

## ИНВЕРСИЯ ЭФФЕКТА РЕЗИСТИВНОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В ЭЛЕКТРОННО-ДОПИРОВАННОМ $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{BiO}_{3-x}$

*Н. А. Тулина\*, Л. А. Клинова*

*Институт физики твердого тела Российской академии наук  
142432, Черноголовка, Московская обл., Россия*

Экспериментально обнаружен эффект электронной неустойчивости гетеропереходов на базе монокристаллов  $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{BiO}_{3-x}$ . Показано, что эффект имеет противоположный знак по направлению электрического поля тока по сравнению с аналогичным эффектом, наблюдаемым в структурах на базе дырочно-допированных систем.

PACS: 74.62.Dh, 74.70.-b, 74.72.-h, 73.40.-c, 73.40.Ns, 74.62.Yb, 71.10.-w

Сильно коррелированные электронные системы (СКЭС), ВТСП, допированные манганиты являются в современной физике объектами интенсивного изучения как экстремально чувствительные системы, критичные к внешним воздействиям — магнитным и электрическим полям, внешнему давлению [1–6]. Устройства на основе этих соединений рассматриваются как перспективные кандидаты для использования в электронной технике. С этой точки зрения интересен эффект электронной неустойчивости (или эффект колоссального электросопротивления), наблюдаемый в гетероструктурах на основе ВТСП [7], ферроэлектриков [8], перовскитных Ti- или Zr-окислов и легированных манганитов [10–17]. Эффект проявляется в изменении на несколько порядков резистивного состояния интерфейса нормальный металл–ВТСП или нормальный металл–легированный манганит под влиянием приложенного электрического поля в условии значительной токовой инжекции. Все структуры, исследованные на предмет эффекта электронной неустойчивости, являлись представителями дырочно-допированных СКЭС. В настоящей работе мы исследовали этот эффект в гетероструктурах на основе электронно-допированного высокотемпературного сверхпроводника  $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{BiO}_{3-x}$ .

Монокристаллы  $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{BiO}_{3-x}$ , полученные с помощью метода, описанного в работе [18], имели размеры порядка  $3 \times 3 \times 5$  мм<sup>3</sup>. Токовые и потенциальные подводы припаивались в предварительно

вожженную пленку серебра (схема). На «as grown» поверхность монокристалла напылялась пленка серебра или подводился микроконтакт в устройстве с механическим микроподводом. Так формировался гетеропереход нормальный металл–монокристалл  $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{BiO}_{3-x}$ .

На рис. 1 показан пример вольт-амперной характеристики (ВАХ) такого перехода. На рис. 2 показан пример температурных зависимостей сопротивлений метастабильных низкорезистивного (LRS) и высокорезистивного (HRS) состояний гетероперехода.

Наблюдаемое явление можно поэтапно описать следующим образом.

1. К гетероконтакту прикладывается электрическое напряжение  $+V$  (позиция 1 на ВАХ). При микроконтактном (точечном) растекании тока оно создает достаточно высокую концентрацию электрического поля [19]. Это поле стимулирует фазовый переход в обедненную носителями фазу — высокорезистивную (HRS или off-состояние). Температурная зависимость сопротивления и ВАХ (ветвь 1–2) этой фазы характерны для систем с прыжковым механизмом сопротивления (локализованные носители).

2. При определенном напряжении  $V_3$  (позиция 3 на ВАХ) происходит обратный фазовый переход в низкорезистивную, проводящую фазу с сверхпроводящим переходом в Tc (LRS или on-состояние). Это состояние сохраняется при развертке тока до отрицательных напряжений, стимулирующих обратный фазовый переход (ветвь 4–2).

