Физика низких температур, 1996, т. 22, № 11, с. 1268–1271

Пиннинг и динамика магнитного потока в умеренно анизотропных сверхпроводниках

В. М. Пан, В. Ф. Соловьев

Институт металлофизики НАН Украины, Украина, 252142, г. Киев, ул. Вернадского, 36

Приведены результаты измерения анизотропии плотности критического тока в монокристаллах ВТСП соединения YBCO магнитным и транспортным методами. Показано, что в монокристаллических образцах доминирующими центрами пиннинга являются точечные и двумерные дефекты. С точки зрения предложенной модели анализируются литературные данные по измерению критического тока в монокристаллах YBCO.

Наведено результати вимірювань анізотропії густини критичного струму в монокристалах ВТНП сполуки YBCO магнітним і транспортним методами. Показано, що в монокристалічних зразках домінуючими центрами пінінга є точковий і двовимірний дефекти. З точки зору запропонованої моделі аналізуються літературні дані по вимірюванню критичного струму в монокристалах YBCO.

Введение

Токонесущие свойства ВТСП материалов определяются совместным действием двух факторов: кристаллической анизотропии соединения и характером центров пиннинга конкретного образца. Влияние кристаллической анизотропии проявляется в угловой зависимости равновесных параметров сверхпроводника и, как следствие, усилении роли термических флуктуаций. Оценить вклад центров пиннинга более сложно, поскольку в реальных ВТСП образцах, как правило, встречается иерархия дефектов различного типа. Перечислим наиболее характерные из них: 1) точечные ($0D$) дефекты — кислородные вакансии; 2) одномерные ($1D$) — дислокации и дислокационные петли; 3) двумерные ($2D$) — двойниковые плоскости. Доминирование определенного типа центров пиннинга определяется методом приготовления образца. Так например, в эпитаксиальных пленках и текстурированных образцах соединения YBCO пиннинг потока реализуется за счет взаимодействия вихрей с дислокациями и дислокационными петлями. В этом случае на угловой зависимости плотности критического тока J_c наблюдаются два максимума при $\mathbf{H} \parallel c$ и $\mathbf{H} \parallel ab$, а зависимость J_c как функция поля носит монотонный характер. В совершенных же монокристаллах плотность дислокаций на несколько порядков ниже, что приводит к качественному изменению ситуации. Как показано в наших предыдущих публикациях [1,2], эти изменения связаны со специфическим механизмом пиннинга, в корне отличающимся от случая разупорядоченных (пленочных и текстурированных) образцов. Тем не менее физическая природа пиннинга потока в монокристаллах до сих пор остается дискуссионной, так как зачастую экспериментальные результаты, полученные различными группами, плохо согласуются между собой, что приводит к взаимоисключающим трактовкам. Отметим возможные причины этой несогласованности: 1) измерения J_c монокристаллов проводятся при разных уровнях диссипации, значениях внешнего магнитного поля и температуры; 2) различна топология пути протекания тока, что особенно важно при сравнении угловых зависимостей J_c, полученных транспортным и магнитным методами. В данной работе делается попытка построения модели взаимодействия вихревой решетки (ВР) и потенциала пиннинга в монокристаллических образцах на основе собственных и литературных данных. Предлагаемая модель, по мнению авторов, объясняет, по меньшей мере качественно, наблюдавшееся в эксперименте разнообразие угловых и полевых зависимостей J_c монокристаллов YBCO.

Эксперимент

Плотность транспортного критического тока измерялась с помощью импульсной методики, подробно описанной в [2]. Основные параметры установки: длительность токового импульса 10 мкс, амплитуда 0–10 А, критическая напряженность электрического поля на образце 10 мкВ/см. Проводи-

© В. М. Пан, В. Ф. Соловьев, 1996

лись параллельные измерения плотности критического тока магнитным методом, что позволило получить информацию о поведении ВР при низких температурах и малых уровнях диссипации. Поле вблизи образца (поле B) регистрировалось миниатюрным датчиком Холла (размеры 50×50 мкм), после чего из этой величины вычиталось значение внешнего поля H магнита, измеренное независимым датчиком, в результате чего определялась намагниченность образца M. Величина J_c определялась из соотношения $J_c = M/d$, где d — толщина образца. Уровень диссипации при магнитных измерениях J_c контролируется скоростью развертки внешнего магнитного поля, в данном случае скорость развертки составляла 0,01 Тл/с, что соответствовало напряженности электрического поля 0,1 мкВ/см на поверхности образца. Объектами исследования были монокристаллы YBCO, полученные методом спонтанной кристаллизации из расплава. Критическая температура равна 90 К при ширине перехода 0,2 К. Размер двойниковых доменов, определенный из наблюдения в поляризационном микроскопе, 0,5–1 мкм.

