

ОСЦИЛЛЯЦИИ КРИТИЧЕСКОГО ТОКА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ОБМЕННОГО ПОЛЯ И ТОЛЩИНЫ ФЕРРОМАГНИТНОГО МЕТАЛЛА (F) В ДЖОЗЕФСОНОВСКОМ КОНТАКТЕ S- F- S

А.И.Буздин, Л.Н.Булаевский, С.В.Панюков

Для короткой слабой связи вычислен джозефсоновский ток в контакте S-F-S. Амплитуда тока осциллирующим образом зависит от обменного поля чистого ферромагнитного металла. В сверхпроводящем кольце с контактом S-F-S при выполнении определенных условий минимуму энергии системы соответствует состояние со спонтанным током и магнитным потоком.

В обычных джозефсоновских контактах типа S-N-S осцилляционная зависимость тока от магнитного поля является следствием интерференции фаз электронов куперовской пары, определяемых векторным потенциалом. Мы покажем, что такая же интерференция появляется в контакте сверхпроводник – чистый ферромагнитный металл – сверхпроводник, но в этом случае фазы электронов в куперовской паре определяются также и обменным полем ферромагнетика. Поэтому контакты S-F-S могут быть использованы для исследования обменных полей в чистых ферромагнитных металлах.

Рассмотрим контакт S-F-S с геометрией, которая показана на рис. 1 и соответствует модели ODSE¹. Мы полагаем, что толщина ферромагнетика L и его поперечный размер малы по сравнению со сверхпроводящей корреляционной длиной ξ_0 и длиной свободного пробега электронов l , т.е. $L \ll d \ll \xi_0 \ll l$. Мы считаем также, что в ферромагнетике эффективный параметр электрон-фононного взаимодействия модели БКШ равен нулю. Для описания системы используем уравнения Эйлэнбергера с синглетным спариванием электронов

$$\begin{aligned} \left(\omega + ih + \frac{1}{2} v_x \frac{\partial}{\partial x} \right) f(x) &= \Delta(x)g(x), f^+ f + g^2 = 1 \\ \left(\omega + ih - \frac{1}{2} v_x \frac{\partial}{\partial x} \right) f^+(x) &= \Delta^*(x)g(x), \quad \omega = 2\pi T \left(n + \frac{1}{2} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

где ось x выбрана так, как показано на рис. 1. Внутри сверхпроводников 1, 3 обменное поле Вейсса $h = 0$ и параметр порядка $\Delta(x)$ в областях 1, 3 равен $|\Delta| \exp(\pm i\varphi/2)$, где φ – разность фаз на контакте. Внутри ферромагнитного металла $\Delta(x) = 0$, и мы рассматриваем однодоменный образец, т.е. поле h постоянно в области 2. Мы полагаем также, что $h \gg \Delta$, и $h \gg v_F/l$, где v_F – фермиевская скорость электронов, которую мы считаем для простоты одинаковой в сверхпроводниках и ферромагнитном металле. Условие $h \gg v_F/l$ позволяет пренебречь рассеянием электронов на примесях. При получении уравнений (1) в области 2 учтено, что в гамильтониане для электронов есть обменное взаимодействие $h \psi^+(r) \vec{\sigma} \psi(r)$, где $\vec{\sigma}$ – матрицы Паули и ψ^+ , ψ – электронные операторы. В этой области функция g описывает движение электрона с проекцией спина $(-1/2)$ на ось, параллельную h . Влияние магнитного поля на движение электронов приводит к замене φ на градиентно инвариантную разность фаз.

Решение уравнений (1) в областях 1, 3 имеет вид экспонент с показателями $0, \pm \Omega/|v_x|$, $\Omega = \sqrt{\omega^2 + \Delta^2}$. В области 2 получаем

$$f_2(x) = C_0 e^{-2(\omega+ih)x/v_x}, \quad f_2^+(x) = C_0^* e^{2(\omega+ih)x/v_x}, \quad (2)$$

где C_0, C_0^* – постоянные. Учитывая ограниченность функций f и f^+ на бесконечности и их непрерывность на границах областей 1, 2 и 2, 3, находим функцию $g^2(\omega, v_x)$. С ее помощью легко вычисляется ток $I_s(\varphi)$, протекающий через контакт

$$I_s(\varphi, a) = \frac{\pi \Delta^2}{2eR_N} \int_a^\infty \frac{dy}{y^3} \left[\sin \frac{\varphi - y}{2} \operatorname{th} \frac{\Delta \cos((\varphi - y)/2)}{2T} + \sin \frac{\varphi + y}{2} \operatorname{th} \frac{\Delta \cos((\varphi + y)/2)}{2T} \right] \quad (3)$$

где $a = 2 |h| L / v_F$ и R_{N} – сопротивление слабой связи в нормальном состоянии. При $a = 0$ из (3) следует известное выражение для джозефсоновского тока в короткой слабой связи $S-N-S^{1,2}$.

