

ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Колоссальное электросопротивление и электронная неустойчивость в структурах на основе сильнокоррелированных электронных систем

Н.А. Тулина

Представлен обзор исследований эффектов электронной неустойчивости (ЭЭН) в структурах на основе сильнокоррелированных электронных систем (СКЭС), таких как высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) и легированные манганиты — соединения с колоссальным магнетосопротивлением (КМС). Эффект проявляется в изменении на несколько порядков резистивного состояния интерфейса нормальный металл — ВТСП или нормальный металл — легированный манганит под действием приложенного электрического поля в условии значительной токовой инжекции. Рассматриваются результаты исследования гетероконтактов на основе ВТСП и легированных манганитов. Проводится сравнение ЭЭН в гетероструктурах с эффектом влияния электрического поля на свойства СКЭС в тонких пленках и устройствах с затворами. Анализируются общие черты и различие в физике этих явлений.

PACS numbers: 71.10. – w, 71.27. + a, 71.30. + h, 73.40. – c, 74.62.Dh

DOI: 10.3367/UFNr.0177.200711d.1231

Содержание

1. Введение (1231).
 2. Влияние электрического поля на свойства структур на основе сильнокоррелированных электронных систем (1233).
 3. Влияние электрического тока на транспорт в пленках и монокристаллах сильнокоррелированных электронных систем (1234).
 4. Эффект электронной неустойчивости в гетероструктурах сильнокоррелированных электронных систем (1235).
 - 4.1. Модельное описание эффектов электронной неустойчивости.
 - 4.2. Инверсия эффекта электронной неустойчивости в электронно-допированной сильнокоррелированной электронной системе.
 - 4.3. Колоссальное электросопротивление.
 5. Заключение (1238).
- Список литературы (1239).

1. Введение

Эффект переключения резистивных свойств гетероконтактов, которому посвящена эта статья, соотносится с поведением электронных устройств (исследования 1960-х годов), которые под действием напряжения либо переключаются из одного проводящего состояния в другое, либо осциллируют между ними. К таким устройствам [1] относятся туннельные диоды [2], диоды Ганна [3],

лавинные диоды [4], тиристоры [5], тонкие пленки аморфных халькогенидов [6], пленки двуокиси VO_2 [7]. Как правило, переключающие устройства различают прежде всего по виду вольт-амперной характеристики (ВАХ): S-образная (управляемая током) и N-образная (управляемая напряжением) [1]. Эффекты первого типа связаны с термическим влиянием тока, появлением токовых доменов или шнурованием тока и при этом являются неполярными. Эффекты второго типа обусловлены влиянием зонной структуры на свойства полупроводниковых пленок. Круг исследований этого раннего периода представлен в обзоре [6].

Сильнокоррелированные электронные системы (СКЭС), такие как перовскитные соединения на основе оксидов переходных металлов — высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП), легированные манганиты (ЛМ), — являются в современной физике объектами интенсивного изучения [8–13], прежде всего благодаря таким, присущим им и еще до конца не понятным явлениям, как переход в сверхпроводящее состояние и эффект колоссального магнетосопротивления (КМС). Родительские соединения ВТСП и ЛМ — антиферромагнитные моттовские диэлектрики. Формирование металлического состояния в этих соединениях происходит посредством легирования, как правило, щелочно-земельным элементом либо изменения содержания кислорода. На рисунках 1–3 показаны примеры фазовых диаграмм ВТСП и легированного манганита $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$.

В этих соединениях конкурируют и взаимодействуют несколько степеней свободы: спиновая, зарядовая, спин-орбитальная, фононная. Поэтому такие соединения демонстрируют необычайно широкий класс фазовых пере-

Н.А. Тулина. Институт физики твердого тела РАН,
142432 Черноголовка, Московская обл., Российская Федерация
Тел. (496) 993-27-55. Факс (496) 524-97-01
E-mail: tulina@issp.ac.ru

Статья поступила 18 апреля 2007 г.

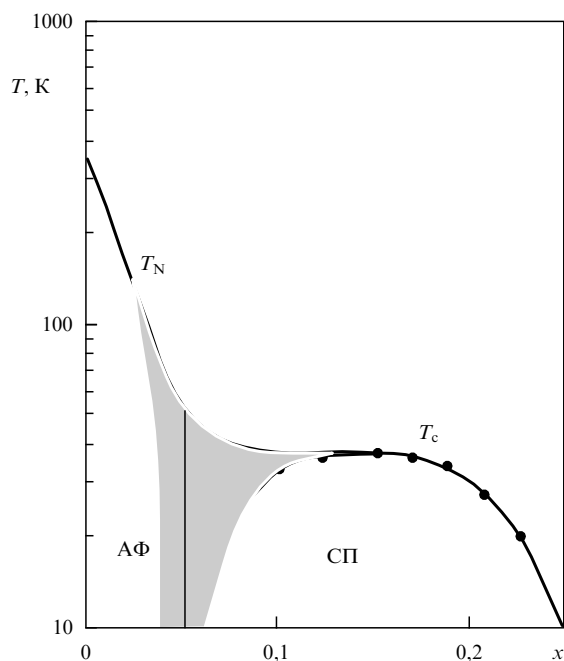


Рис. 1. Фазовая диаграмма ВТСП (из работы [13]): АФ — антиферромагнитное состояние, СП — сверхпроводящее состояние, T_N — температура Нееля, T_c — критическая температура перехода в СП. Область двухфазного состояния выделена темным цветом.

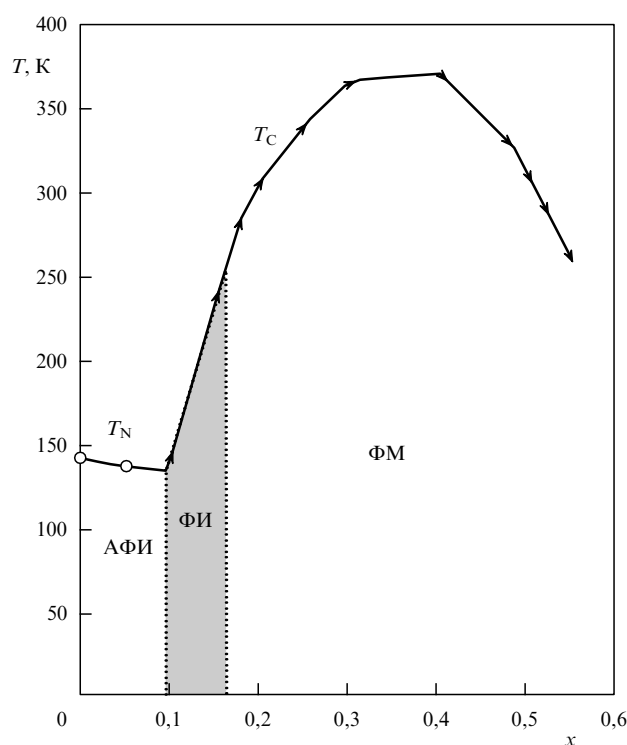


Рис. 2. Фазовая диаграмма системы $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ (из работы [9]): ФМ — ферромагнитный металл, ФИ — ферромагнитный изолятор, фазово-расслоенное состояние, АФИ — антиферромагнитный изолятор, T_c — температура Кюри. Область двухфазного состояния выделена темным цветом.

