

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В КОНТАКТАХ СВЕРХПРОВОДНИК – НОРМАЛЬНЫЙ МЕТАЛЛ

В.Н.Губанков, Н.М. Марголин

Экспериментально обнаружены щелевые особенности, избыточный ток и немонотонная температурная зависимость первой производной ВАХ микроконтактов нормальный металл – сверхпроводник с непосредственной проводимостью, связанная с изменением механизма проводимости при понижении температуры.

В ряде работ [1, 2] отмечалось существование нелинейной вольт-амперной характеристики (ВАХ) по постоянному току и нелинейное поведение в микроволновом поле структуры сверхпроводник – сужение – нормальный металл ($S - c - N$) с сужением (c) из S либо из N , в которой реализуется непосредственный контакт сверхпроводника с нормальным металлом. Однако подробные исследования нелинейных явлений и причин их возникновения в $S - c - N$ контактах не проводились. Между тем было интересно установить, влияет ли на нелинейность ВАХ энергетическая щель в спектре электронных возбуждений сверхпроводника и, если это так, оценить степень этого влияния.

В данной работе обсуждаются результаты экспериментальных исследований температурной эволюции ВАХ $S - c - N$ контактов субмикронных размеров. Были обнаружены особенности, явно связанные с наличием энергетической щели: характерные минимумы в зависимостях первой производной ВАХ dV/dI от V ; эффект избыточного тока. Оказалось, что свойства $S - c - N$ контактов заметно отличаются от свойств туннельных слабосвязанных структур $S - I - N$ [3], в которых перенос электрического заряда в области слабой связи осуществляется за счет туннелирования квазичастиц сквозь слой изолятора (I).

Объектом исследования служили точечные контакты, образованные прижатием заостренной (радиус закругления ≈ 3 мкм) танталовой проволоки к плоской поверхности медного электрода. В данной работе об-

суждаются контакты с сопротивлением в нормальном состоянии $R_N = 20 \div 200$ Ом (контакты с $R_N > 0,5$ кОм имели ВАХ, характерные для туннельных $S-I-N$ переходов).

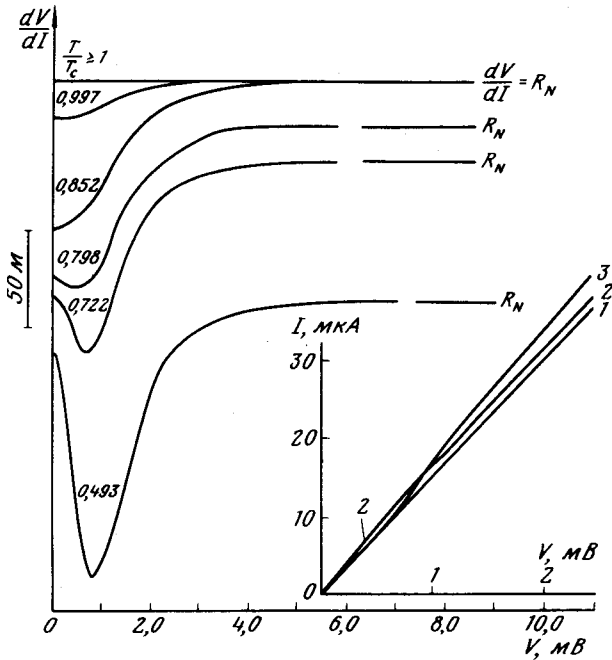


Рис. 1. Зависимости dV/dI от V при различных температурах (цифры у кривых — значения T/T_c). Кривые при $T/T_c \lesssim 0,798$ смещены вниз относительно начальных кривых. Контакт с $R_N = 65,8$ Ом. На вставке показано семейство ВАХ: 1 — $T/T_c \gtrsim 1$, 2 — $T/T_c \lesssim 1$, 3 — $T/T_c \ll 1$

