

Андреевские состояния в ферромагнитном делителе куперовских пар

П.Л. Строганов¹, Я.В. Фоминов^{2,1}

¹Московский физико-технический институт (государственный университет)

²Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН

Рассмотрена задача об андреевских уровнях в модельной системе. Система представляет собой СКВИД, рукавами которого являются неколлинеарно намагниченные ферромагнетики (см. Рис.1). Подобные системы представляют интерес ввиду возможности получения пар запутанных электронов путем спинового разделения куперовских пар.

Целью является расчет спектра андреевских связанных состояний, который в дальнейшем будет использован для вычисления джозефсоновского ток–фазового соотношения перехода. Учет только дискретного спектра возбуждений корректен для короткого перехода [1]

Расчет проведен в формализме матриц рассеяния [2].

Общая схема расчета спектра имеет следующий вид (см. Рис.1.а). Обозначим волны слева от перехода a_1 , b_1 и справа от перехода a_2 , b_2 . С одной стороны они связаны матрицей S рассеяния перехода

$$\begin{pmatrix} \mathbf{b}_1 \\ \mathbf{b}_2 \end{pmatrix} = S \begin{pmatrix} \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

С другой стороны они связаны матрицей отражения границы переход-сверхпроводник (напомним, что рассматриваются только подщелевые состояния)

$$\begin{pmatrix} \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Sigma_1 & 0 \\ 0 & \Sigma_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{b}_1 \\ \mathbf{b}_2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Условие существования нетривиального решения системы (1), (2) дает искомое спектральное уравнение

$$\det \left[\hat{1} - \begin{pmatrix} \Sigma_1 & 0 \\ 0 & \Sigma_2 \end{pmatrix} \cdot S \right] = 0 \quad (3)$$

Таким образом, необходимо найти матрицы рассеяния S и Σ .

Была найдена матрица рассеяния границы сверхпроводник – нормальный металл (SN-граница)

$$\Sigma = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & e^{-i\chi+i\phi} \\ 0 & 0 & e^{-i\chi+i\phi} & 0 \\ 0 & e^{-i\chi-i\phi} & 0 & 0 \\ e^{-i\chi-i\phi} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

где ϕ – разница фаз сверхпроводников, $\chi = \arccos\left(\frac{E}{\Delta}\right)$. Здесь E – энергия возбуждения, Δ – величина щели.

Для нахождения матрицы рассеяния делителя (см. Рис.2.а) был выбран предел полуметаллического ферромагнетика. Тройники считались идеальными [2]. Ввиду громоздкости конечное выражение для S не приводим.

Далее по найденным матрицам было получено полное спектральное уравнение (3). Ввиду чрезвычайной громоздкости выражение не приводим. Вместо этого на Рис.2.а и 2.б показаны соответственно характерные энергетический спектр и ток–фазовое соотношение перехода, полученные путем численного решения уравнения (3). Численные значения параметров: $h = E_F, \theta = 0.73\pi, L = k_F$, где h – обменное поле в ферромагнетике, θ – угол между намагниченностями ферромагнитных рукавов, L – длина рукавов.

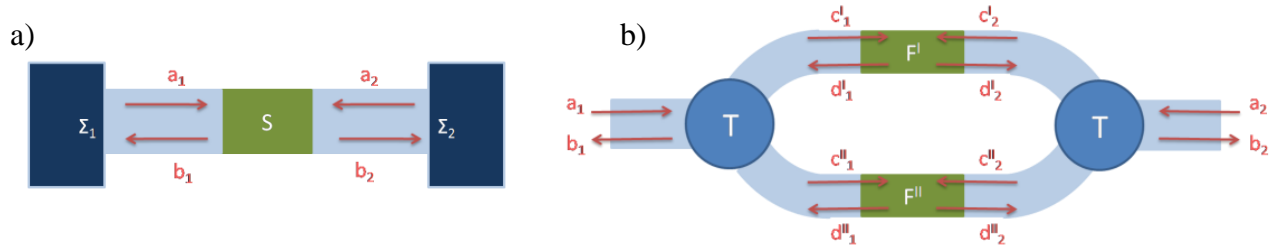


Рис. 1. Формализм матриц рассеяния в вычислении спектра возбуждений. а) общая постановка: между двумя массивными сверхпроводниками (синие прямоугольники слева и справа) находится слабая связь, которую можно описывать матрицей рассеяния S . б) конкретная структура перехода, рассматриваемая в работе. Голубые части – нормальный металл, зеленые прямоугольники – ферромагнитные вставки.

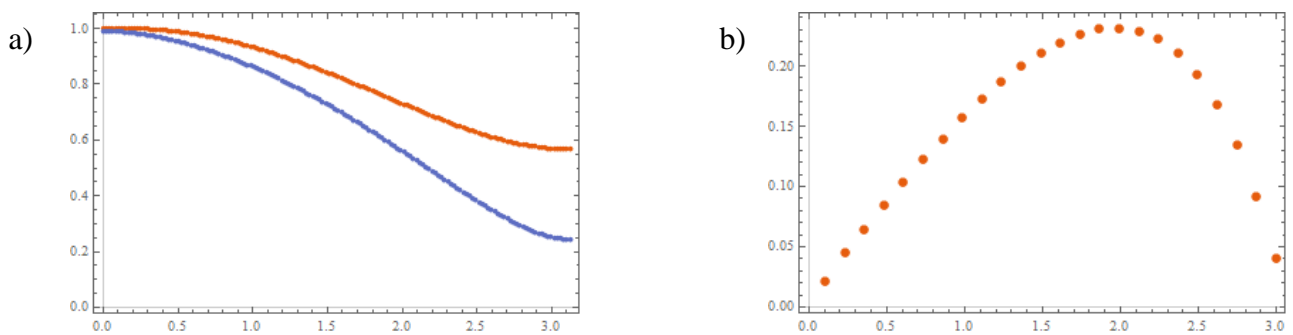


Рис. 2. Численные результаты. Значения параметров $h = E_F, \theta = 0.73\pi, L = k_F$. а) Зависимость энергии возбуждений от разности фаз φ . б) Ток–фазовая характеристика перехода.

Литература

1. *Beenakker C. W. J.*, Phys. Rev. L. 1991 V.67.P.3836
2. *Nazarov Y.V., Blanter Y. M.*, Quantum Transport: Introduction to Nanoscience, 1st ed, Cambridge University Press, 2009