тока применим и для более длинных контактов.

Одним из существенных отличий экспериментально наблюдаемых вольт-амперных характеристик (ВАХ) слабосвязанных сверхпроводников (мостиков и контактов) от ВАХ, следующих из резистивной модели, является наличие избыточного тока  $\delta I$ , где  $\delta I$  — независимая от напряжения  $V$  (при больших  $V$ ) добавка к току  $I(V) = V/R$ . Несмотря на то, что избыточный ток впервые наблюдался более десяти лет назад [1], до недавнего времени его физическая природа была не ясна. Различные механизмы избыточного тока, основанные либо на чисто феноменологических соображениях [2], либо применимые лишь в случае бесщелевых сверхпроводников [3], не объясняют всех экспериментально наблюдаемых особенностей этого явления. В частности, из работ [2, 3] следует, что величина избыточного тока  $\delta I$  пропорциональна критическому току слабой связи  $I_c$ . Однако на опыте нами наблюдалось, что характерным масштабом избыточного тока является не  $I_c$ , а величина энергетической щели сверхпроводника  $\Delta$  [4]. Совсем недавно на основе микроскопической теории было получено выражение для тока в точечном контакте (или коротком мостике) с длиной  $L < \xi(T) (1 - T/T_c)^{1/4} = \eta(T)$  [5]:

$$I = V/R + (\Delta/R) (\pi^2/4 - 1) \text{th}(eV/2kT),$$

справедливое при  $eV > \Delta$  и любых температурах  $T$ . В данной работе экспериментально изучена зависимость  $\delta I$  от  $V$  и  $T$ , проведено сопоставление полученных результатов с теорией [5] и сделано предположение о ее применимости и для более длинных контактов с  $L \gtrsim \eta(T)$ .

Измерения проводились на стабильных сверхпроводящих точечных контактах (СТК) Nb — Nb, основные джозефсоновские свойства которых определяются существующими в них микрозакоротками [4]. Измерялись ВАХ контактов с сопротивлениями  $R \cdot 10^{-1} - 10^3 \text{ Ом}$  в области температур 4,2 — 10 К и напряжений до десятков мВ. Все исследованные контакты в указанных областях температур и сопротивлений обладали выраженными избыточным и критическим токами. Соотношение между экспериментальными значениями избыточного  $\delta I$  и критического  $I_c$  токов было таким, что при  $T \ll T_c$   $\delta I \sim I_c$ , а при  $T \lesssim T_c$   $\delta I \gg I_c$ . Поэтому для  $T \lesssim T_c$

измеряемый ток  $I(V)$  почти во всем диапазоне напряжений представляет собой сумму омического тока  $V/R$  и избыточного тока  $\delta I(V)$ . Для  $T \ll T_c$  в суммарный ток при  $eV \gtrsim \Delta$  будут вносить вклад и другие компоненты, например, джозефсоновский ток. По этим причинам зависимость избыточного тока от напряжения определялась нами по разности экспериментальных ВАХ контактов при  $T \lesssim T_c$  ( $I = V/R + \delta I$ ) и при  $T > T_c$  ( $I = V/R$ ).

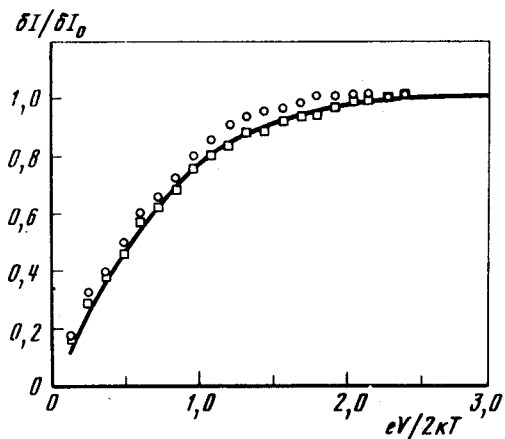


Рис. 1. Зависимость избыточного тока  $\delta I$  СТК от напряжения  $V$  для двух температур  $T$ , К:  $\circ$  — 9,57,  $\square$  — 9,66. Избыточный ток нормирован на его значение  $\delta I_0$  при  $eV \gtrsim 5 kT$ . Сопротивление  $R$  СТК в нормальном состоянии равно 5,9 Ом. Сплошная линия —  $\text{th}(eV/2kT)$

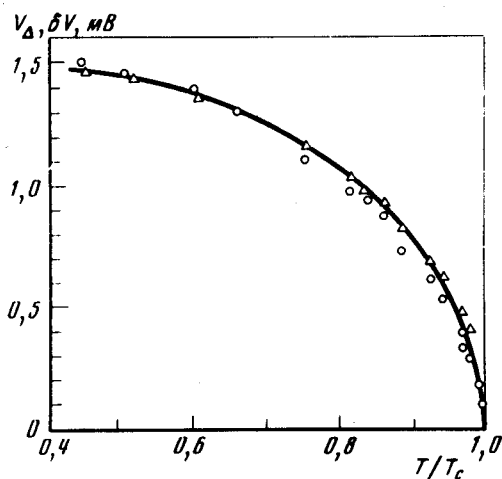


Рис. 2. Температурная зависимость напряжения  $\delta V(0)$ , равного произведению избыточного тока  $\delta I$  на сопротивление  $R$ , и щелевой особенности  $V_\Delta$  ( $\Delta$ ) для контакта с  $R = 5,9$  Ом. Сплошная линия — зависимость  $\Delta(T)$  из теории БКШ

