

## СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ КВАНТОВЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛООКСИДНОЙ КЕРАМИКИ В БЕЗГИСТЕРЕЗИСНОМ РЕЖИМЕ ПРИ 77 К

В.М. Закосаренко, Е.В. Ильичев, В.А. Тулин

Экспериментально показано, что превышение энергии джозефсоновского контакта над тепловой не является необходимым условием работы ВЧ-сквида. Реализован сквид из керамики  $YBa_2Cu_3O_x$ , работающий в жидком азоте в безгистерезисном режиме и имеющий уровень шумов менее  $3 \times 10^{-4} \Phi_0 / \sqrt{Гц}$ , определены его параметры. В рамках резистивной модели джозефсоновского контакта оценена роль низкочастотной и высокочастотной компонент термодинамических флуктуаций магнитного потока в сквиде.

В одном из последних обзоров по сквид-магнитометрам <sup>1</sup> приведены фундаментальные ограничения на возможность наблюдения отклика с прибора. Одно из них получено в предположении, что энергия джозефсоновского контакта должна быть больше тепловой энергии, т.е. есть  $I_c \Phi_0 / 2\pi > k_B T$ . Здесь  $\Phi_0 = \pi \hbar / e \approx 2 \cdot 10^{-5}$  Вб – квант магнитного потока.  $I_c$  – критический ток слабой связи. Иногда это условие записывается через параметр тепловых флуктуаций  $\gamma = 2\pi k_B T / I_c \Phi_0$ :

$$\gamma < 1. \quad (1)$$

Откуда при  $T = 77$  К имеем ограничение на  $I_c > 2\pi k_B T / \Phi_0 \approx 3,2$  мкА.

Основным параметром, определяющим режим работы одноконтактного квантового интерферометра, является его безразмерная индуктивность:  $l = 2\pi L_s I_c / \Phi_0$ , где  $L_s$  – индуктивность кольца датчика. Значение  $l = 1$  является граничным между безгистерезисным ( $l < 1$ ) и гистерезисным ( $l > 1$ ) режимами работы сквида. В датчиках ВЧ сквида циммермановской конструкции обычно  $L_s > 10^{-10}$  Гн, что вместе с оценкой  $I_c$ , полученной из (1), дает  $l > 1$ . Этот результат означает, что невозможно изготовить циммермановский датчик ВЧ сквида, работающий в безгистерезисном режиме при  $T = 77$  К.

Целью данной работы является экспериментальное доказательство реализации безгистерезисного режима работы ВЧ-сквида в жидком азоте и дается качественное объяснение полученных результатов.

Исследования проводились на цилиндрических датчиках из  $YBa_2Cu_3O_x$  длиной  $4 \div 6$  мм с отверстием 0,1 мм. Толщина стенки составляла  $0,5 \div 1$  мм. Цилиндр прорезался по образующей и в прорези формировалась перемычка с характерными размерами  $30 \div 50$  мкм. В отверстие образца помещалась катушка связи  $\Phi \approx 0,9$  мм. Катушка включалась в колебательный контур с резонансной частотой  $20 \div 30$  МГц и ненагруженной добротностью  $Q \approx 50$  при 77 К и  $Q \approx 100$  при 4,2 К. Записывались зависимости величины переменного напряжения  $U_{\sim}$  от тока накачки  $I_{\sim}$  (ВЧ ВАХ) и зависимость  $U_{\sim}$  от постоянного тока через катушку связи  $I_{\pm}$  при фиксированном  $I_{\sim}$  (сигнальная характеристика). Схема измерений подробнее изложена в <sup>2</sup>. Измерения проводились в жидком гелии в сверхпроводящих экранах, и в жидком азоте в многослойных экранах из магнитомягких материалов.

