

Возможный механизм возникновения участка с отрицательным магнитосопротивлением гранулярного ВТСП

© К.А. Шайхутдинов, Д.А. Балаев, С.И. Попков, М.И. Петров

Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук, Красноярск, Россия

E-mail: dir@iph.krasn.ru

(Поступила в Редакцию 16 июля 2008 г.

В окончательной редакции 10 ноября 2008 г.)

С целью выяснения механизма возникновения участка с отрицательным магнитосопротивлением гранулярного ВТСП исследованы полевые зависимости магнитосопротивления при 77.4 К образцов $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.3}\text{Sr}_{1.9}\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ различной плотности, имеющих микроструктуру „пены“ и обладающих различными значениями диамагнитного отклика. Обнаружено, что участок с отрицательным магнитосопротивлением наблюдается в образцах с наибольшими по модулю значениями намагниченности. Такое поведение адекватно объясняется влиянием дипольных моментов ВТСП кристаллитов на эффективное поле в межгранулярной среде. Оценена величина этого эффективного поля.

Работа выполнена в рамках программы РАН № 3.4 „Квантовая макрофизика“ и комплексного интеграционного проекта СО РАН № 3.4. Один из авторов (Д.А.Б.) благодарит фонд содействия отечественной науке.

PACS: 74.81.Fa, 74.50.+g

1. Введение

Известно, что зависимость электросопротивления от внешнего магнитного поля $R(H)$ гранулярных высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) в некоторых случаях демонстрирует участок с отрицательным магнитосопротивлением (ОМС) [1–6]. В гранулярных ВТСП межгранулярные границы играют роль джозефсоновских слабых связей. Поэтому их критические параметры (плотность критического тока, первые и вторые критические поля H_{C1} , H_{C2}) намного меньше таковых для ВТСП-гранул. И в большинстве экспериментов транспортный ток не вызывает процессов диссипации в сверхпроводящих кристаллитах [3–9]. Хотя в работах [2,3] было указано, что участок ОМС на зависимости $R(H)$ связан с перераспределением магнитного потока в межгранулярных границах в районе первого критического поля гранул H_{C1G} , тем не менее условия возникновения данной особенности к настоящему времени не выяснены. Зависимость $R(H)$ фактически отражает резистивный отклик системы межгранулярных границ на эффективное поле в межгранулярной среде $B_{\text{эф}}$, которое является суперпозицией внешнего поля (при $H \geq H_{C1}$) и поля, наведенного дипольными моментами ВТСП-кристаллитов [10,7,3,9,11]. Чтобы оценить величину индукции магнитного поля в межгранулярной среде $B_{\text{эф}}$ и прояснить механизм, приводящий к появлению участка с ОМС на зависимости $R(H)$, целесообразно, на взгляд авторов, исследовать поликристаллические образцы ВТСП одного состава, но с модифицированной микроструктурой и с различными значениями диамагнитного отклика.

В настоящей работе были исследованы магниторезистивные свойства висмутовых ВТСП различной плот-

ности, которые обладают различными значениями диамагнитного отклика, и впервые обнаружена корреляция между существованием участка с ОМС и величиной намагниченности образца. Указанные объекты относятся к классу пенообразных ВТСП [12] с характерной хлопьеобразной структурой кристаллитов и имеют микропоры [13]. Ранее были исследованы магнитные свойства [14], вольт-амперные характеристики в отсутствие внешнего поля [15] и резистивный переход в магнитном поле [16] данных образцов. Поэтому данные исследования являются также и логическим продолжением указанных работ.

2. Эксперимент

Образцы для измерений — ВТСП микропены $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.3}\text{Sr}_{1.9}\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ были получены по технологии, описанной в работах [13,15,16]. Там же приведена микроструктура этих образцов, которая показала, что образцы состоят из хаотически расположенных пластинчатых кристаллитов с линейными размерами 20–30 μm и толщиной 1–2 μm . Исследовались образцы с плотностью 2.26 и 1.55 g/cm^3 (38 и 26% от теоретической плотности соответственно). Обозначим эти образцы далее как foam 1 (2.26 g/cm^3) и foam 2 (1.55 g/cm^3). В качестве репера был синтезирован плотный образец того же состава (обозначен далее как poly-Bi). Он был приготовлен из микропены путем перемальвания, прессования с последующим спеканием при той же температуре, что и „пены“ (825°C), в течение 5 h. Плотность образца poly-Bi составила 5.28 g/cm^3 (90% от теоретической). Сканирующая электронная микроскопия этого образца

