

# Топологические фазовые переходы Березинского–Костерлица–Таулесса в джозефсоновской среде гранулярных высокотемпературных сверхпроводников под действием магнитного и электрического полей

Т.В. Сухарева, В.А. Финкель

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт» НАН Украины  
ул. Академическая, 1, г. Харьков, 61108, Украина  
E-mail: t.sukhareva.2003@gmail.com

Статья поступила в редакцию 16 декабря 2019 г., опубликована онлайн 24 марта 2020 г.

Работа посвящена установлению тождественности топологических фаз, возникающих в джозефсоновской среде гранулярных высокотемпературных сверхпроводников  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  при протекании фазовых переходов Березинского–Костерлица–Таулесса (БКТ) под действием внешнего магнитного поля и транспортного тока. Установлено, что характер топологических фаз, возникающих в результате БКТ фазового перехода, не зависит от вида внешнего воздействия.

Ключевые слова: топологический фазовый переход, топологические фазы, гранулярный высокотемпературный сверхпроводник,  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ , джозефсоновская среда, магнитное поле, транспортный ток.

## 1. Введение

В 2016 г. Нобелевская премия по физике была присуждена с формулировкой «За теоретические открытия топологических фазовых переходов и топологических фаз материи». Из самой формулировки 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 обнаружения топологических фазовых переходов, в частности перехода Березинского–Костерлица–Таулесса (БКТ), число же работ в области экспериментального изучения топологических фазовых переходов и топологических фаз материи относительно невелико. Наиболее важный из этих маркеров — пониженная размерность систем (1D или 2D), в которых потенциально возможно протекание подобных фазовых переходов [1–4].

Мы полагаем, что идеальным двумерным объектом, в котором с помощью изучения электромагнитных свойств могут быть обнаружены и достаточно надежно идентифицированы топологические БКТ фазовые переходы, может служить джозефсоновская среда двух-

уровневых гранулярных высокотемпературных сверхпроводников, топологией которой можно управлять с помощью температуры, внешнего магнитного поля или транспортного тока [5].

Микроструктура гранулярных сверхпроводников — совокупность трехмерных гранул (размером  $\sim 1$  мкм) и двумерных «слабых связей» (размером  $\sim 1$  нм). Как известно, описание поведения гранулярных высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) во внешнем магнитном поле возможно в рамках двухуровневой модели критического состояния [6]. В рамках данной модели гранулярные ВТСП рассматриваются как совокупность двух подсистем сверхпроводников второго рода [7]: *трехмерных* сверхпроводящих гранул с сильной сверхпроводимостью и *двумерных* межгранулярных границ — джозефсоновских «слабых связей» со слабой сверхпроводимостью.

В рамках двухуровневой модели для сверхпроводящих гранул (зерен) (индекс  $g$ ) и межгранулярных границ — джозефсоновских «слабых связей» (индекс  $J$ )

$$\begin{aligned} T_c &= T_{cg} = T_{cJ}, \\ H_{c1g}(T) &> H_{c1J}(T), \quad H_{c2g}(T) > H_{c2J}(T), \\ I_{cg}(T, H_{\text{ext}}) &\gg I_{cJ}(T, H_{\text{ext}}), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $T_{cg}$  и  $T_{cJ}$  — критические температуры,  $H_{c1g}$  и  $H_{c1J}$  — критические поля начала процесса проникновения магнитного поля в подсистемы гранулярного сверхпроводника,  $H_{c2g}$  и  $H_{c2J}$  — критические поля полного проникновения магнитного поля в подсистемы гранулярного сверхпроводника,  $I_{cg}$ ,  $I_{cJ}$  — критические токи.