На рис. 1 приведены типичные зависимости $\frac{dV}{dI}(V)$ для контакта с $R_N = 65,80$ Ом в диапазоне $T/T_c \approx 1 \div 0,5$. При $\frac{T}{T_c} \gtrsim 1$ $\frac{dV}{dI}(V) = \text{const} = R_N$ в области токов и напряжений, где генерация фононов быстрыми электронами [4] еще не сказывается на виде ВАХ. При понижении T ниже T_c наблюдается уменьшение dV/dI в области $V=0$ $\frac{dV}{dI} \Big|_{V=0} < R_N$. Как известно, такая температурная эволюция вблизи T_c свидетельствует о наличии прямой микрозакоротки между S и N электродами [2]. При дальнейшем понижении T на зависимостях $\frac{dV}{dI}(V)$ появляются характерные минимумы, смещающиеся по мере уменьшения T в область больших V и соответствующие величине $\Delta(T)/e$. Одновременно величина dV/dI , измеренная при $V=0$ ($\frac{dV}{dI} \Big|_{V=0}$), начинает увеличиваться и достигает значения $0,957 R_N$ при минимальной реализованной в эксперименте $T/T_c \approx 0,49$.

Структура ВАХ для трех предельных случаев ($T \gtrsim T_c$, $T \lesssim T_c$, $T \ll T_c$) показана на вставке к рис. 1. Для того же контакта температурная зависимость $\left. \frac{dV}{dI} \right|_{V=0}$ с характерным минимумом при $T/T_c = 0,817$ представлена на рис. 2. Видно, что минимум $\left. \frac{dV}{dI} \right|_{V=0} \approx 0,87$ и во всем температурном интервале величина $\left. \frac{dV}{dI} \right|_{V=0}$ не превышает R_N .

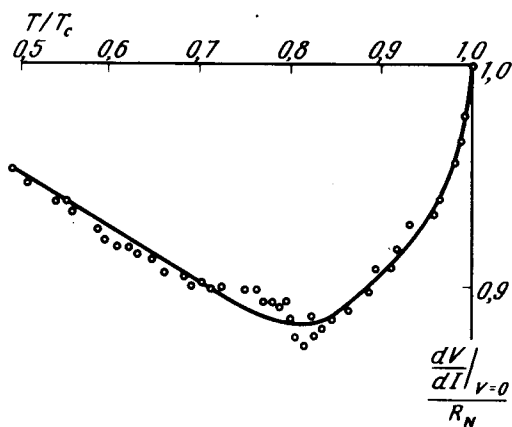


Рис. 2. Зависимость $\left(\left. \frac{dV}{dI} \right|_{V=0} \right) / R_N$ от температуры

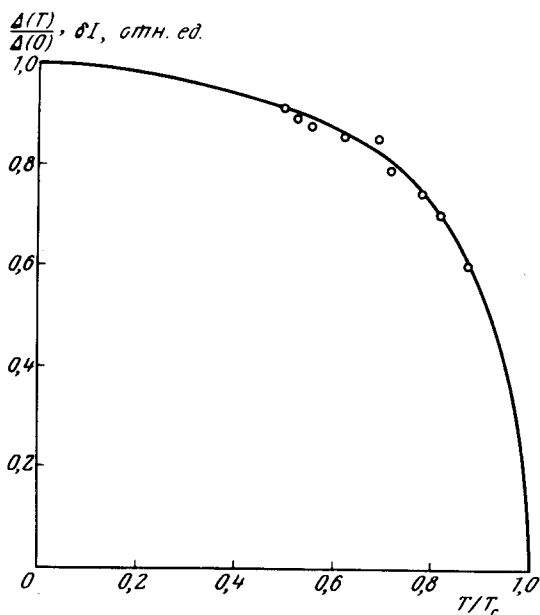


Рис. 3. Зависимость $\delta I(T)$ (o — результаты измерений); сплошная линия — теоретическая зависимость $\Delta I / \Delta(0)$

Из анализа структуры ВАХ и зависимости $\left. \frac{dV}{dI} \right|_{V=0}(V)$ при различных T следует, что в $S-c-N$ -контактах малых размеров присутствует избыточный ток δI , известный для $S-c-S$ -контактов [5] и отсутствующий в туннельных сверхпроводниковых структурах с изолирующим сло-

ем (эффект избыточного тока заключается в выходе ВАХ при больших напряжениях на прямые, смещенные относительно $V = IR_N$ на величину $\delta I(T)$, не зависящую от V). На рис. 3 приведена зависимость нормированной величины $\delta I(T)$.

