

ШНУРОВАНИЕ ТОКОВ И МАКРОТУРБУЛЕНТНОСТЬ В СВЕРХПРОВОДНИКАХ ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

*В.Власко-Власов¹⁾, У.Велл*²⁾, В.Кабанов, Дж.Крэбтри*²⁾, В.Никитенко*

*Институт физики твердого тела РАН
142432 Черноголовка, Московская обл., Россия*

**Argonne National Laboratory
9700 South Cass Avenue, Argonne, IL 60439, USA*

Поступила в редакцию 27 декабря 1996 г.

В монокристаллах YBCO во вращающемся магнитном поле обнаружено появление специфических магнитных структур, связанных с образованием протяженных токовых шнуров. Подобно токовым шнурам в плазме, они оказываются неустойчивыми и распадаются на токовые макровихри. Возникновение шнуров объясняется формированием замкнутых колец потока вдоль фронтов перемагничивания и их схлопыванием с образованием мейсснеровских цилиндров. Суммарный ток по поверхности и в вихревой оболочке цилиндра (последний доминирует в ВТСП) превышает критический ток в таком же объеме, удаленном от шнура.

PACS: 74.60.Ge, 74.72.Bk

Перемагничивание сверхпроводников II рода рассматривается обычно в рамках моделей критического состояния [1,2], развитых для бесконечных образцов (пластин и цилиндров) в продольном поле. При этом фронт перемагничивания представляет собой двумерную поверхность, параллельную полю, и прямые нити потока ориентируются вдоль него. В реальных образцах краевые эффекты определяют сильный изгиб вихрей и приводят к появлению специфических токовых структур и неустойчивостей [3]. В настоящей работе обнаружено формирование токовых шнуров и их распад в макровихревые образования в пластинках ВТСП при вращении поля в их плоскости. Обнаруженные особенности позволяют объяснить неустойчивости намагниченности в сверхпроводниках во вращающихся полях, наблюдавшиеся в последние 20 лет при макроскопических измерениях [4].

Исследование структуры магнитного потока в монокристаллах YBCO (толщиной от 20 до 110 мкм, размерами в плоскости 0.5–1 мм и с отношениями ширины к толщине от 5 до 40) проводилось с помощью магнитооптических индикаторных пленок из висмутсодержащего феррограната, позволяющих визуализировать и измерять нормальную компоненту индукции на поверхности сверхпроводника [5,6]. Поле медленно вращалось в развитой ab-плоскости кристалла, нормальной к оптической оси. При этом выявлялись только отклонения магнитного потока от направления поля в сторону перпендикуляра к поверхности образца. При слегка раскращенных поляризаторах микроскопа противоположно направленные нормальные компоненты индукции вызывали ослабление или усиление фоновой интенсивности и возникновение черно-белого контраста.

¹⁾e-mail: vlasko@issp.ac.ru

²⁾U.Welp, G.Crabtree.

В исходном состоянии (при наложении поля на охлажденный образец на краях пластин, нормальных к прикладываемому плоскостному полю, наблюдался обычный, магнитооптический контраст [3,5,6] из-за частичного огибания сверхпроводника линиями потока. При вращении поля контраст на этих краях существенно изменялся. Это связано с изменением характера изгиба вихрей вблизи краев (при приложении поля вихри огибают углы образца, при повороте поля линии захваченного ранее потока меняют знак кривизны). В то же время возникает контраст на краях, нормальных к новому направлению поля, где вновь входящие вихри огибают середину кристалла. При этом в центральной области образца распределение потока остается практически неизменным, а на границе между ней и периферией, где изменяется изгиб вихрей, появляются периодические узкие полосы более яркого контраста. Они отвечают отклонениям вихрей из плоскости образца в этих местах. Такие периодические отклонения можно связать с геликоидальными возмущениями вихрей. При повороте поля в периферийной зоне возникают токи, перпендикулярные токам, индуцированным в исходном H , то есть параллельные ранее проникшим вихрям. В этом случае захваченные вихри оказываются неустойчивыми к геликоидальным возмущениям их формы [7,8], что и создает модуляцию нормальной компоненты индукции на поверхности образца. Отметим, что период наблюдаемых полос близок к оценке шага геликоидов по теории [8].

