Физика низких температур, 1996, т. 22, № 1, с. 58–61 УДК 538.945

Немонотонные полевые зависимости захваченного магнитного потока в Y-ВТСП — эффект «отрицательного захвата»

Х. Р. Ростами, А. А. Суханов, В. В. Манторов

Институт радиотехники и электроники РАН,
Россия, 141120, Московская обл., г. Фрязино, пл. Введенского, 1
E-mail:<aas195@ire216.msk.su>

Статья поступила в редакцию 3 июля 1995 г., после переработки 28 августа 1995 г.

Обнаружен новый тип немонотонных полевых зависимостей захваченного магнитного поля (ЗМП) $H_{tr}(H)$, отличающихся отсутствием плато и пика и растянутым участком «отрицательного дифференциального захвата» в области слабых полей (20–50 Э). Изучено влияние температуры и транспортного тока на особенности полевых зависимостей ЗМП. Для объяснения полученных немонотонных зависимостей $H_{tr}(H)$ предложена модель взаимодействующих сверхпроводящих контуров — «колец».

Виявлено новий тип немонотонних польових залежностей захопленого магнітного поля (ЗМП) $H_{tr}(H)$, які відзначаються відсутністю плата та піка і розтягнутою ділянкою «негативного диференціального захоплення» в області слабких полів (20–50 Е). Вивчено вплив температури та транспортного струму на особливості польових залежностей ЗМП. Для пояснення одержаних немонотонних залежностей $H_{tr}(H)$ запропоновано модель надпровідних контурів — «кілець», які взаємодіють.

Исследование эффекта захвата магнитного потока в ВТСП и, в частности, зависимостей захваченного магнитного поля (ЗМП) H_{tr} от внешнего индуцирующего магнитного поля H и от температуры T представляется одним из наиболее удобных и информативных методов исследования физических свойств ВТСП, дающих полезные сведения о критических параметрах ВТСП, о функции распределения гранул и слабых (джозефсоновских) связей по критическим полям и температурам, а также о функции распределения неодносвязных СП кластеров — «колец» или «контуров» — по температурам и полям фазовой когерентности [1–4]. В этой связи особый интерес представляет обнаружение и детальное исследование особенностей на полевых зависимостях $H_{tr}(H)$.

Обычно в ВТСП керамиках, при твердофазном синтезе которых не использовались специальные режимы термообработки, в режиме захвата импульсом поля после охлаждения в нулевом магнитном поле (ZFC) наблюдаются монотонно возрастающие зависимости $H_{tr}(H)$ с плавным переходом к насыщению при высоких полях $H \approx$ $\approx$ 300–1 000 Э. Наряду с этим в ряде случаев [4–6] наблюдались зависимости $H_{tr}(H)$ иного типа, в том числе и немонотонные [5,6]. Изученная в [4] зависимость $H_{tr}(H)$ имела два плато при H = 30–60 Э и H > 200 Э, разделенных участком роста H_{tr} с ростом H, и была объяснена четко разделенными по величинам критических полей процессами захвата в межгранульных слоях (джозефсоновские вихри, гипервихри) при $H_{c1}^J < H < H_t^J$ ($H_{c1}^J \approx 10$ Э и $H_t^J \approx 30$ Э) и в гранулах (абрикосовские вихри) при $H > H_{c1}^G \approx 60$ Э. Немонотонные зависимости $H_{tr}(H)$ с пиком в конце участка первого плато были объяснены подавлением кольцевого тока гипервихрей («колец») магнитными полями рассеяния абрикосовских вихрей, захватываемых в гранулах при $H \approx H_{c1}^G \approx 100$ Э [6].

В настоящей работе представлены результаты исследования немонотонных зависимостей $H_{tr}(H)$, качественно отличающихся от полученных ранее, и обсуждена возможная природа эффекта, на наш взгляд, существенно расширяющая имеющиеся представления о механизмах ЗМП в ВТСП.