показала отчетливую гранулярную микроструктуру, линейные размеры кристаллитов уменьшились по сравнению с таковыми в микропенах (5–10 μm), в то же время увеличилась доля мелких кристаллитов (до $\sim 5 \mu\text{m}$). Рентгеноструктурные исследования образцов показали, что доминирующей является фаза 2-2-2-3, доля низкотемпературной фазы 2-2-2-1 составляет менее 5%. Из магнитных измерений температура перехода всех трех образцов составила 108 К, температура перехода в состояние „ $R = 0$ “ из резистивных измерений составила 106 К.

Измерения магнитосопротивления $R(H) = U(H)/I$, где U — падение напряжения на образце, I — транспортный ток, $I \perp H$, были проведены стандартным четырехзондовым методом. Типичный размер образца $1 \times 1.5 \times 8 \text{ mm}$. Электрические контакты приготавливались с помощью клея Epo-Tek H20E на основе эпоксидной смолы. Во время измерений образец находился в среде жидкого азота. Плотность критического тока при $T = 77.4 \text{ K}$, определенная по критерию $1 \mu\text{V}/\text{cm}$, составила $\approx 0.5, 35$ и $80 \text{ A}/\text{cm}^2$ для образцов foam 2, foam 1 и poly-Bi соответственно (транспортный критический ток I_C через образец составлял соответственно 15, 600 и 410 mA). Величина удельного электросопротивления при 120 К (выше T_C) примерно одинакова для всех образцов и составляет $\sim 1.6 \Omega\cdot\text{cm}$. Данные по $R(H)$ приведены в $\text{m}\Omega$. Величины магнитосопротивления при 77.4 К в полях более 1 kOe и транспортных токах 500–700 mA составляют около 10% от $R(120 \text{ K})$. Образцы охлаждались в условиях нулевого замороженного поля (специальных мер по экранированию поля Земли не предпринималось). После каждого цикла измерения до некоторого максимального поля $H_{\uparrow} \rightarrow H_{\text{max}}$, а затем до $H_{\downarrow} \rightarrow 0$ (H_{\uparrow} и H_{\downarrow} соответствуют возрастающему и убывающему полю) образец отогревался выше T_C .

Измерения намагниченности образцов проводились на вибрационном магнетометре [17]. Использовались те же самые образцы, на которых были проведены измерения $R(H)$: из них вырезалась центральная часть (которая соответствовала „рабочей“ части между потенциальными контактами).¹

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены петли гистерезиса намагниченности $M(H)$ при $T = 77.4 \text{ K}$ исследованных образцов. Видно, что пористые образцы обладают большими значениями намагниченности, чем „реперный“ образец poly-Bi. Такое поведение обнаружено ранее [13,14] и может быть связано по крайней мере с двумя факторами. Во-первых, в микропене большие линейные размеры кристаллитов,

¹ Авторы не обнаружили кардинального влияния (не более 10%) формы образца (цилиндр, пластина) при $H \perp$ оси цилиндра или $H \perp$ плоскости пластины на форму и максимальное значение зависимости $M(H)$; при оценке эффективного поля в межгранулярной среде влияние размагничивающего фактора образца незначительно для исследованных образцов.

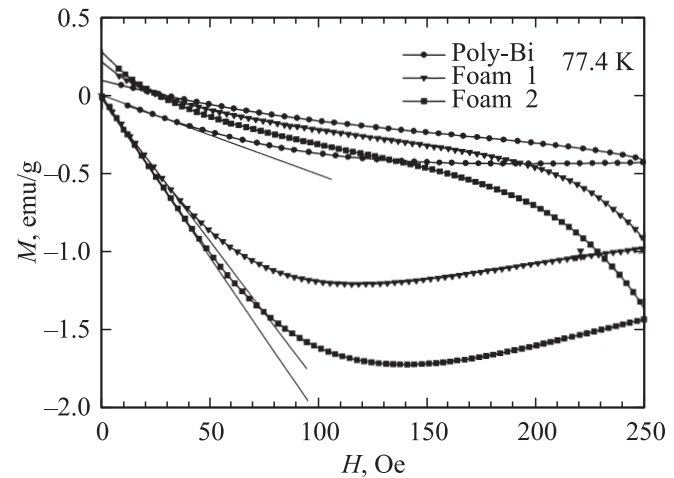


Рис. 1. Гистерезисные зависимости намагниченности исследованных образцов при $T = 77.4 \text{ K}$.

