Физика низких температур, 1996, т. 22, № 6, с. 645–647

Экспериментальное наблюдение переходов между фазовыми состояниями в четырехконтактных параллельно-последовательных джозефсоновских контурах

П. Н. Михеенко

Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина НАН Украины, Украина, 340114, г. Донецк, ул. Р. Люксембург, 72

С. Й. Левандовский

Institute Fizyki PAN, Al. Lotnikov 32, PL 02-668 Warszawa, Poland

Р. Монако

Dipartamento di Fisica, Universita di Salerno, I-84100, Salerno, Italy

В. А. Миляев

Институт общей физики РАН, Россия, 117942, г. Москва, ул. Вавилова, 38

Получены экспериментальные данные, свидетельствующие о существовании в многоконтактных интерферометрах стационарных фазовых состояний, являющихся следствием неоднозначного соответствия между фазами сильных и слабых контактов контура. Найдено, что в соответствии с теоретическими расчетами каждое из состояний имеет собственную зависимость критического тока от внешнего магнитного потока. Обнаружены переходы между ними, выраженные в виде систематически повторяющихся скачков напряжения.

Отримано експериментальні дані, що свідчать про існування в багатоконтактних інтерферометрах стаціонарних фазових станів, які є наслідком неоднозначного співвідношення між фазами сильних і слабких контактів контура. Знайдено, що відповідно до теоретичних розрахунків кожен із станів має власну залежність критичного струму від зовнішнього магнитного потоку. Виявлено переходи між ними, що мають вигляд стрибків напруги, які систематично повторюються.

1. Недавние успехи в получении джозефсоновских переходов на основе высокотемпературных сверхпроводников [1–3] позволяют надеяться на их ближайшее применение в многоконтактных интерферометрах. Одним из условий такого применения является изготовление джозефсоновских контактов с близкими критическими токами.

Разница критических токов приводит к довольно серьезным последствиям, не осознаваемым до конца в практике физического эксперимента. Чтобы проиллюстрировать это, обратимся к простому последовательному соединению двух переходов с критическими токами I_1 и I_2. Пусть $I_1 < I_2$ и для каждого из контактов выполняется простое соотношение ток–фаза: $I = I_i \sin \varphi_i$, $i = 1, 2$. Поскольку соединение последовательное,

$$I_1 \sin \varphi_1 = I_2 \sin \varphi_2 \ . \qquad (1)$$

Выберем фазу φ_1 более слабого контакта как ведущую, тогда

$$\varphi_2 = \arcsin \left[\frac{I_1}{I} \sin (\varphi_1) \right] . \qquad (2)$$

Если на фазу φ_1 никаких ограничений нет, то, поскольку $I_1/I_2 < 1$, согласно (2), φ_2 имеет ограниченные интервалы допустимых значений, разделенные запрещенными щелями шириной $2 \arccos (I_1/I_2)$. Разумеется, арксинус является многозначной функцией и общее решение для φ_2 будет

$$\varphi_2 \equiv \varphi_2^{\langle m \rangle} = (-1)^m \varphi_2^0 + \frac{m}{\pi} \ , \qquad (3)$$

где m — целое число; φ_2^0 принадлежит главному интервалу $[-\pi/2, \pi/2]$. Легко, однако, показать, что физически различными являются только ре-

© П. Н. Михеенко, С. Й. Левандовский, Р. Монако, В. А. Миляев, 1996

шения с m равными 0 и 1. Остальные могут быть получены ничего не изменяющей трансляцией на 2π. Тогда исследуемая система имеет два фазовых состояния: $\langle 0 \rangle$ и $\langle 1 \rangle$. В первом из них при произвольной эволюции φ_1 фаза более сильного контакта движется по ветви с $m = 0$, во втором — по ветви с $m = 1$. Можно допустить также переходы между состояниями. Как было показано в [4], если система захвачена в одно из состояний, переход в другое может происходить только с потерей энергии порядка $3{,}5\Phi_0 I_1/2\pi$, где Φ_0 — квант магнитного потока. Однако в цепочке из двух последовательно соединенных контактов невозможно определить, в каком фазовом состоянии находится система.

Такая возможность предоставляется при последовательно-параллельном соединении контактов в петлю, к которой может быть приложен внешний магнитный поток Ф. Рассмотрим, например, четырехконтактный интерферометр, имеющий две параллельные ветви с двумя переходами в каждой из них. Каждая ветвь может находиться в двух состояниях с квантовыми числами 0 и 1. Тогда вся система имеет четыре фазовых состояния: $\langle 00 \rangle$, $\langle 11 \rangle$, $\langle 01 \rangle$ и $\langle 10 \rangle$. Благодаря условию квантования потока изменением Ф можно обеспечить протяжку фаз слабых контактов и получить зависимость от Ф какого-либо параметра системы как целого, например полного критического тока.

