

Электропроводность сверхпроводящих микроконтактов, содержащих магнитные примеси

С.И. Белобородько

*Физико-технический институт низких температур им. Б.И.Веркина НАН Украины
пр. Ленина, 47, г. Харьков, 61103, Украина
E-mail: biloborodko@ilt.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 26 марта 2003 г.

Исследована нелинейная электропроводность контактов сверхпроводник – сужение – нормальный металл, содержащих магнитные примеси. Проанализировано влияние прозрачности потенциального барьера, который возникает на границе контактирующих металлов, на зависимость проводимости и величину избыточного тока. Показано, что в случае малой прозрачности дифференциальная проводимость такого контакта пропорциональна плотности электронных состояний.

Досліджено нелінійну електропровідність контактів надпровідник – звуження – нормальний метал, що містять магнітні домішки. Проаналізовано вплив прозорості потенціального бар'єра, який виникає на границі металів, що контактують, на залежність провідності та величину надлишкового струму. Показано, що у разі малої прозорості диференційна провідність такого контакту пропорційна густині електронних станів.

PACS: 74.50.+r

Изучение особенностей нелинейной проводимости $\sigma(V) = dI/dV$ и температурной зависимости избыточного тока I_{exc} точечных контактов сверхпроводник – сужение – нормальный металл ($S-c-N$) позволяет определять величину и температурную зависимость энергетической щели $\Delta_0(T)$ [1,2]. Так для чистого контакта ($l_i \gg a$, l_i – упругая длина свободного пробега электронов, a – диаметр контакта)

$$I_{\text{exc}} = \frac{4}{3} \frac{1}{R} \Delta_0(T), \quad (1)$$

где R – сопротивление контакта в нормальном состоянии.

Наличие в сверхпроводнике магнитных примесей, как было показано в работе [3], влияет на вольт-амперную характеристику и избыточный ток $S-c-N$ контакта. По мере увеличения концентрации магнитных примесей особенность на нелинейной проводимости контакта, связанная с энергетической щелью, начинает размываться и сдвигаться в сторону меньших энергий, при этом избыточный ток уже не определяется величиной энергетической

щели, а зависит от значения параметра порядка $\Delta(T)$, связанного с $\Delta_0(T)$ соотношением [4]

$$\Delta_0(T) = \Delta(T)(1 - g^{2/3})^{3/2} \quad (2)$$

($g = 1/(\Delta(T)\tau_s)$, τ_s – время свободного пробега при рассеянии на примесях с переворотом спина).

При $g > 1$ щель в спектре сверхпроводника равна нулю, в то время как параметр порядка остается отличным от нуля в некоторой области концентраций магнитных примесей (бесщелевая область). В этой области [3]

$$I_{\text{exc}} = \frac{\pi}{8} \frac{1}{R} \Delta(T)^2 \tau_s \operatorname{th} \left(\frac{eV}{2T} \right) \quad (3)$$

происходит изменение температурной зависимости избыточного тока, который вблизи T_c пропорционален $(1 - T/T_c)$, в то время как для сверхпроводника без магнитных примесей согласно (1) $I_{\text{exc}} \sim (1 - T/T_c)^{1/2}$

В работе [3] рассмотрен случай $S-c-N$ контакта, содержащего магнитные примеси, в случае прозрачности границы $d = 1$. В эксперименте из-за различия параметров контактирующих металлов

величина $d < 1$. Поэтому представляется интересным изучить влияние произвольной прозрачности потенциального барьера, возникающего на границе, на нелинейную электропроводность и избыточный ток $S-c-N$ контактов, содержащих магнитные примеси.

$$I(V) = \frac{1}{R} \int_{-\infty}^{+\infty} d\varepsilon \left[\text{th} \left(\frac{\varepsilon + eV}{2T} \right) + \text{th} \left(\frac{\varepsilon - eV}{2T} \right) \right] |(2d^{-1} - 1) + G_\varepsilon|^{-2} \{ |1 + G_\varepsilon|^2 + |F_\varepsilon|^2 + 4(d^{-1} - 1) \text{Re}(G_\varepsilon) \}, \quad (4)$$

$$G_\varepsilon = u/(u^2 - 1)^{1/2}; \quad F_\varepsilon = 1/(u^2 - 1)^{1/2},$$

где $u = \varepsilon/\Delta_\varepsilon$ (Δ_ε — комплексный, зависящий от энергии параметр порядка сверхпроводника [4]) определяется из уравнения

$$\frac{\varepsilon}{\Delta(T)} = u[1 - g(1 - u^2)^{-1/2}]. \quad (5)$$

В отсутствие магнитных примесей τ_s стремится к бесконечности и формула (4) совпадает с выражением для тока, полученным в работе [2].

