

УДК 539.537

© 1990

СТАЦИОНАРНЫЙ ТОК В КОЛЬЦЕ ИЗ СВЕРХПРОВОДНИКА

А. И. Шельх

Исследовались характеристики стационарного тока в высокотемпературном сверхпроводнике $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$.

В кольце из проводника любого материала возникновение и направление индукционно-наведенного в нем тока определяются законом электромагнитной индукции Фарадея и правилом Ленца. В кольце из сверхпроводника этот ток не затухает, оставаясь постоянным длительное время, что экспериментально установлено Камерлинг-Оннесом. Как известно, для сверхпроводника характерно предельное значение тока, при достижении которого вещество переходит в нормальное несверхпроводящее состояние. В том случае, когда сверхпроводник и проводник образуют последовательную электрическую цепь, замкнутую на внешний источник электрического напряжения, при достижении предельного критического тока на сверхпроводнике возникает электрическое напряжение. Предполагается, что сверхпроводящий ток исчезает. В кольце, изготовленном из сверхпроводящего материала с индукционно-наведенным в нем током, при достижении определенной его величины также можно ожидать разрушения сверхпроводящего состояния и, следовательно, уменьшения до нуля тока и связанного с ним магнитного потока. Данная работа посвящена экспериментальному исследованию этого явления применительно к кольцу из сверхпроводящего материала $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$.

1. М е т о д и к а и з м е р е н и й

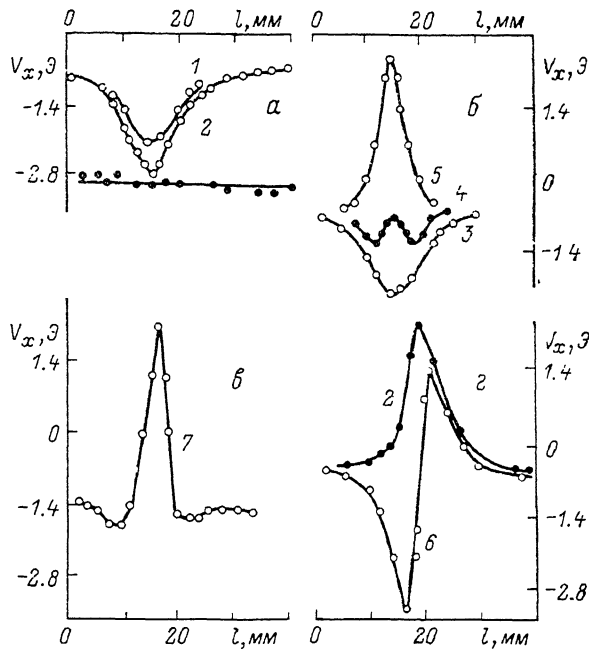
а) Стационарный ток I в сверхпроводящем кольце создает магнитный поток, максимальное значение которого из-за симметрии кольца следует ожидать в его центре. По величине потока можно оценить величину тока в кольце $I(A) \sim 10 HR/2\pi \sim 1.6 HR$, где H — величина магнитного поля в центре кольца (Э), R — радиус кольца (см). В ряде случаев для этих целей целесообразно применять кольцо-эталон. Нами он изготавливался из меди размером, равным размеру исследуемого кольца. В одном месте кольцо-эталон имело тонкий радиальный разрез. К двум образовавшимся сечениям подводился ток, величина и полярность которого устанавливались при помощи внешнего источника. Таким способом в центрах колец из сверхпроводника и эталона можно получить одинаковые по величине и полярности магнитные поля с известным током в одном из колец. Эталон целесообразно изготавливать из исследуемого сверхпроводящего материала, но в настоящее время это связано с определенными затруднениями.

б) Кольцо из сверхпроводящего материала $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ с наружным и внутренним диаметрами 14 и 6 мм соответственно и толщиной 3 мм помещалось в среднюю часть проволочного соленоида, однородное магнитное поле в котором создавалось током I . Соленоид с током и кольцом охлаждались до температуры жидкого азота. После отключения тока в соленоиде

(экстратоки исключались) проводились измерения магнитного поля, созданного индукционно-наведенным током в кольце из сверхпроводника. Магнитное поле измерялось датчиком Холла. Он перемещался вдоль оси кольца и проходил через его центр. Плоскость датчика располагалась перпендикулярно оси кольца, поэтому им измерялась только осевая компонента поля. Измерения проводились в среде жидкого азота при $T \sim 77$ К. В результате получены зависимости величины магнитного поля сверхпроводящего кольца (т. е. сигнал датчика Холла V_x) от положения l датчика на осевой линии кольца по обе стороны от его центра. Такие характеристики $V_x = f(l)$ получены для разных магнитных полей соленоида и, следовательно, для разных индукционно-наведенных токов в кольце из сверхпроводника. Индукционный ток в кольце создавался также с использованием разъемного магнитопровода из феррита. На таком магнитопроводе размещалась обмотка из нескольких витков провода и кольцо из сверхпроводника. Ток в обмотке создавал магнитный поток, который проходил по магнитопроводу и, следовательно, через отверстие кольца. После охлаждения этой конструкции жидким азотом ток в обмотке отключался. Кольцо с индукционно-наведенным в нем сверхпроводящим током снималось с магнитопровода, и затем на нем проводились измерения зависимости $V_x = f(l)$.