\*E-mail: tulina@issp.ac.ru

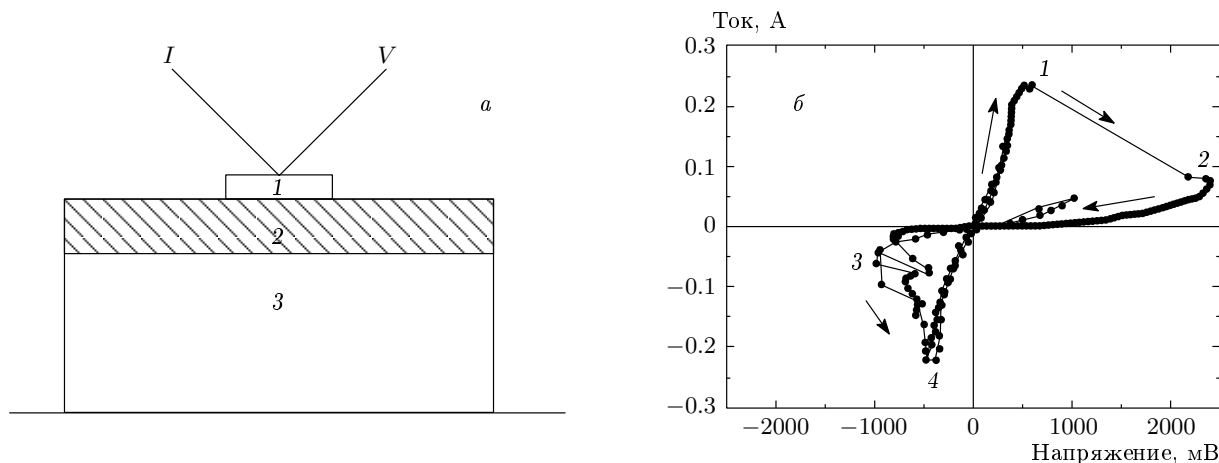


Рис. 1. *a* — Схема перехода: 1 — нормальный электрод, 2 — деградированная прослойка, 3 — монокристалл, I-V — токовые и потенциальные подводы. *б* — Пример ВАХ перехода с эффектом электронной нестабильности

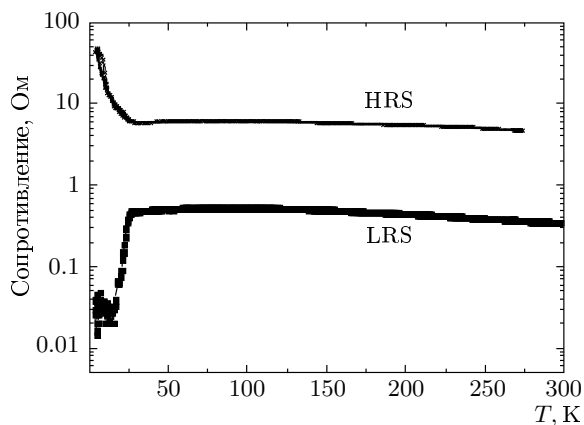


Рис. 2. Пример температурной зависимости сопротивления двух метастабильных состояний гетероконтакта: низкорезистивного (LRS) с переходом в сверхпроводящее состояние и высокорезистивного (HRS)

3. Ветви ВАХ 2–3 и 4–1 обратимы, переключения состояний происходит на ветвях 1–2 и 4–1.

4. Сопротивление определяется поверхностным слоем монокристалла и связано с предрасположенностью СКЭС при внешних воздействиях к фазовому расслоению на обедненные или обогащенные носителями области.

Следует отметить, что иногда ветви ВАХ 3–4 и 1–2, на которых происходит переключение из одного состояния в другое и наоборот, показывают некую неустойчивость (рис. 1*б*). Переключения бывают как между металлическим и диэлектрическим

состояниями, так и между двумя состояниями, из которых ни одно не является металлическим.

Таким образом, транспортные свойства интерфейса нормальный металл–монокристалл  $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{BiO}_{3-x}$  зависят от полярности приложенного напряжения, а переключения в высокорезистивное состояние происходят, когда монокристалл ВТСП находится при отрицательном потенциале относительно нормального электрода. При этом поле тока ( $\mathbf{E} = \mathbf{J}\sigma$ ) направлено к поверхности, в отличие от случая переключений, наблюдаемых в дырочно-допированных ВТСП и легированных манганитах, которые также имеют дырочный тип проводимости [7–17]. Во всех упомянутых выше работах эффект имел противоположный знак по электрическому полю.

Существует несколько модельных подходов описания эффекта электронной нестабильности [12, 16, 17, 19–21].

