

системе управления воздушным движением // Современные научно-технические проблемы транспорта : сб. науч. тр. V Междунар. науч.-техн. конф. (15–16 окт. 2009. г. Ульяновск); УлГТУ. Ульяновск, 2009. С. 112–116.

14. Назаров С. Н. Основные положения методики определения места расположения сети удаленных взаимо-

связанных радиоцентров-ретрансляторов // ИКТ. 2009. Т. 7. № 2. С. 79–82.

15. Прохоров В. К., Шаров А. Н. Методы расчета показателей эффективности радиосвязи. Л. : ВАС, 1990.

S. N. Nazarov, A. A. Shagarova

REALIZATION OF MECHANISM OF DIVERSITY RECEPTION IN HYBRID NETWORK OF WIRELESS INFORMATION TRANSMISSION

The article considers possibilities of realization of diversity reception algorithms in hybrid network of wireless information transmission. The basis of the diversity reception algorithms is that at the decision of problems of optimum processing of the fields, their correlation curves are determining for the description of Gaussian, as well as stochastic fields of a free-hand type.

Keywords: hybrid network of a wireless information transmission, algorithm of a diversity reception, correlation factor, optimum reception.

© Назаров С. Н., Шагарова А. А., 2010

УДК 538.945

В. В. Храпунова, Ю. С. Гохфельд, М. И. Петров

УВЕЛИЧЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ПИННИНГА В СВЕРХПРОВОДНИКАХ $Y_{1-x}RE_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ ¹

Исследовалось влияние допирования малыми концентрациями редкоземельных элементов La, Ce, Pr в сверхпроводнике $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ на внутригранульный пиннинг. Магнитные и транспортные измерения показали, что максимальный пиннинг наблюдается при концентрации редкоземельных элементов, соответствующей среднему расстоянию между примесями, равному диаметру абрикосовских вихрей в YBCO.

Ключевые слова: высокотемпературные сверхпроводники, потенциал пиннинга, транспортные свойства, магнитные свойства.

Для широкого практического применения высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) крайне желательно повысить потенциал пиннинга абрикосовских вихрей, пожалуй единственный параметр по которому ВТСП уступают низкотемпературным сверхпроводникам. Увеличение потенциала пиннинга в ВТСП открывает дорогу к созданию эффективных экранов от магнитных и электромагнитных полей в устройствах, где это связано с надежностью оборудования и жизнеобеспечением персонала, например в космических пилотируемых аппаратах.

Увеличение потенциала пиннинга и критического тока в высокотемпературных сверхпроводниках структуры 1–2–3 достигается созданием в материале дополнительных дефектов, действующих как центры пиннинга. Основными способами создания дефектов являются облучение высокоэнергетическими частицами, введение наноразмерных примесей и химическое допирование [1–5]. В

последнем случае предпочтительным является частичное замещение иттрия на редкоземельные элементы (RE) [3; 6–8], что приводит к некоторым искажениям кристаллической структуры и электронной плотности. Как правило, при исследовании редкоземельного замещения в $Y_{1-x}RE_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ использовались образцы с содержанием примесей x , кратным десяткам процентов. Было установлено, что наиболее заметное увеличение пиннинга наблюдается при малых ($x < 0,1$) концентрациях примесей [8].

Авторы статьи считают, что целесообразно выбирать концентрацию примесных атомов так, чтобы она была связана с параметрами кристаллической структуры. Концентрация RE может быть связана со средним расстоянием между примесными атомами D . Атомы иттрия в YBCO образуют плоскую решетку, для которой связь между x и D дается выражением $x = a^2/D^2$, где a – постоянная решетки в плоскости редкоземельных атомов. Удобно

¹ Настоящие исследования ведутся при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (НИР НК-209П).

переписать это выражение как $x = a^2/(na)^2 = 1/n^2$, где $n = D/a$. Таким образом, возможно выбрать концентрации x , соответствующие $n = 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, \infty$, т. е. чтобы расстояние D было кратно постоянной решетки a . Состав с $n = \infty$ соответствует обычному $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$. Такой выбор позволит проследить влияние среднего расстояния между примесными атомами на пиннинг в сверхпроводнике.