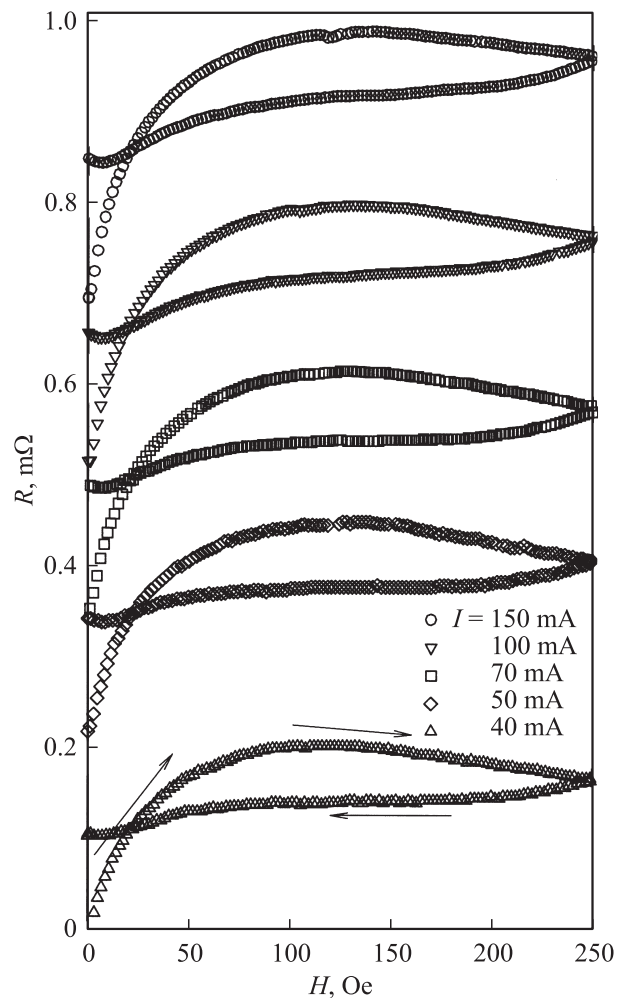


Рис. 2. Гистерезисные зависимости магнитосопротивления $R(H)$ образца foam 2 при $T = 77.4 \text{ K}$, $H_{\text{max}} = 250 \text{ Oe}$ и различных величинах транспортного тока I . Стрелки указывают направление изменения внешнего поля H .

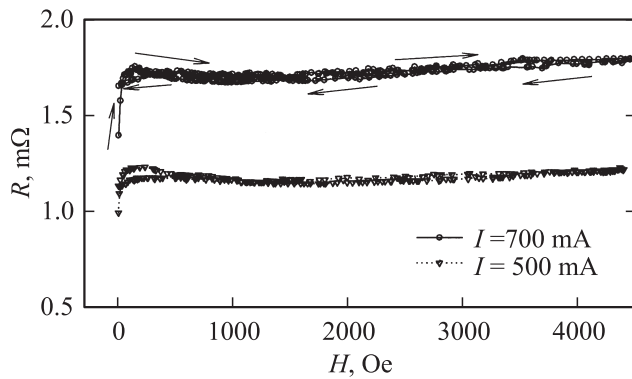


Рис. 3. Гистерезисные зависимости $R(H)$ образца foam 2 при $T = 77.4$ К, $H_{\max} \approx 4.4$ кОе и различных значениях транспортного тока I . Стрелки указывают направление изменения внешнего поля H .

что приводит к увеличению диамагнитного сигнала от внутригранульного тока. Во-вторых, в плотной керамике может быть частичная экранировка кристаллитов, находящихся в глубине образца, отсутствующая в пористом образце. Механизмы увеличения диамагнитного отклика в данных микропенах будут проанализированы в отдельной работе, а далее основное внимание уделим взаимосвязи гистерезисных зависимостей намагниченности и магнитосопротивления $R(H)$.