1. Образцы и методика эксперимента

Исследовались цилиндрические образцы керамики $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ диаметром D = 6–10 мм и толщиной d = 3–8 мм, приготовленные методом твердофазной реакции в режиме одноразового спекания на воздухе. Отличительными особенностями этого режима были, во-первых, нагрев до максимальной температуры близкой к температуре плавления T_1 = 1 025–1 050 °C, и, во-вторых,

© Х. Р. Ростами, А. А. Суханов, В. В. Манторов, 1996

длительные выдержки в течение 4–6 ч в процессе охлаждения при температурах $T_2 = 950$ °C, $T_3 = 770$ °C и $T_4 = 650$ °C. Такой режим синтеза был выбран с целью получения керамик с большим количеством слабых связей с близкими по величине и достаточно высокими критическими полями, чему, на наш взгляд, способствует отсутствие промежуточного размалывания образцов, частичное их «подплавление» и длительные выдержки при температурах образования тетрагональной и орторомбических фаз и при температуре окисления. В результате спекания получались черные, слегка оплавленные таблетки керамик ВТСП с крупнозернистой структурой и $T_c = 92$–95 K.

Поскольку введение Ag в керамики Y-ВТСП приводит к существенному изменению критических токов, что связывается с влиянием Ag на межзеренные границы, мы использовали также образцы 1-2-3-Ag с добавлением до 30 вес. % Ag. При этом, однако, температура максимального нагрева T_1 для получения образцов с оптимальными параметрами с немонотонными зависимостями $H_{tr}(H)$ уменьшалась на 1 °C/вес.%.

Измерение захваченного магнитного поля проводилось при температурах 4,2; 50 и 77 K в магнитных полях $H \leq 1$ кЭ датчиком Холла (ДХ) с размерами рабочей области 0,15 × 0,45 мм и чувствительностью 96 мкВ/мТл. Принцип работы установки для создания нужных температур и магнитных полей, а также магнитометра для регистрации сигнала ДХ описан в работах [7,8].

Захват магнитного поля осуществлялся в режиме ZFC: образец охлаждался в нулевом магнитном поле до температуры захвата $T_{tr} < T_c$, затем подавался импульс внешнего магнитного поля H длительностью 0,5 мин и через 5 мин после снятия поля измерялось ЗМП. Далее образец нагревался до $T > T_c$ и процедура повторялась для другого значения H.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Типичная зависимость ЗМП от амплитуды импульса внешнего магнитного поля представлена на рис. 1. На графике $H_{tr}(H)$ выделяются несколько интервалов полей H с характерными изменениями ЗМП. Для $H < H_{c1}^J \approx 3$ Э захват в образце отсутствует. Захваченное магнитное поле возникает и резко возрастает при $H \geq H_{c1}^J$ до 2,5 Э в сравнительно узком интервале полей $\Delta H = 0{,}5$–1 Э и достигает максимума при $H_{max} = 28$ Э. В интервале $H_{max} < H < H_{min}$ значение захваченного поля уменьшается, проходит через минимум при

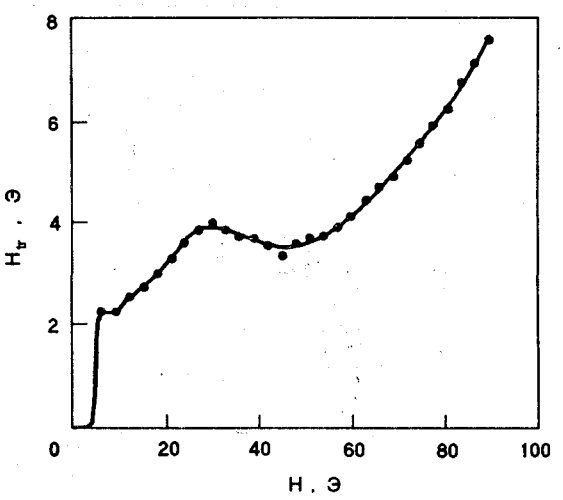

Рис. 1. Немонотонная зависимость захваченного магнитного поля от амплитуды импульса внешнего магнитного поля $H_{tr}(H)$ при $T = 77$ K. Образец № 74.

$H_{min} = 46$ Э, снова возрастает и выходит на насыщение при $H > 600$ Э. Следует отметить, что интервал полей «отрицательного дифференциального захвата» согласуется с областью полей плато, полученного в [4], и существенно сдвинут к меньшим значениям по сравнению с положением пика, обнаруженного в [5,6].

Аналогичная немонотонность зависимости $H_{tr}(H)$ наблюдалась также и в случае, когда нагрев образца до $T > T_c$ между измерениями не проводился, а амплитуда импульсов поля H последовательно увеличивалась с постоянным шагом. Если поле H после прохождения минимума уменьшалось, то на зависимости $H_{tr}(H)$ наблюдался гистерезис.

