

# Визуализация топологического фазового перехода Березинского–Костерлица–Таулеса в джозефсоновской среде – обнаружение аномальной температурной зависимости магнитосопротивления гранулярных высокотемпературных сверхпроводников $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$

Т. В. Сухарева<sup>1)</sup>, В. А. Финкель

Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт” НАН Украины, 61108 Харьков, Украина

Поступила в редакцию 30 мая 2018 г.

После переработки 9 июля 2018 г.

Изучена возможность реализации топологического фазового перехода Березинского–Костерлица–Таулеса в джозефсоновской среде двухуровневых высокотемпературных сверхпроводников “по магнитному полю”. Проведены экспериментальные исследования влияния температуры и внешнего магнитного поля на транспортные свойства модельного объекта – гранулярного высокотемпературного сверхпроводника  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ . Впервые обнаружено аномальное поведение изотерм магнитосопротивления в узком диапазоне значений температуры и напряженности внешнего магнитного поля, свидетельствующее о протекании топологического фазового перехода в джозефсоновской среде гранулярных высокотемпературных сверхпроводников.

DOI: 10.1134/S0370274X18160051

В 2013 г. вышла в свет монография известного специалиста в области фазовых переходов Джорджа Хосе “40 лет теории Березинского–Костерлица–Таулеса” [1]. В 2016 г. Дэвид Таулес, Дункан Холдейн и Джон Майкл Костерлиц были удостоены Нобелевской премии по физике с формулировкой “За теоретические открытия топологических фазовых переходов и топологических фаз материи” [2]. Автор приоритетных работ по теории топологических фазовых переходов [3–5] Вадим Львович Березинский скончался в 1980 г. задолго до присуждения Нобелевской премии-2016.

Из самой формулировки Нобелевского комитета в 2016 г. следует, что премия была присуждена исключительно за теоретические работы в области установления природы топологических фазовых переходов и топологических фаз материи. Естественно, что теория содержит набор достаточно важных “маркеров” для возможного экспериментального обнаружения топологических фазовых переходов, в частности – перехода Березинского–Костерлица–Таулеса (Berezinskiy–Kosterlitz–Thouless) (ВКТ-переход). Наиболее важным из этих маркеров является пониженная размерность систем (1D или

2D), в которых потенциально возможно протекание подобных фазовых переходов [3, 4, 6, 7].

Известен ряд попыток экспериментального обнаружения характерных признаков топологических фазовых переходов – ВКТ-переходов в квазидвумерных системах с различной “архитектурой”. Еще в 1981 г. в известной работе D.J. Resnick и J.C. Garland [8] на примере “рукотворной” квазидвумерной сверхпроводящей системы, состоящей из Sn-пленки толщиной  $\sim 150$  нм, заключенной между двумя массивными Pb-дисками, были обнаружены особенности поведения вольтамперных характеристик (ВАХ)  $V \sim I^3$ , указывающие на возможность протекания топологического ВКТ-перехода [9]. Подобные особенности поведения ВАХ квазидвумерных объектов типа NbN,  $InO_x$ , TiN, BiSb, NbTiN и т.п. наблюдали также в работах [10–19].

Следует полагать, что поиск модельных объектов, в которых могут быть обнаружены и надежно идентифицированы топологические ВКТ фазовые переходы, следует осуществлять не в искусственно созданных двухфазных системах типа упомянутых выше, а в системах, топологией которых в принципе можно управлять с помощью температуры, внешнего магнитного поля или транспортного тока. Идеальным двумерным объектом для поиска топологических фазовых ВКТ-переходов является джозефсо-

<sup>1)</sup>e-mail: t.sukhareva.2003@gmail.com

новская среда двухуровневых гранулярных высокотемпературных сверхпроводников [20]. Как известно [21, 22], необходимым и достаточным условием реализации двухуровневой системы “3D сверхпроводящие гранулы + 2D джозефсоновские слабые связи” является приложение внешнего магнитного поля напряженностью  $H_{\text{ext}} \geq H_{c2J}$  ( $H_{c2J}$  – поле полного проникновения в подсистему джозефсоновских слабых связей). Ранее нам удалось обнаружить эффекты аномального поведения параметров ВАХ в узком интервале температур – в том числе и скачок критического тока  $I$  [23–25], указывающие на возможность протекания топологического фазового перехода – ВКТ-перехода в джозефсоновской среде двухуровневого гранулярного высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП)  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  “по транспортному току”.

Вопрос о возможности протекания топологического фазового перехода “по магнитному полю” фактически оставался открытым. Попытке решения этого вопроса на основании экспериментальных исследований влияния температуры и внешнего магнитного поля на транспортные свойства модельного объекта – гранулярного ВТСП  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ , по существу, и посвящена настоящая работа.