Для изучения влияния искажений локальной электронной плотности и кристаллической структуры исследовались серии YBCO, допированные Ce, Pr и La. Ионы Ce и Pr имеют валентность $4+$ и $3-4+$ и могут сильно искажать локальную электронную плотность в подрешетке редкоземельных элементов. У лантана валентность такая же, как у иттрия, и при допировании La искажений электронной плотности возникать не должно. Но возможны искажения кристаллической решетки, возникающие из-за большого атомного радиуса La.

В настоящей работе мы приводим результаты сравнительного исследования транспортных и магнитных свойств трех систем: $Y_{1-x}Ce_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ и $Y_{1-x}La_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$. Были проведены измерения намагниченности и сопротивления образцов, что позволило сравнить внутригранульный пиннинг в составах с различными x . Для характеристики внутригранульного пиннинга использованы данные по намагниченности, измеренной при охлаждении в магнитном поле и без внешнего поля.

Эксперимент. Были синтезированы три серии образцов $Y_{1-x}RE_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ для $RE = Ce, Pr, La$. Каждая серия синтезировалась отдельно, методом твердофазного синтеза по 10 образцов с $x = 0,25; 0,11; 0,0625; 0,04; 0,0278; 0,0204; 0,0156; 0,0123; 0,01$ и 0 . Выбранные концентрации соответствуют $n = 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$ и ∞ . Реперные образцы с $x = 0$ ($YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$) синтезировались для каждой серии.

Исходные реактивы – $Y_2O_3, CeO_2, Pr_6O_{11}, La_2O_3, CuO$ квалификации ХЧ, $BaCO_3$ и CuO квалификации ЧДА. Соответствующие количества реактивов тщательно смешивались в агатовой ступке, спрессовывались в таблетки и отжигались при температуре $930^\circ C$. Общая продолжительность синтеза составляла $160 h$ с семью промежуточными помолами и прессованиями. Длительный синтез способствует замещению атомов редкоземельных элементов в позиции иттрия и равномерному распределению примесных атомов в подрешетке редкоземельных элементов. В конце синтеза образцы были отожжены при температуре $300^\circ C$ в течение $3 h$ и медленно охлаждены вместе с печью до комнатной температуры для насыщения кислородом.

Измерения температурной зависимости сопротивления образцов были проведены стандартным четырехзондовым методом на образцах прямоугольного сечения $2 \times 1 \times 10$ мм, расстояние между потенциальными контактами составляло 2 мм.

Измерения магнитных характеристик проводились вибрационным магнетометром. Образцы изготавливались в форме цилиндра высотой 5 мм и диаметром $0,5$ мм. Температурные зависимости намагниченности измерялись на образцах, охлажденных в магнитном поле Земли (M_{ZFC})

и в магнитном поле 100 Ое (M_{FC}). Измерения проводились при нагреве со скоростью $0,8$ К/мин от $77,4$ до 100 К для образцов $Y_{1-x}Ce_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ и $Y_{1-x}La_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ и от 55 до 100 К для образцов $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$. Магнитное поле 100 Ое прикладывалось параллельно оси цилиндрических образцов. Температура сверхпроводящего перехода T_c определялась из температурной зависимости намагниченности $M_{ZFC}(T)$, температура исчезновения сопротивления T_{c0} была определена из температурной зависимости сопротивления $R(T)$.

Результаты и обсуждение. Рентгенофазовый анализ показал, что все образцы серии $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ являются однофазными и имеют структуру 1–2–3. Для образцов $Y_{1-x}La_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ с большими концентрациями La ($x = 0,11, x = 0,25$) наблюдаются моноклинные искажения кристаллической решетки. Образцы $Y_{1-x}Ce_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ показывают структуру 1–2–3, при $x \leq 0,024$. Так как церий плохо растворяется в $YBaCuO$, то при добавлении его в $Y_{1-x}Ce_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ в количестве $x > 0,024$ выделяется фаза $BaCeO_3$.

Измеренные зависимости $R(T)$ являются типичными для поликристаллических сверхпроводников. На $R(T)$ имеется участок резкого падения сопротивления при $T = T_c$, соответствующий внутригранульному сверхпроводящему переходу и плавный участок уменьшения сопротивления до нуля в T_{c0} , отражающий переход джозефсоновской среды, сформированной межгранульными границами. Выше T_c характер зависимостей в основном металлический. Исключением является $Y_{0,75-0,25}La_{0,25}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$, для которого выше температуры перехода зависимость $R(T)$ имеет квазиполупроводниковый характер. Это может быть следствием того, что при больших концентрациях La частично занимает позиции Ba [9]. Зависимости $R(T)$ показывают, что Pr гораздо сильнее подавляет сверхпроводимость, чем Ce или La. Критическая температура T_c образцов практически не зависит от концентрации RE, при $x < 0,0625$ ($n > 4$).

