

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ МАССИВНОГО СКВИДА ИЗ $YBa_2Cu_3O_x$

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

В сквидах из массивной керамики $YBa_2Cu_3O_x$ с сужением в качестве слабой связи работают контуры квантования не охватывающие отверстие сквида. Магнитный поток в них создается наведенными токами, т.е. корпус сквида работает как трансформатор потока, а роль сужения сводится к увеличению плотности наведенного тока.

Сразу же после появления сообщений о сверхпроводимости образцов металлооксидной керамики при температурах жидкого азота и выше возможности практического использования этих сверхпроводников для создания приборов на основе эффекта Джозефсона. Вскоре во многих работах было экспериментально доказано наличие макроскопической квантовой интерференции в этих материалах (см., например, ¹⁻³) и было высказано предположение, что керамика представляет собой систему гранул, связанных джозефсоновскими контактами.

Наличие джозефсоновских связей в самой керамике позволило изготовить двудырочный сквид циммермановского типа ^{4,5}, а также однодырочные сквиды ^{6,7}, удовлетворительно работавшие в жидком азоте, в которых роль слабой связи играло сужение макроскопических размеров. В связи с этим в ⁷ было высказано предположение, что все множество джозефсоновских контактов, расположенных в сужении реагирует на внешнее воздействие как единый переход. Однако, характеристики сквидов из металлооксидной керамики во многом отличаются от характеристик традиционных сквидов. Эти отличия, несмотря на различные методики измерений, проявляются на сквидах изготовленных в различных лабораториях и, следовательно, характеризуют свойства самого материала.

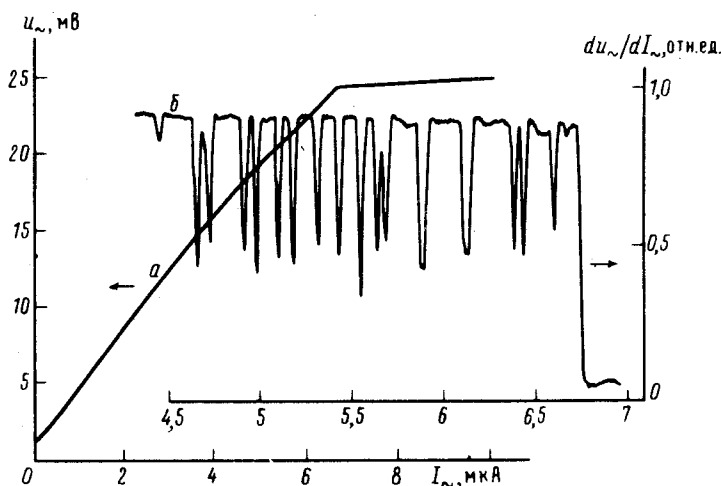


Рис. 1. Напряжение на резонансном контуре сквида, u_{\sim} , (а) и производная du_{\sim}/dI_{\sim} участка ВЧ-ВАХ перед плато (б) в зависимости от тока накачки контура I_{\sim}

В данной работе представлены экспериментальные исследования особенностей характеристик массивных сквидов из керамики состава $YBa_2Cu_3O_x$. Исследовались цилиндрические датчики длиной 4–6 мм с отверстием \varnothing 1,4 мм толщиной стенки 0,5 – 1 мм с прорезью вдоль образующей, в которой находилась перемычка ^{6,7}. В отверстие помещалась катушка связи, намотанная медным проводом \varnothing 0,1 мм на диаметр 1 мм в один слой, включенная в контур с резонансной частотой 25 – 30 МГц добротностью $Q \cong 60$. Записывались зависимости ампли-

туды напряжения на контуре, u_{\sim} , от тока накачки, I_{\sim} , (ВЧ-ВАХ), а также производная ВЧ-ВАХ, т.е. динамический импеданс контура (du_{\sim}/dI_{\sim}) в зависимости от I_{\sim} и от постоянного тока через катушку связи I_{\pm} . Для измерений импеданса использовалась амплитудная модуляция I_{\sim} на частоте 300–1000 Гц. Подробнее схема измерений описана в ⁴. Все измерения проводились в жидком гелии при 4,2 К в сверхпроводящих экранах.

На рис. 1 представлена ВЧ-ВАХ и ее производная для одного из датчиков. Как и для двудырочного скивида ⁴ на ВЧ-ВАХ наблюдаются особенности соответствующие дополнительному поглощению мощности. Эти особенности отчетливо проявляются на производной ВЧ-ВАХ в виде минимумов. В отличие от ⁴ здесь при достаточно больших I_{\sim} на ВЧ-ВАХ появляется плато, которое обычно наблюдается для традиционных ВЧ скивдов ⁸ и соответствует достижению критического тока в кольце скивида. Но, в отличие от традиционного скивида, введение постоянного магнитного потока в кольцо, Φ , не отражается на положении плато, в то время как минимумы смещаются, т.е. скивид чувствителен к магнитному полю не на плато, а при меньших уровнях I_{\sim} .

