

УДК 538.91+538.955+537.311.3

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ И МЕХАНИЗМЫ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА НА МАГНИТНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ La-Sr МАНГАНИТОВ С КОМБИНИРОВАННЫМ ЗАМЕЩЕНИЕМ МАРГАНЦА

© 2024 г. В. К. Карпасюк<sup>1</sup>, А. Г. Баделин<sup>1</sup>, И. М. Державин<sup>1, \*</sup>, С. Х. Эстемирова<sup>1,2</sup>,  
Д. И. Меркулов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Астраханский государственный университет имени В.Н. Татищева», Астрахань, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт металлургии  
Уральского отделения Российской академии наук», Екатеринбург, Россия

\*E-mail: derzh\_igor@mail.ru

Поступила в редакцию 19.02.2024

После доработки 18.03.2024

Принята к публикации 28.06.2024

Приведены данные о магнитных свойствах и особенностях нелинейных вольт-амперных характеристик манганитов с замещением марганца парами ионов ( $\text{Fe}^{3+}_{0.5}\text{Sc}^{3+}_{0.5}$ ), ( $\text{Ni}^{2+}_{0.5}\text{Ge}^{4+}_{0.5}$ ), ( $\text{Zn}^{2+}_{0.5}\text{Ge}^{4+}_{0.5}$ ), ( $\text{Mg}^{2+}_{0.5}\text{Ge}^{4+}_{0.5}$ ) в La-Sr системе. Образцы, содержащие (Fe, Sc), (Ni, Ge) и (Zn, Ge), имеют S-образные участки отрицательного дифференциального сопротивления, а (Mg, Ge)-замещенный манганит проявляет свойство стабилизации напряжения.

**Ключевые слова:** электронные конфигурации, заряды и радиусы ионов, микроструктура, неоднородности, интервал температур, намагнитченность, точка Кюри, переход металл-полупроводник, типы вольтамперных характеристик

DOI: 10.31857/S0367676524100245, EDN: FJNLPM

### ВВЕДЕНИЕ

Перовскитоподобные манганиты, благодаря сильной взаимосвязи зарядового, спинового и орбитального упорядочения, магнитных и электрических параметров, обладают интересными и практически важными свойствами [1–3], в том числе эффектом порогового электрического переключения, проявляющимся в S- или N-образных вольтамперных характеристиках (ВАХ) [4–9]. Физика переключения широко обсуждалась для различных материалов, тонких пленок и гетероструктур (например, [10]), но роль состава и микроструктуры манганитов систематически не исследовалась. Замещение компонентов основного состава выбранными ионами позволяет управлять магнитным упорядочением, зонной структурой, типом и концентрацией носителей заряда и, соответственно, электромагнитными свойствами манганитов [11, 12]. Межкристаллитные границы в поликристаллах очень чувствительны к воздействию внешних полей [13].

Природа нелинейных ВАХ может быть связана с электронными эффектами, саморазогревом, электрохимическими миграционными процессами

[8, 9, 14–18]. Механизм порогового переключения в оксидах с отрицательным дифференциальным сопротивлением S-типа может быть понят в рамках электронно-термической модели [19] в сочетании с теориями электронных фазовых переходов и расслоения [20–22]. В манганитах с S-образной ВАХ также проявляются эффекты образования металлических ферромагнитных каналов, усиленных полем прыжков, инжекции или экстракции носителей заряда из границы раздела [5, 8, 9, 23] и т. д. Отрицательное дифференциальное сопротивление N-типа манганитов связано с усилением неупругого рассеяния носителей заряда в пороговом поле [6], зарядово-спиновым туннелированием между конкурирующими сосуществующими фазами и зернами в поликристаллах, или может быть связано с изменением структуры энергетических уровней и концентрация носителей в энергетических зонах [7]. Авторы [22] связывают N-образную ВАХ с появлением «горячей» полупроводниковой парамагнитной фазы.

В работе [17] на ВАХ манганита  $\text{La}_{0.65}\text{Ca}_{0.35}\text{MnO}_3$  наблюдался очень резкий, почти вертикальный рост туннельного тока в узком диапазоне напряжений.

Этот эффект, по мнению авторов, не может быть объяснен тепловыми эффектами и, скорее всего, обусловлен скачками ионов кислорода в области туннельного барьера, которые стимулируются туннельным током и электрическим полем, приложенным к контакту. Аналогичная кислородно-диффузионная модель переключения с участием анионных вакансий предложена в [8, 16].

Целью нашей работы является изучение влияния различных сочетаний заместителей марганца в манганитах  $\text{La}_{1-c}\text{Sr}_c\text{Mn}_{1-x}(\text{Me}^{\text{I}}_{0.5}\text{Me}^{\text{II}}_{0.5})_x\text{O}_3$  ( $c = 0.3; 0.35; x = 0.1; 0.15$ ) на их структуру, магнитные свойства и нелинейные электрические характеристики.

