

УДК 538.945

ЭЛЕКТРОННЫЙ И ДЫРОЧНЫЙ ВКЛАДЫ В ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОННО-ЛЕГИРОВАННОГО СВЕРХПРОВОДНИКА $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$

¹Петухов Д.С., ¹Петухова О.Е., ¹Чарикова Т.Б., ¹Шелушинина Н.Г.,
¹Харус Г.И., ²Иванов А.А.

¹Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, e-mail: dpetukhov@imp.uran.ru;

²Московский государственный инженерно-физический институт, Москва

Представлены результаты исследования гальваномагнитных эффектов в смешанном и нормальном состояниях системы $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$ в магнитных полях до 90 кОе ($H \parallel c$, $J \parallel ab$) в интервале температур $T = (0.4 - 40)$ К. Показано, что наблюдаемые аномалии в поведении коэффициента Холла, а также в температурной зависимости верхнего критического поля можно проанализировать в рамках единого подхода в результате обобщения стандартных формул на случай сосуществования как электронного, так и дырочного вкладов в явления переноса номинально электронно-легированного сверхпроводника $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$.

Ключевые слова: электронно-легированные сверхпроводники, коэффициент Холла, верхнее критическое поле

ELECTRON AND HOLE CONTRIBUTIONS TO THE TRANSPORT PHENOMENA IN ELECTRON-DOPED SUPERCONDUCTOR $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$

¹Petukhov D.S., ¹Petukhova O.E., ¹Charikova T.B., ¹Shelushinina N.G.,
¹Harus G.I., ²Ivanov A.A.

¹Institute of Metal Physics RAS, Ekaterinburg, e-mail: dpetukhov@imp.uran.ru;

²Moscow Engineering Physics Institute, Moscow

We present the results of investigation of the galvanomagnetic effects in the mixed and normal states of $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$ in magnetic fields up to 90 kOe ($H \parallel c$, $J \parallel ab$) in the temperature range $T = (0.4 - 40)$ K. It is shown that the observed anomalies of the Hall coefficient behavior and the temperature dependence of the upper critical field can be analyzed in the framework of a unified approach by generalizing the standard formulas for the case of coexistence of both electron and hole contributions to the transport phenomena in electron-doped superconductor $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$.

Keywords: electron doped superconductors, Hall coefficient, upper critical field

Высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) демонстрируют аномальное поведение в смешанном состоянии. В частности, это выражается в том, что знак коэффициента Холла в смешанном состоянии может быть противоположен его знаку в нормальном состоянии [1]. Уравнения, полученные в рамках классических моделей Нозьера-Винена (NV) и Бардина-Стефана (BS) (основанных на анализе динамики вихрей Абрикосова) [2], не позволяют описать смену знака коэффициента Холла R_H . Для объяснения данного эффекта был предложен целый ряд моделей [3], однако до сих пор как происхождение, так и причины наличия или отсутствия аномалии, связанной со сменой знака R_H в конкретном сверхпроводнике, остаются неясными.

В работе Хирша и Марсильо [4] для объяснения смены знака эффекта Холла в смешанном состоянии была предложена двузонная модель, в которой предполагалось наличие электронов и дырок. Данные исследования транспортных свойств, эксперименты по фотоэмиссионной спектроскопии с угловым разрешением (ARPES) [5] и ре-

зультаты исследования магнитосопротивления в сильных магнитных полях [6] показывают, что свойства нормального состояния электронного ВТСП $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$ определяются как электронами, так и дырками.

Для ВТСП также характерно то, что зависимости верхнего критического поля от температуры $H_{c2}(T)$ существенно отличаются от зависимостей $H_{c2}(T)$ для обычных низкотемпературных сверхпроводников [7]. В работе [8] показано, что магнитосопротивление в нормальном состоянии пленок $\text{Nd}_{1.85}\text{Ce}_{0.15}\text{CuO}_{4+\delta}$ с оптимальным отжигом можно количественно описать в рамках модели с двумя типами носителей, если предположить сосуществование электронно-подобной и дырочно-подобной зон.

2.1 Эффект Холла в смешанном состоянии

В настоящей работе представлены результаты измерений магнитосопротивления и коэффициента Холла в смешанном и нормальном состояниях в недолегируемых ($x = 0,14$), оптимально-легируемых ($x = 0,15$) и перелегируемых ($x = 0,17$ и $0,18$) монокристаллических пленках электронно-легированного сверхпроводника

$Nd_{2-x}Ce_xCuO_{4+\delta}$ с различным содержанием кислорода δ (степенью беспорядка) в магнитных полях до 90 кЭ ($H \parallel c$; $J \parallel ab$) в интервале температур $T = (0,4 - 40)$ К.