Казалось бы, соотношения (1) вполне адекватно описывают процессы проникновения магнитного поля в обе подсистемы двухуровневого гранулярного сверхпроводника, а также разрушения сверхпроводящего состояния. Проникновение внешнего магнитного поля  $\mathbf{H}_{\text{ext}}$  в гранулярные высокотемпературные сверхпроводники реализуется при помощи вихрей Абрикосова в гранулы при  $\mathbf{H}_{\text{ext}} > H_{c1g}$  и вихрей Джозефсона в «слабые связи» при  $\mathbf{H}_{\text{ext}} > H_{c1J}$ . Однако вопрос о характере влияния плотности транспортного тока ( $j$ ) на критические параметры гранулярных ВТСП достаточно сложен. Принципиально возможны два канала воздействия транспортного тока на критические температуры и критические поля сверхпроводящих гранул и «слабых связей» (см., например, [8–11]): а) посредством создаваемого током магнитного поля; б) путем «прямого» воздействия тока на вихревую структуру двухуровневого ВТСП. Почти очевидно, что прямое воздействие транспортного тока может заметно влиять лишь на процессы, протекающие в джозефсоновской среде (речь идет об эволюции системы «слабых связей» — возникновение и движение одиночных «слабых связей», появление их конгломератов и образование и разрушение непрерывных джозефсоновских контактов).

Ранее [5,12–15] была разработана и реализована оригинальная аппаратура и развита методология экспериментального изучения топологических фазовых переходов, оптимизированы пути проведения экспериментов и обработки полученных экспериментальных данных. В основу методологии изучения топологических фазовых переходов положен анализ трех типов экспериментальных данных, полученных при непрерывном изменении одного параметра, дискретном изменении другого параметра и постоянном значении третьего параметра.

Конечная цель исследования — установление тождественности топологических фаз, возникающих при двух принципиально различных сценариях реализации топологических фазовых переходов Березинского–Костерлица–Таулесса.

Сценарий 1: Изучение температурных зависимостей магнитосопротивления при постоянном значении плот-

ности транспортного тока —  $\rho(T, H_{\text{ext}})_{j = \text{const}}$  (непрерывный параметр — температура  $T$ , дискретный параметр — напряженность внешнего магнитного поля  $H_{\text{ext}}$ , постоянный параметр — плотность транспортного тока  $j$ ).

Сценарий 2: Изучение параметров вольт-амперных характеристик (ВАХ) при постоянном значении напряженности внешнего магнитного поля —  $E(T, j)_{H_{\text{ext}} = \text{const}}$  (непрерывный параметр —  $T$ , дискретный параметр —  $j$ , постоянный параметр —  $H_{\text{ext}}$ )\*.

Мы полагаем, что идеальным доказательством тождественности топологических фаз является совпадение фазовых  $H$ – $T$ -диаграмм джозефсоновской среды гранулярных ВТСП в области реализации БКТ перехода при двух различных сценариях внешнего воздействия.

## 2. Методические аспекты исследований

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. Размеры образцов составляли  $\approx 2 \times 2 \times 20$  мм. Токовые и потенциальные контакты наносили путем осаждения паров серебра в вакууме [16].

Для аттестации образцов ВТСП состава  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,95}$  использованы методы рентгеноструктурного анализа\*\*, резистивных и магнитных измерений критической температуры (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) [17,18].

Для проведения электрофизических измерений по обоим описанным выше сценариям разработана и реализована специальная установка (ПИК на основе криогенатора 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)\*\*\* [19].

## 3. Результаты исследования

### 3.1. Сценарий 1 — магнитосопротивление

В соответствии со сценарием 1 была осуществлена следующая программа исследований [12]:

1) измерения удельного электросопротивления в условиях непрерывного изменения температуры ( $70 \text{ К} \leq T \leq 100 \text{ К}$ ) и дискретного изменения напряженности внешнего перпендикулярного магнитного поля ( $0 \leq H_{\text{ext}} \leq 500$  Э) при постоянном значении плотности транспортного тока ( $j = 2 \text{ А/см}^2$ );

\* Речь идет о физически эквивалентной ВАХ зависимости напряженности электрического поля  $E$  от плотности транспортного тока.