Объектами исследования в настоящей работе служили однофазные образцы гранулярного ВТСП  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  номинального состава  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.95}$ , синтезированные по стандартной “керамической технологии” [26]. Температура середины сверхпроводящего перехода  $T_c^{1/2}$  составляла  $92.65 \pm 0.01$  К, ширина перехода  $\Delta T_c$  не превышала 0.4 К.

Для измерений температурных зависимостей электросопротивления во внешних магнитных полях была разработана и создана специальная установка [27] {ПИК на основе криогенератора *RGD-210 Leybold* (20–273 К), оснащенный внешней системой постоянных магнитов из высококоэрцитивного сплава  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  для создания магнитных полей напряженностью до  $\sim 2000$  Э}<sup>2)</sup>.

Для достижения цели работы была осуществлена следующая программа исследований:

1. Проведение измерений удельного электросопротивления в условиях непрерывного изменения одного параметра (температура,  $T$ ) и дискретного изменения второго параметра (напряженность внешнего магнитного поля,  $\mathbf{H}_{\text{ext}}$ ) при постоянном значении

третьего параметра – плотности транспортного тока  $j$ .

2. Разработка и реализация алгоритмов преобразования результатов прямых измерений температурных зависимостей электросопротивления при заданных внешних параметрах ( $H_{\text{ext}}, j$ ) в совокупность изотерм магнитосопротивления  $\rho(H_{\text{ext}})_{T=\text{const}}$ .

3. Установление природы и особенностей поведения изотерм магнитосопротивления при изменении температуры и напряженности внешнего магнитного поля.

Динамика эволюции изотерм магнитосопротивления при изменении температуры и должна нести, по нашему мнению, информацию о возможности протекания топологических фазовых переходов – ВКТ-переходов в джозефсоновской среде гранулярных высокотемпературных сверхпроводников “по магнитному полю”.

На рисунке 1 представлены результаты прецизионных измерений температурных зависимостей

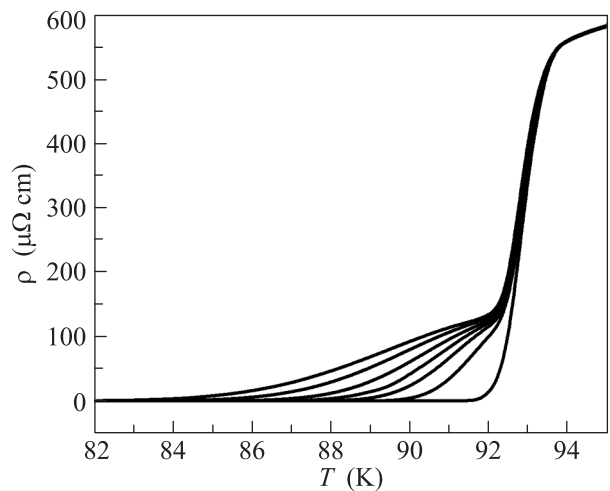


Рис. 1. Температурные зависимости удельного электросопротивления гранулярных ВТСП  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.95}$  во внешних магнитных полях. Снизу вверх  $H_{\text{ext}} = 0, 10, 25, 50, 100, 250, 500$  Э

удельного электросопротивления при фиксированных величинах напряженности перпендикулярного внешнего магнитного поля ( $0 \leq H_{\text{ext}} \leq 500$  Э) в диапазоне температур  $\approx 70 \leq T \leq \approx 100$  К<sup>3)</sup>, при постоянном значении плотности транспортного тока

<sup>3)</sup>Для приложения магнитного поля использовали FC-режим (охлаждение в магнитном поле). Подобный режим, как показано ранее [27], обеспечивает достижение максимального равновесия между объектом исследования – гранулярным ВТСП и внешним магнитным полем; достижению равновесия способствовало также применение очень низких скоростей охлаждения и нагрева образцов ( $\sim 0.002$ – $0.004$  град/с).

<sup>2)</sup>Подобный способ создания высокостабильного магнитного поля в криостатах, насколько нам известно, ранее не применялся.

( $j \sim 2 \text{ A/cm}^2$ ). Все измерения проводились в условиях повышения температуры.

В соответствии с приведенной выше программой исследований, результаты прямых измерений температурных зависимостей удельного электросопротивления – матрицу  $\rho(T)_{H_{\text{ext}}=\text{const}}$  транспонировали в матрицу  $\rho(H_{\text{ext}})_{T=\text{const}}$ . В этой связи проводили интерполяцию полученных значений  $\rho(T)_{H_{\text{ext}}=\text{const}}$  к определенным значениям температуры с “шагом” 0.1 К. Результаты преобразования данных  $\rho(T)_{H_{\text{ext}}=\text{const}} \rightarrow \rho(H_{\text{ext}})_{T=\text{const}}$  представлены на рис. 2.

