Исследование критического состояния, создаваемого током в керамическом ВТСП

Н.А. Боголюбов
Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия

Проведено экспериментальное исследование зависимости критического тока от температуры, размеров и формы поперечного сечения керамических ВТСП образцов на основе иттрия (Y-123) и висмута (фазы 2223 и 2212+2223). Установлено, что критический ток, создаваемое им внутри образца магнитное поле и плотность критического тока являются однородными функциями. При протекании через образец критического тока распределение криттока и магнитного поля в образце определяется формой границ поперечного сечения этого образца.

Критическое состояние в керамическом ВТСП образце может быть создано либо пропусканием через него транспортного тока критической величины, либо с помощью внешнего магнитного поля или сочетанием обоих приемов. При отсутствии внешнего магнитного поля окружающее образец пространство изотропно. Это значительно упрощает исследуемую систему и позволяет выяснить ряд важных её свойств. Магнитное поле в такой системе все же присутствует, это поле, созданное транспортным током, так называемое ″собственное поле″. Управлять таким полем можно только, меняя поперечные размеры образца. Если по образцу течет критический ток, то образец находится в критическом состоянии. Меняя размеры, форму поперечного сечения образца, мы оказываем влияние на критическое состояние во всем сечении образца. В результате наблюдается размерный эффект – зависимость величины критического тока образца I_c и его средней плотности $\langle j_c \rangle$ от размеров поперечного сечения образца.

Этот эффект использовался нами как инструмент для изучения критического состояния керамического ВТСП образца. Было выяснено, что выражение для транспортного критического тока может быть представлено в виде:

$$I_c(X,Y,T) = G(X,Y)\, f(T). \qquad (1)$$

Функция f(T) зависит от температуры и индивидуальных свойств образца, т.е. от типа сверхпроводящего материала образца, фазового состава, наличия несверхпроводящих примесей и т.д. В противоположность этому G(X,Y) зависит только от размеров поперечного сечения образца. Если это сечение имеет форму прямоугольника, то X и Y – ширина и высота сечения, если – прямоугольного треугольника, то X и Y – катеты. В случае цилиндрического образца G определяется радиусом поперечного сечения R. Кроме этого установлено, что критический ток, а именно функция G(X,Y) является однородной функцией Эйлера:

$$G(kX,kY) = k^{p}\, G(X,Y). \qquad (2)$$

Здесь k – произвольная величина. Показатель p не зависит от температуры и индивидуальных свойств образца. Более того, он не зависит и от формы поперечного сечения образца. Усредненное значение показателя p равно 1,36±0,01. С помощью специально поставленных экспериментов нами было доказано, что критический ток не только удовлетворяет определению однородной функции, но и двум теоремам о необходимости и достаточности [1,2]. Во-первых, он удовлетворяет дифференциальному уравнению Эйлера и может быть представлен в виде:

$$I_c(X.Y.T)=X^p\, F_1(Y/X)\, f(T), \qquad (3)$$
$$I_c(X.Y.T)=Y^p\, F_2(X/Y)\, f(T). \qquad (4)$$

Тот факт, что критический ток может быть представлен одновременно в виде (3) и (4), обусловлено отсутствием внешнего поля. Кроме этого установлено, что для образцов с названными формами поперечных сечений:

$$I_c(S) = A\, S^{p/2}\, f(T), \qquad (5)$$

т.е. независимо от формы поперечного сечения образцов выражения, описывающие критические токи как функции площадей разных сечений имеют один и тот же вид. Может создаться впечатление, что информация о форме сечения заключена в константе A. В отдельно поставленных опытах поперечное сечение одного и того же образца (т. е. при постоянном значении f(T)) изменялось специальным образом. Сечение имело форму прямоугольников с разными соотношениями сторон, трапеций, различных многоугольников (в том числе вогнутых), кругов и треугольников. Выяснено, что независимо от формы поперечного сечения величина критического тока определяется выражением (5) с одним и тем же коэффициентом A.