Степень влияния примесей RE на межгранульные границы в YBCO можно оценить из сравнения ширины сверхпроводящего перехода $T_c - T_{c0}$ образцов. Для сравнения образцов с разными концентрациями RE и разными T_c , мы рассматривали приведенную ширину сверхпроводящего перехода $(T_c - T_{c0})/T_c$. Приведенная ширина перехода $(T_c - T_{c0})/T_c$ образцов как функция от n представлена на рис. 1. Для составов $x \leq 0,04$ ($n \geq 5$) изменение $(T_c - T_{c0})/T_c$ составляет менее 4% . Это свидетельствует, что допирование YBCO редкоземельными элементами не оказало существенного влияния на межгранульные границы при данных концентрациях.

Измеренные полевые зависимости намагниченности $M(H)$ образцов имеют вид, характерный для поликристаллических сверхпроводников. Высота петли ΔM в нулевом поле практически одинакова для зависимостей, измеренных в полях до 200 и 1000 Ое. В работе [10] описан метод, позволяющий оценить отдельно внутригранульные и межгранульные критические токи из кривых $M(H)$, измеренных до различных значений максимального магнитного поля. Однако из-за несимметричности петель $M(H)$ в больших H применение модели Бина для оценки критического тока и метода [10] в данном случае является некорректным [11].

Температурные зависимости намагниченностей $M_{FC}(T)$ и $M_{ZFC}(T)$ образцов в поле 100 Ое изображены на рис. 2–4.

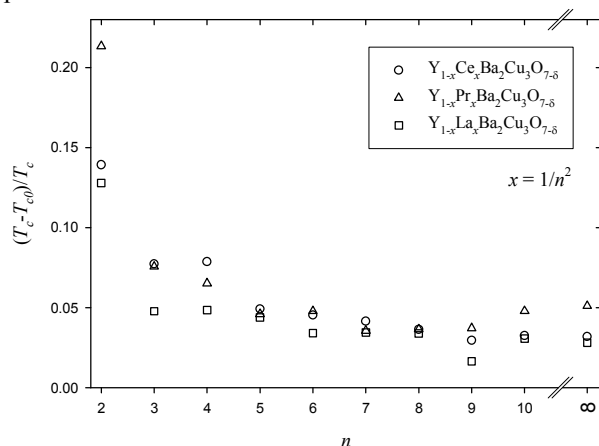


Рис. 1. Нормированная ширина сверхпроводящего перехода $(T_c - T_{c0})/T_c$ для образцов $Y_{1-x}RE_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$

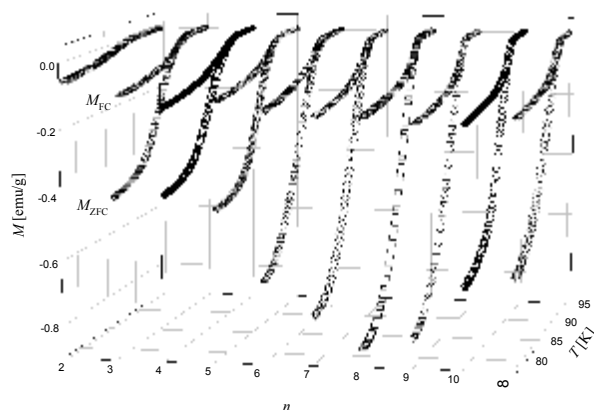


Рис. 2. Температурная зависимость намагниченности образцов $Y_{1-x}Ce_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, охлажденных в магнитном поле $M_{FC}(T)$ и без поля $M_{ZFC}(T)$