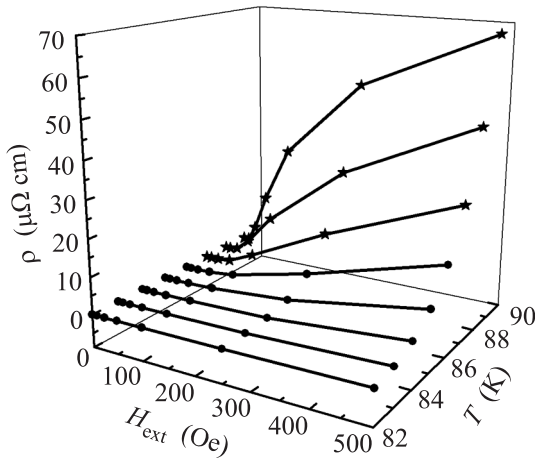


Рис. 2. Температурные зависимости магнитосопротивления гранулярных ВТСП  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.95}$ . Для большей наглядности на рисунке представлена часть полученных изотерм магнитосопротивления, соответствующих целочисленным значениям параметра  $T$

Как видно, при изменении температуры характер поведения кривых магнитосопротивления принципиально меняется:

- в диапазоне  $\sim 82 \leq T \leq \sim 86 \text{ K}$  изотермы магнитосопротивления носят практически линейный (нормальный) характер. Такой ход кривых магнитосопротивления  $\rho(H_{\text{ext}})$  исключает возможность появления каких-либо иных фазовых переходов, кроме перехода при  $T = T_{c2J} = T_{\rho=0}$  (температура полного проникновения магнитного поля в подсистему джозефсоновских слабых связей);

- в диапазоне  $\sim 87 \text{ K} \leq T \leq \sim 89 \text{ K}$  изотермы магнитосопротивления носят явно выраженный аномальный характер – с повышением напряженности внешнего магнитного поля  $H_{\text{ext}}$  “высокотемпературные” изотермы  $\rho(H_{\text{ext}})$  обнаруживают резкий рост сопротивления, на кривых появляется характерный перегиб, после прохождения точки перегиба изотермы магнитосопротивления заметно меняют ход.

Обнаружение эффекта аномального поведения электрофизических свойств гранулярного ВТСП  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  в узком диапазоне значений температуры и напряженности внешнего магнитного поля и являет собой основной результат настоящей работы. Есть все основания полагать, что аномальное поведение изотерм магнитосопротивления связано с протеканием топологического фазового перехода в джозефсоновской среде гранулярного ВТСП  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ .

На основании изучения влияния температуры и внешнего магнитного поля на транспортные свойства гранулярных ВТСП  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  построена фазовая  $H-T$ -диаграмма (рис. 3)<sup>4</sup>. Однозначно показано, что  $T_{c2J} = T_{\rho=0} < T_{\text{ВКТ}} < T_{c1g} < T_c$ .

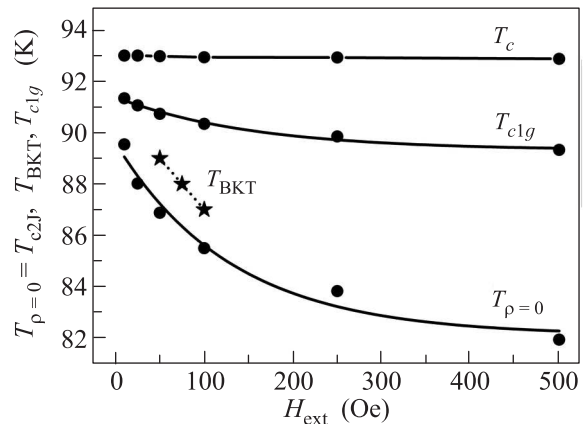


Рис. 3. Зависимости критических температур фазовых переходов гранулярных ВТСП  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.95}$   $T_{c2J} = T_{\rho=0}$ ,  $T_{\text{ВКТ}}$ ,  $T_{c1g}$  и  $T_c$  от напряженности внешнего магнитного поля

Таким образом, в работе удалось решить задачу визуализации топологического фазового перехода – ВКТ-перехода “по магнитному полю” в джозефсоновской среде гранулярных ВТСП  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ . Впервые в узком диапазоне температур и значений напряженности внешнего магнитного поля обнаружены характерные особенности поведения кривых магнитосопротивления. Принципиально важно то, что температуры, при которых имеет место аномальное поведение изотерм магнитосопротивления

<sup>4</sup>На основании данных, представленных на рис. 1 и 2, могут быть определены полевые зависимости критических температур фазовых переходов: температура полного проникновения магнитного поля в подсистему джозефсоновских слабых связей  $T_{c2J} = T_{\rho=0}$ , температура начала проникновения магнитного поля в сверхпроводящие гранулы  $T_{c1g}$ ,  $T_c$  [20, 27] и  $T_{\text{ВКТ}}$ . Критические температуры  $T_{c1g}$  и  $T_c$  определяли по положению максимумов производных электросопротивления по температуре  $dR/dT$ .