Поскольку критический ток является однородной функцией размеров поперечного сечения (а именно функция G(X,Y)) и не изменен при преобразовании формы сечения, то, в свою очередь, плотность критического тока является однородной функцией координат точки наблюдения. Ее показатель равен p-2:

$$j_c(kx,ky) = k^{p-2}\, j_c(x,y) \qquad (5)$$

Величина магнитного поля в образце H(x,y), создаваемого текущим током, и его компоненты $H_x(x,y)$, $H_y(x,y)$ так же являются однородными функциями, но показатель степени равен p-1. В керамических ВТСП материалах плотность критического тока зависит от величины магнитного поля в образце. Поскольку обе эти величины являются однородными функциями, то связь между ними дается выражением:

$$j_c = Q\, H^{(p-2)/(p-1)}. \qquad (6)$$

Кроме этого, плотность критического тока сохраняется неизменной вдоль границы поперечного сечения, если контур сечения является гладкой кривой, или вдоль гладкого участка в случае, когда сечение ограничено кусочно-гладкой кривой. Пусть этот контур (или гладкий участок) описывается неявной функцией $g(x,y) = 1$, тогда:

$$j_c(x,y) = j_c(g(x,y)) \qquad (7)$$

Это выражение описывает одно из важнейших свойств критического состояния в керамическом образце, возникающего при протекании через него транспортного тока критической величины: распределение критического тока в образце определяется формой границ поперечного сечения образца.

Если функция $g(x,y)$ сама является однородной функцией с некоторым показателем m, то для плотности тока и магнитного поля в образце имеем:

$$j_c\,(x,y) = j_o\, g^{(p-2)/m}, \qquad (9)$$

$$H_c(x,y) = H_o\, g^{(p-1)/m}. \qquad (10)$$

Здесь j_o и H_o – значения плотности тока и магнитного поля на границе сечения образца. Они определяются величиной критического тока I_c.

Если образец имеет форму прямоугольного бруска, то поперечное сечение – прямоугольник, имеющий размеры X и Y. Поместим начало отсчета его центр. Тогда для сектора, расположенного справа от центра вдоль оси x и ограниченного диагоналями имеем:

$$j_{c1}(x) = j_{o1}\,(2x/X)^{p-2}, \quad H_{c1}(x) = H_{o1}\,(2x/X)^{p-1}. \qquad (11)$$

Для сектора, расположенного вверх от центра вдоль оси Y:

$$j_{c2}(y) = j_{o2}(2y/Y)^{p-2}, \quad H_{c2}(y) = H_{o2}\,(2y/Y)^{p-1}. \qquad (12)$$

$$j_{o1} = pI_cY^2/[S(X^2+Y^2)], \quad j_{o2} = pI_cX^2/[S(X^2+Y^2)],$$

$$H_{o1} = pI_cY/[2(p-1)(X^2+Y^2)],$$

$$H_{o2} = pI_cX/[2(p-1)(X^2+Y^2)].$$

При приближении к центру прямоугольника плотность критического тока возрастает, обращаясь в бесконечность в центре. На диагональных линиях при переходе из одного сектора в другой плотность тока меняется скачком. Следует помнить, что используемое рассмотрение в рамках приближения сплошной среды применимо для расстояний много больших размера зерен керамики. Магнитное поле так же изменяется скачком на диагоналях и возрастает от нуля в центре до H_{oi} на границах образца. Внутри образца магнитные силовые линии замкнуты и имеют форму прямоугольников.

Доли критического тока, текущего по названным выше секторам, определяются выражениями:

$$I_{c1} = I_cY^2/2(X^2+Y^2),$$

$$I_{c2} = I_cX^2/2(X^2+Y^2).$$

В очень высоком образце ($X \ll Y$) практически весь критического тока течет по бокам образца, и лишь малая его часть протекает через верхний и нижний сектора. В общем случае большая часть тока протекает по тем областям сечения, которые ограничены большей стороной.

В случае круглого образца

$$I_c = A\, f(T)\, (\pi R^2)^{p/2}, \quad j_c(r) = p/2\, A\, f(T)\, (\pi r^2)^{(p-2)/2},$$

$$H(r) = ½\, Af(T)\, \pi^{(p-2)/2}\, r^{(p-1)/2}$$

В прямоугольном и круглом образцах магнитосиловые линии замыкаются внутри, не покидая образца. Однако это не всегда так, например, в случае эллиптического поперечного сечения.

Поскольку величина критического тока определяется только площадью поперечного сечения (ур.(5)) и не зависит от его формы, то функциональная связь относительного тока с относительной площадью сечения носит универсальный характер и не зависит от свойств конкретного керамического ВТСП образца:

$$I_c(S)/\, I_O(S_o) = (S/\, S_o)^{p/2}.$$

Работа выполняется при поддержке РФФИ, проект № 03-03-32446.

1. Н.А. Боголюбов, ФНТ **23,** 808**,** (1997).
2. Н.А. Боголюбов, ФНТ **25,** 1243**,** (1999).