

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 ¹, 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 ², 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 ² 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_φ , 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_φ 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

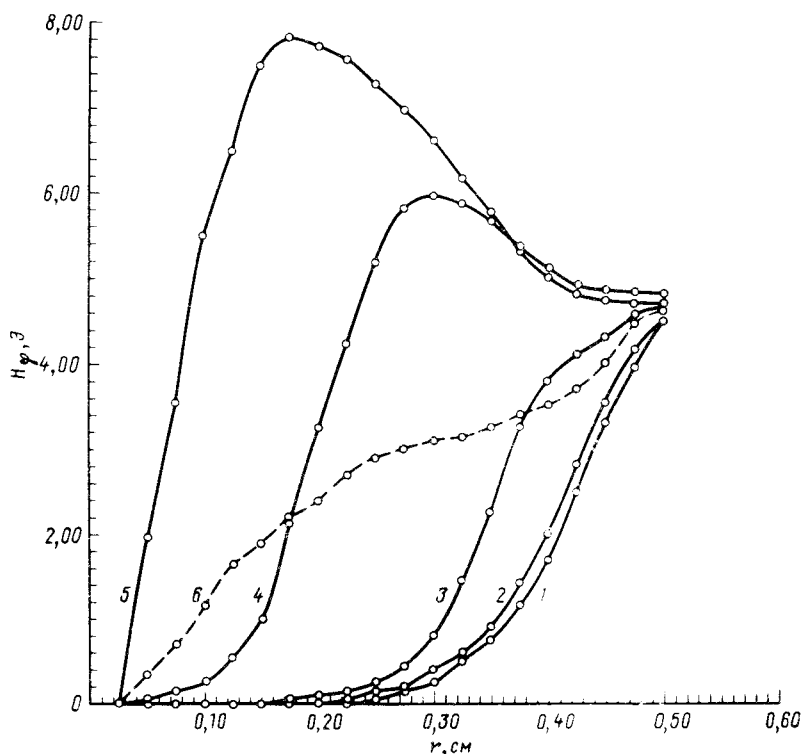


Рис. 1. Радиальное распределение азимутального магнитного поля транспортного тока $I = 10$ А при различных амплитудах переменного магнитного поля частотой 73 Гц: кривая 1 - переменное поле отсутствует, 2 - $H_0 = 10,2$ Э, 3 - 15 Э, 4 - 20 Э, 5 - 25 Э, пунктирная кривая 6 - $H_0 = 35$ Э

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_φ 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 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° 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_φ - 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.