В смешанном (резистивном) состоянии (при $H_p < H < H_{c2}$, H_p – поле депиннинга вихревой решетки, H_{c2} – верхнее критическое поле), в котором конечное значение сопротивления является следствием движения вихревых нитей под действием силы Лоренца, для электронно-легированного сверхпроводника $Nd_{2-x}Ce_xCuO_{4+\delta}$ обнаружена аномальная смена знака эффекта Холла в магнитных полях ниже H_{c2} : с отрицательного на положительный для $x = 0,14, 0,15$ (рис. 1) и с положительного на отрицательный для $x = 0,17, 0,18$ (рис. 2).

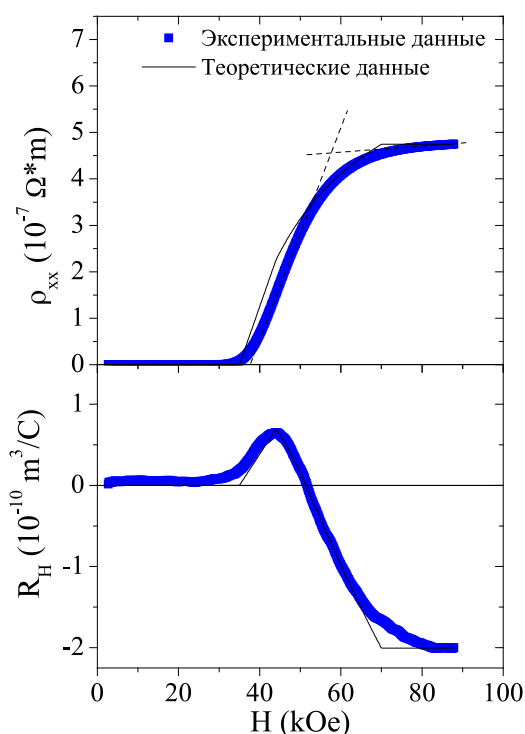


Рис. 1. Экспериментальные и теоретические зависимости $\rho(H)$ и $R_H(H)$ при $T = 4,2$ К для образца $Nd_{2-x}Ce_xCuO_{4+\delta}$ с $x = 0,15$ и оптимальным отжигом

В рамках схемы, основанной на классической модели Друде для нормального состояния и полуфеноменологической модели Бардина-Стефена для смешанного состояния сверхпроводника, модифицированных с учетом сосуществования электронов и дырок, оказалось возможным количественно описать всю совокупность наблюдаемых магнитополевых зависимостей продольной и холловской компонент сопротивления в системе $Nd_{2-x}Ce_xCuO_{4+\delta}$ (для $x = 0,14 \div 0,18$ и различных значений δ). По аналогии с ра-

ботой [4] мы предполагаем, что два типа носителей имеют существенно различные сверхпроводящие щели и, как следствие, существенно различные значения виртуального верхнего критического поля. Подробный вывод уравнений для расчета приведен в работе [9].

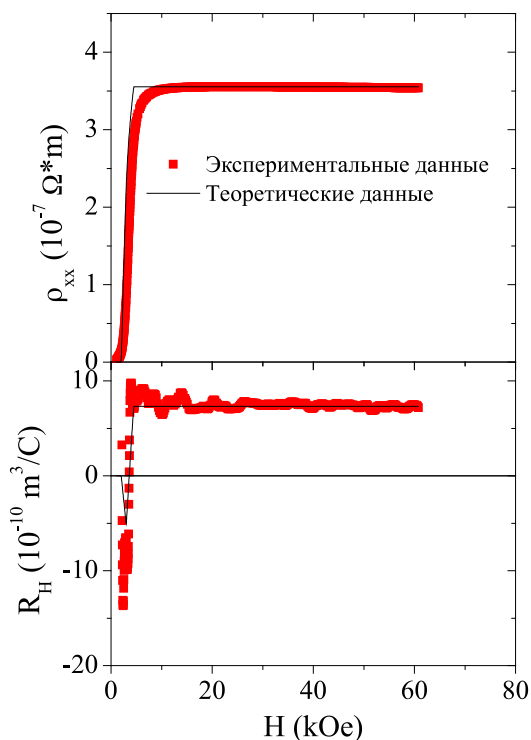


Рис. 2. Экспериментальные и теоретические зависимости $\rho(H)$ и $R_H(H)$ при температуре 4,2 К для образца $Nd_{2-x}Ce_xCuO_{4+\delta}$ с $x = 0,18$ и оптимальным отжигом