ходов и являются экстремально чувствительными, критичными к внешним воздействиям: магнитным, электрическим полям, приложенному давлению. Сегодня установлено, что ВТСП и манганиты как моттовские

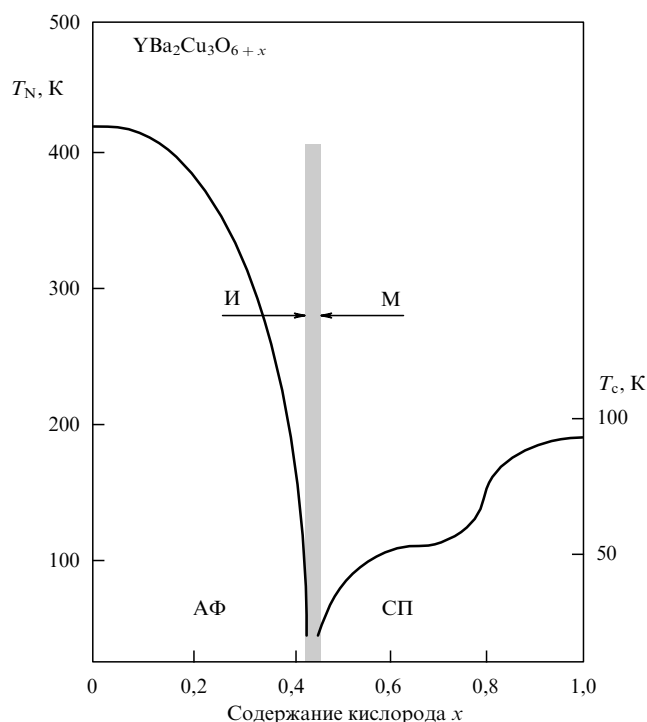


Рис. 3. Фазовая диаграмма системы $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ в зависимости от содержания кислорода [14]. И — изолятор с тетрагональной кристаллической структурой, М — металл с орторомбической кристаллической структурой. Область двухфазного состояния выделена темным цветом.

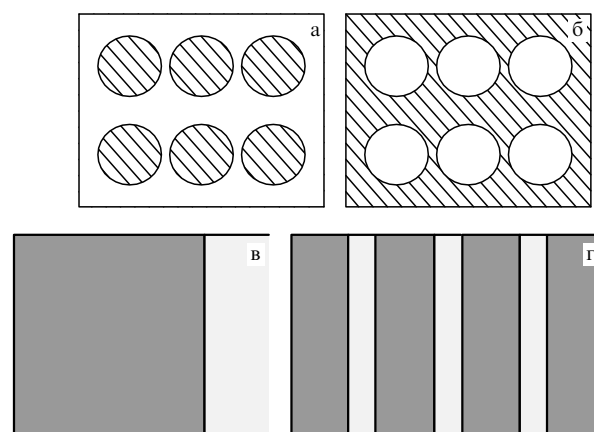


Рис. 4. Виды фазового расслоения (из обзора [9]): (а) непроводящее состояние с включениями металлической фазы, (б) проводящее состояние с диэлектрическими включениями; макроскопическое ФР: (в) фазовое разделение на поверхности кристалла, (г) страйповые структуры.

системы в определенных условиях (степень легирования, воздействие электрических и магнитных полей) могут существовать в состоянии фазового расслоения (ФР) на диэлектрическую (или полупроводниковую) и металлическую фазы [8–13] (рис. 4). На рисунках 1–3 показаны области существования ФР в интервале низкого легирования.

Обычно выделяют два типа фазового расслоения [9, 11, 12]: электронное, вызванное разбиением системы свободных зарядов на области с разной концентрацией носителей, которое приводит к двухфазному разбиению

на области размером порядка атомного [9, 10], а также примесное расслоение на фазы размером в несколько микрон с одинаковой плотностью электронов. Для реализации примесного разделения фаз необходимо, чтобы коэффициент диффузии примесей был достаточно велик. На роль такой примеси в перовскитных структурах на основе оксидов переходных металлов, каковыми являются ВТСП и ЛМ, в первую очередь претендует, конечно, кислород. Действительно, имеются прямые экспериментальные данные о высоком коэффициенте диффузии кислорода в ряде перовскитов ($\sim 10^{-9} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ при комнатной температуре).

Доказательство наличия двухфазного состояния в манганитах и ВТСП, наблюдение его эволюции осуществлялось различными методами:

- структурными (рентгеноструктурный анализ, нейтронно-графические методы);
- спектроскопическими (ядерный магнитный резонанс, ферромагнитный резонанс, фотоэмиссионная спектроскопия);
- транспортными (измерение электронного транспорта, намагниченности, теплоемкости, теплопроводности в зависимости от магнитного поля и температуры);
- посредством визуализации ВТСП и ЛМ в состоянии ФР с помощью магнито-оптических методов, декорирования, магнитно-силового микроскопа и сканирующей туннельной спектроскопии (рис. 5).

Структуры на основе СКЭС рассматриваются как перспективные для применения в качестве элементов электронных устройств. С этой точки зрения представляет интерес эффект электронной неустойчивости (ЭЭН) (или колоссального электросопротивления — КЭС), наблюдаемый в гетероструктурах на основе перовскитных окисных соединений ВТСП, ферроэлектриков, перовскитных Ti- и Zr-соединений и легированных манганитов [16–28]. Этот эффект проявляется в изменении на

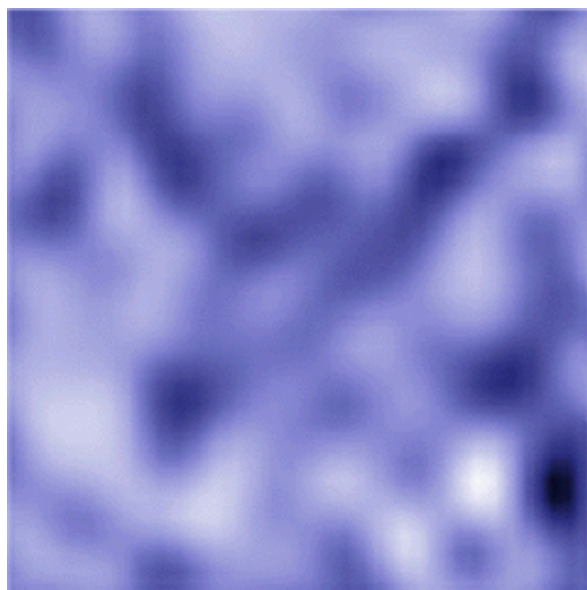


Рис. 5. Наблюдение микроскопической электронной неоднородности в сверхпроводящем BiSrCaCuO посредством сканирующей туннельной спектроскопии [15]. Светлые области (размер 14 Å) — участки повышенной локальной электронной плотности состояний (LDOS).

