

Обнаружение автоколебаний транспортного тока в двухсвязном сверхпроводнике

С.И. Бондаренко, В.П. Коверя, А.В. Кревсун, Н.М. Левченко, А.А. Шабло

*Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины
пр. Ленина, 47, г. Харьков, 61103, Украина
E-mail: bondarenko@ilt.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 21 июля 2009 г., после переработки 4 сентября 2009 г.

Экспериментально обнаружено, что при пропускании постоянного тока через контур из двух параллельно соединенных сверхпроводников и достижении в одной из ветвей критического значения ток в ветвях совершает квазигармонические незатухающие колебания. Обсуждается механизм возникновения автоколебаний. Рассматриваются особенности замораживания магнитного поля в контуре с током, совершающем автоколебания.

Экспериментально виявлено, що при пропусканні постійного струму через контур з двох паралельно з'єднаних надпровідників та досягненні в одній з гілок критичного значення струм в гілках здійснює квазигармонічні незгасаючі коливання. Обговорюється механізм виникнення автоколивань. Розглядаються особливості заморожування магнітного поля в контурі зі струмом, який здійснює автоколивання.

PACS: 74.25.F– Транспортные свойства;
74.81.Fa Матрица джозефсоновских контактов и проволочные сети.

Ключевые слова: двухсвязный сверхпроводник, автоколебания тока, замороженное магнитное поле.

Введение

Двухсвязные сверхпроводники в виде двух параллельно соединенных однородных или неоднородных по своим свойствам ветвей широко используются в различных сверхпроводящих устройствах. В частности, к ним относятся такие макроскопические объекты, как квантовые измерители магнитного потока — СКВИДы и сверхпроводящие катушки для создания больших магнитных полей, переводимые в короткозамкнутое состояние с помощью параллельно включенных тепловых ключей. Наноразмерные двухсвязные и многосвязные сверхпроводящие контуры могут возникать также в современных гранулированных и квазикристаллических высокотемпературных сверхпроводниках.

Картина распределения постоянного сверхпроводящего электрического тока, проходящего по ветвям двухсвязного сверхпроводника, находящегося в докритическом состоянии, является классической и описана, например, в работе [1].

Целью настоящей работы является исследование распределения постоянного тока в подобных структурах при достижении его критической величины. Публикации других авторов по данному вопросу нам до начала настоящих исследований не были известны.

Также следует отметить, что абсолютное равенство критических токов и индуктивностей ветвей, изготовленных из реальных сверхпроводников, крайне маловероятно. Поэтому результаты нашей работы могут иметь и практическое значение.

Постановка эксперимента

На рис. 1 представлена электрическая схема исследованного двухсвязного сверхпроводника.

Двухсвязный сверхпроводящий контур был изготовлен из танталового микропровода диаметром 100 мкм. Индуктивности ветвей контура составляли $L_1 = 5 \cdot 10^{-6}$ Гн и $L_2 \cong 10^{-8}$ Гн, а их взаимная индуктивность $M = 2 \cdot 10^{-10}$ Гн. Ветвь с индуктивностью L_1 была выполнена в виде катушки с диаметром 8 мм и числом витков $W = 5$. Внутри катушки расположен детектор магнитного поля тока, текущего по ней. Детектором являлся феррозонд (ФЗ) с чувствительностью 10^{-5} Э. Ток катушки определяли по измеряемому детектором полю с помощью заранее определенного соотношения между током в катушке и показаниями ФЗ. Показания феррозонда регистрировали с помощью электромеханического самописца. Постоянный ток I задавался от источника тока в пределах от 10^{-5} А до 1 А. Контур располагался в жидком гелии при температуре $T =$

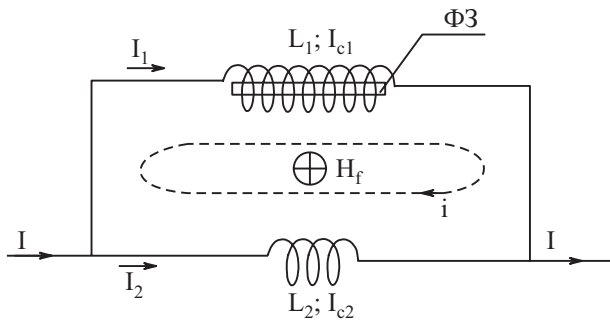


Рис. 1. Схема двухсвязного сверхпроводника, через который пропускается постоянный ток I ; I_1 и I_2 — токи в ветвях сверхпроводящего контура с индуктивностями L_1 и L_2 , H_f и i — замораживаемое магнитное поле в контуре и соответствующий ему сверхпроводящий ток, I_{c1} и I_{c2} — критические токи ветвей, ФЗ — феррозонд для измерения магнитного поля, создаваемого током ветви.

