

## ПРЯМОЕ НАБЛЮДЕНИЕ СЖАТИЯ ТРАНСПОРТНОГО ТОКА ПЕРЕМЕННЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

*И.Ф.Волошин, Н.В.Ильин, Н.М.Макаров, Л.М.Фишер,  
В.А.Ямпольский*

*Всесоюзный электротехнический институт им. В.И.Ленина  
111250, Москва*

Поступила в редакцию 24 декабря 1990 г.

На основе измерения пространственного распределения магнитного поля выполнено прямое наблюдение эффекта коллапса транспортного тока в переменном магнитном поле. Изучена динамика перехода сверхпроводника в резистивное состояние в этих условиях.

Модель критического состояния, предложенная Бином около тридцати лет назад <sup>1</sup>, в настоящее время широко применяется для описания электромагнитных свойств ВТСП образцов. Применение этой модели к традиционным ("холодным") сверхпроводникам позволило успешно объяснить необратимость кривой намагничивания жестких сверхпроводников, рассчитать потери в низкочастотном магнитном поле. Однако, простейшая ситуация, в которой внешнее магнитное поле  $H$  направлено вдоль транспортного тока  $\vec{I}$ , и реализуется бессиловая конфигурация, детально не анализировалась.

Рассмотрение случая  $\vec{H} \parallel \vec{I}$  ( $I < I_c$ , где  $I_c$  - критический ток), выполненное в <sup>2</sup>, показало, что в такой геометрии может наблюдаться эффект сжатия транспортного тока (коллапс) внешним переменным магнитным полем. В результате область, по которой протекает транспортный ток, смещается к оси образца и при некоторой амплитуде поля  $H^*$  достигает его центра. В таких условиях плотность транспортного тока становится равной критической, и в объеме образца возникает электрическое поле, обуславливающее диссипативное протекание тока  $I$ . В <sup>2</sup> была измерена зависимость тока  $I^*$ , при котором появляется диссипация, от амплитуды поля  $H_0$ . Был показано, что эта зависимость существенно отличается от аналогичной зависимости, полученной в статических условиях. Именно это различие и явилось косвенным свидетельством существования эффекта коллапса транспортного тока.

В настоящей работе выполнено прямое наблюдение эффекта коллапса в цилиндрических ВТСП образцах УВСО. Для обнаружения этого эффекта в образце диаметром 10 мм было высверлено отверстие 0,8 мм в направлении,

перпендикулярном оси. В отверстие помещался миниатюрный датчик Холла, который можно было перемещать внутри отверстия при помощи микрометрического винта. Примененное устройство позволяло измерять пространственное распределение азимутальной компоненты постоянного магнитного поля  $H_\varphi$ , создаваемого транспортным током.

Эксперимент проводился при температуре 77 К, в области частот 30 - 1000 Гц. Критический ток образца в отсутствие внешнего магнитного поля составлял 25 А. Результаты измерений пространственного распределения магнитного поля транспортного тока, который устанавливался равным 10 А, при различных значениях внешнего переменного поля  $H_0$  приведены на рисунке. В отсутствие внешнего магнитного поля (кривая 1) и при малой амплитуде  $H_0$  (кривая 2) максимальное значение азимутального поля  $H_\varphi$  достигается вблизи поверхности  $r = R = 0,5$  см, в то же время в широкой области вблизи оси поле близко к нулю. Это означает, что транспортный ток протекает