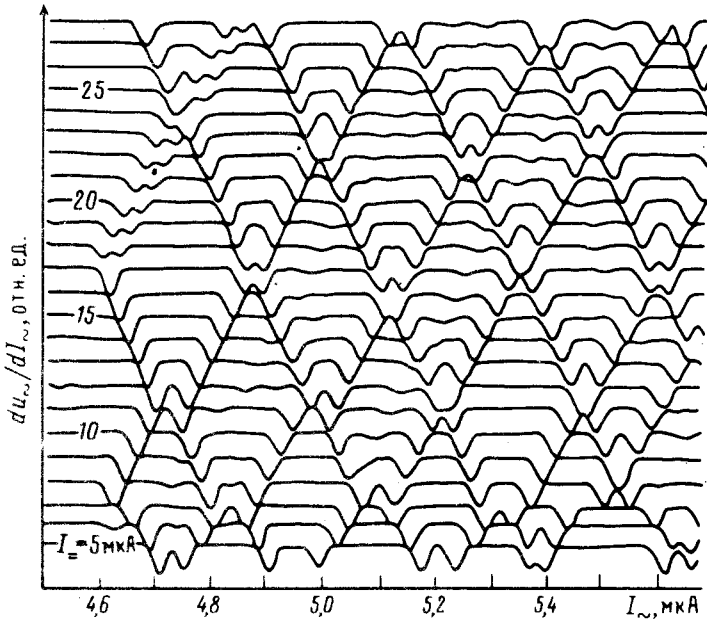


Рис. 2. Производная du_{\sim}/dI_{\sim} при различных значениях постоянного тока I_{\pm} в зависимости от тока накачки контура I_{\sim} . При записи серии кривых I_{\pm} увеличивался с шагом 1 мкА (указан на кривых), а кривые смещались вверх для ясности

Зависимость положения минимумов от потока через кольцо скивида хорошо видна на рис. 2, где записана серия кривых $du_{\sim}/dI_{\sim}(I_{\sim})$, в которой параметром является I_{\pm} . Из рисунка видно, что при развертке I_{\pm} либо I_{\sim} (вертикальное либо горизонтальное сечение картины) будут чередоваться области чувствительные и нечувствительные к малой модуляции I_{\pm} , что наблюдалось в работе ⁷, а также соответствует сигнальной характеристике, приведенной в ⁴. Картина движения минимумов похожа на "треугольную" зависимость, полученную еще Циммерманом для ниобиевого скивида с точечным контактом ⁹, и приобретает аналогичный смысл, если считать коэффициент связи резонансного контура с контуром квантования скивида k , малым ($k^2Q \ll 1$). В этом случае ⁸ плато на ВЧ-ВАХ узки и проявляются только в виде минимумов на производной.

Картина расположения минимумов должна быть периодична по Φ с периодом $\Phi_0 = \pi\hbar/e$. Представленная на рис. 2 картина не строго периодична по I_{\pm} , но можно выделить характерное расстояние между похожими кривыми $\Delta I = 10$ мкА, что соответствует потоку $\Delta\Phi = 50\Phi_0$

через площадь сечения катушки. Если считать, что ΔI соответствует Φ_0 в контуре квантования сквида, то получается $k \sim 0,02$, т.е. действительно $k^2 Q \ll 1$. С другой стороны, исходя из сравнения размеров катушки и отверстия датчика, а также из изменения резонансной частоты контура при помещении катушки связи в сквид должно быть $k \geq 0,5$. Из этих оценок следует, что контур (или контуры) квантования сквида не совпадает с отверстием датчика.

Можно предположить, что контуры квантования расположены в перемычке и их слабая связь с катушкой обусловлена наличием рассеянных полей. Однако, проверка показала, что в магнитном поле, создаваемом внешним соленоидом, происходит смещение минимумов, соответствующее той же величине $\Delta\Phi$ в расчете на площадь отверстия датчика. Таким образом, остается предположить, что в датчике работают контуры квантования, расположенные в самой керамике в перемычке или вблизи нее. Магнитное поле в них создается экранирующими токами, плотность которых вблизи перемычки выше. Т.е. тело датчика сквида работает как трансформатор потока, а роль перемычки сводится к увеличению плотности наведенного тока (концентратор тока). Отметим, что это противоречит предположению, высказанному в ⁷, что все джозефсоновские контакты в перемычке работают как единый контакт.