Результаты анализа зависимостей коэффициента Холла $R_H(H)$ и удельного сопротивления от магнитного поля $\rho(H)$ при $T = 4,2$ К для образцов $Nd_{2-x}Ce_xCuO_{4+\delta}$ в рамках данной модели приведены на рис. 1 для $x = 0,15$ и рис. 2 для $x = 0,18$. Найденные при расчете значения подгоночных параметров для двух типов носителей (концентраций электронов (n) и дырок (p) при соотношении подвижностей $\mu_n/\mu_p \approx 1$) представлены в таблице.

Величины подгоночных параметров для двух типов носителей

x	$n, \text{см}^{-3}$	$p, \text{см}^{-3}$
0,14	$2,3 \cdot 10^{20}$	$4,9 \cdot 10^{19}$
0,15	$4,3 \cdot 10^{21}$	$5,4 \cdot 10^{21}$
0,18	$3,5 \cdot 10^{20}$	$2,8 \cdot 10^{21}$

Из таблицы видно, что для недолегированного образца ($x = 0,14$) рассчитанные

концентрации электронов и дырок находятся в соотношении $p < n$; для образца с оптимальным легированием ($x = 0,15$) $p \approx n$; для перелегированного образца ($x = 0,18$) $p > n$, что соответствует результатам, полученным из данных ARPES [5] и из частот осцилляций Шубникова-де-Гааза [6] для различных образцов $Nd_{2-x}Ce_xCuO_{4+\delta}$.

2.2 Температурные зависимости верхнего критического поля

В данной работе представлены также результаты измерений резистивным методом (из измерений электросопротивления в магнитном поле) верхнего критического поля (H_{c2}) в зависимости от температуры (T) в монокристаллических пленках $Nd_{2-x}Ce_xCuO_{4+\delta}/SrTiO_3$ с $x = 0,14$ и $0,15$ при различной степени беспорядка (δ) в магнитных полях до 90 кЭ в интервале температур $T = (0,4 - 40)$ К в ЦКП «Испытательный центр нанотехнологий и перспективных материалов» ИФМ УрО РАН.

Обнаружено, что в оптимально легированных пленках $Nd_{2-x}Ce_xCuO_{4+\delta}$ с $x = 0,15$ и различной степенью беспорядка (δ) наблюдается два вида зависимостей $H_{c2}(T)$:

1. Аномальные зависимости с положительной кривизной $H_{c2}(T)$ в оптимально и не оптимально отожженных пленках и

2. БКШ-зависимости в пленке без отжига (рис. 3).

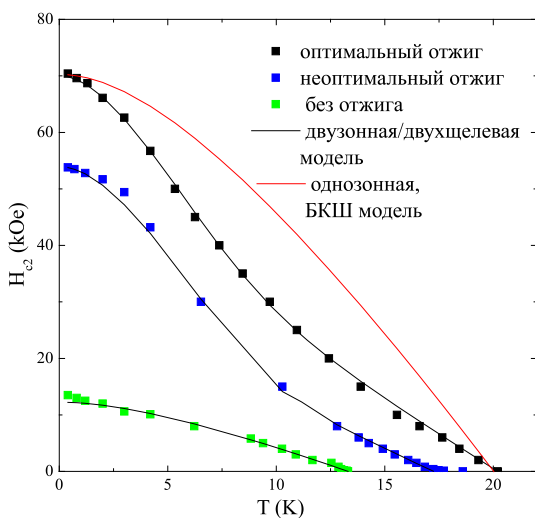


Рис. 3. Экспериментальные и теоретические зависимости верхнего критического поля от температуры для образцов $Nd_{2-x}Ce_xCuO_{4+\delta}$ с $x = 0,15$ и разным отжигом

Температурные зависимости верхнего критического поля для пленок недолегированного $Nd_{2-x}Ce_xCuO_{4+\delta}$ с $x = 0,14$ (в непосредственной близости от антиферромагнитной фазы) имеют аномальную по-

ложительную кривизну для всех режимов отжига (рис. 4).