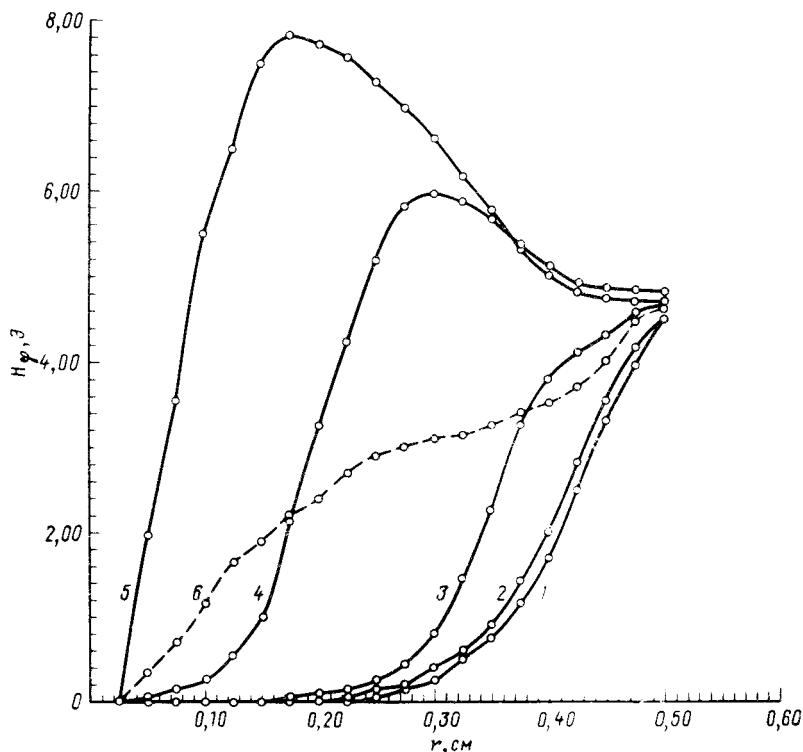


Рис. 1. Радиальное распределение азимутального магнитного поля транспортного тока  $I = 10$  А при различных амплитудах переменного магнитного поля частотой 73 Гц: кривая 1 - переменное поле отсутствует, 2 -  $H_0 = 10,2$  Э, 3 - 15 Э, 4 - 20 Э, 5 - 25 Э, пунктирная кривая 6 -  $H_0 = 35$  Э

в приповерхностном слое. В достаточно сильном переменном поле (кривые 4 и 5) распределение  $H_\varphi(r)$  качественно меняется. На кривых появляется отчетливо выраженный максимум, который по мере увеличения амплитуды переменного поля смещается вглубь образца. В сильном внешнем переменном поле  $H_0 = 25$  Э (кривая 5) магнитное поле  $H_\varphi$  достигает оси образца. Именно при этом значении тока наблюдалось появление постоянного напряжения на образце, которое регистрировалось с помощью потенциальных контактов. Это означает, что при данном значении  $H_0$  плотность тока в шнуре достигает кри-

тического значения, образец переходит в резистивное состояние, и протекание тока сопровождается диссипацией. Начиная с этой величины  $H_0$ , максимум на распределении  $H_\varphi(r)$  начинает вырождаться (кривая б), и по мере дальнейшего роста  $H_0$  распределение тока все более стремится к однородному.

Таким образом, приведенные результаты являются прямым доказательством коллапса транспортного тока во внешнем переменном поле. В самом деле, проникновение переменного поля  $H_z$  в объем образца сопровождается появлением в этой области электрического поля, вызывающего протекание азимутального экранирующего тока с плотностью равной критической. Соответственно, транспортный ток вытесняется из этой области. Образование максимума на кривых  $H_\varphi(r)$  по существу означает, что трубка транспортного тока, имевшая исходный внешний радиус, близкий к радиусу образца, в переменном поле  $20 \text{ Э}$  сжимается примерно вдвое. Распределение переменного поля в поверхностной области, соответствующее модели критического состояния подтверждается прямым измерением с помощью того же датчика Холла, повернутого на  $90^\circ$  и регистрирующего компоненту переменного магнитного поля, направленного вдоль оси образца. Граница раздела областей, в одной из которых протекает ток, экранирующий переменное магнитное поле, а в другой - транспортный ток, лежит в области максимума кривых  $H_\varphi(r)$ . Когда протекание транспортного тока становится диссипативным (кривая 5), происходит перемешивание азимутального и аксиального токов. Заметим, что немонотонное распределение азимутального поля имеет место и в резистивном состоянии. Решение уравнений критического состояния позволяет найти распределения токов в образце и в этих условиях. В частности, распределение транспортного тока имеет вид

$$j_z(r) \simeq E_z / (E_z^2 + E_\varphi^2)^{1/2},$$

где  $E_z$  и  $E_\varphi$  - соответствующие компоненты электрического поля. В принципе, используя приведенные на рисунке пространственные распределения полей, можно определить локальный критический ток в любой точке образца и получить полную информацию о критическом состоянии. Однако наличие отверстия в образце вносит искажение в расчетное распределение полей, поэтому все проведенное здесь рассмотрение носит лишь качественный характер.

В заключение отметим, что рассмотренное явление не является эффектом, существующим лишь в ВТСП образцах. Аналогичный эффект может наблюдаться и в традиционных жестких сверхпроводниках. Отличие состоит лишь в том, что в ВТСП коллапс проявляется более ярко. Дело в том, что, вследствие малых значений критической плотности тока коллапс можно наблюдать в слабых переменных магнитных полях низкой частоты.

## Литература

1. Bean C.P. Phys. Rev. Lett., 1962, 8, 250.
2. Baltaga I.V., Makarov N.M., Yampol'skii V.A., Fisher L.M., Il'in N.V., Voloshin I.F. Phys. Lett. A, 1990, 148, 213.