На рис. 2 приведены зависимости $R(H)$ образца foam 2 при различных величинах транспортного тока I в полях до 250 Ое при $T = 77.4$ К. Эти зависимости обладают рядом интересных особенностей. Во-первых, это ярко выраженный гистерезис при увеличении/уменьшении внешнего поля H . Во-вторых, на прямом ходу зависимость $R(H)$ имеет выраженный максимум, после которого следует участок с ОМС. При дальнейшем увеличении внешнего поля, проходя через минимум, зависимость $R(H)$ начинает слабо возрастать (рис. 3). Также отметим, что зависимости $R(H)$ на рис. 2, 3 начинают ход с точки $R(H = 0) \neq 0$. Указанное обстоятельство является следствием того, что для данного образца измерительный ток I больше критического $I_C(H = 0)$ ($I_C \approx 15$ мА).

Зависимости $R(H)$ для образца foam 1 приведены на рис. 4. Эти зависимости также характеризуются гистерезисом, однако выраженного участка ОМС не наблюдается. При достаточно низких величинах транспортного тока ($I = 30$ – 40 мА) можно различить очень небольшое уменьшение сопротивления с ростом внешнего поля, при больших значениях I в диапазоне $H = 150$ – 250 Ое сопротивление практически не меняется (в больших полях R также возрастает, подобно данным рис. 3).

Для плотного образца poly-Vi гистерезисные зависимости $R(H)$ не имеют участка с ОМС, что показано на рис. 5. Данные рис. 5 получены как при условиях $I < I_C(H = 0)$, так и при $I > I_C(H = 0)$. Как следует из наших измерений, в интервале полей 0.25–1.5 кОе эти зависимости продолжают возрастать.

Исходя из полученных данных по $R(H)$ и зависимостей $M(H)$ (рис. 1), можно однозначно заключить, что участок с ОМС наблюдается в образце с наибольшим значением диамагнитного отклика. Величина внешнего поля, при котором наблюдается локальный максимум магнитосопротивления ~ 130 кОе, коррелирует с полем минимума прямого хода зависимости $M(H)$ (~ 140 Ое). Для описания полученного результата рассмотрим качественно картину полей в межгранульной среде.

Пусть две соседние гранулы обладают дипольными моментами $\mathbf{M}_G(H)$ и в межгранульном промежутке направление транспортного тока перпендикулярно внешнему полю. Если внешнее поле возрастает, то векторы \mathbf{M}_G направлены против внешнего поля [9,11]. Тогда поле, индуцированное дипольными моментами гранул в промежутке между гранулами \mathbf{V}_{ind} , будет усиливать внешнее поле, $\mathbf{V}_{\text{ind}} \parallel \mathbf{H}$ (линии магнитной индукции от \mathbf{M}_G замыкаются через межгранульную границу [9,11]). Для эффективного поля в межгранульной

