

Особенности плотности состояний в SN-контактах

Я. В. Фоминов^{1,2*}, А. А. Мазаник^{3,4}

¹Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау РАН, Черноголовка

²Лаборатория физики конденсированного состояния, НИУ «Высшая школа экономики», Москва

³Московский физико-технический институт, Долгопрудный

⁴Лаборатория теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова, ОИЯИ, Дубна

*fominov@itp.ac.ru

Изучена поверхностная плотность состояний $\nu(E)$ в пленке нормального металла (N), контактирующей с объемным сверхпроводником (S). Система предполагается диффузной, SN-граница – прозрачной. В пределе тонкого N-слоя (по сравнению с длиной когерентности) аналитически найдены три типа особенности плотности состояний на энергии, равной параметру порядка в объеме сверхпроводника Δ_0 . (i) В отсутствие обратного эффекта близости особенность имеет вид галочки с $\nu(\Delta_0) = 0$, если толщина N-слоя d_N меньше критического значения. Такой вид особенности был предсказан ранее в работе [1]. (ii) При возникновении обратного эффекта близости галочка немедленно приподнимается, так что $\nu(\Delta_0) > 0$. (iii) При дальнейшем усилении обратного эффекта близости $\nu(E)$ постепенно трансформируется в вертикальную особенность (характеризуемую точкой перегиба при $E = \Delta_0$ с бесконечной производной). Такой тип особенности был ранее получен в работе [2].

Характерными пространственными масштабами для двух слоев являются длины когерентности $\xi_N = \sqrt{D_N/2\Delta_0}$ и $\xi_S = \sqrt{D_S/2\Delta_0}$, где $D_{S(N)}$ – коэффициенты диффузии в нормальном состоянии. Сила эффекта близости (как прямого, так и обратного) определяется отношением материальных параметров двух веществ:

$$\kappa = D_S \sigma_N^2 / D_N \sigma_S^2.$$

Здесь $\sigma_{S(N)}$ – проводимости двух веществ в нормальном состоянии. Роль параметра κ , с точки зрения решения уравнений Узаделя на спектральные углы $\theta_{S(N)}$, ясна из граничного условия на SN-границе:

$$\frac{d\theta_S(0)}{d(x/\xi_S)} = \sqrt{\kappa} \frac{d\theta_N(0)}{d(x/\xi_N)}.$$

Предел $\kappa \rightarrow 0$ соответствует абсолютно жесткому сверхпроводнику (т. е. отсутствию обратного эффекта близости), тогда как предел $\kappa \rightarrow \infty$ соответствует мягкому сверхпроводнику (сильный обратный эффект близости).

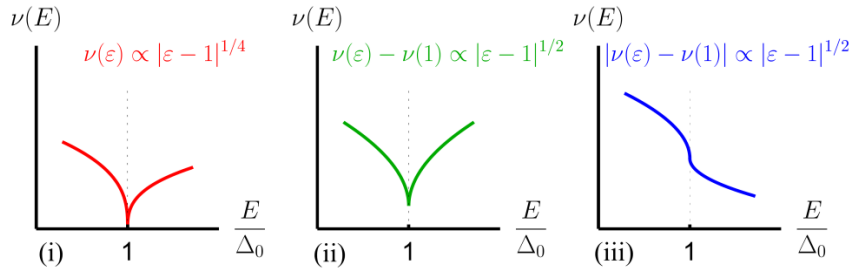


Рис. 1. Три различных типа особенности плотности состояний при $E = \Delta_0$: (i) При $\kappa = 0$ (предел абсолютно жесткого S, нет обратного эффекта близости) особенность имеет вид полной «галочки» с проседанием до нуля, $\nu(\Delta_0) = 0$; (ii) при $\kappa > 0$ (предел жесткого S, очень слабый обратный эффект близости) галочка приподнимается, так что минимальная плотность состояний оказывается конечна, $\nu(\Delta_0) > 0$; (iii) при $\kappa \geq (d_N/\xi_N)^4$ (кроссовер к режиму мягкого S с заметным обратным эффектом близости) поведение плотности состояний $\nu(E)$ постепенно трансформируется в вертикальную особенность (монотонная зависимость с точкой перегиба, т. е. с бесконечной производной при $E = \Delta_0$). В полученных нами результатах приподнятая галочка оказывается симметричной, тогда как полная галочка и вертикальная особенность – асимметричными

Три характерных типа особенности плотности состояний показаны на рис. 1. В работе найдены аналитические формулы, описывающие все эти особенности. В абсолютно жестком пределе ($\kappa = 0$) особенность типа полной галочки имеет место до тех пор, пока d_N меньше критической толщины: $d_N < d_N^{(cr)} \approx 2,86 \xi_N$.

Режимы (ii) и (iii) исправляют сделанные ранее в работе [1] предсказания. В целом получается согласованная картина эволюции типа особенности от полной галочки до вертикальной особенности с ростом параметра κ . Режим (ii) оказывается «недостающим элементом», показывающим механизм эволюции. Ранее такой тип особенности аналитически не изучался. В режимах (i)–(iii) была также найдена энергетическая щель E_g и численно поведение плотности состояний $\nu(E)$ вблизи E_g .

Результаты опубликованы в работе [3]. Работа выполнена в рамках госзадания ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН и Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.

1. A. Levchenko, *Crossover in the local density of states of mesoscopic superconductor/normal-metal/superconductor junctions*, Phys. Rev. B, **77**, 180503(R) (2008).

2. Ya.V. Fominov, A.A. Mazanik, M.V. Razumovskiy, *Surface density of states in superconductors with inhomogeneous pairing constant: Analytical results*, Phys. Rev. B, **100**, 224513 (2019).

3. A.A. Mazanik, Ya.V. Fominov, *Peculiarities of the density of states in SN junctions*, Annals of Physics, **449**, 169199 (2023).