Результаты и обсуждение

Угловая зависимость транспортного критического тока двойникованного монокристаллического образца YBCO при различных значениях внешнего магнитного поля представлена на рис. 1 (здесь θ означает угол между вектором поля H и осью c кристалла). Предполагается, что в данном случае

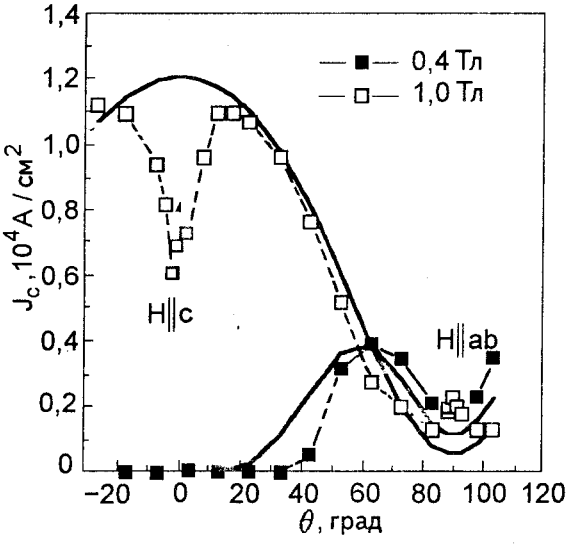

Рис. 1. Угловые зависимости плотности транспортного критического тока монокристалла YBCO при T = 83,2 К.

анизотропия J_c в диапазоне значений угла $20° < \theta < 90°$ — следствие пиннинга на изотропных точечных дефектах — кислородных вакансиях. Эффективное действие двойниковых плоскостей и дислокационных петель ограничено узким интервалом углов между вектором магнитного поля и плоскостью дефекта. Для описания вклада точечных дефектов воспользуемся феноменологическим скейлинговым законом Крамера:

$$J_c B = A B_c^m b^p (1 - b)^q; \; b = B/B_{IRR} \; . \qquad (1)$$

Определяя значения индексов аппроксимациями полевых зависимостей J_c при различных значениях θ, мы обнаружили их универсальность в интервале углов $20° < \theta < 80°$, а именно $p \cong q \cong 2$. Этот факт подтверждает сделанное выше предположение о том, что в этом диапазоне θ анизотропия J_c появляется из-за угловой зависимости поля необратимости B_{IRR} , а центры пиннинга изотропны. Мы воспользуемся результатом теории Гинзбурга–Ландау для угловой зависимости B_{IRR}:

$$B_{IRR}(\theta) = B_{IRR}(0)/(\cos^2\theta + \sin^2\theta\,/\Gamma^2)^{1/2} \; . \qquad (2)$$

Подставляя функцию $B_{IRR}(\theta)$ в (1), получаем аналитическое выражение вклада точечных дефектов, соответствующие аппроксимации экспериментальных кривых $J_c(\theta)$ показаны на рис. 1 сплошными линиями. Таким образом, в сильных полях (1 Тл) заметен вклад только точечных центров, в то же время в промежуточных полях на кривой $J_c(\theta)$ возникает минимум, который является следствием действия двойниковых плоскостей. Как показано ранее [2], аномальная зависимость $J_c(\theta)$ связана с полевой аномалией J_c так называемым пик-эффектом, который подавляется при ориентации поля вдоль плоскости двойника. Следуя изложенной в [2] аргументации, предположим, что аномальное возрастание J_c как функции поля происходит из-за резкого уменьшения продольного корреляционного радиуса Ларкина–Овчинникова L_c при переходе через некоторое граничное значение внешнего магнитного поля (мы не будем обсуждать конкретные механизмы, приводящие к уменьшению L_c , некоторые из них рассмотрены в [3]). В данном контексте следует различать две составляющие J_c : J_c^{0D} — вклад точечных дефектов, вычисляемый согласно теории коллективного пиннинга, и J_c^{2D} — вклад двойниковых плоскостей, который может быть рассчитан исходя из модели Блаттера–Винокура [4].

Оказывается, что возможны ситуации, когда суммарное значение критического тока не равно сумме этих составляющих, т.е. возникает интерференция, что и проявляется как минимум на угловой зависимости J_c (поле 0,4 Тл, рис. 1). Интерференция возможна, если поперечный корреляционный радиус R_c домена Ларкина–Овчинникова больше периода двойниковой структуры образца l. При этом благодаря магнитному взаимодействию между закрепленными двойниковой плоскостью и свободным сегментами вихря (при значениях θ меньше критического угла захвата) происходит увеличение эффективного значения модуля сгиба C_{44} и уменьшение эффективности пиннинга на кислородных вакансиях вследствие увеличения L_c.

Поскольку полевая зависимость R_c имеет максимум, эффект интерференции ограничен диапазоном промежуточных полей, в котором $R_c > l$. Этим объясняется неоднозначность роли двойниковых плоскостей в пиннинге потока в монокристаллах.

1. В малых полях, ниже поля пик-эффекта, продольный корреляционный радиус велик, а поперечный мал и $J_c^{2D} > J_c^{0D}$. Поэтому результаты экспериментов по декорированию вихревой структуры [5] (значения внешнего поля в экспериментах не больше 100 Э), как правило, говорят об эффективности двойников как центров пиннинга.