несколько порядков характеристик резистивного состояния интерфейса нормальный металл–ВТСП или нормальный металл–ЛМ под влиянием приложенного электрического поля в условиях значительной токовой инжекции¹.

Эффекты электронной неустойчивости, наблюдаемые, как сказано выше, в гетероструктурах, связаны с процессами, происходящими в интерфейсе нормальный металл–легированный манганит или ВТСП. Эти эффекты полярны, т.е. зависят от знака электрического поля, приложенного к гетероструктуре, и обладают свойством памяти. С одной стороны, ЭЭН может служить основой для создания устройств с памятью. С другой стороны, ЭЭН показывает общность поведения СКЭС и открывает путь исследования микроскопической природы формирования основных свойств этих систем.

2. Влияние электрического поля на свойства структур на основе сильнокоррелированных электронных систем

Необходимо также отличать эффекты электронной неустойчивости в гетероконтактах от влияния электрического поля на резистивные свойства в устройствах с затворами и пленках некоторых соединений ЛМ. В устройствах с затворами токи пренебрежимо малы и электрическое поле изменяет число носителей (и, как следствие, резистивные свойства структуры) благодаря изменению кулоновского взаимодействия. Такие эффекты не обладают памятью и проявляются только в присутствии электрического поля с большой напряженностью (рис. 6).

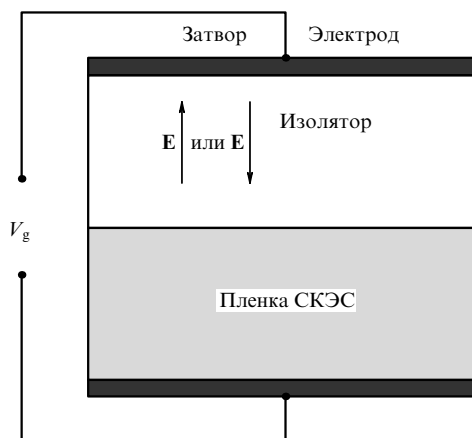


Рис. 6. Схема устройства с затвором для исследования эффекта электрического поля на свойства сверхпроводящей пленки, V_g — напряжение на затворе.

¹ Термин "колоссальное электросопротивление" введен в работе [24] при исследованиях ЛМ, видимо, по аналогии с термином "колоссальное магнетосопротивление" для обозначения изменения сопротивления в магнитном поле. После снятия магнитного поля КМС не сохраняется, т.е. КМС не обладает памятью. В отличие от этого термин КЭС (в ряде работ этот эффект называется гигантским электросопротивлением [29–31]) применяется как для обозначения эффектов изменения сопротивления в присутствии электрического поля в пленках и устройствах с затворами, так и эффектов ЭЭН, которые изменяют резистивные свойства структур и сохраняют их после снятия электрического поля (см. раздел 4).

Ожидаемые эффекты определяются длиной экранирования l_{TF} (радиусом экранирования Томаса – Ферми), которая для традиционных сверхпроводников и металлов очень мала ($\sim 1 \text{ \AA}$) и зависит от числа носителей:

$$l_{TF} = \left(\frac{\varepsilon E_{F0}}{4\pi^2 e^2 n_0} \right)^{1/2},$$

где ε — диэлектрическая константа материала, E_{F0} и n_0 — энергия Ферми и концентрация носителей в отсутствие электрического поля.

В высокотемпературных сверхпроводниках и соединениях легированных манганитов концентрация носителей очень низка — порядка 10^{21} см^{-3} — и существует значительная зависимость критической температуры сверхпроводящего перехода в ВТСП, температуры Кюри в ЛМ, а также транспортных свойств от числа носителей. Для $\text{YBaCuO}(123)$ $l_{TF} = 5\text{--}10 \text{ \AA}$, поэтому можно ожидать заметного проявления эффектов влияния электрического поля на сверхпроводящие и нормальные свойства ВТСП и ЛМ. В ряде работ наблюдалось влияние электрического поля на некоторые свойства ВТСП: увеличение критического тока в пленках [32–34] из ВТСП; изменение избыточного тока в микроконтактах Y-Ba-Cu-O – нормальный металл [35]; электронно-стимулированный переход порядок – беспорядок на поверхности ВТСП [36]. В основном работы проводились на УВСО [37–39]. Структуры с затворами изучались в нескольких соединениях СКЭС [40, 41].

В работе [42] исследовано влияние электрического поля на температурную зависимость сопротивления трехтерминальной структуры, состоящей из p – n –перехода LaBaMnO-Sr(TiNb)O и металлического электрода — пленки Ag . Исследовались транспортные свойства p – n –перехода в зависимости от приложенного напряжения (рис. 7). Как видно из рисунка, напряжение на затворе кардинально изменяет транспортные свойства структуры и температуру Кюри (температуру перехода металл – изолятор). И это является прямым доказательством того, что меняется фазовое состояние $(\text{LaBa})\text{MnO}_3$ в результате изменения числа носителей под влиянием электрического поля. Авторы работы [42] полагают, что в p – n –переходе увеличивается глубина деградированного слоя и это усиливает воздействие электрического поля. Следует отметить, что роль деградации свойств ВТСП и КМС на поверхности монокристаллов, которая исследовалась в работах [19, 43, 44], является очень существенной. В этих работах показано, что в результате потери кислорода происходит изменение валентного состояния атомов на поверхности монокристалла и, как следствие, транспортных, сверхпроводящих и магнитных свойств материала. В частности, в ЛМ вследствие деградации поверхности изменяется соотношение $\text{Mn}^{+3}/\text{Mn}^{+4}$, которое определяет температуру Кюри и транспортные свойства интерфейса [43].

3. Влияние электрического тока на транспорт в пленках и монокристаллах сильнокоррелированных электронных систем

Влияние статического электрического тока на транспортные свойства манганитов исследовалось в работах [29–31, 45, 46]. Наиболее ярко изменение характера проводимости ЛМ при протекании постоянного тока наблюдается в системе $\text{Pr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ [45]. Манганиты