\*\* Значения параметров ромбической кристаллической решетки в пределах точности измерений совпадали с табличными значениями:  $a = (3,82 \pm 0,001) \text{ \AA}$ ,  $b = (3,89 \pm 0,001) \text{ \AA}$ ,  $c = (11,6802 \pm 0,001) \text{ \AA}$ .

\*\*\* Подобный способ создания высокостабильного магнитного поля в кристаллах обеспечивает повышение точности измерений.

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.

При изменении температуры характер поведения кривых магнитосопротивления принципиально менялся:

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

— в диапазоне  $87 \text{ K} \leq T \leq 89 \text{ K}$  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.

### 3.2. Сценарий 2 — вольт-амперные характеристики

В соответствии со сценарием 2 была осуществлена следующая программа исследований [13–15]:

1) измерения удельного электросопротивления в условиях непрерывного изменения температуры ( $70 \text{ K} \leq T \leq 100 \text{ K}$ ) и дискретного изменения плотности транспортного тока ( $50 \text{ mA/cm}^2 \leq j \leq 2000 \text{ mA/cm}^2$ ) при постоянном значении напряженности внешнего перпендикулярного магнитного поля ( $H_{\text{ext}} = 25, 50, 100 \text{ Э}$ );

2) восстановление на основании полученных экспериментальных данных о температурных зависимостях электросопротивления гранулярных образцов ВТСП  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.95}$  вольт-амперных характеристик в широком диапазоне температур;

3) установление на основе полученных ВАХ температурных зависимостей джозефсоновских критических токов и возможностей протекания фазовых переходов в джозефсоновской среде\*.

Установлено, что в очень узком диапазоне температур ( $\Delta T_{\text{BKT}} \sim 0,1 \text{ K}$ ) наблюдаются явно выраженные скачки критической плотности джозефсоновского тока  $j_{cJ}$ . При этом критическая плотность тока падает в несколько раз (!). При тех же температурах обнаружены характерные скачки на зависимостях коэффициентов нелинейности ВАХ  $\nu(T)$ .

\* Перспективность анализа поведения ВАХ для обнаружения БКТ перехода рассматривалась в ряде работ (см., например, [20–23]).

Основной итог изучения электрофизических свойств гранулярных ВТСП  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  при двух различных сценариях сводится к следующему:

— исходные данные — температурные зависимости удельного электросопротивления  $\rho(T)$ , — *независимо от вида внешнего воздействия* (магнитное поле [12] или транспортный ток [13–15]), носят качественно сходный характер: на фоне монотонного роста электросопротивления при повышении температуры на всех кривых наблюдается появление явно выраженного максимума;

— аномальное поведение изотерм магнитосопротивления [12] связано с протеканием БКТ фазового перехода по магнитному полю в области существования резистивности джозефсоновской среды [ $H_{c2J}(T) - H_{c1g}(T)$ ] гранулярного ВТСП  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ;

— обнаруженные эффекты скачкообразного изменения параметров ВАХ [13–15] связаны с протеканием БКТ фазового перехода по транспортному току в области существования резистивности джозефсоновской среды [ $I_{cJ}(T) - I_{cg}(T)$ ] гранулярного ВТСП  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ .

## 4. Обсуждение результатов

Подчеркнем, что в рамках настоящей работы *впервые* удалось провести сравнительный анализ природы и механизмов протекания топологических фазовых переходов под действием внешнего магнитного и электрического полей.

В первую очередь следует отметить, что появление всех обнаруженных аномалий в поведении изотерм магнитосопротивления и параметров ВАХ, независимо от величины напряженности внешнего магнитного поля и плотности транспортного тока, локализовано в строго определенном, достаточно узком диапазоне температур — области существования резистивности джозефсоновской среды  $T_{c2J}(T_{\rho=0}) - T_{c1g}$  [12–15].