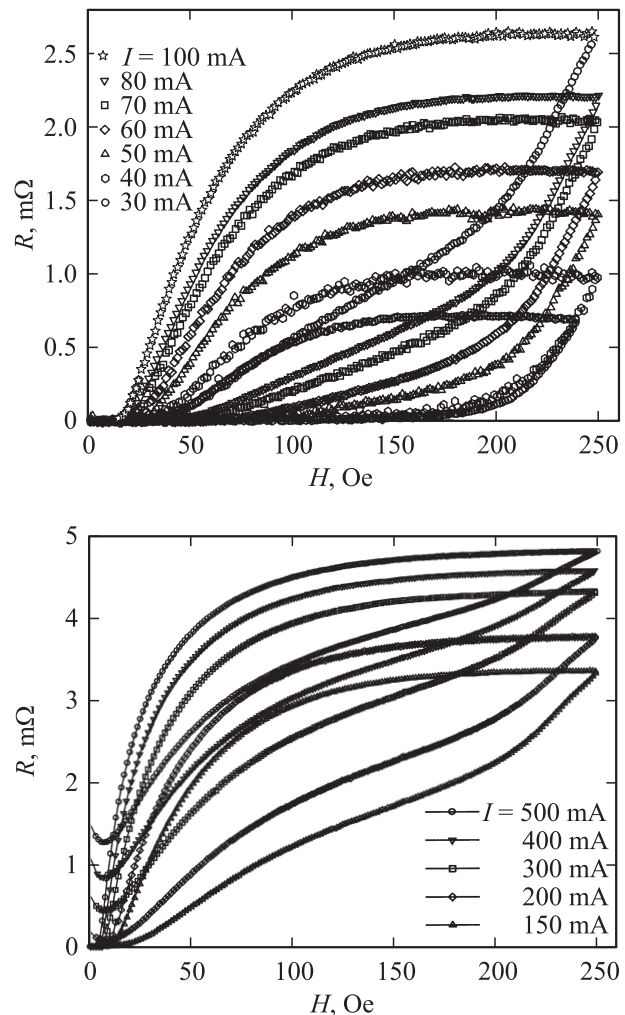


Рис. 4. Гистерезисные зависимости $R(H)$ образца foam 1 при $T = 77.4$ К, $H_{\max} = 250$ Ое и различных величинах транспортного тока I .

среде \mathbf{V}_{eff} можно записать $\mathbf{V}_{\text{eff}} = \mathbf{H} + \mathbf{V}_{\text{ind}}$; значит,

$$\mathbf{V}_{\text{eff}} = \mathbf{H} + 4\pi\mathbf{M}_G \alpha, \quad (1)$$

где α — коэффициент, определяющийся влиянием размагничивающих факторов гранул и размерами межгранульных промежутков. Величины \mathbf{M}_G и α неизвестны. Однако для анализа эффективного поля можно использовать экспериментальные данные по намагненности $M(H)$ образцов. В этом случае выражение (1) можно переписать в виде

$$\mathbf{V}_{\text{eff}} = \mathbf{H} + 4\pi\mathbf{M}(H)\alpha(H), \quad (2)$$

где M — намагненность образца (в единицах G), α в общем случае — функция H . Выражение (2) объясняет гистерезисное поведение магнитосопротивления, поскольку из данных рис. 1 $|M(H_{\uparrow})| > |M(H_{\downarrow})|$, поэтому $\mathbf{V}_{\text{eff}}(H_{\uparrow}) > \mathbf{V}_{\text{eff}}(H_{\downarrow})$; следовательно, $R(H_{\uparrow}) > R(H_{\downarrow})$. Минимум или нулевое значение магнитосопротивления в области малых полей H_{\downarrow} имеет место, когда индуцированное поле преобладает над внешним: $|\mathbf{V}_{\text{ind}}| > |\mathbf{H}|$. Ясно, что максимум диамагнитного отклика на зависимости $M(H_{\uparrow})$ может проявиться и на зависимости $V_{\text{eff}}(H_{\uparrow})$ как локальный максимум; следовательно, магнитосопротивление также будет иметь локальный максимум и далее участок с ОМС.

На рис. 6 приведены зависимости эффективного поля в межгранульной среде от внешнего поля, построенные для исследованных образцов с помощью выражения (2)

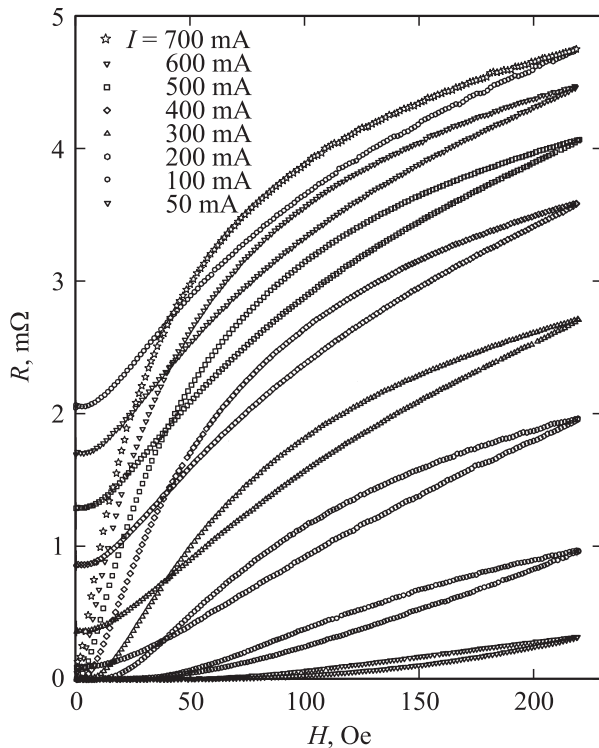


Рис. 5. Гистерезисные зависимости $R(H)$ образца poly-Bi при $T = 77.4 \text{ K}$, $H_{\text{max}} = 250 \text{ Oe}$ и различных величинах транспортного тока I .