На рис. 1 представлены зависимости  $\delta I(V)$  для контакта с  $R = 5,9$  Ом при двух фиксированных температурах 9,57 и 9,66 К ( $T_c = 9,87$  К), начиная с напряжений  $eV \gtrsim \Delta$  и до больших напряжений  $eV \gtrsim 5 kT$ , когда  $\delta I$  практически не изменялась. На значения избыточного тока при  $eV \gtrsim 5 kT$  были нормированы все величины  $\delta I$ . Сплошная кривая соответствует зависимости  $\text{th}(eV/2kT)$ , следующей из микроскопической теории [5]. Видно, что зависимости  $\delta I(V)$  — экспериментальная и теоретическая — хорошо согласуются.

Температурная зависимость избыточного тока, умноженного на сопротивление контакта,  $\delta V = \delta I R$  для того же контакта с  $R = 5,9$  Ом представлена на рис. 2. Величина  $\delta V$  измерялась при напряжении  $V \approx 4$  мВ,

когда во всем температурном интервале, во-первых,  $eV/2kT \approx 2,5$  и значения  $\text{th}(eV/2kT)$  отличаются от единицы не более, чем на 2%, во-вторых, выполняется также условие  $eV > \Delta$ . Одновременно на рис.2 нанесены экспериментальные точки зависимости от температуры напряжения  $V_{\Delta}$ , соответствующего щелевым особенностям ВАХ контакта, т.е. фактически температурной зависимости величины энергетической щели. Как видно из рис.2, экспериментальные зависимости  $\delta V(T)$  и  $V_{\Delta}(T)$  хорошо совпадают, а вместе они количественно согласуются с зависимостью  $\Delta(T)$  по теории БКШ. Таким образом, экспериментальная и теоретическая [5] (см. приведенное выше выражение для тока) зависимости  $\delta V(T)$  по своему характеру одинаковы, однако по величине теория дает значение  $\delta V$  в 1,5 раза большее. Причинами такого расхождения могут являться особенности механизма проводимости реальных СТК [4] и тепловые эффекты в них (особенно при малых  $R$ ).

Выше уже отмечалось, что микроскопическая теория [5] строго применима только для случая контактов с длиной  $L < \eta(T)$ . Размеры микрозакоротов в исследованных нами контактах с  $R \sim 10$  Ом согласно оценкам равны (по порядку величины): длина  $L \sim 100$  Å, диаметр  $\sim 10$  Å. Для таких контактов с учетом того, что длина свободного пробега электрона определяется диаметром микрозакоротов, условие  $L < \eta(T)$  выполняется при  $T \sim T_c$  и нарушается при понижении температуры ниже  $T_c - T \sim 1$  К. Об этом свидетельствует также изменение характера ВАХ контакта в зависимости от  $T$  [4]. При  $T \sim T_c$  ВАХ при малых  $V$  имеет гиперболический вид, что находится в соответствии с теорией для коротких контактов  $L < \eta(T)$  [6]. При понижении температуры, когда  $T_c - T \gtrsim 1$  К на ВАХ СТК появляется изгиб, который согласно теории характерен для контактов с длиной  $\eta(T) < L < \xi(T)$  и обусловлен стимулированием  $I_c$  вследствие осцилляций стенок потенциальной ямы в перешейке контакта при токах  $I \gtrsim I_c$  [7]. Аналогичный изгиб появляется на ВАХ пленочных мостиков, когда на некотором удалении от  $T_c$  начинает выполняться условие  $\eta < L < \xi$  [8].

Несмотря на переход от случая  $L < \eta$  к случаю  $L > \eta$ , как показывают наши измерения (рис.2), избыточный ток сохраняется, а его зависимость от  $T$  следует зависимости  $\Delta(T)$ . Это, по-видимому, указывает на то, что предложенный в [5] механизм избыточного тока применим и к случаю  $\eta(T) < L < \xi(T)$ .

Авторы благодарны С.Н.Артеменко и А.Ф.Волкову за полезные обсуждения результатов работы.

Институт радиотехники  
и электроники  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
11 марта 1979 г.

### Литература

- [1] J.I.Pankove. Phys. Lett., 21, 406, 1966.
- [2] B.S.Deaver, J.M.Pierce. Phys. Lett., 38A, 81, 1972.
- [3] К.К.Лихарев, Л.А.Якобсон. ЖЭТФ, 68, 1150, 1975.
- [4] Ю.Я.Дивин, Ф.Я.Надь. ФНТ, 4, 1105, 1978.

- [ 5 ] С.Н.Артеменко, А.Ф.Волков, А.В.Зайцев. Письма в ЖЭТФ, 28, 637, 1978; 29, 172, 1979.
- [ 6 ] С.Н.Артеменко, А.Ф.Волков, А.В.Зайцев. Материалы 20-го Всесоюзного совещания по физике низких температур, ч. III, стр. 261, 1979.
- [ 7 ] Л.Г.Асламазов, А.И.Ларкин. ЖЭТФ, 70, 1340, 1976.
- [ 8 ] В.Н. Губанков, В. П.Кошелец, Г.А.Овсянников . ЖЭТФ, 73, 1435, 1977.
-