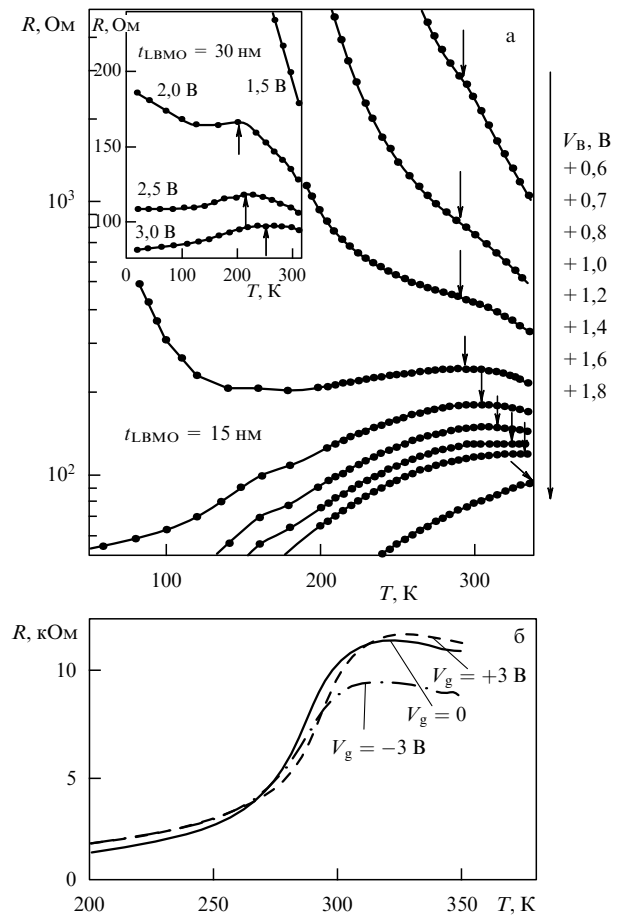


Рис. 7. (а) Температурная зависимость сопротивления перехода структуры p – $(\text{LaBa})\text{MnO}_3(15 \text{ нм})/n$ – $\text{Sr}(\text{TiNb})\text{O}_3$ при различных значениях приложенного напряжения V (из работы [42]). Стрелки указывают температуру перехода металл – изолятор. На вставке показана аналогичная зависимость для пленки толщиной $t_{\text{LBMO}} = 30 \text{ нм}$. (б) Температурная зависимость сопротивления в плоскости пленки толщиной 10 нм при различных значениях приложенного напряжения на затворе V_g в структуре транзисторного типа.

этого семейства являются непроводящими во всем диапазоне x . При приложении электрического напряжения монокристалл претерпевал переход из зарядово-упорядоченной антиферромагнитной фазы в проводящую ферромагнитную (рис. 8).

В работе [31] наблюдался отклик фазового состояния пленки LaBaMnO на структурный переход в подложке из BaTiO_3 . Результаты этой работы показывают, что внутренние напряжения стимулируют фазовое расслоение в ЛМ.

В работе Gu et al. [47] теоретически рассмотрено влияние электрического поля протекающего тока на зарядово-упорядоченное включение в фазово-расслоенную среду манганита. Предполагается, что в определенных местах фазово-расслоенной среды концентрируется электрическое поле. Такое поле, имеющее напряженность $\sim 10^5 \text{ В см}^{-1}$, подавляет зарядовое упорядочение, переводит систему из антиферромагнитного состояния в ферромагнитное и стимулирует переход металл – изолятор.

Эффекты, рассмотренные в этом разделе, являются прямым свидетельством моттовской природы СКЭС, в

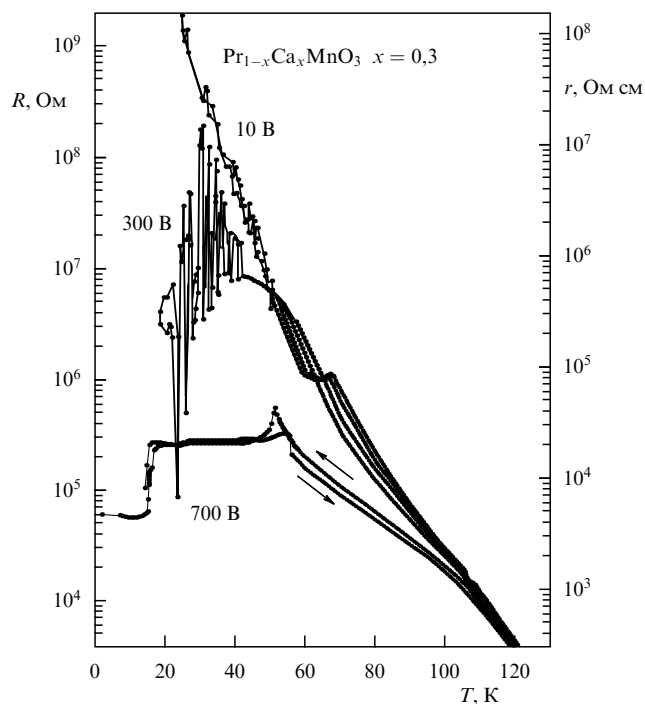


Рис. 8. Температурная зависимость сопротивления кристалла $\text{Pr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0,3$) при различных значениях приложенного напряжения. (Из работы [45].)

которых кулоновское взаимодействие подавляется беспорядком, уровнем допирования и т.д.

В реальной экспериментальной ситуации, исследуя электронный транспорт в фазово-расслоенной среде, каковой является ЛМ или ВТСП при определенных условиях, мы имеем дело с перколяционным транспортом двух систем резисторов: магнитоупорядоченных (металлических) и зарядово-упорядоченных (диэлектрических), сложным образом включенных в пленку или монокристалл. Таким образом, электрические поля даже небольшой величины могут значительно изменять транспортные и магнитные свойства структур на основе фазово-расслоенных СКЭС. Доказательством последнего утверждения могут служить результаты работ [48, 49], в которых наблюдалось изменение знака КЭС в зависимости от структурного состояния матрицы.

4. Эффект электронной неустойчивости в гетероструктурах сильнокоррелированных электронных систем

В этом разделе рассматриваются эксперименты, в которых наблюдались эффекты кардинального изменения резистивных свойств гетеропереходов нормальный металл–легированный манганит (ВТСП) в условиях значительной токовой инжекции, приводящие к изменению фазового состояния интерфейса нормальный металл–СКЭС. Эффект в разных работах называется по-разному:

- индуцированные электрическим полем и током эффекты [16];
- воспроизводимый эффект резистивных переключений для применения в устройствах с памятью [18];
- эффекты электронной неустойчивости [21];

- индуцированные полем резистивные переключения [23];
- колоссальное электросопротивление [24];
- гигантское резистивное переключение [26];
- индуцированный электрическим импульсом обратимый эффект резистивного изменения [28].

Несмотря на разные названия эффектов и некоторые другие различия в цитируемых выше работах, речь в них идет об общем явлении.

Впервые эффект был обнаружен в гетероконтактах, типа точечных контактов монокристалл $\text{BSCCO}-\text{Ag}$ [16]. Впоследствии подобные явления наблюдались и на пленочных структурах [19–21].

В работе [18] этот эффект наблюдался в другой перовскитной системе: пленочной структуре $\text{Sr}(0,2\% \text{ Cr})\text{TiO}_3-\text{Ag}$. Стало очевидным, что эффект является общим для нескольких классов перовскитных соединений СКЭС. Это подтвердилось, когда подобные эффекты были обнаружены [20–28] в родственных ВТСП соединениях — легированных манганитах.

И хотя в обсуждаемом случае ключевым моментом является протекающий через гетерокontakt ток, наблюдаемые эффекты переключения отличаются от эффектов изменения резистивных характеристик в пленках и устройствах с затворами (см. разделы 2, 3), поскольку первые обладают свойством памяти. Это отражается в транспортных свойствах метастабильных состояний гетероконтактов —

- металлическое состояние: а) линейная зависимость $I(V)$, б) металлическая зависимость $R(T)$;
- парамагнитное или фазово-расслоенное состояние: а) нелинейная зависимость $I(V)$, б) активационные вклады в проводимость.