Здесь парами  $(\text{Me}^{\text{I}}_{0.5}\text{Me}^{\text{II}}_{0.5})$  являются:  $(\text{Fe}^{3+}_{0.5}\text{Sc}^{3+}_{0.5})$ ,  $(\text{Ni}^{2+}_{0.5}\text{Ge}^{4+}_{0.5})$ ,  $(\text{Zn}^{2+}_{0.5}\text{Ge}^{4+}_{0.5})$ ,  $(\text{Mg}^{2+}_{0.5}\text{Ge}^{4+}_{0.5})$ . Выбранные замещающие ионы имеют следующие конфигурации внешних электронных оболочек:  $\text{Fe}^{3+}(3d^5)$ ,  $\text{Sc}^{3+}(3p^6)$ ,  $\text{Ni}^{2+}(3d^8)$ ,  $\text{Zn}^{2+}(3d^{10})$ ,  $\text{Mg}^{2+}(2p^6)$ ,  $\text{Ge}^{4+}(3d^{10})$ . Ионы  $\text{Fe}^{3+}$  и  $\text{Ni}^{2+}$  обладают спиновым магнитным моментом, остальные являются диамагнитными.

Пара катионов  $(\text{Fe}^{3+}_{0.5}\text{Sc}^{3+}_{0.5})$  обеспечивает изовалентное замещение ионов  $\text{Mn}^{3+}$ . Двухвалентные и четырехвалентные катионы действуют как доноры и акцепторы, а комбинация таких ионов, взятых в равных количествах, с точки зрения зарядовой компенсации «эквивалентна» удвоенному количеству трехвалентных ионов. Поэтому можно считать, что такие пары ионов фактически замещают трехвалентные ионы марганца. Сопоставление влияния комбинаций  $(\text{Zn}^{2+}_{0.5}\text{Ge}^{4+}_{0.5})$  и  $(\text{Mg}^{2+}_{0.5}\text{Ge}^{4+}_{0.5})$  на свойства манганитов интересно тем, что в первой сочетаются  $d$ -ионы, а во второй —  $p$  и  $d$ , причем радиусы ионов  $\text{Zn}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  имеют близкие значения (0.74 и 0.72 Å, соответственно). Отметим также совпадение радиусов ионов  $\text{Fe}^{3+}$  и  $\text{Mn}^{3+}$ ,  $\text{Ge}^{4+}$  и  $\text{Mn}^{4+}$  [24].

Содержание стронция выбрано в области, где  $\text{La-Sr}$  манганит имеет высокую точку Кюри.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Манганиты были синтезированы методом традиционной керамической технологии из высушенных порошков  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SrCO}_3$ ,  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Sc}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{GeO}_2$ . Исходные компоненты смешивали в стехиометрических пропорциях и измельчали в шаровой мельнице с добавлением этанола. Таблетки, спрессованные из полученной смеси, предварительно обжигали при 1273 К в течение 4 ч. После этой операции производилось измельчение, введение связующего (водного раствора поливинилового спирта), прессование образцов и выжигание связующего. Заключительная операция спекания осуществлялась на воздухе при 1473 К в течение 10 ч, затем образцы охлаждались вместе с печью.

Фазовую чистоту, пространственную группу и параметры элементарной ячейки определяли методом порошковой рентгеновской дифракции

в  $\text{CuK}\alpha$ -излучении при комнатной температуре на дифрактометре Shimadzu XRD-7000. Электронные изображения поверхности экспериментальных образцов получали на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) MIRA 3. Удельную намагниченность ( $\sigma$ ) измеряли баллистическим методом в магнитном поле напряженностью 5.6 кЭ. Точку Кюри ( $T_C$ ) определяли как температуру, соответствующую максимуму  $|d\mu(T)/dT|$ , где  $\mu(T)$  — зависимость магнитной проницаемости на частоте 99.9 кГц от температуры.

Температурные зависимости сопротивления и ВАХ измеряли с помощью серебряных электродов, напыленных на противоположные плоскости таблеток (толщиной 4 мм). Температуру перехода металл–полупроводник ( $T_{ms}$ ) определяли по пику температурной зависимости сопротивления.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Все синтезированные манганиты имеют ромбоэдрическую структуру. Их параметры решетки  $a$ ,  $c$  и объем элементарной ячейки  $V$  представлены в табл. 1.