$= 4,2$ К. Критический ток ветви с меньшей индуктивностью I_{c2} в различных образцах контура изменялся в интервале $0,7-500$ мА, что достигалось с помощью утончения микропровода — химического травления его участка длиной около 1 мм в растворе плавиковой и азотной кислот с соотношением $1:1$. Протравленный участок имел наименьший диаметр (30 мкм) в своей центральной части.

Для замораживания в контуре магнитного поля на катушке располагался медный соленоид. Криостат с исследуемым контуром был защищен от воздействия земного поля и его флуктуаций магнитным экраном. Амплитуда остаточных низкочастотных флуктуаций не превышала 10^{-4} Э, что соответствовало изменению тока в катушке с феррозондом на 10 мкА. Спектры автоколебания тока, измеряемые феррозондом, регистрировались с помощью спектроанализатора фирмы «Брюльв и Кьер» в полосе частот $0-200$ Гц.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) параллельного соединения в целом и отдельно второй ветви приведены на рис. 2.

Как видно, критический ток I_c соединения составляет 500 мА, что определяется в основном критическим током I_{c1} (около 480 мА) ветви 1 (без протравленного участка). ВАХ имеет скачкообразный вид и гистерезис при уменьшении тока (на рис. 2 не показан), что обычно связано со значительным перегревом сверхпроводника транспортным током. Критический ток ветви 2 (I_{c2}), измеренный до замыкания ветвей в контур, определяется критическим током «слабого» протравленного участка и равняется 20 мА, а его ВАХ не имеет гистерезиса. При значениях тока I , меньших 20 мА, он течет только по ветви 2 с меньшей индуктивностью. Начиная с $I = I_{c2} = 20$ мА, в ветви 1 появляется ток в виде квазигармонических незатухающих автоколебаний (АК) с амплитудой ΔI_1 . На рис. 3 показаны зависи-

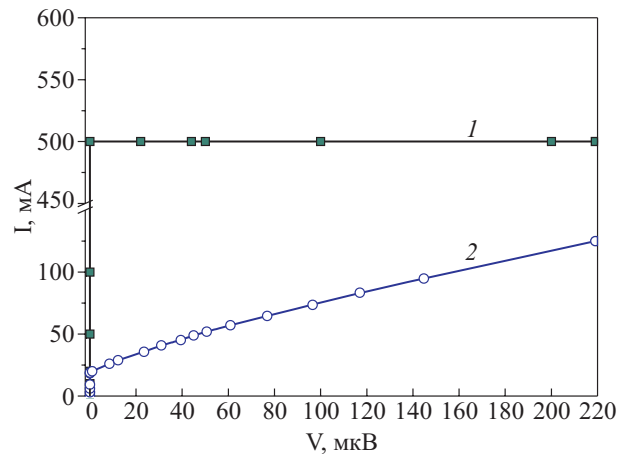


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики параллельного соединения двух танталовых сверхпроводников при $T = 4,2$ К (кривая 1) и его ветви со «слабым» участком (кривая 2).

симости величины АК от времени (t) для различных значений постоянного транспортного тока I .

При $I > 20$ мА наряду с появлением постоянного тока в ветви 1 наблюдается рост ΔI_1 и изменение формы АК. При этом установлено, что максимальные значения ΔI_1 не превышают 1% от величины I_{c2} . Появление новых максимумов и минимумов на зависимости $\Delta I_1(t)$ по мере роста I свидетельствует о расширении частотного спектра АК. В частности, при $I \gg I_{c2}$ регистри-