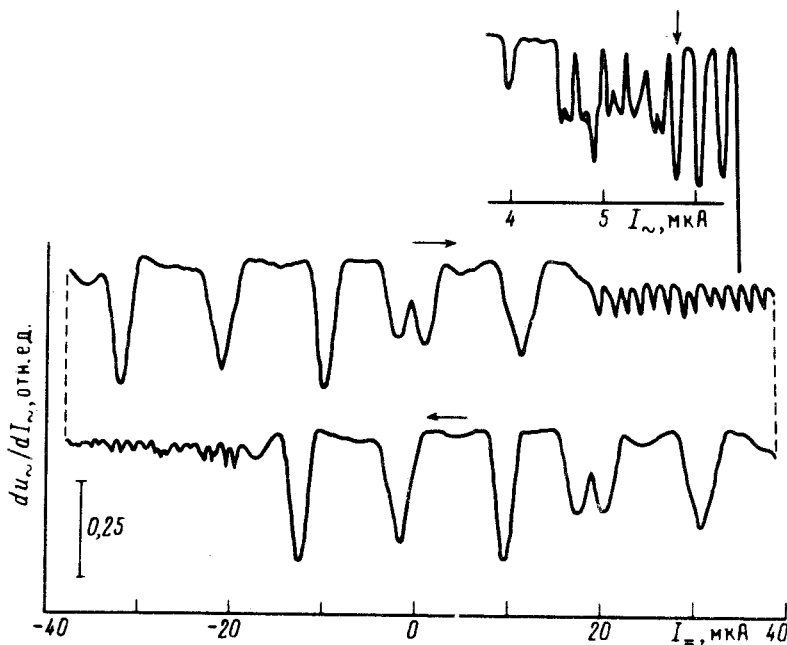


Рис. 3. Производная du_{\sim} / dI_{\sim} при фиксированной накачке I_{\sim} в зависимости от постоянного тока $I_{=}$. Горизонтальные стрелки указывают направление развертки $I_{=}$. Кривые смещены по вертикали для ясности. На вставке показан участок производной ВЧ-ВАХ и отмечена величина тока накачки

На рис. 3 представлены зависимости du_{\sim} / dI_{\sim} от $I_{=}$ при постоянном уровне накачки I_{\sim} близком к началу плато на ВЧ-ВАХ. При развертке $I_{=}$ сначала на кривой появляются особенности, обусловленные прохождением минимумов, а затем, когда сумма токов наведенных в датчике достигает критического тока перемычки, на кривой начинаются срывы, соответствующие выходу потока из отверстия датчика. При обратном ходе развертки сначала полностью повторяются все особенности первой кривой (кривая как бы смещается вдоль оси $I_{=}$), а затем появляются аналогичные срывы. Такое поведение однозначно указывает, что магнитный поток через контуры квантования определяется током наведенным в датчике, а не полем катушки связи.

Заметим, что кривые смещены по $I_{=}$ как раз на интервал, равный области срывов, т.е. в этой области наведенный ток в датчике практически не меняется. Такое поведение соответствует модели Бина ¹⁰ и характерно для жестких сверхпроводников второго рода.

Литература

1. *Zavaritskiy N.V., Zavaritskiy V.N., Petrov S.V.* Novel. Mechanisms of Superconductivity. Ed. S. Wolf, V.Kresin, N.Y.:Plenum Press, 1987, 871.
2. *Igushi I., Sugishita A., Yanagisawa M.* Jap. J. Appl. Phys., 1987, 26, L1021.
3. *Веркин Б.И., Дмитриенко И.М. и др.* ФНТ, 1987, 13, 651.
4. *Закосаренко В.М., Ильичев Е.В., Никифорова Т.В., Тулин В.А.* Письма в ЖЭТФ, 1987, 13, 1389.
5. *Закосаренко В.М., Ильичев Е.В., Никифорова Т.В., Тулин В.А.* Проблемы высокотемпературной сверхпроводимости. Информац. материалы, часть II, Свердловск УрО АН СССР, 1987, с. 244.
6. *Веркин Б.И., Дмитренко И.М. и др.* там же, с. 78.
7. *Заварицкий В.Н., Заварицкий В.Н., Петров С.В.* Письма в ЖЭТФ, 1987, 46, 469.
8. *Лихарев К.К., Ульрих Б.Т.* Системы с джозефсоновскими контактами. Основы теории. М.: Изд-во МГУ, 1978.
9. *Zimmerman J.E.* Cryogenics, 1972, 12, 19.
10. *Bean C.P.* Phys. Rev. Lett., 1962, 8, 250.

Институт проблем технологии микроэлектроники
особочистых материалов
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
30 мая 1988 г.