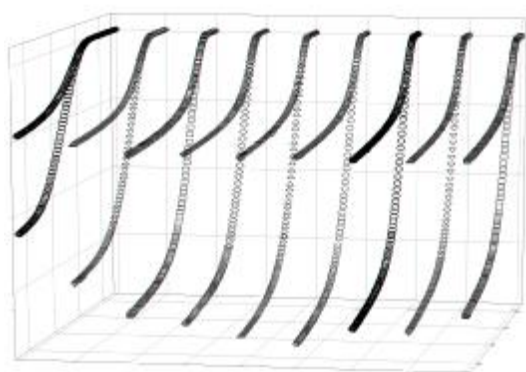


Рис. 3. Температурная зависимость намагниченности образцов $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, охлажденных в магнитном поле $M_{FC}(T)$ и без поля $M_{ZFC}(T)$

Рисунки, представленные в статье, демонстрируют, что абсолютные значения намагниченности, измеренной при охлаждении без поля, очень чувствительны к содержанию RE. Образец $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ с $x=0$ имеет меньшие абсолютные значения $M_{ZFC}(T)$, чем образцы $Y_{1-x}La_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ и $Y_{1-x}Ce_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ с $x=0$. Причиной этого, так же как и слабого разброса T_c образцов разных

серий с $x=0$, может быть различие в содержании кислорода в разных сериях образцов.

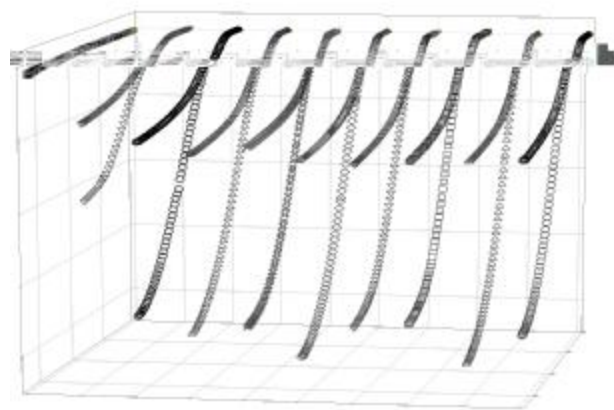


Рис. 4. Температурная зависимость намагниченности образцов $Y_{1-x}La_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, охлажденных в магнитном поле $M_{FC}(T)$ и без поля $M_{ZFC}(T)$

Измеренные зависимости $M_{FC}(T)$ и $M_{ZFC}(T)$ дают информацию о том, как содержание RE влияет на внутригранульный пиннинг в $Y_{1-x}RE_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$. Разница между намагниченностями образца M_{FC} и M_{ZFC} монотонно зависит от энергии пиннинга [12]. Влияние межгранульного пиннинга на зависимости $M_{FC}(T)$ и $M_{ZFC}(T)$ мало, вследствие сильного депиннинга в межгранульных границах при охлаждении [13]. Таким образом, величина $\Delta M = M_{FC} - M_{ZFC}$ отражает внутригранульный пиннинг. Величина ΔM для образцов как функция от n при $T=77,4$ К представлена на рис. 5.

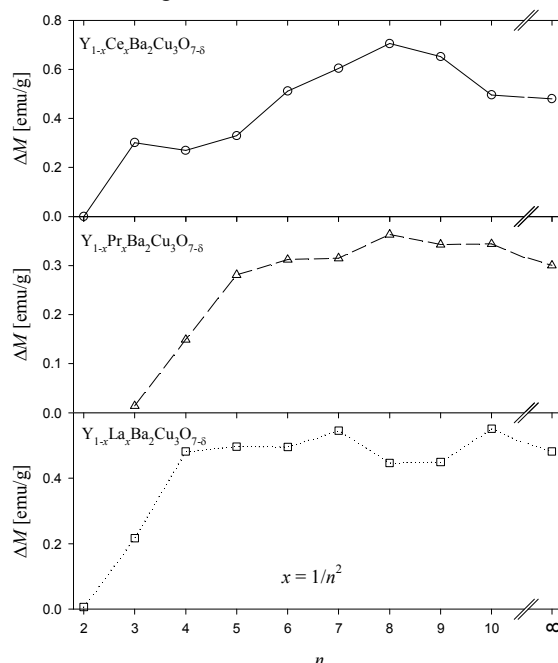


Рис. 5. Разность намагниченностей $\Delta M = M_{FC} - M_{ZFC}$ образцов $Y_{1-x}RE_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ в 77,4 К

Характер зависимости $\Delta M(n)$ не изменяется при других температурах $T < T_c$. Для образцов $Y_{1-x}Ce_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ и $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ величина ΔM максимальна при $n=8$ ($x=0,0156$). Этот максимум соответствует среднему расстоянию между примесными атомами D , равному $8a$.