Зависимости $H_{tr}(H)$, полученные на образцах 1-2-3-Ag, практически не отличались от описанных выше. Напомним, однако, что для получения образцов с немонотонными зависимостями $H_{tr}(H)$ необходимо снизить максимальную температуру T_1, что, очевидно, связано с понижением температуры плавления образцов при введении Ag.

Следует подчеркнуть, что для захвата потока в результате охлаждения в магнитном поле (FC) зависимости $H_{tr}(H)$ всегда монотонны.

Для выяснения зависимости наблюдаемой особенности от локальных критических СП параметров образца, а также изучения влияния поверхностных макротоков датчик Холла помещался в разные точки поверхности образца. Обнаружено, что особенность наблюдается в разных точках, в том числе и на краю образца. Разброс результатов для разных точек составлял 1,5–2%. Также пока-

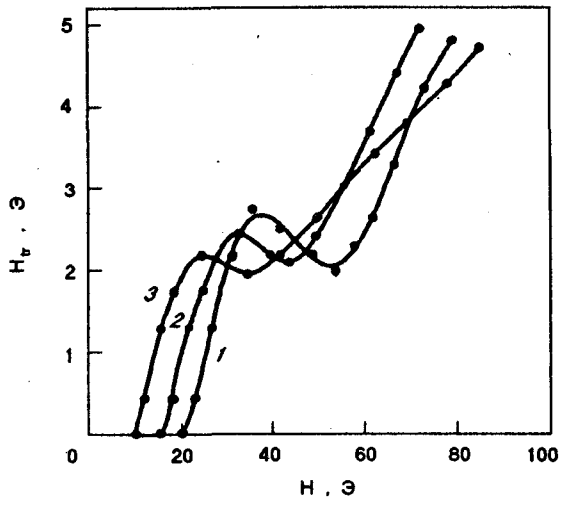

Рис. 2. Немонотонная зависимость $H_{tr}(H)$ для разных температур T, К: 4,2 (*1*), 50 (*2*), 77 (*3*) К. Образец N 42.

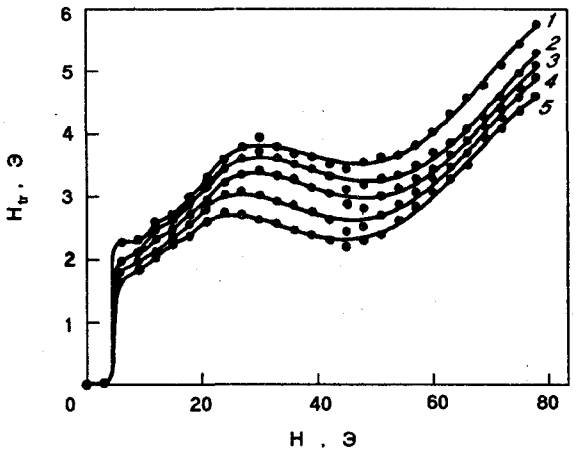

Рис. 3. Немонотонные зависимости $H_{tr}(H)$ при T = 77 К для разных величин транспортного тока I, мА: 0 (*1*), 125 (*2*), 200 (*3*), 375 (*4*), 1000 (*5*) . Образец N 74.

зано, что немонотонность на зависимости $H_{tr}(H)$ наблюдается и для больших (по меньшей мере до 5 мм) расстояний между ДХ и образцом. Таким образом, немонотонность зависимости $H_{tr}(H)$ не может быть обусловлена макронеоднородностями образца и, следовательно, присуща самой природе захвата магнитного потока в исследованных керамиках.

При уменьшении температуры кривая $H_{tr}(H)$ смещалась в область больших полей, а немонотонность зависимости проявлялась сильнее (рис. 2). При пропускании транспортного тока через образец происходил сдвиг положений максимума и в еще большей степени минимума зависимостей $H_{tr}(H)$ в область меньших полей H (рис. 3) и увеличение относительной величины «провала» на кривой $H_{tr}(H)$.