На рис. 1 приведены ВЧ ВАХ (кривая 1) и сигнальная характеристика (кривая 2), записанные при 4,2 К. Целью обработки результатов, полученных в жидком гелии, служило определение "геометрических" параметров сквида –  $L_s$  и коэффициента связи  $k$  резонансного контура с датчиком. Коэффициент связи определялся по смещению резонансной частоты колебательного контура  $k = \sqrt{(\omega_0 + \omega')(\omega' - \omega_0)} / \omega_0 = 0,48$ . Здесь  $\omega_0$  и  $\omega'$  – резонансная частота соответственно ненагруженного контура и контура с интерферометром, измеренная при малой накачке – на линейном участке ВЧ ВАХ. Взаимная индукция  $M = \Phi_0 / \Delta I_{\pm} \approx 10^{-8}$  Гн, определялась из периода сигнальной характеристики  $\Delta I_{\pm} = 0,2$  мкА (рис. 1, кривая 2). Зная из импеданса резонансного контура его индуктивность  $L_k \approx 4 \cdot 10^{-7}$  Гн и учитывая, что  $M = k\sqrt{L_s L_k}$ ,

вычисляем  $L_c \approx 7 \cdot 10^{-10}$  Гн. Из ВЧ ВАХ (считая, что критический ток в интерферометре достигается при  $U_c \approx 50$  мкВ на контуре) получаем  $I_c \approx 10$  мкА.

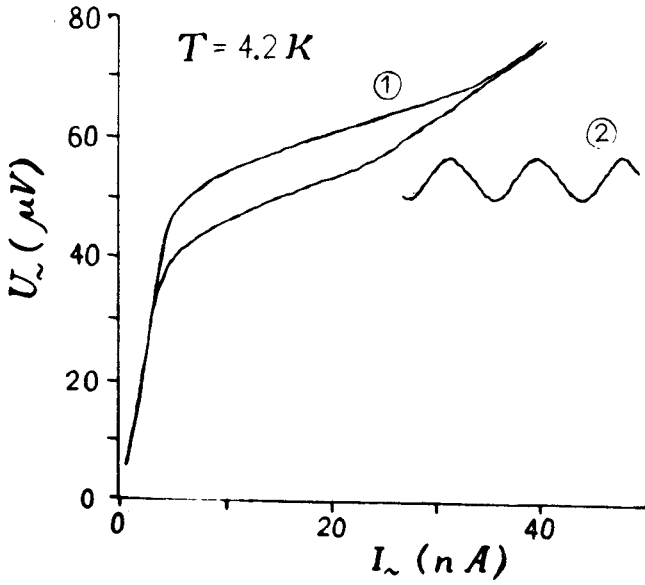


Рис. 1. ВЧ ВАХ сквида (1) и сигнальная характеристика (2) при 4,2 К. Период сигнальной характеристики составляет 0,2 мкА.

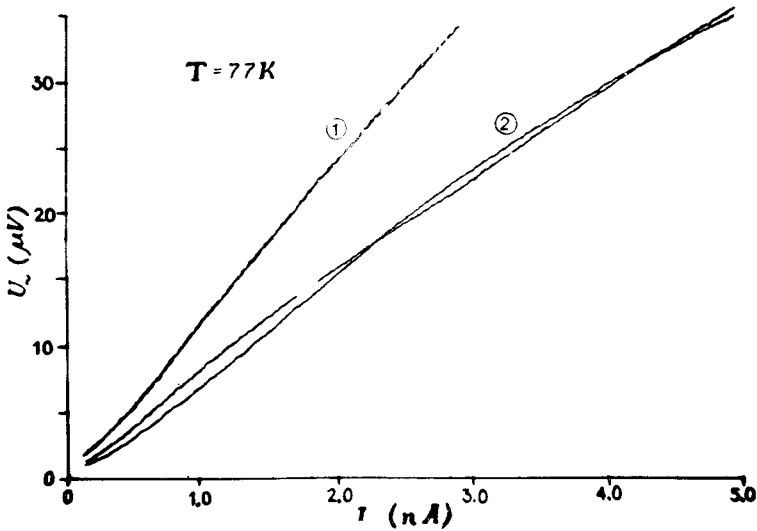


Рис. 2. ВЧ ВАХ сквида на резонансной частоте (1) и при расстройке  $\omega/\omega' - 1 = 1,3 \cdot 10^{-2}$  (2) записанные при значениях магнитного потока в датчике  $n\Phi_0$  и  $(n + 1/2)\Phi_0$  при температуре 77 К