Для объяснения экспериментальных исследований вольт-амперных характеристик $S-c-N$ контактов с магнитными примесями [6,7] часто используется модифицированная теория Блондера—Тинкхама—Клапвика (БТК) [8], учитывающая размытие плотности квазичастичных состояний, связанное с конечным временем затухания электронов. Формально результаты теории БТК в рамках рассматриваемой модели получаются в режиме сильного распаривания ($|u| \gg 1$). В этом случае из уравнения (5) для величины u получаем

$$u = \frac{\varepsilon}{\Delta(T)} + ig \quad (i = (-1)^{1/2}). \quad (6)$$

При $eV \gg \max(\Delta(T), 1/\tau_s)$, представляя (4) в виде $I = V/R + I_{\text{exc}}$, для избыточного тока I_{exc} находим

$$I_{\text{exc}} = \frac{\pi}{8} \frac{1}{R_n} \Delta(T)^2 d \tau_s \text{th} \left(\frac{eV}{2T} \right), \quad (7)$$

здесь R_n — перенормированное сопротивление контакта в нормальном состоянии, $R_n = R(d = 1)/d$. Из сравнения формул (3) и (7) следует, что уменьшение прозрачности барьера приводит к уменьшению избыточного тока.

Дифференцируя выражение (4), для проводимости $\sigma(V)$ при $T = 0$ имеем

Используя стандартный метод решения системы уравнений для функций Грина в $S-c-N$ контакте [5] с граничными условиями на поверхности раздела металлов, полученными в [2], для вольт-амперной характеристики контакта имеем

$$\sigma(V) = \frac{1}{R} |(2d^{-1} - 1) + G_\varepsilon|^{-2} \times \{ |1 - G_\varepsilon|^2 + |F_\varepsilon|^2 + 4(d^{-1} - 1) \text{Re}(G_\varepsilon) \}_{\varepsilon=eV}. \quad (8)$$

Зависимость $\sigma(V)$ для различных значений d показана на рис. 1. В отличие от результатов работы [3], проводимость имеет минимум при нулевых значениях V («нулевая» аномалия, часто наблюдаемая экспериментально [6]).

При уменьшении прозрачности барьера характер зависимости проводимости переходит от режима контактов с непосредственной проводимостью к туннельному, для которых $\sigma(V)$ пропорциональна плотности электронных состояний. Нормированная дифференциальная проводимость (при $d = 0,1$, $g = 0,1$) и плотность состояний, детали вычисления которой мы не приводим, изображены на рис. 2. Видно, что кривые практически совпадают.

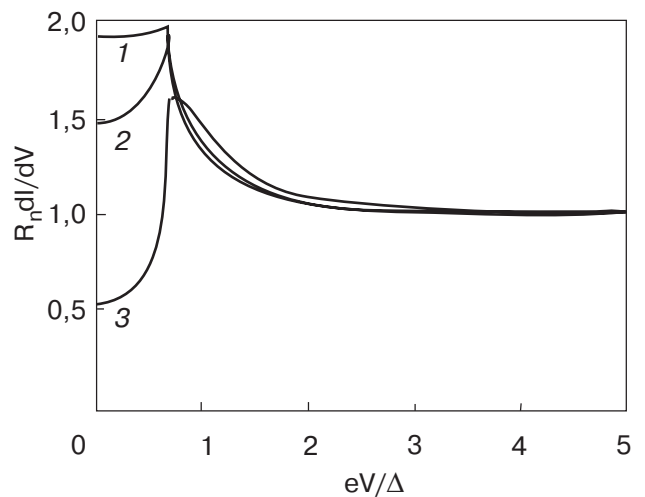


Рис. 1. Зависимость нормированной проводимости $R_n dI/dV$ для $g = 1/(\Delta\tau_s) = 0,1$ ($\Delta_0/\Delta = 0,694$) от eV/Δ при различных d : 0,99 (1); 0,9 (2); 0,56 (3).