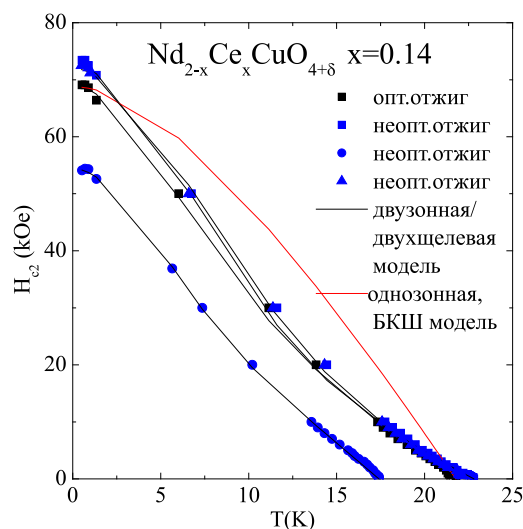


Рис. 4. Экспериментальные и теоретические зависимости верхнего критического поля от температуры для образцов $Nd_{2-x}Ce_xCuO_{4+\delta}$ с $x = 0,14$ и разным отжигом

На рис. 3 и 4 представлены также теоретические зависимости $H_{c2}(T)$ для образцов $Nd_{2-x}Ce_xCuO_{4+\delta}$ с $x = 0,15$ и с $x = 0,14$. Для сравнения показано, что кривая, полученная в рамках стандартной однозонной модели Бардина-Купера-Шриффера (БКШ) для обычных сверхпроводников, не описывает экспериментальные зависимости.

Расчеты показали, что все наблюдаемые зависимости $H_{c2}(T)$ можно непротиворечивым образом объяснить на основе двухзонной/двухщелевой модели сверхпроводника в грязном пределе (модель Гуревича [10]), варьируя соотношение коэффициентов диффузии двух типов носителей (электронов и дырок). При этом, в соответствии с анализом работы [10], установлено, что температура сверхпроводящего перехода всегда определяется электронами, в то время как значение верхнего критического поля при низких температурах, $H_{c2}(T \rightarrow 0)$, может определяться как электронами, так и дырками в зависимости от соотношения их коэффициентов диффузии в данном образце.

Выводы

Таким образом, проведенный анализ влияния легирования (и степени нестехиометрического беспорядка) на изменение магнитолевой зависимости тензора электросопротивления в рамках модели проводимости Друде для нормального состояния и полуфеноменологической модели BS для смешанного состояния показал, что

в процессах переноса заряда в номинально электронно-легированном сверхпроводнике $Nd_{2-x}Ce_xCuO_{4+\delta}$ участвуют два типа носителей заряда с противоположным знаком – электроны и дырки.

Показано, что экспериментально наблюдаемое изменение кривизны $H_{c2}(T)$ можно объяснить на основе модели двузонного/двухщелевого сверхпроводника в грязном пределе для различного соотношения коэффициентов диффузии электронов и дырок, что также свидетельствует о существовании как электронного, так и дырочного вкладов в явления переноса номинально электронно-легированного сверхпроводника $Nd_{2-x}Ce_xCuO_{4+\delta}$.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Электрон» № 01201463326 при частичной финансовой поддержке программы фундаментальных

исследований УрО РАН (грант № 15-8-2-6) и РФФИ (грант № 15-02-02270).

Список литературы

1. S.J. Hagen, A.W. Smith, M. Rajeswari, et al., Phys. Rev. B., V. 47, 1064 (1993).
2. P. Nozières, W.F. Vinen, Philos. Mag., V. 14, (1966); J. Bardeen, M. J. Stephen, Phys. Rev., V. 140, A1197 (1965).
3. E.H. Brandt, Rep. Prog. Phys., V. 58, 1465 (1995).
4. J.E. Hirsch, F. Marsiglio, Phys. Rev. B., V. 43, 424 (1991).
5. N.P. Armitage, P. Fournier, R.L. Greene, Rev. Mod. Phys., V.82, 2421 (2010).
6. T. Helm, M.V. Kartsovnik, M. Bartkowiak, et al., Phys. Rev. Lett., V. 103, 157002 (2009); M. V. Kartsovnik, T. Helm, C. Putzke, et al., New J. Phys., V.13, 015001 (2011).
7. Y. Dalichaouch, B.W. Lee, C.L. Seaman, et al., Phys. Rev. Lett., V.64, 599 (1990).
8. F. Gollnik, M. Naito, Phys. Rev. B., V. 58, 11734 (1998).
9. T.B. Charikova, N.G. Shelushinina, G.I. Harus, et al., Physica C., V. 483, 113 (2012).
10. Gurevich, Phys. Rev. B., V.67, 184515 (2003).