Более того, в работе *впервые показано*, что положение аномалий на оси температур, определенное при двух различных видах внешнего воздействия на джозефсоновскую среду гранулярных ВТСП  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ , совпадает в пределах точности электрофизических измерений. При этом открытым остается вопрос: *свидетельствует ли обнаруженная в работе близость температур БКТ перехода о тождественности топологических фаз, возникающих под действием магнитного поля и транспортного тока?*

Для получения ответа на этот принципиально важный вопрос была построена фазовая  $H$ – $T$ -диаграмма джозефсоновской среды гранулярных ВТСП в области реализации БКТ переходов, полученных по двум различным сценариям приложения внешнего воздействия.

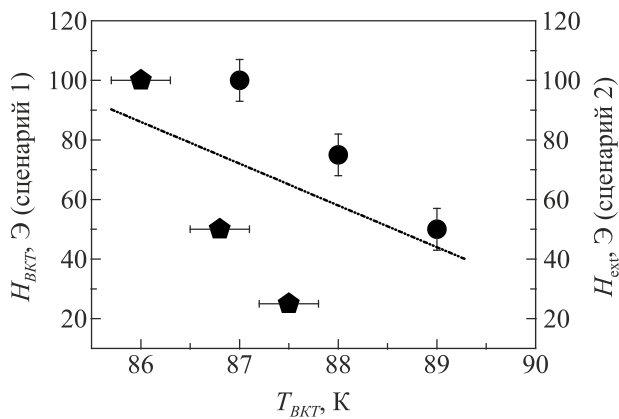


Рис. 1. Фазовая  $H$ - $T$ -диаграмма в области реализации БКТ переходов, полученных по сценариям 1 (●) и 2 (◆).

Данные, представленные на рис. 1, однозначно свидетельствуют о практически полной идентичности фазовых диаграмм в области протекания БКТ переходов при приложении к объекту исследований внешнего магнитного и электрического полей. Как видно, результаты построения  $T_{BKT}$  –  $H_{BKT}$  фазовой диаграммы при различных внешних воздействиях удовлетворительно описываются единой зависимостью (линия на рисунке). Возможные ошибки в определении значений  $T_{BKT}$  из данных анализа поведения ВАХ и  $H_{BKT}$  из анализа изотерм магнитосопротивления представлены на рисунке горизонтальными и вертикальными «усам» соответственно.

### 5. Заключение

В рамках настоящей работы получены следующие результаты.

1. Показано, что оптимальным объектом для изучения БКТ фазовых переходов является двумерная джозефсоновская среда гранулярных ВТСП.

2. Развита методология исследования топологических фазовых переходов и топологических фаз в джозефсоновской среде двухуровневых гранулярных высокотемпературных сверхпроводников, основанная на анализе экспериментальных данных, полученных при непрерывном изменении одного параметра, дискретном изменении другого параметра и постоянном значении третьего параметра. Разработаны и реализованы алгоритмы преобразования результатов прямых измерений температурных зависимостей электросопротивления при заданных внешних параметрах в изотермы магнитосопротивления и в совокупность вольт-амперных характеристик.

3. Обнаружено, что температурные зависимости удельного электросопротивления, независимо от вида внешнего воздействия, носят качественно сходный характер.

4. Показано, что критерием идентичности топологических фаз, возникающих при протекании БКТ фазовых переходов при воздействии внешнего магнитного поля и транспортного тока, является практически полное совпадение соответствующих фазовых  $H$ - $T$ -диаграмм.

5. Впервые установлено, что характер топологических фаз, возникающих в результате БКТ фазового перехода, не зависит от вида внешнего воздействия.