На рисунках 9–11 показаны примеры вольт-амперных характеристик, на которых проявляется ЭЭН, и температурных зависимостей сопротивлений метастабильных фаз в гетеропереходах на основе ЛМ и ВТСП.

Наблюдаемое явление можно поэтапно описать следующим образом (рис. 11а).

1. Прикладываем электрическое напряжение " $-V$ " к гетероконтакту (позиция 1 на ВАХ, рис. 11б). При микроконтактном (точечном) растекании тока создается достаточно высокая концентрация электрического поля [21]. Это поле стимулирует фазовый переход в обедненную носителями высокорезистивную фазу (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_2 (позиция 2 на ВАХ) происходит обратный фазовый переход в низкорезистивную проводящую фазу (LRS- или on-состояние). Эта фаза характеризуется наличием сверхпроводящего перехода при $T = 85 \text{ K}$. Низкорезистивное состояние сохраняется при развертке напряжения до отрицательных значений, стимулирующих обратный фазовый переход (ветвь 3–4).

3. Ветви ВАХ 1–2 и 3–4 обратимы, переключения состояний происходят на ветвях 2–3 и 4–5.

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

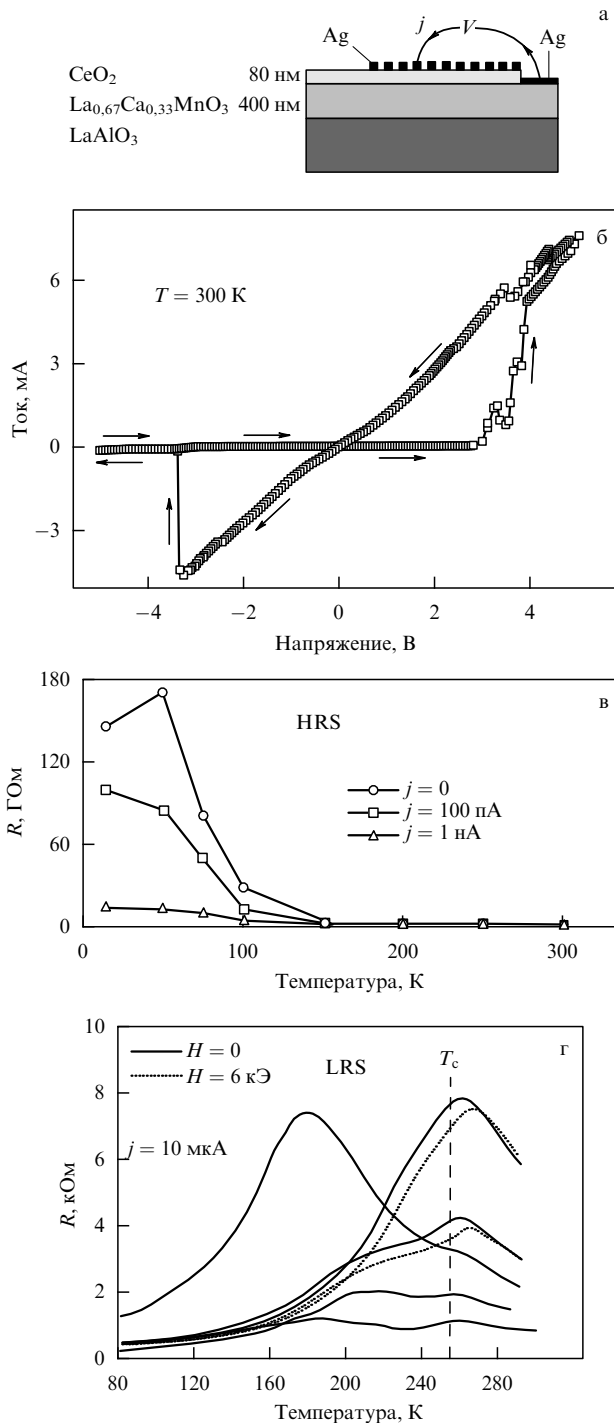


Рис. 9. (а) Гетероэпитаксиальная пленочная структура CeO_2 (80 нм) / $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$ (400 нм), напыленная на монокристалл LaAlO_3 (001) с целью изготовления двухтерминального устройства. (Из работы [26].) (б) ВАХ гетероперехода $\text{Ag}/\text{CeO}_2/\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$, демонстрирующая воспроизводимое переключение между (в) высокорезистивным состоянием (HRS) с изолирующими свойствами и (г) металлическим состоянием (LRS) с отношением сопротивлений в этих состояниях, достигающим значения 10^5 . Обратимое электрическое переключение представляет собой полярный эффект и проявляется как при медленной развертке напряжения, так и в импульсном режиме.

В работах указываются времена переключений, различающиеся на несколько порядков. Самые короткие времена — порядка нескольких пикосекунд — зарегистрированы в устройствах на пленках [18, 26]. В ра-

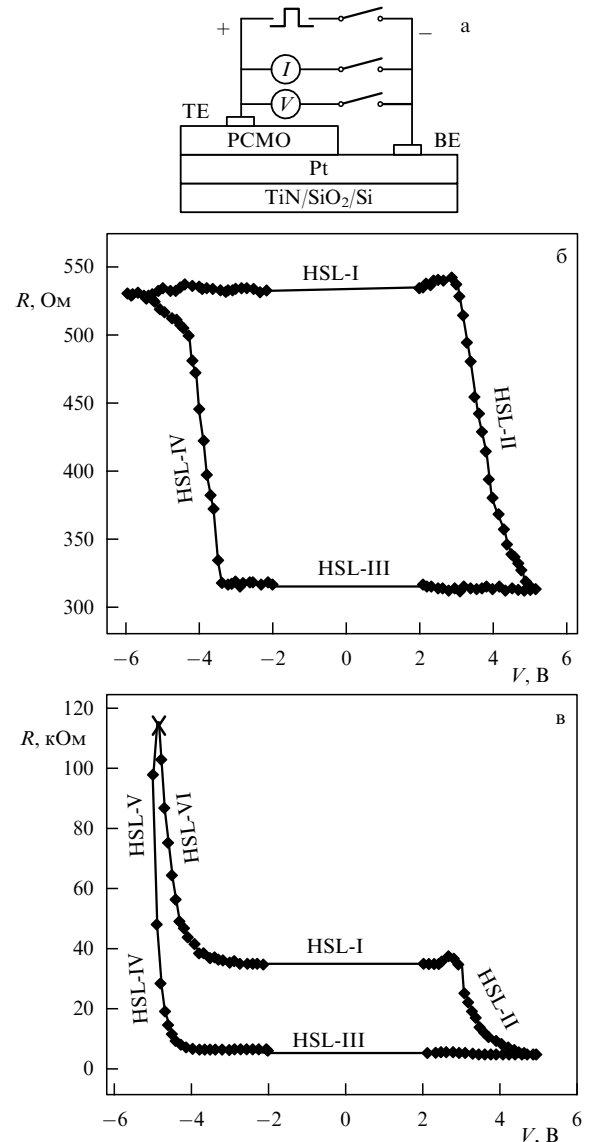


Рис. 10. (а) Схема гетероконтакта (из работы [27]). TE и BE — верхний и нижний электроды соответственно. (б, в) Резистивные переключения на пленочном гетеропереходе $\text{PrCaMnO}-\text{Ag}$ в импульсном режиме на пленках, обогащенных (б) и обедненных (в) кислородом. V — амплитуды импульсов напряжения длительностью 300 нс (б) и 100 нс (в), R — сопротивление гетероконтакта, HSL-I — низкорезистивное состояние гетероконтакта, HSL-III — высокорезистивное, HSL-II, HSL-IV — промежуточные состояния гетероконтакта.