Перемещаем вставку с образцом в жидкий азот. На рис. 2 представлены ВЧ ВАХ интерферометра при 77 К. Характеристики записаны для целого и полуцелого числа квантов магнитного потока в сквида на резонансной частоте  $\omega'$  (кривая 1) и при расстройке  $\omega/\omega' - 1 = 1,3 \times 10^{-2}$  (кривая 2). Полученные зависимости характерны для работы прибора в безгистерезисном режиме<sup>3</sup>.

В безгистерезисном режиме из-за параметрической индуктивности джозефсоновского контакта,  $\omega'$  является функцией магнитного потока в отверстии датчика. Поэтому для выяснения причин появления отклика сквида на изменение магнитного поля мы записали семейство

сигнальных характеристик при различных расстройках и восстановили амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) прибора (рис. 3). Из рис. 3 видно, что отклик прибора связан с изменением  $\omega'$ , что окончательно доказывает, что реализован безгистерезисный режим.

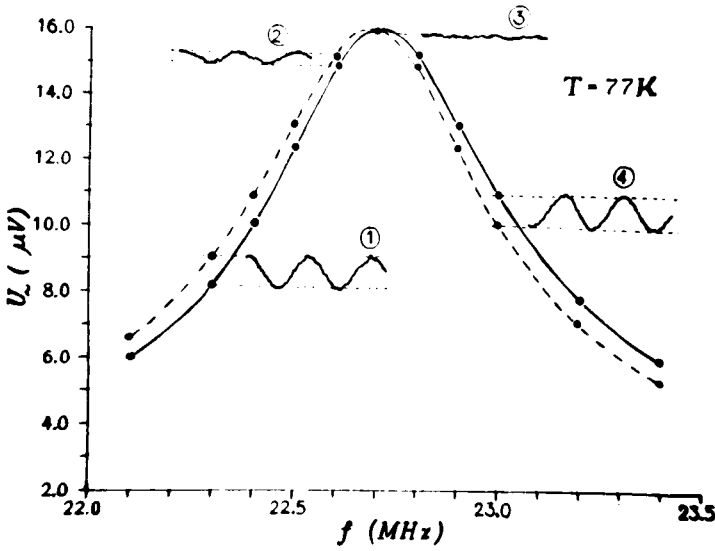


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики для целого (—) и полуцелого (---) числа  $\Phi_0$  в кольце скивда, восстановленные из семейства сигнальных характеристик и пример сигнальных характеристик снятых при частотах накачки 1 — 22,3; 2 — 22,6; 3 — 22,7; 4 — 23,0 МГц при температуре 77 К

Таким образом, в нарушение условия (1), скивд оказался работоспособным. Для объяснения полученных результатов воспользуемся резистивной моделью джозефсоновского контакта <sup>4</sup>. Джозефсоновский ток  $I = I_c \sin(2\pi\Phi/\Phi_0)$  определяется значением магнитного потока  $\Phi$  в кольце датчика. Поэтому, если шумовой магнитный поток, вызванный флуктуационным током не превосходит  $\Phi_0/2$ , отклик будет наблюдаться, несмотря на нарушение (1). Средний квадрат шумового потока в полосе частот  $\delta\omega/2\pi$  в рамках резистивной модели имеет вид <sup>4</sup>

$$\langle \delta\Phi^2 \rangle = 2k_B T L_s^2 \delta\omega / \pi R (1 + q^2), \quad (2)$$