Описанная эволюция ВАХ существенно отличается от зависимостей ВАХ(T) родственных по типу и геометрии слабосвязанных сверхпроводниковых структур. Как известно, при изменении T от T_c до близких

к нулю величина $\left. \frac{dV}{dI} \right|_{V=0}$ в туннельных [3] $S-I-N$ переходах стре-

мится от R_N к бесконечности; в $S-c-S$ -контактах она остается равной нулю, а при напряжениях $V = 2\Delta/ne$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) наблюдаются максимумы dV/dI , обусловленные разрушением куперовских пар за счет поглощения собственного джозефсоновского излучения¹⁾.

Проведенные недавно [6] теоретический анализ $S-c-N$ -контактов малых размеров (с диаметром микрозакоротки $a < \zeta(T)(1 - T/T_c)^{1/4}$

это условие удовлетворяется в наших экспериментах) показал, что в

температурной зависимости $\left. \frac{dV}{dI} \right|_{V=0}$ действительно должен существовать минимум, причем при $T \rightarrow 0$ $\left. \frac{dV}{dI} \right|_{V=0}$ асимптотически стре-

мится к R_N , что соответствует данным эксперимента. Наличие миниму-

ма $\left. \frac{dV}{dI} \right|_{V=0}$ объясняется следующими причинами. Согласно теории

[6] в $S-c-N$ контактах могут существовать одновременно два механизма проводимости: вследствие переноса заряда квазичастицами

1) с энергией $E > \Delta$ и 2) с энергией $E < \Delta$, проходящими из N -области в S , с преобразованием в S -области в куперовские пары. Присутствие щели в S -области не препятствует переносу заряда через $S-N$ границу квазичастицами с $E < \Delta$, так же, как это имеет место и при андреевском отражении. Возникновение ниже T_c второго механизма приводит к возрастанию суммарной проводимости контакта; при дальнейшем понижении T проводимость, обусловленная первым механизмом, уменьшается из-за уменьшения числа квазичастиц с энергией $E > \Delta$, тогда как проводимость за счет второго механизма стремится к постоянной величине, определяемой числом квазичастиц в интервале $E \lesssim 2\Delta(T)$, и становится доминирующей. Это обстоятельство вызывает медленное возрастание

$\left. \frac{dV}{dI} \right|_{V=0}$ при T заметно меньших T_c .

Расчет [6] свидетельствует также о наличии минимума dV/dI при $V = \Delta/e$, обусловленного возрастанием числа квазичастиц, непосредственно проходящих $S-N$ границу, и эффекта избыточного тока, который должен проявляться при $V > \Delta/e$ и связан с существованием второго механизма проводимости (т. е. является дополнительным призна-

¹⁾Контрольные эксперименты показали, что при облучении таких $S-c-N$ -контактов СВЧ излучением джозефсоновские эффекты в них отсутствуют, в частности, на ВАХ не наблюдались известные ступеньки тока.

ком образования прямого контакта сверхпроводник — нормальный металл). Как видно из рис. 1, выход ВАХ на прямую параллельную $V = I R_N$ (т. е. выход dV/dI на постоянный уровень R_N , $\frac{dV}{dI} = R_N$) действительно происходит при $V > \Delta/e$. Экспериментальная величина $\delta I(T)$ оказывается пропорциональной $\Delta(T)$ (рис. 3), в соответствии с теорией.

Авторы благодарны А.Ф.Волкову за полезные обсуждения.

Институт радиотехники и электроники
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
12 марта 1979 г.

Литература

- [1] И.Я.Краснополин, С.М.Хайкин. Письма в ЖЭТФ, **4**, 290, 1966; O. Iwanshyn, H. J. H. Smith. Phys. Rev., **B6**, 120, 1972; U. Kaiser-Dieckhoff. Conf. SQUID-77, C7, 54, Berlin, 1977.
 - [2] Ю.Г.Бевза, В.И.Карамушко, И.М.Дмитренко. ЖТФ, **47**, 646, 1977.
 - [3] Туннельные явления в твердых телах, гл. 19, под ред. Э.Бурштейна и С.Лундквиста, М., изд Мир, 1973.
 - [4] Н.И.Богатина, И.К.Янсон. ЖЭТФ, **63**, 1312, 1972.
 - [5] J.I.Ponkove. Phys. Rev., **21**, 406, 1966.
 - [6] С.Н.Артеменко, А.Ф.Волков, А.В.Зайцев. Письма в ЖЭТФ, **28**, 637, 1978; S.N.Artemenko, A.F.Volkov, A.V.Zaitsev. Solid State Comm., **30**, №12, p. 771, 1979.
-