Можно еще сузить задачу и рассмотреть стационарные состояния, как такие, у которых полная энергия системы не меняется при малом изменении фазы самого слабого контакта петли [4,5]. Как следует из [4,5], момент перехода в резистивное состояние с критическим током I_c и переходы между фазовыми состояниями удовлетворяют условию стационарности системы. Более того, каждое стационарное фазовое состояние $\langle ij \rangle$, $i, j = 0, 1$, имеет собственную зависимость полного тока от внешнего магнитного потока, которую можно рассчитать, зная критические токи переходов и включенные в цепь индуктивности [4,5]. Таким образом, состояния могут различаться по зависимостям $I_c(\Phi)$.

Для того чтобы надежно идентифицировать различные состояния, необходимо иметь как можно меньшую разницу критических токов слабых контактов обеих ветвей, поскольку I_c не может быть больше суммы этих токов и меньше их разницы. При большом различии токов интервал изменения I_c очень узок. Для проверки возможности реализации фазовых состояний были выбраны четырехконтактные интерферометры н основе ниобиевых джозефсоновских переходов [6]. Современная технология вполне позволяет добиваться в них заранее заданных значений критического тока.

2. Интерферометры приготавливались по «оконной» схеме. Размер окна для каждого из переходов составлял 10×10 мкм. В качестве диэлектрической прослойки использовался окисленный слой алюминия. Ее толщина подбиралась такой, чтобы обеспечить плотность критического тока около 20 А/см^2. Площадь интерферометра, открытая для проникновения потока, составляла 70×70 мкм. Для измерения I_c записывались вольт-амперные характеристики при 70–80 значениях внешнего магнитного поля, охватывая область до четырех квантов потока в пересчете на площадь контура интерферометра. Для уменьшения влияния термических флуктуаций эксперименты проводились при температуре жидкого гелия. Были исследованы четыре различных образца.

3. Экспериментальные данные для одного из образцов представлены кружками на рис. 1. На нем же приведены теоретически рассчитанные зависимости $I_c(\Phi)$ для состояний $\langle 11 \rangle$ и $\langle 10 \rangle$. В верхней части рисунка видно, что при положительной полярности тока реализуется стационарное фазовое состояние $\langle 11 \rangle$, в нижней — $\langle 10 \rangle$. Видна также обязательная для интерферометров периодичность с квантом потока и не очень большая запрещенная щель значений I_c — следствие малой разницы критических токов самых слабых контактов обеих ветвей.

Особое место занимают точки, отмеченные на рис. 1 заштрихованными квадратиками. Они соответствуют необычной аномалии, проявляющейся на вольт-амперных характеристиках в виде кратковременного скачка напряжения (см. рис. 2), не

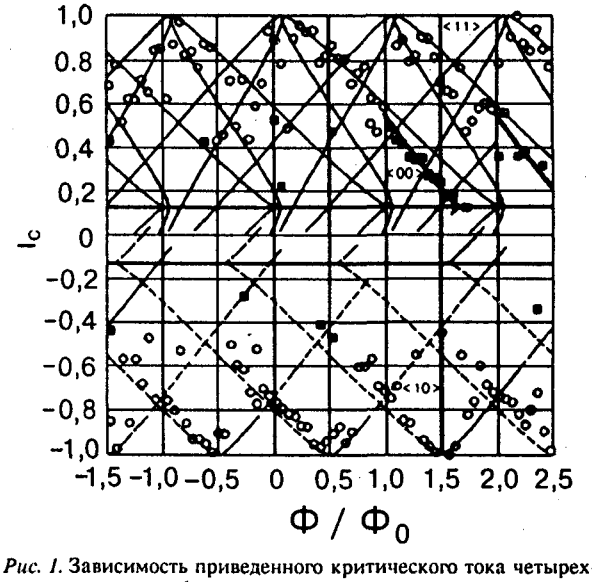

Рис. 1. Зависимость приведенного критического тока четырехконтактного интерферометра от приведенного магнитного потока. Тонкой сплошной линией показаны расчетные кривые для состоянию $\langle 11 \rangle$. Пунктирная линия соответствует состоянию $\langle 10 \rangle$, сплошная жирная — состоянию $\langle 00 \rangle$. Размер точек превосходит интервал погрешности экспериментальных данных.