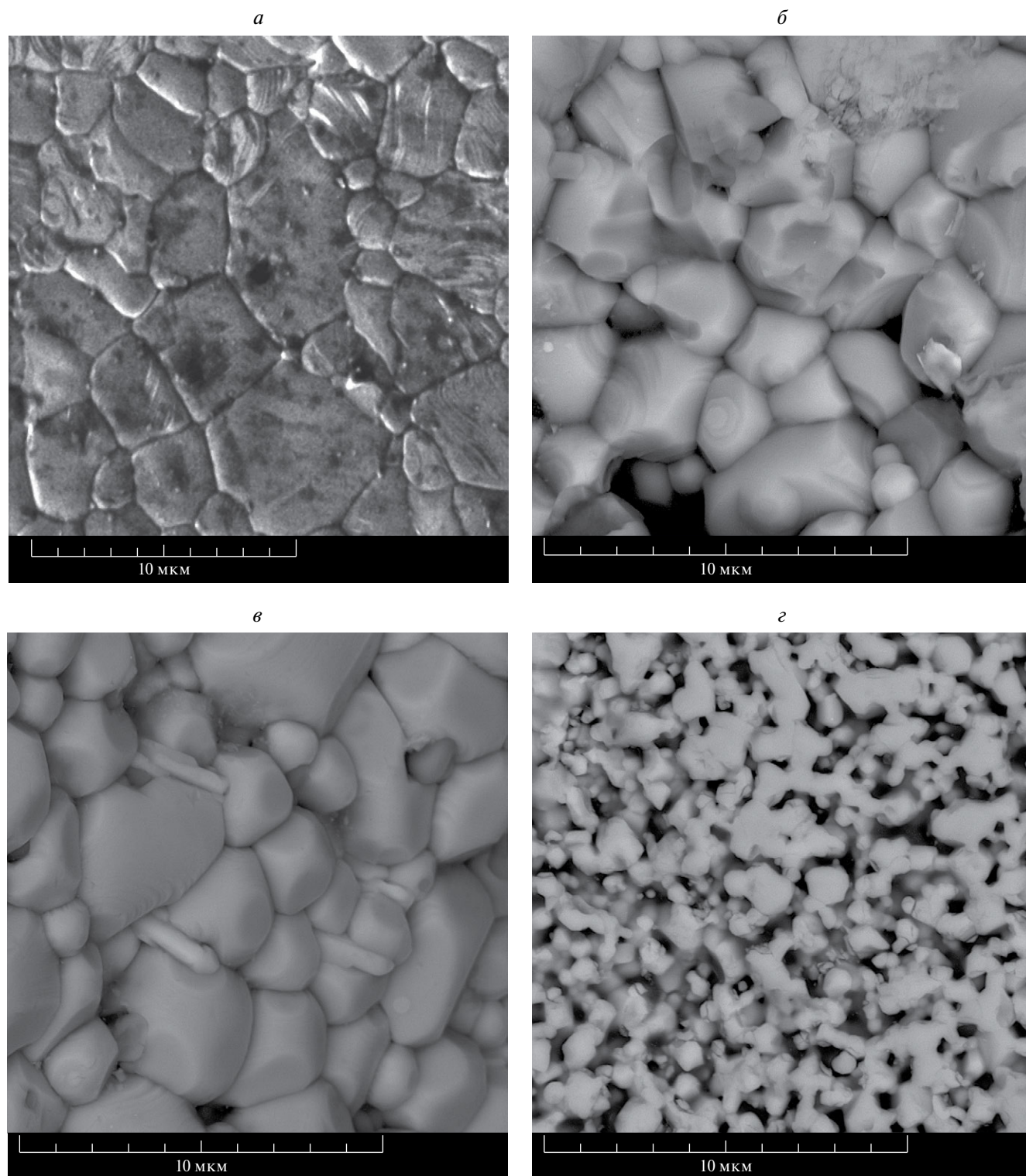
**Таблица 1.** Параметры кристаллической структуры синтезированных манганитов:  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Mn}_{0.9}(\text{Fe}_{0.5}\text{Sc}_{0.5})_{0.1}\text{O}_3$  (состав I),  $\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{Mn}_{0.85}(\text{Ni}_{0.5}\text{Ge}_{0.5})_{0.15}\text{O}_3$  (II),  $\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{Mn}_{0.85}(\text{Zn}_{0.5}\text{Ge}_{0.5})_{0.15}\text{O}_3$  (III),  $\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{Mn}_{0.85}(\text{Mg}_{0.5}\text{Ge}_{0.5})_{0.15}\text{O}_3$  (IV)

| Состав | $a$ , Å | $c$ , Å | $c/a$ | $V$ , Å <sup>3</sup> |
|--------|---------|---------|-------|----------------------|
| I      | 5.517   | 13.373  | 2.424 | 352.5                |
| II     | 5.488   | 13.333  | 2.429 | 347.9                |
| III    | 5.498   | 13.360  | 2.430 | 349.8                |
| IV     | 5.495   | 13.346  | 2.429 | 349.1                |

Зависимость параметров кристаллической структуры от состава соответствует различию ионных радиусов ионов, замещающих марганец, и содержанию Sr. Отношение параметров  $c/a$ , определяющее соотношение ферромагнитного и антиферромагнитного взаимодействий [25], в составах II, III, IV практически одинаковое и выше, чем в составе I.