Рис. 1. Магнитная индукция V_x вдоль оси l сверхпроводящего кольца, токи в котором индукционно наводились различными по величине внешними магнитными полями.

а—в — токи в кольце наводились полем H проволочного соленоида. 1 — 0.03, 2 — 0.05, 3 — 0.1, 4 — 0.2, 5 — 0.3, 6 — 2.4, 7 — 6; з — токи в кольце наводились полем магнитопровода, который проходил через отверстие кольца.



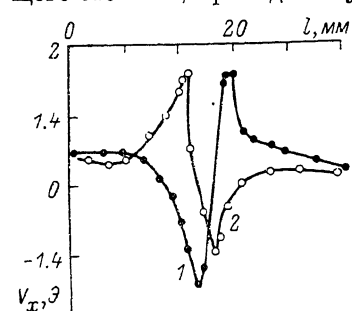
2. Результаты измерений и их обсуждение

На рис. 1 представлены зависимости $V_x = f(l)$, полученные для разных токов в сверхпроводящем кольце, индукционно наведенных разными по величине магнитными полями H соленоида, т. е. разными его токами I , $H = 56.5 I$ Э. Центр кольца, где величина магнитного поля должна достигать экстремального значения, располагался на расстоянии $l_k \sim 17$ мм. При удалении по оси кольца в обе стороны от его центра ($l=0$ и 40 мм) величина магнитного поля уменьшалась практически до 0. При этом не равный нулю сигнал датчика Холла, как видно из рис. 1, $V_{x0} = 0.5$ вызван неэквипотенциальным расположением холловских электродов использованного нами датчика; величины V_{x0} и l_k менялись незначительно.

На рис. 1, а показаны зависимости $V_x = f(l)$, полученные для разных токов в соленоиде, равных $I = 0.03$ и 0.05 А. Видно, что с увеличением I пропорционально растет и магнитное поле в центре сверхпроводящего кольца. На рис. 1, а приведена также прямая, соответствующая $V_x \approx -2$. Она представляет зависимость осевой компоненты магнитного поля соленоида с током $I = 0.05$ А, в центре которого находился также и кольцо. Видно, что поле соленоида в диапазоне перемещений l датчика

Холла однородно по величине и кольцо в сверхпроводящем состоянии не влияет на это поле. После выключения тока в соленоиде индукционно-наведенный ток в кольце создает в центре кольца магнитное поле, величина которого близка по величине магнитному полю соленоида до его выключения. Поля совпадают по знаку. Отметим, что при $I=0.05$ А ток в кольце из сверхпроводника, как показали предварительные измерения, близок к критическому, который для исследованного кольца равен 30 А/см² при $T \sim 77$ К.

На рис. 1, б показаны зависимости $V_x=f(l)$, которые получены для токов в кольце, величина которых должна превышать критический ток. При этом в центре кольца величина магнитного поля уменьшается, а при дальнейшем росте I ($I \geq 0.3$ А) снова возрастает. Но знак этого поля, а следовательно, и направление тока в сверхпроводящем кольце противоположны тому, которое следует ожидать согласно правилу Ленца. Эти результаты можно объяснить тем, что после достижения в кольце критического тока дальнейшее увеличение магнитного поля соленоида, наводящего этот ток, приводит к уменьшению сверхпроводящего тока, направле-



ние которого определяется правилом Ленца; одновременно растет в кольце электрический ток противоположного направления. Для объяснения полученной формы кривой $V_x=f(l)$ для $I=0.2$ А следует допустить, что проти-

Рис. 2. Магнитная индукция V_x вдоль оси l сверхпроводящего кольца.

Ток в нем наводился полем магнитопровода, который проходил через отверстие кольца.

воположно направленные токи в кольцевом сверхпроводнике пространственно разделены следующим образом: одинаково направленные круговые токи располагаются около двух плоских параллельных поверхностей кольца с индексами 1 и 2. Ток с противоположным направлением проходит или в объеме средней части кольца, или по его боковым цилиндрическим поверхностям.

На рис. 1, в дана зависимость $V_x=f(l)$ для тока $I=6$ А, из которой видно, что магнитное поле в центре кольца экстремально, а его направление остается противоположным тому, которое ожидается по правилу Ленца. Но по обе стороны от этого экстремума появляются поля, направление которых соответствует этому правилу.

Из анализа приведенных данных следует, что величина и направление сверхпроводящего тока в кольце зависит от величины внешнего магнитного поля, индукционно-наводящего этот ток.