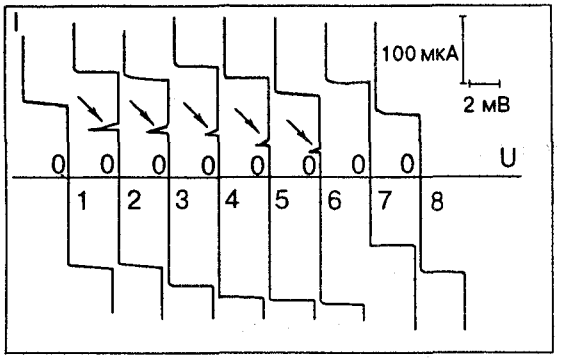

Рис. 2. Серия вольт-амперных характеристик четырехконтактного интерферометра на основе ниобия при различных значениях внешнего магнитного потока, $\Phi = 1{,}014$ (*1*); 1,129 (*2*); 1,243 (*3*); 1,357 (*4*); 1,471 (*5*); 1,586 (*6*); 1,700 (*7*); $1{,}814\Phi_0$ (*8*). Выделенные скачки напряжения соответствуют переходу между состояниями ⟨00⟩ и ⟨11⟩.

выводящего образец из бездиссипативного состояния. Расчеты показывают, что положение этих точек хорошо соответствует состоянию ⟨00⟩ (см. рис. 1).

Таким образом, при повышении тока, протекающего через интерферометр, происходит следующее. При некоторых значениях внешнего магнитного потока, начиная с $I = 0$, в образце реализуется стационарное фазовое состояние ⟨00⟩. Обладая, однако, при таких Ф низкими значениями полного критического тока I_c, при его превышении система имеет выбор: либо перейти в резистивное состояние, либо осуществить переход в новое сверхпроводящее фазовое состояние. Именно последнее и происходит в данном образце. При этом происходит переключение фазовых состояний обеих параллельных ветвей и соответственно при бо́льших токах реализуется состояние ⟨00⟩. Выход в резистивное состояние теперь осуществляется именно из ⟨11⟩, о чем и свидетельствуют соответствующие экспериментальные точки на рис. 1.

При понижении тока, гистерезисном возврате образца в сверхпроводящее состояние и перемене знака I система снова может стартовать из состояния ⟨00⟩, но, как показывают расчетные кривые на рис. 1, далее она переходит в состояние ⟨10⟩, т.е. с фазовым переключением только в одной из параллельных ветвей. Разумеется, каждый интерферометр ведет себя по-своему и это зависит от многих факторов, в частности, от соотношения токов переходов и величины включенных в контур индуктивностей. Общим является лишь преимущественная реализация при малых токах состояния ⟨00⟩.

4. Таким образом, в настоящей работе идентифицированы стационарные фазовые состояния четырехконтактных последовательно-параллельных интерферометров, а наблюдаемые скачки напряжения в бездиссипативном состоянии впервые интерпретированы как момент перехода из одного фазового состояния в другое.

Дополнительным аргументом может служить совпадение по порядку величины энергии, диссипируемой во время скачка (она легко может быть рассчитана по его времени и интегральной мощности, извлекаемой из вольт-амперной характеристики), и предсказанной величины потери энергии $3{,}5\Phi_0 I_1 / 2\pi$ [4]. Для данного образца она составляет $\approx 10^{-8}$ Дж.

В заключение отметим, что дискретное поведение интерференционных систем может служить источником ряда практических приложений.

Эта работа была поддержана грантом № 2.P302.179.06 Польского правительства (KBN).

1. R. Gross, in: *Int. Workshop on HTS Electron Devices*, Whistley Mountain (1994), p. 19.
2. R. Gerdemann, K.-D. Husemann, R. Gross, L. Alff, A. Beck, B. Elia, W. Reuter, and M. Seidel, *J. Appl. Phys.* **76**, 8005 (1994).
3. Q. Z. Jia, D. Reagor, S. R. Folton, M. Hawley, C. Mombourquette, K. N. Springer, and X. D. Wu, *Physica* C228, 160 (1994).
4. S. J. Lewandowski, *Phys. Rev.* B43, 7776 (1991).
5. S. J. Lewandowski, *Phys. Rev.* B45, 2319 (1992).
6. R. Monaco and A. Oliva, *Appl. Phys. Lett.* **64**, 3042 (1994).

Experimental observation of transitions between phase states in four-junction parallel-serial Josephson loops

P. N. Mikheenko, S. J. Lewandowski, R. Monaco, and V. A. Miljaev

The experimental data suggesting the existence of stationary phase states in multiple-junction interferometers, which are a consequence of the ambiguous relation between the phases of strong and weak junctions of the loop, are obtained. The theoretical calculations hold that each state has its own specific dependence of critical current on external magnetic flux. The transitions between the phase states as regularly repeated jumps of voltage are observed.