Подчеркнем, что для образцов с минимумом на полевой зависимости ЗМП характерным является наличие резкого скачка H_{tr} при H_{c1}^J, свидетельствующее о том, что функция распределения слабых связей в наших образцах близка к нулю для $H_c^J < H_{c1}^J$ и имеет пик при $H_c^J \geq H_{c1}^J$. Характерно также слабое влияние транспортного тока на положение и ширину скачка на кривой $H_{tr}(H)$.

Отличительными особенностями полученных результатов являются резкий рост захваченных полей при $H \geq H_{c1}^J$, отсутствие на зависимости $H_{tr}(H)$ плато и пика, возникновение участка «отрицательного захвата» в слабых полях и его сравнительно большая протяженность. На наш взгляд, эти результаты невозможно объяснить в рамках предложенной в [6] модели подавления кольцевых токов, возникающих при ЗМП, абрикосовскими вихрями.

Полученные результаты можно интерпретировать в рамках модели взаимодействующих СП контуров — «колец». Очевидно, должна существовать корреляция между размером колец и их критическими полями: кольца большего размера содержат большее число слабых связей и, следовательно, должны характеризоваться меньшими критическими полями для захвата потока H_c^J, определяемыми самым слабым местом кольца. При малых полях в режиме ZFC захват магнитного потока происходит в «слабых» кольцах большого размера, а в больших полях начинается захват в «сильных» кольцах меньшего размера. При этом создаваемые ими сильные локальные поля подавляют СП в «слабых» кольцах. Вследствие этого происходит перераспределение полей колец, захваченные поля становятся сильно неоднородными и знакопеременными. В результате измеряемые датчиком Холла средние захваченные поля уменьшаются и на зависимости $H_{tr}(H)$ возникает участок с «отрицательным захватом».

Очевидно, что, согласно изложенной модели, для возникновения участка «отрицательного захвата» необходимо, чтобы при $H \geq H_{c1}^J$ произошел захват в достаточно большом количестве колец, подавление ЗМП которых должно приводить к немонотонности, т.е. участку спада на зависимости $H_{tr}(H)$ должен предшествовать участок резкого роста H_{tr}, что и наблюдается на опыте.

В пользу изложенной модели свидетельствует также наблюдение на некоторых образцах при измерениях с малым шагом δH = 0,5–1 Э в режиме ZFC без промежуточного нагрева одного или нескольких слабо выраженных минимумов, в том

числе и в очень слабых полях $H = 2$–5 Э, т.е. в полях по крайней мере на порядок меньших типичных полей проникновения абрикосовских вихрей в СП гранулы.

Авторы весьма признательны В. Б. Сандомирскому, В. Н. Губанкову, В. А. Ацаркину за интерес и полезные обсуждения работы.

1. Е. В. Блинов, М. Г. Семенченко, В. Г. Флейшер, Б. П. Захарченя, П. П Кулешов, Ю. П. Степанов, *Письма в ЖЭТФ* **48**, 147 (1988).
2. В. В. Чабаненко, *СФХТ* **4**, 1821 (1991).
3. Н. Н. Ефимова, Ю. А. Попков, М. Б. Устименкова, В. А. Финкель, *ФНТ* **20**, 343 (1994).
4. Cao Xiaowen, Han Guchang, and Zhang Tingyu, *Mod. Phys. Lett.* **B1**, 383 (1988).
5. J. Jung, M. A. Mohammed, S. G. Cheng, and J. P. Frank, *Phys. Rev.* **B42**, 6181 (1990).
6. A. A. Zhukov, D. A. Komarkov, G. Karapetrov, S. N. Gordeev, and R. I. Antonov, *Supercond. Sci. Technol.* **5**, 338 (1992).
7. Х. Р. Ростами, *Измерительная техника* N 1, 45 (1995).
8. Х. Р. Ростами, *Приборы и техника эксперимента* N 6, 182 (1993).

Nonmonotonous field dependences of trapped magnetic flux in Y-HTSC — «negative trapping» effect

Kh. R. Rostami, A. A. Sukhanov, and V. V. Mantorov

A new type of nonmonotonous field dependences of the HTSC trapped magnetic field (TMF), $H_{tr}(H)$, which are characterized by the extended negative differential trapping region at low magnetic fields (20–50 Oe) and by the absence of plateau and peak in the TMF-field curves was observed. The effects of temperature and transport current on the peculiarities of the $H_{tr}(H)$ dependences were studied. A model of interacting superconducting loops is proposed to explain the observed nonmonotonous dependences $H_{tr}(H)$.