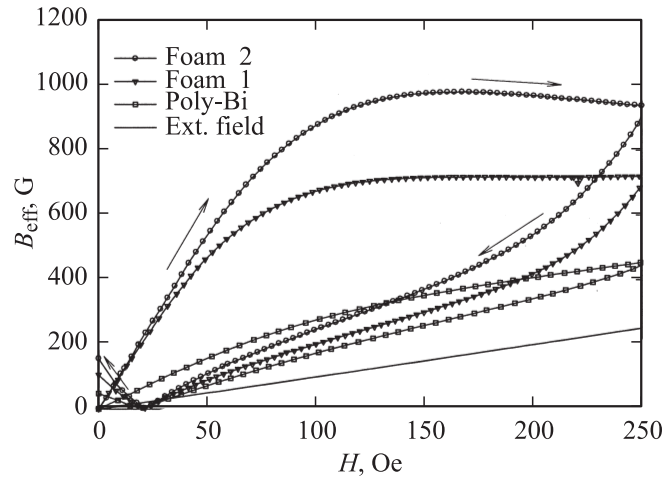


Рис. 6. Эффективное поле в межгранульной среде $\mathbf{V}_{\text{eff}} = |\mathbf{H} + 4\pi\mathbf{M}(H)\alpha|$, рассчитанное из экспериментальных зависимостей $M(H)$ (рис. 1), в зависимости от внешнего поля для исследованных образцов. Стрелки указывают направление изменения внешнего поля H .

с учетом экспериментальных зависимостей $M(H)$ (для пересчета единиц emu/g в G использовалась теоретическая плотность Bi_{2223} , поскольку поры не вносят вклада в диамагнитный отклик). В первом приближении мы взяли $\alpha = \text{const}$. Оказалось, что локальный максимум на зависимости $V_{\text{eff}}(H_{\uparrow})$ для образца foam 2 появляется при $\alpha > 6$. Зависимости $V_{\text{eff}}(H_{\uparrow})$ построены при одинаковом значении $\alpha = 6.5$ для всех образцов.² Из рис. 5 видно, что при таком значении α зависимости $V_{\text{eff}}(H)$ удовлетворительно согласуются с зависимостями $R(H)$: появление локального максимума для образца foam 2, слабо выраженный локальный максимум для образца foam 1 и отсутствие такового для образца poly-Bi. Абсолютная величина диамагнитного отклика ВТСП-гранул вносит основной вклад в эффективное поле в межгранульной среде и в конечном счете влияет на магнитосопротивление и существование участка с ОМС. И это является принципиальным дополнением к объяснению механизма возникновения участка ОМС на зависимости $R(H)$ гранулярного ВТСП. Магнитосопротивление может демонстрировать локальный максимум в поле, близком к минимуму зависимости $M(H_{\uparrow})$, а не в районе поля первого проникновения вихрей в гранулы H_{C1G} , как указано в работах [2,3]. Величина H_{C1G} , оцененная из данных рис. 1, как поле, при котором зависимость $M(H_{\uparrow})$ начинает отклоняться от линейного хода, составляет $\sim 30\text{--}40 \text{ Oe}$ для исследованных образцов (рис. 1). В то же время величины внешнего поля H_{\uparrow} , при которых зависимости $V_{\text{eff}}(H)$ и $R(H)$ имеют максимумы, близки (рис. 2, 4, 5).

² В случае образцов foam 1 и foam 2 это справедливо, поскольку границами в микропенах являются плоскости спайности сверхпроводящих кристаллитов и они идентичны для этих образцов; в образце poly-Bi геометрия межгранульных границ изменилась, и α , возможно, принимает другое значение. Однако на вывод работы это не влияет.