Индукционные токи в кольце из сверхпроводника, как отмечалось выше, создавались с использованием разъемного магнитопровода. На рис. 1, г показаны две зависимости $V_x=f(l)$ для разных токов в обмотке магнитопровода. Для тока 0.05 А эта зависимость имеет обычный вид с максимумом магнитного поля в центре кольца. Для тока величиной 2.4 А эта зависимость иная. В центре кольца величина магнитного поля равна нулю. Наибольшие по величине поля, противоположные по знаку, наблюдаются вне кольца около его плоских параллельных поверхностей, условно отмеченных индексами 1 и 2.

Таким образом, если магнитный поток соленоида проходит только через отверстие сверхпроводящего кольца, то знак индукционно-наведенного им тока в кольце определяется правилом Ленца. С ростом индукции ток в кольце увеличивается, достигает насыщения и в дальнейшем не меняется. В этом случае конфигурация магнитного поля сверхпроводящего кольца соответствует витку с током (она подобна конфигурации, представленной рис. 1, а). В разрезанном кольце (полукольце) такой ток не возникает.

Если магнитный поток соленоида охватывает весь материал сверхпроводящего кольца, то, как показано выше, приходим к следующим выводам.

1. Величина и знак индукционно наведенного тока в сверхпроводящем кольце зависят от величины внешнего магнитного поля, наводящего этот ток.

2. В сверхпроводящем кольце при достижении определенной критической величины ток, направление которого определяется правилом Ленца, уменьшается. Одновременно начинает расти ток противоположного направления. Оба электрических тока являются сверхпроводящими. В частном случае они могут быть равны друг другу по абсолютной величине.

3. Противоположно направленные токи, протекающие в сверхпроводящем кольце, пространственно разделены.

4. Анализ полученных результатов приводит к выводу о необходимости уточнения физического содержания термина «критический ток в сверхпроводнике».

Эти особенности можно объяснить тем, что при внешних магнитных полях соленоида $\geq 2 \text{ Э}$ в объеме сверхпроводящего кольца начинают заметно возникать вихревые сверхпроводящие токи. Они создают магнитный поток, соответствующий кольцу, вещество которого «намагничено» по оси кольца. Следует ожидать, что возникающая при этом конфигурация магнитного поля будет подобна конфигурации поля постоянного магнита такой же кольцевой формы и намагниченного также по оси. В [1] это подтверждено экспериментально. Намагниченность сверхпроводящего кольца и создаваемое им магнитное поле зависят от величины внешнего поля и стремятся к насыщению. В полукольце результаты аналогичны.

Зависимость для $I = 2.4 \text{ А}$ мы объясняем пространственным разделением двух противоположно направленных электрических токов в сверхпроводящем кольце. На рис. 1, *г* представлен частный случай, когда противоположно направленные сверхпроводящие токи приблизительно равны по абсолютной величине. В этом случае полученное распределение магнитного поля, т. е. наблюдаемую зависимость $V_x = f(l)$ легко получить при помощи кольца-эталоны. Он изготавливался из меди в виде двухвитковой бифилярной катушки. В таком эталоне равные по величине токи в двух витках имеют противоположное направление. В центре такой конструкции магнитное поле равно нулю, а с внешней стороны оно максимально у поверхности и имеет разный знак. Но для сверхпроводящего кольца такое бифилярное распределение токов нетривиально, поскольку предпочтение отдается одной поверхности кольца перед другой. Поэтому требовалось найти элемент асимметрии, который, как казалось, отсутствовал в рассматриваемом опыте. Такой элемент, как установлено, связан с последовательностью снятия с магнитопровода сверхпроводящего кольца с током.

На рис. 2 показаны зависимости распределения магнитного поля кольца. При прочих равных условиях опыта одна из них получена при таком снятии кольца с током с магнитопровода, когда вне его первой оказалась поверхность кольца с индексом 1, а вторая зависимость — с индексом 2. Таким образом, наблюдаемое распределение токов в сверхпроводящем кольце в данном случае, вероятно, связано с взаимодействием магнитных полей кольца и магнитопровода.

Конфигурация магнитных полей сверхпроводящего кольца с током (витка с током) и намагниченного сверхпроводящего кольца (постоянного магнита кольцевой формы) существенно отличаются [2], как, например, рис. 1, *а*, *в* соответственно. Вместе с рис. 1, *б* они иллюстрируют эволюцию перехода от сверхпроводящего кольца с круговым током к «намагниченному» сверхпроводящему кольцу с вихревыми токами в зависимости от величины внешнего магнитного поля.

Опыт с применением ферритового магнитопровода для создания индукции (рис. 1, z ; 2) пока не имеет полного объяснения.

Автор благодарит П. П. Сырникова, В. И. Погодина, Б. Т. Мелеха и А. С. Колосову за помощь в проведении работы.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Шелых А. И., Кудинов Е. К., Сырников П. П., Степанова М. И., Смирнов И. А. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. С. 32—35.
- [2] Васильев Э. А. // Письма в ЖЭТФ. 1989. Т. 49. № 2. С. 111—113.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Поступило в Редакцию
3 января 1990 г.