ботах [19, 21], выполненных на монокристаллах, наблюдались медленные процессы, которые интерпретируются как диффузия кислорода по вакансиям в дефектном слое интерфейса. В работе [28] были продемонстрированы резистивные переключения на пленочном гетеропереходе $\text{PrCaMnO}-\text{Ag}$ в импульсном режиме с длительностью импульсов 300 и 100 нс (см. рис. 10). Однако в этой работе наблюдались также релаксационные процессы с временами порядка нескольких минут.

4.1. Модельное описание

эффектов электронной неустойчивости

Существует несколько модельных подходов к описанию ЭЭН.

1. В работах Baikalov et al. [22, 23] предполагается, что электрическое поле создает на интерфейсе дефекты

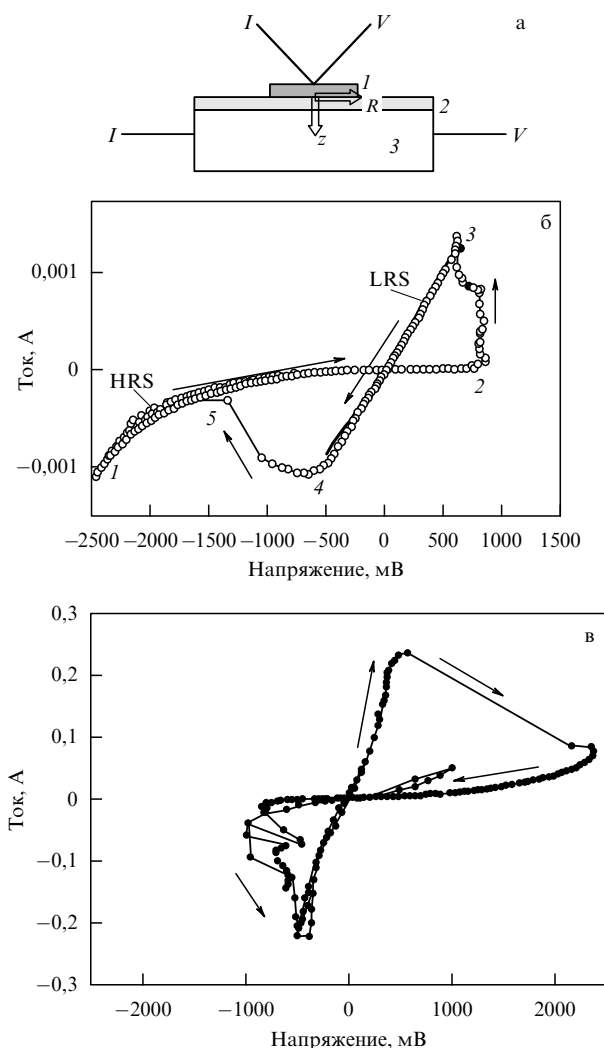


Рис. 11. (а) Схема гетероконтакта: 1 — металлический электрод (серебряная игла или пленка), 2 — поверхностный деградированный слой монокристалла, 3 — монокристалл, I , V — токовые и потенциальные подводы. (б) Пример ВАХ гетероконтакта монокристалл $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+y}$ –Ag с воспроизводимыми переключениями между LRS- и HRS-состояниями (из работы [20]). Стрелками указаны направления развертки напряжения; электрическое поле — $\mathbf{E}(\mathbf{J})$ направлено от поверхности вглубь кристалла, когда напряжение развертки положительно; $\mathbf{E}(\mathbf{J}) = \sigma\mathbf{J}$, где $\mathbf{J}$ — плотность тока, σ — проводимость. (в) Пример ВАХ гетероконтакта монокристалл $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{BiO}_{3-x}$ –Ag с воспроизводимыми переключениями между LRS- и HRS-состояниями (из работы [52]). Стрелками указаны направления развертки напряжения; электрическое поле — $\mathbf{E}(\mathbf{J})$ направлено из объема кристалла к его поверхности, когда напряжение развертки положительно.

кислорода и дальнейшее переключение происходит благодаря электрохимической миграции этих дефектов.

2. В работах Tulina et al. [16, 19–21] предлагается фактически аналогичная модель, в которой интерфейс гетероконтакта рассматривается как деградированная по кислороду прослойка. При достижении критической концентрации электрического поля (которое 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 и изменению резистивных свойств гетероструктуры. В работе [21] проведен численный

расчет резистивных свойств гетероконтактов с учетом реальных резистивных и тепловых свойств ВТСП и манганитов. С помощью совместного решения уравнений теплопроводности и Пуассона численными методами был выполнен расчет электродинамических и тепловых свойств гетероконтактов для модельного описания эффектов электронной неустойчивости гетероконтактов на основе ЛМ в условиях сильной токовой инжекции. Из сравнения экспериментальных и расчетных данных делается вывод, что наблюдаемое в работах [19–21] влияние транспортного тока на резистивные свойства гетеропереходов на основе манганитов и ВТСП вызывает примесное расслоение фаз в СКЭС. Движение заряженных ионов кислорода под действием электрического поля в поверхностном слое с высокой плотностью кислородных вакансий является катализатором фазового расслоения.

3. В работе R. Fors et al. [26] исследовался гетероконтакт на основе LaSrMnO с диэлектрической прослойкой CeO_2 . Авторы этой работы предполагают существование в диэлектрической прослойке CeO_2 электрических доменов, которые взаимодействуют с кислородными вакансиями. Электрическое поле перемещает вакансии, в результате чего происходит переключение резистивного состояния структуры.

4. В работе Т. Ока, N. Nagaosa [50] предполагается, что причина ЭН заключается в природе моттовского перехода на интерфейсе нормальный металл – СКЭС, где формируется двумерная структура: металл/зонный изолятор/металл/моттовский изолятор/СКЭС (рис. 12).