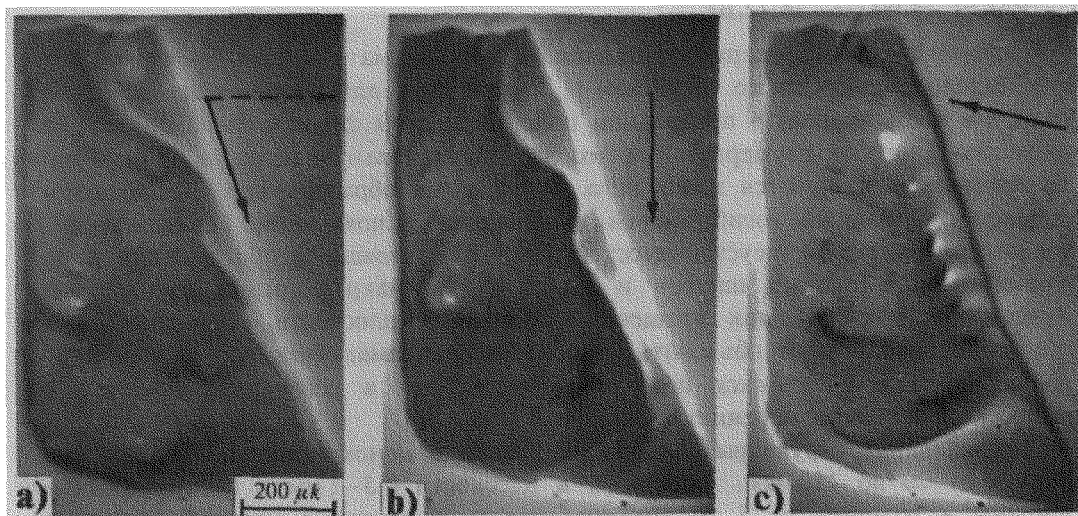


Рис.1. Магнитооптический контраст, обусловленный токовыми линиями, возникающими и распадающимися в пластине YBCO при вращении внешнего магнитного поля в ее плоскости по часовой стрелке. $T = 43\text{ К}$, $H = 1\text{ кЭ}$. Светлый и темный контрасты соответствуют нормальным компонентам индукции противоположной полярности. Соответствующие направления поля показаны сплошными стрелками. Пунктирная стрелка обозначает направление поля в начальный момент времени

Новые особенности возникают при повороте поля на $\sim 90^\circ$ у краев, ориентированных вдоль H (нормальных к направлению исходного поля). Здесь появляются линии яркого контраста с берегами разной окраски (рис.1а), соответствующей противоположным нормальным компонентам индукции на берегах. Такая картина характерна для поля вокруг провода с током и отвечает кон-

центрации тока на этих линиях. В образцах небольшой длины и ширины контраст возникает вдоль одной непрерывной линии. В кристаллах с достаточно длинными сторонами линии возникают уступами (как на рис.1а), наклоненными к краю образца. При дальнейшем вращении поля они объединяются в непрерывную структуру (рис.1б). Профиль нормальной компоненты индукции B_n , измеренный поперек линии, дает величину B_n на ее берегах $\cong \pm 80 \text{ Э}$ (при поле в плоскости $\sim 1.5 \text{ кЭ}$ и $T \sim 50 \text{ К}$). Подгонка профиля модельными токовыми распределениями показала, что он лучше всего описывается тремя параллельными нитями тока в пластине, несущей ток некоторой средней плотности. Вдоль центральной нити ток максимален и течет вдоль критического тока в окружающем объеме. А в сателлитных нитях он в ~ 3 раза меньше и направлен противоположно. Это отвечает увеличению тока вдоль середины наблюдаемых ярких линий и ослаблению тока на их сторонах.

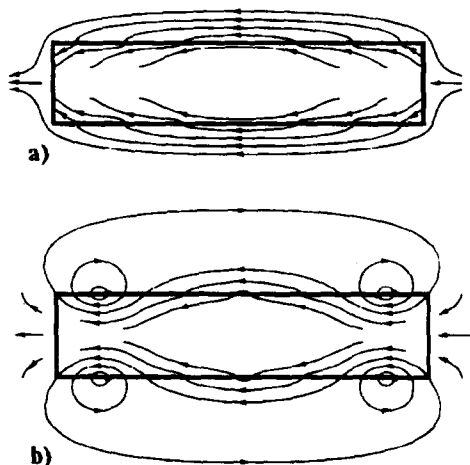


Рис.2. Схемы распределения потока в центральном поперечном сечении ВТСП пластины: а - при наложении внешнего магнитного поля параллельно ее поверхности, б - после его поворота на 90° (линии потока, перпендикулярного сечению пластины, не показаны)

Формирование токовых линий удастся объяснить с учетом изгиба вихрей при повороте поля. При приложении поля концы вихрей опущены вниз (к средней плоскости) на краях образца (рис.2а). При вращении H величина компоненты поля, вызвавшего их возникновение, уменьшается (вплоть до нуля) и вихри начинают двигаться в противоположном направлении - к поверхности кристалла. При этом вблизи ее образуются полупетли (рис.2б) или замкнутые петли. Это происходит вдоль фронтов, идущих под некоторым углом к краю. В дальнейшем полупетли и петли малого радиуса схлопываются за счет силы линейного натяжения вихрей, когда она превышает препятствующую этому силу пиннинга. В результате получаются цилиндры, свободные от потока. По их поверхности, разделяющей мейснеровское и смешанное состояния, течет большой ток намагничивания i_M , который может превышать потери критического тока внутри цилиндра $-i_c$. Впервые возникновение подобных "мейснеровских дыр" обсуждалось в [9,10]. Численные оценки показывают, что в ВТСП существенный вклад в полный ток вдоль "мейснеровской дыры" связан с увеличением критического тока в оболочке цилиндра. Там, где сегменты вихревых петель лежат вдоль базисной плоскости, плотность критического тока превышает средний критический ток J_c в окружающем объеме. На сторонах

же цилиндра, где вихри ориентированы вдоль оси c , плотность тока, наоборот, меньше J_c . В результате в центральной части "мейсснеровской дыры" возникает избыточный положительный ток, а по бокам формируются негативные сателлиты. С помощью такой трехтоковой модели удастся получить хорошую подгонку профилей индукции, измеренных поперек линий сильного контраста.