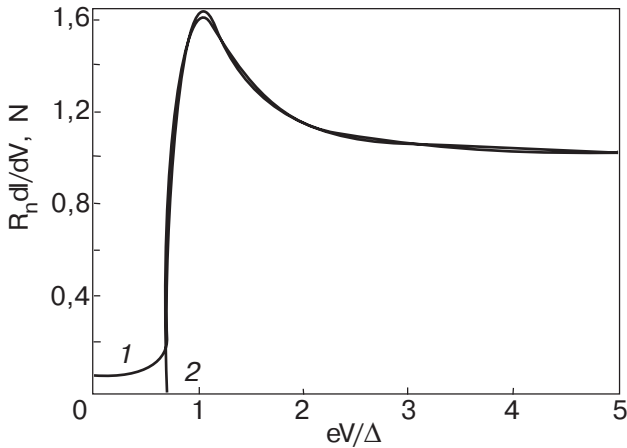


Рис. 2. Нормированная проводимость $R_n dI/dV$ для $g = 1/(\Delta\tau_s) = 0,1$ ($\Delta_0/\Delta = 0,694$) от eV/Δ при $d = 0,1$ (1) и плотность состояний электронов N (2).

Зависимость $\sigma(V)$ при $d = 0,56$ для различных значений g представлена на рис. 3. Как и при $d = 1$ максимум на кривой $\sigma(V)$ с увеличением g сдвигается в сторону меньших энергий, а относительная величина этого максимума уменьшается.

Результаты настоящей работы показывают, что в случае, когда прозрачность барьера в $S-c-N$ контакте с магнитными примесями меньше единицы, возникает минимум электропроводности при нулевом напряжении. Уменьшение прозрачности вызывает падение избыточного тока. В пределе малой прозрачности дифференциальная проводимость контакта пропорциональна плотности электронных состояний.

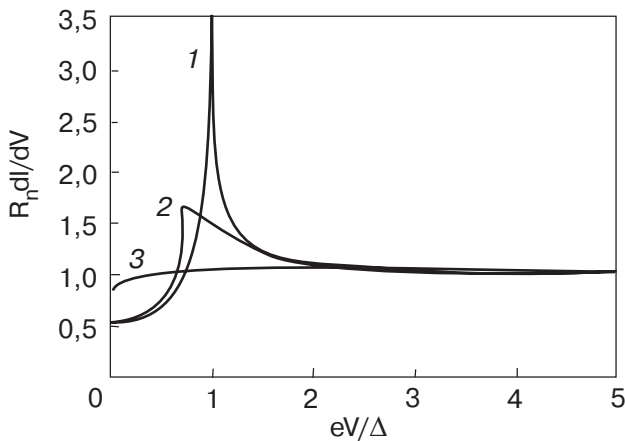


Рис. 3. Зависимость нормированной проводимости $R_n dI/dV$ для $d = 0,56$ при различных значениях $g = 1/(\Delta\tau_s)$: 0 (1); 0,1 (2); 1,1 (3).

В заключение автор выражает благодарность А.Н. Омелянчуку и И.К. Янсону за полезное обсуждение.

1. А.В. Зайцев, *ЖЭТФ* **78**, 221 (1980).
2. А.В. Зайцев, *ЖЭТФ* **86**, 1742 (1984).
3. С.И. Белобородько, А.Н. Омелянчук, *ФНТ* **17**, 994 (1991).
4. А.А. Абрикосов, В.П. Горьков, *ЖЭТФ* **39**, 1781 (1960).
5. В.А. Хлус, А.Н. Омелянчук, *ФНТ* **11**, 543 (1985).
6. Yu.G. Naidyuk, A.V. Moskalenko, I.K. Yanson, and C. Geibel, *Fiz. Nizk. Temp.* **24**, 495 (1998).
7. A.V. Moskalenko, Yu.G. Naidyuk, I.K. Yanson, M. Hedo, Y. Inada, Y. Onuki, Y. Haga, and E. Yamamoto, *Fiz. Nizk. Temp.* **27**, 831 (2001).
8. A. Plecenik, M. Grajcar, S. Benacka, P. Seidel, and A. Pfuch, *Proc. R. B.* **49**, 10016 (1994).

Electrical conductivity of superconducting point contacts containing magnetic impurities

S.I. Beloborod'ko

The nonlinear electrical conductivity of a superconductor—contraction—normal metal contacts containing magnetic impurities is studied. The influence of transparency of a potential barrier which arises at the boundary of the contact metals on the dependence of conductivity and the magnitude of excess current is analyzed. It is shown that in the limit of low transparency the differential conductivity of such contact is proportional to the density of electronic states.