1. В работах [13, 20] предполагается, что электрическое поле создает на интерфейсе дефекты кислорода и дальнейшее переключение происходит благодаря электрохимической миграции этих дефектов. В работе [10, 11, 18] фактически предлагается аналогичная модель, в которой рассматривается интерфейс гетероконтакта как деградированная по кислороду прослойка. При достижении критической концентрации электрического поля (поле неоднородно распределено по гетероконтакту и максимально концентрируется вблизи интерфейса) происходит перераспределение кислорода и кислородных вакансий в приграничном слое, что приводит к фазовому расслоению этого слоя на обедненные или обогащен-

ные носителями области и изменению резистивных свойств гетероструктуры.

2. В работе [17] исследовался гетероконтакт на основе  $\text{LaSrMnO}$  с диэлектрической прослойкой  $\text{CeO}_2$ . Авторы предполагают существование электрических доменов в диэлектрической прослойке  $\text{CeO}_2$ , которые взаимодействуют с кислородными вакансиями. Электрическое поле перемещает вакансии, в результате происходит переключение резистивного состояния структуры.

3. В работе [20] предполагается, что возникновение эффекта электронной нестабильности связано с природой моттовского перехода на интерфейсе нормальный металл–СКЭС, где формируется двумерная структура: металл–зонный изолятор–металл–моттовский изолятор–СКЭС.

4. В работе [21] численно моделируется стимулированный электрическим полем перколяционный переход в пленке манганита с внутренними неоднородностями. В этом рассмотрении изменяется состояние зарядово-упорядоченной, антиферромагнитной фазы в условиях сильного электрического поля ( $E > 10^5 \text{ В}\cdot\text{см}$ ).

Из анализа приведенных выше модельных рассуждений 1–3 следует, что эффекты электронной нестабильности возможны благодаря, во-первых, моттовскому характеру перехода металл–диэлектрик, который существует в базовых структурах рассмотренных соединений. Во-вторых, достаточно высокая подвижность кислородных вакансий обеспечивает перераспределение носителей в области формирования перехода под влиянием электрического поля. Модель 3 позволяет сделать оценку эффекта в терминах так называемого колоссального электросопротивления:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{R_{off} - R_{on}}{R_{on}},$$

где  $R_{off}$  — сопротивление в выключенном состоянии,  $R_{on}$  — сопротивление во включенном состоянии. Тогда

$$\frac{\Delta R}{R} = \exp \left\{ \frac{1}{\xi} \sqrt{\frac{2\varepsilon V_{on}}{e\delta}} \right\} - 1, \quad (1)$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \exp \left\{ \frac{1}{\xi} \left[ \sqrt{\frac{2\varepsilon V_{on}}{e\delta}} - \sqrt{\frac{2\varepsilon V_{off}}{e\delta}} \right] \right\} - 1 \quad (2)$$

где  $V_{off}$  — напряжение, при котором происходит переключение в off-состояние,  $V_{on}$  — напряжение, при котором происходит переключение в on-состояние. ( $V_{on}$  и  $V_{off}$  зависят от разницы работ выхода металла и СКЭС),  $\xi$  — длина затухания,  $\delta$  — величина

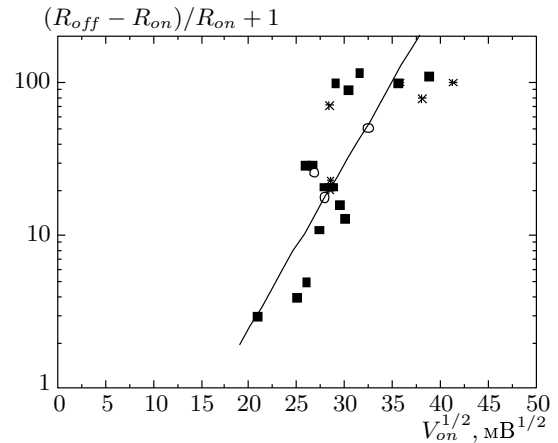


Рис. 3. Зависимость колоссального электросопротивления от напряжения  $V_{on}$ , при котором происходит переключение из «выключенного» высокорезистивного состояния в низкорезистивное металлическое «включенное» состояние. Данные для гетеропереходов на базе монокристаллов  $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{BiO}_3$  (светлые кружки),  $\text{La}_{0.8}\text{Ca}_{0.2}\text{MnO}_{3-x}$  (звездочки),  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$  (темные квадраты)

допирования СКЭС,  $\varepsilon$  — диэлектрическая постоянная. Соотношение (1) справедливо для случая переключения между металлическим и изолирующим состояниями, соотношение (2) справедливо, когда ни одно из метастабильных состояний не является металлическим.