Обратим внимание на то, что величина эффективного поля в межгранульной среде гранулярного ВТСП значительно больше и внешнего поля, и намагниченности самого образца (в единицах G) (рис. 5). Мы считаем это проявлением сжатия магнитного потока в межгранульной среде гранулярного ВТСП, которое предполагалось в ряде работ [3,18], однако до сих пор этому не было экспериментального подтверждения.

Таким образом, в ходе исследования магниторезистивных свойств микропен $Bi_{1.8}Pb_{0.3}Sr_{1.9}Ca_2Cu_3O_x$ различной плотности обнаружена корреляция между существованием участка с ОМС на зависимости $R(H)$ и величиной диамагнитного отклика. Возникновение участка ОМС определяется влиянием поля, индуцированного дипольными моментами ВТСП гранул, на эффективное поле в межгранульных границах и характерно для образцов с большим значением диамагнитного отклика. Оценена степень сжатия магнитного потока в межгранульных границах.

Список литературы

- [1] Y.J. Quian, Z.M. Yang, K.Y. Chen, B. Zhou, J.W. Qiu, B.C. Miao, Y.M. Cai. *Phys. Rev. B* **39**, 7, 4701 (1989).
- [2] Sun Shifang, Zhao Yong, Pan Guoqian, Yu Daoq, Zhang An, Chen Zuyao, Qian Yitai, Kuanw Eiyuan, Zhang Qirui. *Europhys. Lett.* **6**, 4, 359 (1988).
- [3] D. Daghero, P. Mazzetti, A. Stepanescu, P. Tura, A. Masoero. *Phys. Rev. B* **66**, 13, 11 478 (2002).
- [4] Н.Д. Кузьмичев. Письма в ЖЭТФ **74**, 5, 291 (2001).
- [5] В.В. Деревянко, Т.В. Сухарева, В.А. Финкель. ФТТ **46**, 10, 1740 (2004).
- [6] Т.В. Сухарева, В.А. Финкель. ФТТ **50**, 6, 961 (2008).
- [7] L. Ji, M.S. Rzchowski, N. Anand, M. Tinkham. *Phys. Rev. B* **47**, 470 (1993).
- [8] C. Gaffney, H. Petersen, R. Bednar. *Phys. Rev. B* **48**, 3388 (1993).
- [9] Д.А. Балаев, Д.М. Гохфельд, А.А. Дубровский, С.И. Попков, К.А. Шайхутдинов, М.И. Петров. ЖЭТФ **132**, 6 (12), 1340 (2007).
- [10] J.E. Evetts, V.A. Glowacki. *Cryogenics* **28**, 641 (1988).
- [11] Д.А. Балаев, А.А. Дубровский, С.И. Попков, К.А. Шайхутдинов, М.И. Петров. ФТТ **50**, 6, 972 (2008).
- [12] E.S. Reddy, G.J. Schmitz. *Supercond. Sci. Technol.* **15**, 21 (2002).
- [13] М.И. Петров, Т.Н. Тетюева, Л.И. Квеглис, А.А. Ефремов, Г.М. Зеер, К.А. Шайхутдинов, Д.А. Балаев, С.И. Попков, С.Г. Овчинников. Письма в ЖТФ **29**, 23, 40 (2003).
- [14] D.M. Gokhfeld, D.A. Balaev, S.I. Popkov, K.A. Shaihtudinov, M.I. Petrov. *Physica C* **434**, 135 (2006).
- [15] Д.А. Балаев, И.Л. Белозерова, Д.М. Гохфельд, Л.В. Кашкина, Ю.И. Кузьмин, К. Мигель, М.И. Петров, С.И. Попков, К.А. Шайхутдинов. ФТТ **48**, 2, 193 (2006).
- [16] K.A. Shaykhtudinov, D.A. Balaev, S.I. Popkov, A.D. Vasilyev, O.N. Martyanov, M.I. Petrov. *Supercond. Sci. Technol.* **20**, 491 (2007).
- [17] А.Д. Балаев, Ю.В. Бояршинов, М.И. Карпенко, Б.П. Хрусталев. ПТЭ **3**, 167 (1985).
- [18] M.N. Kunchur, T.R. Akew. *J. Appl. Phys.* **84**, 12, 6763 (1998).