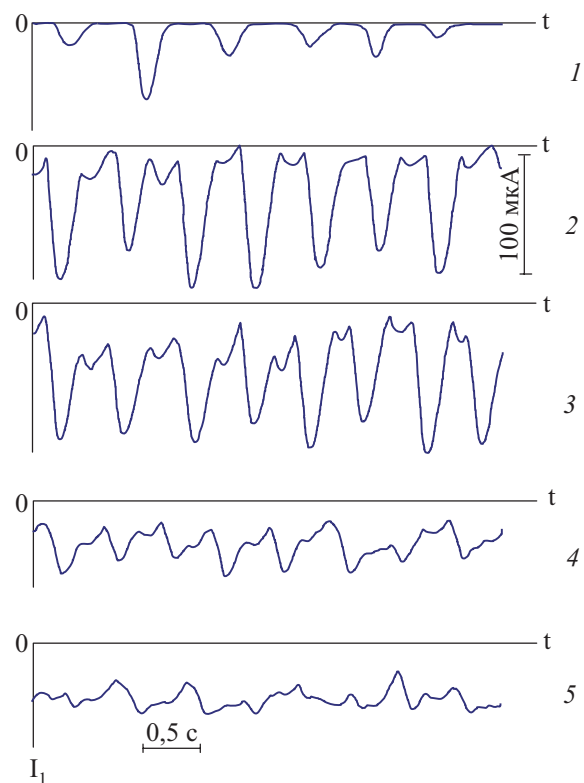


Рис. 3. Запись автоколебаний тока I_1 через контур в одной из ветвей сверхпроводящего контура (ветвь 1) при различных значениях постоянного транспортного тока I , мА: 20 (1); $20,3$ (2); $21,0$ (3); $21,5$ (4); $22,5$ (5).

ровался спектр колебаний $\Delta I_1(t)$ вплоть до частоты 200 Гц. Принимая характерное время колебательного процесса при токах, близких к I_{c2} , $T_0 \cong 1$ с (рис. 3) и зная индуктивность контура ($L = 5 \cdot 10^{-6}$ Гн), можно оценить периодически вносимую в контур резистивность $R \cong L/T_0 = 5 \cdot 10^{-6}$ Ом. При постоянной величине тока $I > 20$ мА в силу выполнения соотношения $I = I_1 + I_2$ соответствующие колебания тока существуют также в ветви 2.

Кроме изучения автоколебаний тока, проведены эксперименты по замораживанию слабого магнитного поля $H < 0,1$ Э, что соответствовало циркулирующему току (ток i на рис. 1) не более 20 мА в замкнутом контуре из указанных параллельно соединенных сверхпроводников. Установлено, что при наличии АК замороженное магнитное поле (ЗМП) сохраняется неизменным (с точностью 1%) в течение двух часов.

Обнаруженным явлениям даны следующие объяснения. Устойчивое распределение постоянного сверхпроводящего тока I в ветвях двухсвязного контура в докритическом состоянии можно установить с помощью концепции минимума магнитной энергии E_m сверхпроводящего контура с током. Использование данной концепции является более предпочтительным в сравнении с принятой в [1], так как позволяет объяснить распределение тока не только в докритическом, но и в критическом состоянии контура. Учитывая, что $M \ll L_1$ и L_2 , условие минимума E_m можно представить соотношением

$$E_m = \Phi^2/2L = (L_1 I_1 - L_2 I_2)^2/2L = 0, \quad (1)$$

где Φ — магнитный поток через контур, создаваемый токами ветвей, $L = (L_1 + L_2)$ — индуктивность контура. Таким образом, при $I_1 < I_{c1}$ и $I_2 < I_{c2}$ из (1) имеем

$$I_1/I_2 = L_2/L_1, \quad (2)$$

а с учетом того, что $I = I_1 + I_2$, получаем:

$$I_1 = (L_2/L)I, \quad (3)$$

$$I_2 = (L_1/L)I. \quad (4)$$

Из соотношений (3), (4) следует, что при экспериментальных значениях входящих в них параметров стационарный транспортный ток I величиной до 20 мА действительно в основном должен течь через ветвь 2. При этом ток в ветви 1 должен быть менее 5 мкА, что находится за пределами чувствительности использованной измерительной системы. Это подтверждается кривыми на рис. 3. Указанная особенность порогового появления АК может быть использована для точного определения критического тока «слабого» участка.

При увеличении тока I до значения, при котором достигается критический ток в одной из ветвей с некоторым «слабым» по сверхпроводящим параметрам участком (в нашем случае в ветви 2), часть (ΔI_2) тока I_2 переключается в ветвь с большим критическим током (в ветвь 1), увеличивая ток I_1 на величину $\Delta I_1 = \Delta I_2$. В

результате магнитный поток через контур и энергия контура возрастают по сравнению с устойчивым докритическим состоянием, задаваемым соотношениями (3) и (4), и система стремится ее снизить, что должно вызывать возврат указанного тока в первоначальное состояние. Далее процесс повторяется. Наблюдаемые АК в целом соответствуют предлагаемой модели, но одновременно имеют особенности, не предсказываемые моделью. Это касается формы и амплитуды АК тока, которые меняются при дальнейшем увеличении I . Указанные особенности можно объяснить тем, что модель не учитывает конкретные условия эксперимента:

– различия и инерционность теплообмена «слабого» участка сверхпроводника с жидким гелием при его нагреве током нормальных электронов (когда $I_2 > I_{c2}$) и при его охлаждении без тока нормальных электронов (когда $I_2 < I_{c2}$);

– конкретный механизм резистивности «слабого» протяженного (1–2 мм) участка танталовой проволоки как сверхпроводника I рода, который, в частности, сам может состоять из нескольких последовательно включенных микроскопических областей (с различными и большими, чем 20 мА критическими токами), увеличивающих начальную резистивность участка по мере роста тока I ;

– изменения соотношения L/R , где R — меняющаяся во времени и зависящая от тока резистивность «слабого» участка контура.