Для YBCO $a = 0,382$ нм, следовательно $D = 3,06$ нм. Такая величина D соизмерима с длиной когерентности в YBCO $\xi_0 \sim 1,5$ нм [14; 15]. По нашему мнению, это указывает на то, что энергия пиннинга наибольшая, когда среднее расстояние между дефектами равно диаметру абрикосовских вихрей. Пиннигующими дефектами являлись локальные искажения электронной плотности, образованные редкоземельными ионами с валентностью, большей чем +3.

Для серии $Y_{1-x}La_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ не наблюдается явного максимума на кривой $\Delta M(n)$. По-видимому, искажения кристаллической структуры, возникающие из-за того, что размеры атомов La больше, чем размеры атомов Y, не служат центрами пиннинга для вихрей.

Исследования транспортных и магнитных свойств образцов $Y_{1-x}RE_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ показали, что допирование редкоземельными атомами с валентностью большей +3 в малых концентрациях увеличивает внутригранульный пиннинг. Концентрация RE $x = 0,015$ 6, при которой наблюдается максимальный пиннинг в слабом магнитном поле, одинакова для YBCO, допированного Ce или Pr. Эта концентрация соответствует среднему расстоянию между примесными атомами равному 3,06 нм, что коррелирует с длиной когерентности в YBCO. Следовательно, для практического использования ВТСП в качестве экранирующего покрытия от магнитного и электромагнитного полей составы $Y_{0,985}(Pr, Ce)_{0,015}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ более эффективны, чем классический сверхпроводник $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$.

Авторы благодарят Д. А. Балаева, Д. М. Гохфельда, С. И. Попкова и К. А. Шайхутдинова за проведенные измерения и обсуждение результатов.

V. V. Khrapunova, Yu. S. Gokhfeld, M. I. Petrov

PINNING ENHANCEMENT IN $Y_{1-x}RE_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ SUPERCONDUCTORS

The intragrain pinning in high-Tc superconductor compounds $Y_{1-x}RE_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ with low concentration of RE (La, Ce, Pr) was investigated. Magnetic and transport measurements reveal that the pinning is maximal for the concentration of RE such that the average distance between the impurity ions are close to the diameter of Abrikosov's vortices in YBCO.

Keywords: high-temperature superconductors, pinning potential, transport properties, magnetic properties.

Библиографические ссылки

1. Paulius L. M., Almasan C. C., Maple M. B. // Phys. Rev. 1993. B 47, 11627.
2. Skakle J. M. S. // Materials Science & Engineering R-Reports. 1998. 23, 1.
3. Harada T., Yoshida K. // Physica. 2002. C 383, 48.
4. Harada T., Yoshida K. // Physica. 2003. C 387, 411.
5. Xing J. H., Xu S., Lu X. M., Qian B. [et al.] // International Journal of Modern Physics B. 2007. 21, 3180.
6. MacManus-Driscoll J. L., Foltyn S. R., Jia Q. X. [et al.] // Appl. Phys. Lett. 2004. 84, 5329.
7. Kell J. W., Haugan T. J., Locke M. F. [et al.] // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2005. 15, 3726.
8. Barnes P. N., Kell J. W., Harrison B. C. [et al.] // Appl. Phys. Lett. 2006. 89, 012503.
9. Gantis A., Calamiotou M., Palles D. [et al.] // Phys. Rev. 2003. B 68, 064502.
10. Müller K. H., Andrikidis C., Liu H. K. [et al.] // Phys. Rev. 1994. B 50, 10218.
11. Y. Yeshurun, A.P. Malozemoff, A. Shaulov, Rev. Mod. Phys. 1996. 68, 911.
12. Малоземофф А. П. Физические свойства высокотемпературных сверхпроводников / под ред. Д. М. Гинзберга. М.: Мир, 1990.
13. Jung J., Mohamed M. A-K., Isaac I. [et al.] // Phys. Rev. 1994. B 49, 12188.
14. Горьков Л. П., Копнин Н. Б. // УФН. 1988. 156, 117.
15. Larbalestier D., Gurevich A., Feldmann D. M. [et al.] // Nature. 2001. 414, 368.