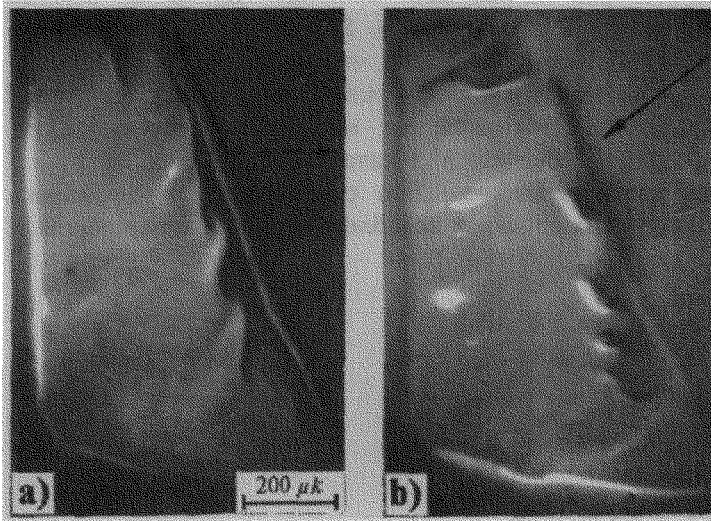


Рис.3. Магнитооптический контраст, обусловленный токовыми линиями, возникающими в пластине YBCO при вращении внешнего магнитного поля в ее плоскости против часовой стрелки

При дальнейшем повороте H линии яркого контраста распадаются на небольшие области с вихрями, перпендикулярными поверхности (рис.1с). Они соответствуют образованию замкнутых токовых петель (макротокмахов), которые затем движутся по кристаллу, меняют форму и размер, и частично аннигилируют. Кроме того, новые линии концентрации тока возникают на соседних краях образца (рис.1с) и процесс повторяется. В результате формируются сложные распределения индукции, которые и характеризуют динамическую структуру потока во вращающемся поле.

При вращении поля в противоположном направлении симметрично изменяется направление токовых линий (рис.3). В остальном детали процесса повторяются. Отметим, что подобная картина наблюдалась во всех исследованных образцах вплоть до пластин с отношением ширины к толщине ~ 40 , где одномерная биновская картина перемагничивания [1], казалось бы, могла реализоваться.

Очевидно, что образование и распад токовых шнуров, а также последующее движение макротокмахов должны вызывать локальные всплески электрического поля, которые часто наблюдались в сверхпроводниках во вращающихся полях [4]. Представляется, что характерные времена формирования и преобразования обнаруженных структур, наряду с геликоидальными возмущениями, определяют периодические изменения локального потенциала, выявленные в эксперименте (см. ссылки в [4]).

Авторы из ИФТТ благодарны за поддержку Международному научному фонду (грант RF1000 и RF1300) и Фонду Государственной научно-технической программы России "Актуальные проблемы в физике конденсированного состояния" (программа "Сверхпроводимость"). Работа также поддерживалась US DOE, BES-MS, контракт №W-31-109-ENG-38.

-
1. C.Bean, Phys. Rev. Lett. **8**, 250 (1962); Rev. Mod. Phys. **38**, 31 (1964).
 2. Y.B.Kim, C.F.Hempstead, and A.R.Strnad, Phys. Rev. **129**, 528 (1963).
 3. V.K.Vlasko-Vlasov, V.I.Nikitenko, A.A.Polyanskii et al., Physica C**222**, 361 (1994).
 4. E.H.Brandt, Rep. Progr. Phys. **58**, 1465 (1995), §7.2.
 5. L.M.Dorosinskii, M.I.Indenbom, V.I.Nikitenko et al., Physica C**203**, 149 (1992).
 6. V.K.Vlasko-Vlasov, L.M.Dorosinskii, A.A.Polyanskii et al., Phys. Rev. Lett. **72**, 3246 (1994).
 7. J.Clem, Phys. Rev. Lett. **38**, 1425 (1977).
 8. E.H.Brandt, Phys. Lett. **79A**, 207 (1980).
 9. H.Koppe, Phys. Stat. Solidi **17**, K229 (1966).
 10. J.E.Evetts and A.M.Campbell, Proc. of the X Intern. Conf. on Low Temperature Physics (Moscow, USSR, Aug. 31-Sept. 6, 1966), Moscow, VINITI, 1967.