5. В работах Quintero et al. [51] моделируется эффект резистивного переключения в поликристаллическом

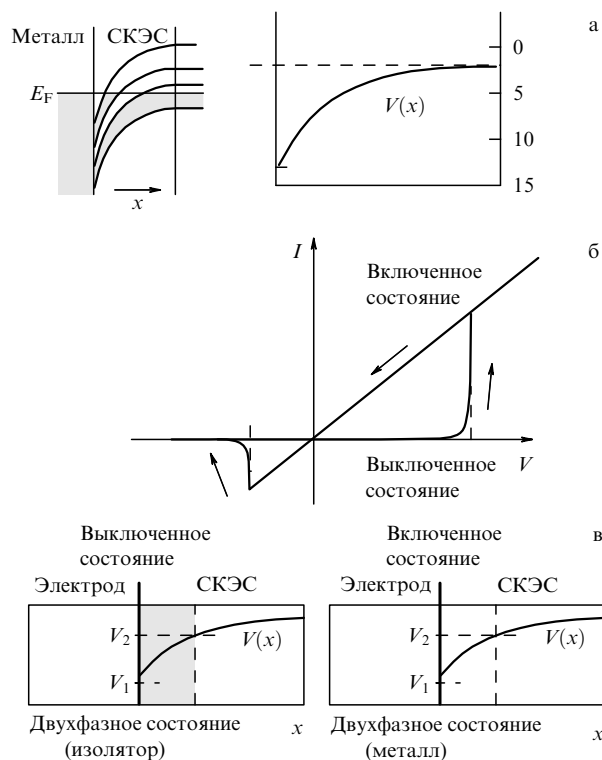


Рис. 12. (а) Схема распределения потенциала на интерфейсе металл – СКЭС [50]. (б) ВАХ структуры металл – СКЭС в модели работы [50]. (в) Выключенное (off) и включенное (on) состояния структуры металл – СКЭС.

манганите с пространственной модуляцией кислородных вакансий.

Из анализа вышеприведенных модельных рассмотрений следует, что эффекты ЭЭН оказываются возможными благодаря, во-первых, моттовскому характеру перехода металл–диэлектрик, который свойствен базовым структурам рассмотренных соединений. Такой переход [50] является переходом первого рода, демонстрирует гистерезис и допускает сосуществование двух фаз. Во-вторых, достаточно высокая подвижность кислородных вакансий обеспечивает перераспределение носителей в области формирования перехода под влиянием электрического поля. Но свести наблюдаемые эффекты к простой электродиффузии ионов кислорода, очевидно, нельзя, так как ЭЭН наблюдаются и при низких температурах [19, 21], при которых диффузионные процессы затруднены.

4.2. Инверсия эффекта электронной неустойчивости в электронно-допированной сильнокоррелированной электронной системе

Все исследованные с целью изучения ЭЭН структуры являлись в основном представителями дырочно-допированных СКЭС. В работе [52] этот эффект был исследован в гетероструктурах на основе электронно-допированного высокотемпературного сверхпроводника $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{BiO}_{3-x}$.

Было показано, что транспортные свойства интерфейса нормальный металл–монокристалл $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{BiO}_{3-x}$ зависят от полярности приложенного напряжения и переключения в высокорезистивное состояние происходят, когда монокристалл ВТСП имеет отрицательный по отношению к потенциалу нормального электрода потенциал (рис. 11в), в этом случае поле тока $\mathbf{E} = \sigma \mathbf{J}$ направлено из объема кристалла к его поверхности. В случае переключений, наблюдаемых в дырочно-допированных ВТСП и ЛМ, также обладающих дырочным типом проводимости [16–28], эффект имел противоположный знак по электрическому полю. Изменение знака эффекта в электронно-допированном $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{BiO}_{3-x}$ подтверждает предположение о том, что электрическое поле перераспределяет кислород в поверхностном слое, изменяя число вакансий, которые по-разному влияют на число носителей в случаях дырочно- и электронно-допированных перовскитных структур.

Наблюдаемая в работе [52] инверсия эффекта резистивных переключений при изменении типа носителей СКЭС подтверждает существенную роль зарядовых эффектов и кислорода в рассмотренных выше явлениях.

4.3. Колоссальное электросопротивление

Модель (4) позволяет сделать оценку эффекта резистивного переключения в терминах так называемого колоссального электросопротивления (КЭС) $\Delta R(V_{\text{off}}, V_{\text{on}})$:

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

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

$$\frac{\Delta R}{R} = \exp \left[\frac{\sqrt{2eV_{\text{on}}/(e\delta)}}{\xi} \right] - 1, \quad (1)$$

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

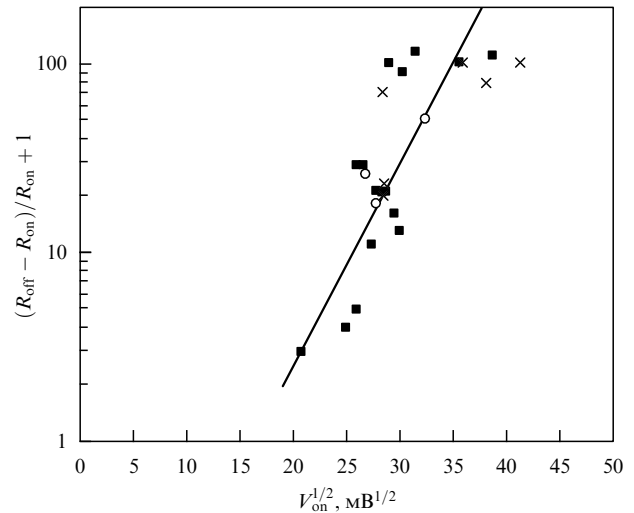


Рис. 13. Зависимость колоссального электросопротивления от напряжения V_{on} , при котором происходит переход из "выключенного" высокорезистивного состояния в низкорезистивное металлическое "включенное" состояние (из работы [52]). Данные для гетеропереходов на основе монокристаллов $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{BiO}_3$ (кружки), $\text{La}_{0.8}\text{Ca}_{0.2}\text{MnO}_{3-x}$ (крестики), $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ (квадратики).

V_{off} — напряжение, при котором происходит переключение в off-состояние, V_{on} — напряжение, при котором происходит переключение в on-состояние, ξ — длина затухания, δ — величина допирования СКЭС.

Соотношение (1) справедливо в случае переключения между металлическим и изолирующим состояниями, а соотношение (2) справедливо, когда ни одно из метастабильных состояний не является металлическим.

На рисунке 13 приведена зависимость КЭС от абсолютного значения напряжения переключения V_{on} из "выключенного" состояния во "включенное" состояние, полученная по данным исследования двух родственных СКЭС: ВТСП [16, 19, 52] и КМС [20, 21], которые имели примерно одинаковый уровень допирования δ . Использовались абсолютные значения V_{on} , так как в электронно-допированном $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{BiO}_{3-x}$ напряжение V_{on} имело противоположный знак по сравнению с напряжением в дырочно-допированных ВТСП и ЛМ. Как видно из рис. 13, существует значительный разброс экспериментальных данных и соотношение (1) не вполне адекватно описывает эксперимент. По-видимому, в реальный процесс переключения резистивных состояний в гетероконтактах вносят вклад неучтенные в модели (4) процессы перегрева и электродиффузии, которые подробно исследовались в работах [21].