где  $q = \omega L_s / R$ , а  $R$  — нормальное сопротивление слабой связи. Интегрирование по всем частотам дает полный шумовой поток  $\langle \Phi_{ш}^2 \rangle$ . Тогда условие  $\langle \Phi_{ш}^2 \rangle \leq (\Phi_0/2)^2$  принимает вид

$$\gamma l / \pi^2 \leq 1. \quad (3)$$

Если определить шумовую индуктивность как  $L_{ш} = \Phi_0^2 / 4k_B T$ , то (3) эквивалентно  $L_s \leq L_{ш}$ . Поскольку у нашего скивда  $L_s \approx 7 \cdot 10^{-10}$  Гн, а при 77 К  $L_{ш} \approx 10^{-9}$  Гн,  $\gamma l / \pi^2 = 0,7$ , т.е. интерферометр работает в условиях больших термодинамических флуктуаций. Дальнейшей целью являлось получение вклада низкочастотного шума  $\omega < \omega_H$  ( $\omega_H$  — частота накачки) в шум интерферометра. Для проведения численных оценок мы определили добротность датчика скивда на частоте накачки  $q_H = \omega_H L_s / R$  из соотношения  $1/Q' - 1/Q \approx k^2 q_H^2$ , где  $Q'$  — добротность контура с интерферометром. В нашем случае  $Q'$  отличается от  $Q$  не более чем на 5%, следовательно  $q_H \leq 4 \cdot 10^{-3}$ . Выполняя интегрирование (2) от 0 до  $\omega_H$  и пренебрегая  $q^2$  в знаменателе, т.к.  $q < q_H$  при  $\omega < \omega_H$ , получаем квадрат шумового потока нормированный на  $(\Phi_0/2)^2$

в полосе до  $\omega_H$ :

$$\frac{\langle \Phi_{ш}^2 \rangle}{(\Phi_0/2)^2} = \frac{2q_H}{\pi} \frac{\gamma l}{\pi^2} \leq 2 \cdot 10^{-3}, \quad (4)$$

что соответствует уровню шума  $\sim 10^{-5} \Phi_0/\sqrt{\Gamma_{ц}}$ . Роль шумов датчика на частотах  $\omega > \omega_H$  сводится к усреднению фазы  $\varphi = 2\pi\Phi/\Phi_0$  интерферометра и, следовательно, к уменьшению коэффициента преобразования  $dU_{ш}/d\Phi$ . Это приводит к увеличению эффективного вклада шумов контура и усилителя, которыми, по-видимому, и определяется экспериментально измеренная чувствительность прибора  $3 \cdot 10^{-4} \Phi_0/\sqrt{\Gamma_{ц}}$ . Эти выводы подтверждаются следующими соображениями. Оценим  $l$  и  $I_c$  сквида из выражения  $k^2 l \approx a(\omega_1 - \omega_2)/2\omega_p J_1(a)$ , полученного в расчетах<sup>5</sup> при анализе безгистерезисного режима. Здесь  $\omega_p$  – резонансная частота контура с датчиком при безразмерной амплитуде колебаний в контуре  $a = 2\pi I_c M/\Phi_0 \gg 1$ ,  $J_1(a)$  – функция Бесселя 1 рода,  $\omega_1$  и  $\omega_2$  – резонансные частоты при целом и полуцелом числе квантов потока в интерферометре, измеренные при накачке  $a < 2\pi$ . Отсюда получаем  $l \approx 0,03$  и  $I_c \approx 15$  нА. Эти оценки представляются неправдоподобными, т.к. критическая температура керамики  $\sim 90$  К, и вряд ли следует ожидать уменьшения критического тока на 3 порядка при увеличении температуры от 4,2 до 77 К. С нашей точки зрения значения  $l$  и  $I_c$  занижены, т.к. высокочастотные шумы "размывают" измеряемую величину  $\omega_1 - \omega_2$ .

### Литература

1. *Ryhanen T., Seppa H.* Journ. Low. Temp. Phys., 1989, 76, 287.
2. *Zakosarenko V.M. et al.* IEEE Trans. on Magnetics, 1989, MAG 25, 946.
3. *Закосаренко В.М. и др.* Письма в ЖТФ, 1989, 15, 7.
4. *Бароне А., Патерно Дж.* Эффект Джозефсона М.: Мир, 1984.
5. *Лихарев К.К., Ульрих Б.Т.* Системы с джозефсоновскими контактами М.: МГУ, 1978.

Институт проблем технологии микроэлектроники  
и особочистых материалов  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
25 января 1990 г.