В предыдущих работах мы исследовали аналогичный эффект в двух родственных СКЭС: ВТСП [10] и легированных манганитах [12, 19]. На рис. 3 приведена зависимость колоссального электросопротивления от  $V_{on}$ , полученная на основании данных наших предыдущих исследований и данные этой работы. Как видно из рисунка, существует значительный разброс экспериментальных данных и соотношение (1) не строго описывает эксперимент. По-видимому, неучтенные в модели 3 процессы перегрева и процессы электродиффузии, которые подробно исследовались в работах [10, 19], вносят определенный вклад в реальный процесс переключения резистивных состояний в гетероконтактах.

Таким образом, изменение знака эффекта в электронно-допированном  $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{BiO}_{3-x}$  подтверждает предположение о перераспределении кислорода в поверхностном слое монокристалла под влиянием электрического поля. На наш взгляд, это связано с изменением кислородных вакансий, которые по-разному влияют на число носителей в случае дырочно-допированных и элек-

тронно-допированных перовскитных структур. Изменение концентрации кислородных вакансий под действием электрического поля стимулирует переход металл–диэлектрик в области интерфейса. Наблюдаемая в настоящей работе инверсия эффекта резистивных переключений при изменении типа носителей СКЭС подтверждает существенную роль зарядовых эффектов и кислорода в рассмотренных выше явлениях.

Авторы выражают благодарность Ю. С. Барашу за плодотворное обсуждение работы. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 05-02-17175а) и Программы Президиума РАН «Влияние атомно-кристаллической и электронной структуры на свойства конденсированных сред».

## ЛИТЕРАТУРА

1. E. Dagotto, *Rev. Mod. Phys.* **66**, 763 (1994).
2. Е. Л. Нагаев, *УФН* **166**, 833 (1996).
3. Л. П. Горьков, *УФН* **168**, 665 (1998).
4. M. D. Coey, M. Viret, and S. von Molnar., *Adv. Phys.* **48**, 167 (1999).
5. E. Dagotto, T. Hotta, and A. Moreo, *Phys. Rep.* **344**, 1 (2001).
6. M. B. Salamon, *Rev. Mod. Phys.* **73**, 583 (2001).
7. N. A. Tulina, G. A. Emel'chenko, and A. V. Kulakov, *Phys. Lett. A* **204**, 74 (1995); N. A. Tulina, *Physica C* **333**, 214 (2000).
8. Y. Watanabe, *Phys. Rev. B* **59**, 11257 (1999)
9. A. Beck, J. G. Bednorz, Ch. Gerber, C. Rossel, and D. Widmer, *Appl. Phys. Lett.* **77**, 139 (2000).
10. N. A. Tulina, A. M. Ionov, and A. N. Chaika, *Physica C* **366**, 23 (2001).
11. N. A. Tulina, S. A. Zver'kov, Y. M. Mukovskii et al., *Europhys. Lett.* **56**, 836 (2001).
12. N. A. Tulina et al., *Physica C* **385**, 563 (2003).
13. A. Baikalov et al., *Appl. Phys. Lett.* **83**, 957 (2003).
14. S. Tsui, A. Baikalov et al., *Appl. Phys. Lett.* **85**, 317 (2004).
15. A. Odagawa et al., *Phys. Rev. B* **70**, 224403 (2004).
16. M. J. Rozenberg, I. H. Inoue, and M. J. Sanchez, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 178302 (2004).
17. R. Fors et al., *Phys. Rev. B* **71**, 045305 (2005).
18. L. A. Klinkova et al., *Phys. Rev. B* **67**, 140501 (2003).
19. N. A. Tulina and V. V. Sirotkin, *Physica C* **400**, 105 (2004).
20. T. Oka and N. Nagaosa, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 26640 (2005).
21. Y. Gu, Z. D. Wang, and C. S. Ting, *Phys. Rev.* **67**, 153101 (2003).