5. Заключение

Итак, на основе исследования эффектов резистивных переключений в устройствах с затворами, тонких пленках и гетеропереходах на базе СКЭС в электрических и магнитных полях можно выделить следующие общие черты ВТСП и легированных манганитов как моттовских систем:

- 1) зависимость их свойств от уровня допирования и типа носителей;
- 2) существование фазового расслоения, стимулированного различными факторами: уровнем допирования,

внутренними напряжениями, электрическими и магнитными полями и т.д.;

3) наличие достаточно подвижного кислорода, который под действием электрического поля может перемещаться по вакансиям;

4) гистерезисный характер перехода металл–изолятор в этих соединениях.

Существующие модельные и теоретические описания не в полной мере учитывают все процессы, происходящие в интерфейсе металл — СКЭС (это касается диффузии кислорода, перегрева при протекании тока, типа носителей и др.), которые формируют распределение потенциала в пограничной области и определяют времена и характер резистивных переключений в структурах на основе СКЭС.

Работа поддержана фондом РФФИ, проект N 05-02-17175a и Программой Президиума РАН "Новые материалы".

Список литературы

- Меден А, Шо М *Физика и применение аморфных полупроводников* (М.: Мир, 1991)
- Esaki L *Phys. Rev.* **109** 603 (1958)
- Gunn J B *IBM J. Res. Dev.* **8** 141 (1964)
- Shockley W *Bell Syst. Tech. J.* **33** 799 (1954)
- Fulop W *IEEE Trans. Electron. Dev.* **ED-10** 120 (1963)
- Ovshinsky S R *Phys. Rev. Lett.* **21** 1450 (1968)
- Andersson G *Acta Chem. Scand.* **8** 1599 (1959)
- Dagotto E *Rev. Mod. Phys.* **66** 763 (1994)
- Nagaev E L *Phys. Rep.* **346** 387 (2001)
- Горьков Л П *УФН* **168** 665 (1998)
- Coe J M D, Viret M, von Molnár S *Adv. Phys.* **48** 167 (1999)
- Dagotto E, Hotta T, Moreo A *Phys. Rep.* **344** 1 (2001)
- Burgy J et al. *Phys. Rev. Lett.* **87** 277202 (2001)
- Pickett W E et al. *Science* **255** 46 (1992)
- Pan S H et al. *Nature* **413** 282 (2001)
- Tulina N A, Emelchenko G A, Kulakov A B *Phys. Lett. A* **204** 74 (1995); *Tulina N A Physica C* **333** 214 (2000)
- Watanabe Y *Phys. Rev. B* **59** 11257 (1999)
- Beck A et al. *Appl. Phys. Lett.* **77** 139 (2000)
- Tulina N A, Ionov A M, Chaika A N *Physica C* **366** 23 (2001)
- Tulina N A et al. *Europhys. Lett.* **56** 836 (2001)
- Tulina N A et al. *Physica C* **385** 563 (2003); *Tulina N A, Sirotkin V V Physica C* **400** 105 (2004)
- Baikalov A et al. *Appl. Phys. Lett.* **83** 957 (2003)
- Tsui S et al. *Appl. Phys. Lett.* **85** 317 (2004)
- Odagawa A et al. *Phys. Rev. B* **70** 224403 (2004)
- Rozenberg M J, Inoue I H, Sánchez M J *Phys. Rev. Lett.* **92** 178302 (2004)
- Fors R, Khartsev S I, Grishin A M *Phys. Rev. B* **71** 045305 (2005)
- Sawa A et al. *Appl. Phys. Lett.* **85** 4073 (2004)
- Nian Y B et al. *Phys. Rev. Lett.* **98** 146403 (2007); *Liu S Q, Wu N J, Ignatiev A Appl. Phys. Lett.* **76** 2749 (2000)
- Sun J Z *J. Magn. Magn. Mater.* **202** 157 (1999)
- Debnath A K, Lin J G *Phys. Rev. B* **67** 064412 (2003)
- Eerenstein W et al. *Nature Mater.* **6** 348 (2007); *cond-mat/0609209*
- Xi X X et al. *Phys. Rev. Lett.* **68** 1240 (1992)
- Mannhart J *Mod. Phys. Lett. B* **6** 555 (1992)
- Matsui K et al. *Jpn. J. Appl. Phys.* **31** L1342 (1992)
- Рыбальченко Л Ф и др. *ФНТ* **17** 202 (1991)
- Bozhko S I, Tsui V S *Physica C* **197** 362 (1992)
- Nakajima K et al. *Appl. Phys. Lett.* **63** 684 (1993)
- Chandrasekhar N, Valls O T, Goldman A M *Phys. Rev. Lett.* **71** 1079 (1993)
- Grigellionis G, Tornau E E, Rosengren A *Phys. Rev. B* **53** 425 (1996)
- Hasegawa T et al. *Phys. Rev. B* **69** 245115 (2004)
- Ahn C H, Triscone J-M, Mannhart J *Nature* **424** 1015 (2003)
- Tanaka H, Zhang J, Kawai T *Phys. Rev. Lett.* **88** 027204 (2001)
- Chaika A N et al. *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* **148** 101 (2005)
- Kim D S et al. *J. Appl. Phys.* **100** 093901 (2006)
- Asamitsu A et al. *Nature* **388** 50 (1997)
- Yuzhelevski Y et al. *Phys. Rev. B* **64** 224428 (2001)
- Gu R Y, Wang Z D, Ting C S *Phys. Rev.* **67** 153101 (2003)
- Sun Y H et al. *J. Magn. Magn. Mater.* **311** 644 (2007)
- Тулина Н А и др., в сб. *Труды международного междисциплинарного симпозиума "Порядок–беспорядок и свойства оксидов" (ODPO 2006), Сочи, 2006*
- Oka E, Nagaosa N *Phys. Rev. Lett.* **95** 266403 (2005)
- Quintero M et al. *Phys. Rev. Lett.* **98** 116601 (2007)
- Тулина Н А, Клиникова Л А *ЖЭТФ* **132** 268 (2007)

Colossal electroresistance and electron instability in strongly correlated electronic systems

N.A. Tulina

*Institute of Solid State Physics, Russian Academy of Sciences,
142432 Chernogolovka, Moscow region, Russian Federation
Tel. (7-496) 993-2755. Fax (7-496) 524-9701
E-mail: tulina@issp.ac.ru*

Research is reviewed on electronic instability in strongly correlated electronic systems (SCESs) such as high-temperature superconductors (HTSCs) and doped manganites. The effect consists of an orders of magnitude change in the resistivity of normal metal-HTSC or normal metal-doped manganite interfaces on applying an electric field under strong current injection conditions. The focus of the review is on HTSC and doped-manganite heterojunctions. A comparison (in particular, in terms of the underlying physics) is made between the electron instability effect in heterostructures and how the electric field affects SCES properties in thin films and gate devices.

PACS numbers: **71.10. - w, 71.27. + a, 71.30. + h, 73.40. - c, 74.62.Dh**

DOI: 10.3367/UFNr.0177.200711d.1231

Bibliography — 52 references

Received 18 April 2007

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **177** (11) 1231 – 1239 (2007)

Physics – Uspekhi **50** (11) (2007)