1. В.Л. Березинский, *ЖЭТФ* **59**, 907 (1970).
2. В.Л. Березинский, *ЖЭТФ* **61**, 1144 (1971).
3. J.M. Kosterlitz and D.J. Thouless, *J. Phys. C* **5**, L124 (1972).
4. J.M. Kosterlitz and D.J. Thouless, *J. Phys. C* **6**, 1181 (1973).
5. В.В. Деревянко, Т.В. Сухарева, В.А. Финкель, *ФТТ* **59**, 1470 (2017).
6. B. Ji, M.S. Rzchowski, N. Anand, and M. Tinkham, *Phys. Rev. B* **47**, 470 (1993).
7. J.N. Rjabinin and L.W. Shubnikow, *Nature* **134**, 260 (1934).
8. D. Goldschmidt, *Phys. Rev. B* **39**, 9139 (1989).
9. М.Ю. Куприянов, К.К. Лихарев, *УФН* **160** (5), 49 (1990).
10. Е.З. Мейлихов, *УФН* **163** (3), 27 (1993).
11. W.A.T. Passos, P.N. Lisboa-Filho, and W.A. Ortiz, *JMMM* **226–230**, 293 (2001).
12. Т.В. Сухарева, В.А. Финкель, *Письма в ЖЭТФ* **108**, 249 (2018).
13. V.V. Derevyanko, V.A. Finkel, T.V. Sukhareva, and M.S. Sunhurov, *IEEE Xplore Digital Library YSF-2017*, 171 (2017).
14. Т.В. Сухарева, В.А. Финкель, *ФНТ* **44**, 258 (2018) [*Low Temp. Phys.* **44**, 194 (2018)].
15. В.В. Деревянко, Т.В. Сухарева, В.А. Финкель, *ФТТ* **60**, 465 (2018).
16. Т.В. Сухарева, В.А. Финкель, *ЖЭТФ* **134**, 933 (2008).
17. Т.В. Сухарева, В.А. Финкель, *ЖТФ* **80**, 68 (2010).
18. T.V. Sukhareva, *J. Supercond. Nov. Magn.* **26**, 2021 (2013).
19. В.В. Деревянко, Т.В. Сухарева, В.А. Финкель, Ю.Н. Шахов, *ФТТ* **56**, 625 (2014).
20. Z. Sefrioui, D. Arias, C. Leon, J. Santamaria, E.M. Gonzalez, J.L. Vicent, and P. Prieto, *Phys. Rev. B* **70**, 064502 (2004).
21. L. Miu, *Romanian Rep. Phys.* **60**, 713 (2008).
22. Qing-Hu Chen, Huan Liu, and Jian-Ping, *Lv. J. Appl. Phys.* **105**, 093919 (2009).
23. 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).

Топологічні фазові переходи Березинського–Костерлиця–Таулесса в джозефсонівському середовищі гранулярних високотемпературних надпровідників під дією магнітного та електричного полів

Т.В. Сухарева, В.О. Фінкель

Робота присвячена встановленню тотожності топологічних фаз, що виникають в джозефсонівському середовищі гранулярних високотемпературних надпровідників  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  при протіканні фазових переходів Березинського–Костерлиця–Таулесса (БКТ) під дією зовнішнього магнітного поля та транспортного струму. Встановлено, що характер топологічних фаз, що виникають в результаті БКТ фазового переходу, не залежить від виду зовнішнього впливу.

Ключові слова: топологічний фазовий перехід, топологічні фази, гранулярний високотемпературний надпровідник,  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ , джозефсонівське середовище, магнітне поле, транспортний струм.

The Berezinskii–Kosterlitz–Thouless topological phase transition in the Josephson medium of granular high-temperature superconductors under the influence of a magnetic and electric fields

T.V. Sukhareva and V.A. Finkel

The work is devoted to establishing the identity of the topological phases arising in the Josephson medium of granular high-temperature superconductors  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  during phase transitions of the Berezinskii–Kosterlitz–Thouless (BKT) under the influence of an external magnetic field and transport current. It is established that the nature of the topological phases arising as a result of the BKT phase transition does not depend on the type of external influence.

Keywords: topological phase transition, topological phases, granular high-temperature superconductor,  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ , Josephson medium, magnetic field, transport current.