практически полностью совпадают со значениями  $T_{\text{ВКТ}}(H_{\text{ext}})$ , полученными на основании изучения влияния плотности транспортного тока на вольтамперные характеристики во внешних магнитных полях [23–25].

1. J. V. Jose, *40 Years of Berezinskii–Kosterlitz–Thouless Theory*, World Scientific, Singapore (2013), 351 p.
2. В. Н. Рыжов, УФН **187**, 125 (2017).
3. В. Л. Березинский, ЖЭТФ **59**(3), 907 (1970).
4. В. Л. Березинский, ЖЭТФ **61**(3), 1144 (1971).
5. В. Л. Березинский, *Низкотемпературные свойства двумерных систем с непрерывной группой симметрии*, Физматлит, М. (2007), 232 с.
6. J. M. Kosterlitz and D. J. Thouless, J. Phys. C **5**, L124 (1972).
7. J. M. Kosterlitz and D. J. Thouless, J. Phys. C **6**, 1181 (1973).
8. D. J. Resnick and J. C. Garland, Phys. Rev. Lett. **47**(21), 1542 (1981).
9. B. I. Halperin and D. R. Nelson, J. Low Temp. Phys. **36**, 599 (1979).
10. R. W. Crane, N. P. Armitage, A. Johansson, G. Sambandamurthy, D. Shahar, and G. Grüner, Phys. Rev. B **75**, 094506 (2007).
11. Y.-H. Lin, J. Nelson, and A. M. Goldman, Phys. Rev. Lett. **109**(1), 017002 (2012).
12. M. V. Burdastyh, S. V. Postolova, T. I. Baturina, T. Proslir, V. M. Vinokur, and A. Yu. Mironov, JETP Lett. **106**(11), 749 (2017).
13. W. Zhao, Q. Wang, M. Liu et al. (Collaboration), Solid State Commun. **165**(4), 59 (2013).
14. K. Medvedyeva, B. J. Kim, and P. Minnhagen, Phys. Rev. B **62**(1), 14531 (2000).
15. T. I. Baturina, S. V. Postolova, A. Yu. Mironov, A. Glatz, M. R. Baklanov, and V. M. Vinokur, EPL **97**, 17012 (2012).
16. D. Massarotti, B. Jouault, V. Rouco, S. Charpentier, T. Bauch, A. Michon, A. De Candia, P. Lucignano, F. Lombardi, F. Tafuri, and A. Tagliacozzo, Phys. Rev. B **94**(11), 054525 (2016).
17. M. P. Stehno, V. Orlyanchik, C. D. Nugroho, P. Ghaemi, M. Brahlek, N. Koirala, S. Oh, and D. J. van Harlingen, Phys. Rev. B **93**, 035307 (2016).
18. I. Maccari, L. Benfatto, and C. Castellani, Phys. Rev. B **96**(5), 060508 (2017).
19. Z. Sefrioui, D. Arias, C. Leon, J. Santamaria, E. M. Gonzalez, J. L. Vicent, and P. Prieto, Phys. Rev. B **70**, 064502 (2004).
20. В. В. Деревянко, Т. В. Сухарева, В. А. Финкель, ФТТ **59**(8), 1470 (2017).
21. M. Tinkham and C. J. Lobb, Solid State Phys. **42**, 91 (1989).
22. B. Ji, M. S. Rzchowski, N. Anand, and M. Tinkham, Phys. Rev. B **47**(1), 470 (1993).
23. V. V. Derevyanko, V. A. Finkel, T. V. Sukhareva, and M. S. Sunhurov, IEEE Xplore Digital Library, **YSF-2017**, 171 (2017).
24. Т. В. Сухарева, В. А. Финкель, ФНТ **44**(3), 258 (2018).
25. В. В. Деревянко, Т. В. Сухарева, В. А. Финкель, ФТТ **60**(3), 465 (2018).
26. В. В. Деревянко, Т. В. Сухарева, В. А. Финкель, ФТТ **46**(10), 1740 (2004).
27. В. В. Деревянко, Т. В. Сухарева, В. А. Финкель, Ю. Н. Шахов, ФТТ **56**(4), 625 (2014).