2. В промежуточных полях, как упоминалось выше, двойники препятствуют реализации эффективного трехмерного пиннинга на точечных дефектах при малых значениях угла θ, понижая J_c, и практически не влияют на пиннинг при θ больше угла захвата ($\cong 20°$), поле 0,4 Тл, рис. 1.

3. В высоких полях возрастает разупорядоченность ВР и при достижении условия $R_c < l$ интерференция исчезает, однако, поскольку в этих полях $J_c^{2D} << J_c^{0D}$, двойниковый максимум J_c при $\mathbf{H} \parallel c$ практически не заметен на фоне сильного вакансионного пиннинга, поле 1 Тл на рис. 1.

4. При приближении к линии необратимости термические флуктуации резко уменьшают эффективность вакансионного пиннинга, в то же время пиннинг на двойниках, дефектах макроскопического масштаба, остается достаточно сильным вплоть до точки плавления ВР. Это означает, что $J_c^{2D} >> J_c^{0D}$ при $B \cong B_{IRR}$. Поэтому измерения на постоянном токе [6], проводившиеся вблизи линии необратимости, свидетельствуют об эффективности двойников как центров пиннинга.

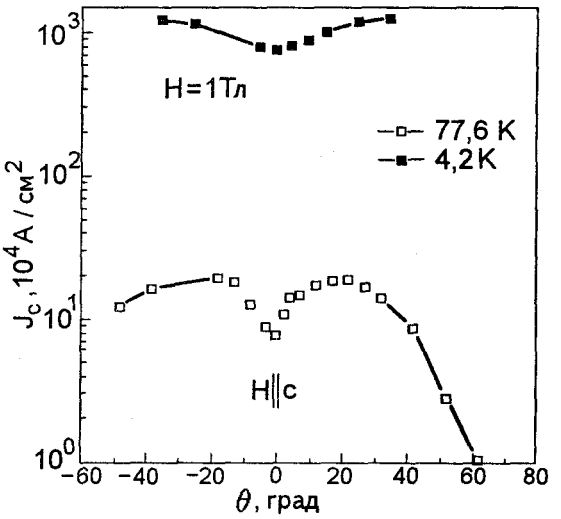

Рис. 2. Угловые зависимости плотности критического тока, измеренные магнитным методом.

Понижение температуры приводит к уменьшению термических флуктуаций и усилению как вакансионного, так и двойникового пиннинга. Измерения при низких температурах проводились описанным выше магнитным методом, их результаты приведены на рис. 2. Из рисунка следует, что при низких температурах минимум становится менее выраженным, ширина его увеличивается. Действительно, усиление двойникового пиннинга приводит к увеличению угла захвата вихря двойниковой плоскости, однако ввиду большей разупорядоченности ВР, вызванной вакансионным потенциалом пиннинга, эффекты интерференции оказываются менее выражены.

Динамический аспект рассматриваемой проблемы более сложен, так как пока не найдено адекватное описание динамики вихревого ансамбля в совершенных монокристаллах, как это сделано в рамках моделей коллективного крипа и вихревого стекла для случая сильно разупорядоченных образцов. Экспериментально показано [2], что при высоких уровнях диссипации и малых магнитных полях (конкретное значение напряженности электрического поля зависит от величин магнитного поля и температуры) выполняются предсказания классической модели среднего поля [7].

Работа выполнена в рамках проектов U4T000-U4T200 Международной научной ассоциации (International Science Foundation) и проекта «Сверхток» Государственного комитета Украины по вопросам науки и технологий.

1. V. F. Solovjov, V. M. Pan, and H. C. Freyhardt, *Proc. of 7IWCC*, Alpbach, 435 (1994).
2. V. F. Solovjov, V. M. Pan, and H. C. Freyhardt, *Phys. Rev.* **B50**, 13724 (1994).
3. P. Korevaar, J. Aarts, P. Berghius, and H. Kes, *Phys. Rev.* **B42**, 1004 (1990).
4. G. Blatter, J. Phyner, and V. Vinokur, *Phys. Rev.* **B43**, 7826 (1991).
5. R. Bleim, M. Audier, Y. Brechet, F. Weiss, J. P. Senateur, and A. Reunault, *Philos. Mag. Lett.* **65**, 113 (1992).
6. W. K. Kwok, U. Welp, G. W. Grabtree, K. G. Vandervoort, R. Hulscher, and J. L. Liu, *Phys. Rev. Lett.* **64**, 966 (1990).
7. D. S. Fisher, *Phys. Rev.* **B31**, 1396 (1986).

Pinning and dynamics of magnetic flux in moderately anisotropic superconductors

V. M. Pan and V. F. Solovjov

Magnetization and transport current data on critical current density anisotropy in high-T_c YBCO single crystals are reported. In single-crystalline samples the dominant pinning centers are shown to be point-like and two-dimensional defects. Literature data on critical current measurements in YBCO single crystals are analyzed on the base of proposed model.