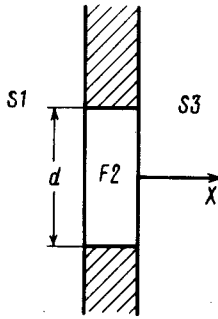


Рис. 1

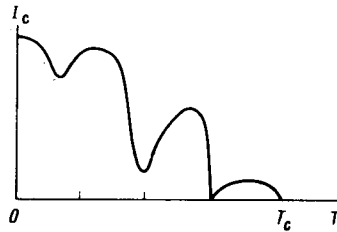


Рис. 2

Рис.1. Области 1, 3 – сверхпроводники, 2 – нормальный ферромагнитный металл, L и d – толщина и поперечный размер ферромагнетика соответственно, заштрихованная область – диэлектрик

Рис.2. Зависимость максимального джозефсоновского тока от температуры в контакте $S-F-S$ при выборе параметров $T_c \approx 4\text{К}$, $\Theta \approx 10\text{К}$, $h_0 \approx 300\text{К}$, $v_F \approx 2 \cdot 10^7$ см/сек (схематически)

Ток $I_S(\varphi, a)$ осциллирует в зависимости от φ и a . Зависимость $I_S(\varphi, a)$ упрощается вблизи T_c , где

$$I_s(\varphi, a) = \frac{\pi \Delta^2}{4eR_N T} F(a) \sin \varphi, \quad F(a) = a^2 \int_a^\infty \frac{dy}{y^3} \cos y. \quad (4)$$

При изменении a функция $F(a)$ осциллирует проходя через нуль, и $F(a) = -\sin a/a$ при $a \gg 1$. Осцилляции максимального критического тока I_c в зависимости от a сохраняются и в области $T \ll T_c$, однако здесь относительные изменения величины I_c меньше, и она не обращается в нуль. В предельном случае грязного ферромагнитного металла $h \ll v_F/l$ осцилляции исчезают во всей области температур.

Осцилляции максимального тока в зависимости от a могут быть замечены экспериментально по зависимости I_c от температуры, так как обменное поле в ферромагнетике меняется с температурой. Рассмотрим ферромагнетик с РККИ-взаимодействием и точкой Кюри Θ . Для него $h_0 \approx \sqrt{\Theta \epsilon_F}$, где ϵ_F – фермиевская энергия в ферромагнитном металле и h_0 – обменное поле при $T=0$. Взяв $\epsilon_F \approx 1$ эВ, $T_c \approx 4\text{К}$, $\Theta \lesssim 10\text{К}$ и $L \approx 10^3$ см получаем сильные немонотонные изменения тока I_c при изменении температуры на величину порядка $0,5\text{К}$. На рис.2 показана схематически зависимость $I_c(T)$ для параметров $T_c \approx 4\text{К}$, $\Theta \approx 10\text{К}$, $h_0 \approx 300\text{К}$ и $v_F \approx 2 \cdot 10^7$ см/сек.

Отметим, что замкнутое сверхпроводящее кольцо с включенным в него $S-F-S$ контактом обладает в основном состоянии спонтанным током и магнитным потоком если $F(a) < 0$ и индуктивность кольца достаточно велика³.

Авторы признательны В.В.Шмидту за обсуждения, которые стимулировали исследование свойств $S-F-S$ контакта. Они благодарят также Г.Ф.Жаркова, А.Д.Зайкина, Д.А.Киржница и Д.Е.Хмельницкого за полезное обсуждение работы.

Литература

1. Лихарев К.К. УФН, 1979, 127, 185.
2. Кулик И.О., Омелянчук А.Н. ФНТ, 1977, 3, 945; 1978, 4, 296.
3. Булаевский Л.Н., Кузий В.В., Собянин А.А. Письма в ЖЭТФ, 1977, 25, 314.