Влияние указанных условий на АК планируется выяснить в ходе дальнейших исследований.

Длительное сохранение ЗМП в контуре с АК свидетельствует о весьма малой диссипации магнитной энергии, запасенной в контуре в результате замораживания.

Приближенная оценка [2] длительности удержания слабого замороженного поля $H_f = 0,1$ Э в контуре при диссипации энергии на резистивности $R \cong 10^{-6}$ Ом путем сопоставления магнитной энергии замороженного потока $Li^2/2$ и тепловой энергии $I^2 R \Delta t$ при $I = 20$ мА, показала, что ЗМП должно полностью исчезнуть за время (Δt), равное нескольким секундам, что противоречит эксперименту. По-видимому, это связано с приближенностью оценки величины резистивности «слабого» участка цепи и требует дальнейших уточнений.

В заключение следует отметить, что изложенные экспериментальные результаты и объяснение квазигармонических АК позволяют понять причину возникновения автоколебаний напряжения на резистивном СКВИДе постоянного тока в составе сверхпроводящего кольца, наблюдавшихся ранее [3] одним из авторов настоящей работы.

Выводы

Обнаруженные квазигармонические автоколебания транспортного тока в двухсвязном сверхпроводнике можно объяснить на основе следующих представле-

ний: достижения током критического состояния в ветви с наименьшим критическим значением, переключения части тока в ветвь с большим критическим током и стремления системы восстановить после этого состояние с наименьшей магнитной энергией путем возврата переключенного тока в исходное положение. При этом установлено, что переключаемая часть тока в исследованном сверхпроводящем контуре (с соотношением индуктивностей его ветвей 1:500) не превышает 1% от критического значения ветви с меньшей индуктивностью.

Форма и амплитуда автоколебаний зависят от величины превышения транспортным током его критической величины в одной из ветвей двухсвязного сверхпроводника и могут быть связаны с особенностями формирования резистивности участка ветви, в которой достигается критический ток.

Длительное сохранение замороженного магнитного поля и соответствующего циркулярного тока (не превышающего наименьший критический ток ветвей контура) в двухсвязном сверхпроводнике первого рода при наличии автоколебаний тока свидетельствует о чрезвычайно слабой диссипации магнитной энергии замораживаемого в контуре поля, что требует дальнейших исследований.

Возникновение автоколебаний при транспортном токе через двухсвязный сверхпроводящий контур, равном пороговому значению возникновения экстремально низкой резистивности одной из его ветвей, может быть использовано в качестве альтернативного метода определения критического постоянного тока различных сверхпроводящих структур, прежде всего, имеющих малое нормальное сопротивление (порядка 10^{-6} Ом).

1. А. Роуз-Инс, Е. Родерик, *Введение в сверхпроводимость*, Мир, Москва (1972).
2. S.I. Bondarenko, V.P. Koverya, N.M. Levchenko, A.V. Krevsun, and A.A. Shablo, *Workshop Program of the Mini-Colloquium and International Workshop «Modern Challenges in Microwave Superconductivity, Photonic and Electronics»*, 11–12 June, Kharkov, Ukraine (2009).
3. С.И. Бондаренко, *Дисс. канд. физ.-мат. наук*, ФТИНТ, Харьков (1969).

Detection of self-oscillations of transport current in a double-connected superconductor

S.I. Bondarenko, V.P. Koverya, A.V. Krevsun, N.M. Levchenko, and A.A. Shablo

It is experimentally revealed, that the current in branches of double-connected superconductor makes quasi-harmonic continuous oscillations if the direct transport current through the superconductor circuit achieves a critical value in one of its branches. The mechanism of self-oscillations and the features of magnetic field freezing in the two coupled superconductor with self-oscillations of current are discussed.

PACS: 74.25.F– Transport properties;
74.81.Fa Josephson junction arrays and wire networks.

Keywords: double-connected superconductor, current auto oscillations, frozen magnetic field.