По данным [26, 27], железо, введенное в манганиты  $\text{La-Sr}$  системы, находится в состоянии  $\text{Fe}^{3+}$  и замещает ионы  $\text{Mn}^{3+}$ , подавляя ферромагнетизм и металлическую проводимость, так как ионы  $\text{Fe}^{3+}$  не участвуют в двойном обменном взаимодействии и нарушают некоторые обменные связи между ионами  $\text{Mn}^{3+}$  и  $\text{Mn}^{4+}$ .

На рисунках 1а–1г сравниваются данные СЭМ манганитов разного состава. Микроструктура образцов, содержащих (Fe, Sc), (Ni, Ge), (Zn, Ge), достаточно плотная (образец (Fe, Sc) имеет наибольшую плотность) со средним размером зерен около 4.3, 2.5 и 3 мкм, соответственно. Mg-содержащие манганиты имеют наименьший диаметр зерен (около 1 мкм)



**Рис. 1.** СЭМ-микрофотографии поверхности манганитов, содержащих (Fe, Sc) (а), (Ni, Ge) (б), (ZnGe) (в), (Mg, Ge) (г).

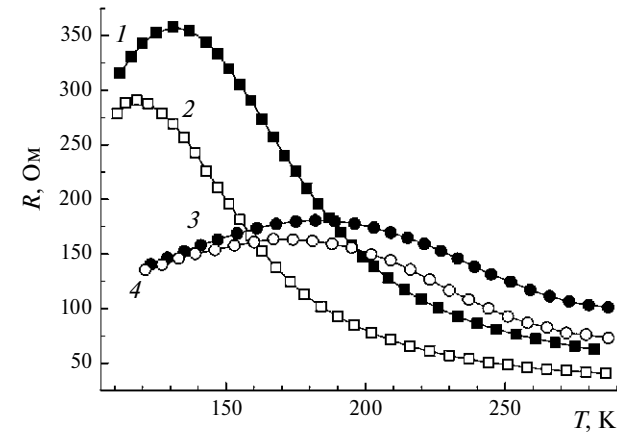
и наибольшую пористость. Вероятно, включение магния более существенно тормозит рост зерен в процессе спекания, чем включение других элементов.

Образцы, содержащие (Fe, Sc), (Ni, Ge) или (Zn, Ge), имеют незначительно отличающиеся значения

намагниченности при 80 К и температуры Кюри, в то время как у (Mg, Ge)-замещенных манганитов значения этих параметров существенно ниже (табл. 2).

В исследованном интервале температур 110–290 К (Zn, Ge)-замещенный манганит имеет металлический

тип проводимости, а (Mg, Ge)-содержащий образец проявляет полупроводниковые свойства. (Fe, Sc)- и (Ni, Ge)-содержащие манганиты проявляют переход металл-полупроводник, причем с увеличением напряженности электрического поля ( $E$ ) температура перехода снижается (рис. 2, табл. 2).



**Рис. 2.** Температурные зависимости сопротивления (Fe, Sc)-содержащего манганита (1, 2) и (Ni, Ge)-замещенного манганита (3, 4) при различных напряженностях измерительного электрического поля: 9.2 В/см (1, 3); 14.0 В/см (2, 4).

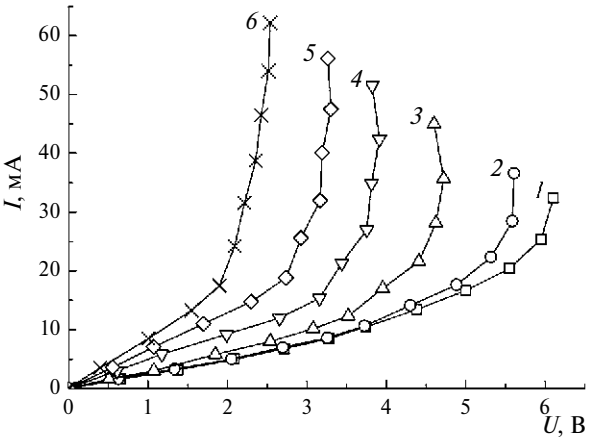
**Таблица 2.** Удельная намагниченность при 80 К, точка Кюри, температура перехода металл-полупроводник при различной напряженности электрического поля

| Состав | $\sigma$ , Гс · см <sup>3</sup> · Г <sup>-1</sup> | $T_C$ , К | $T_{ms}$ , К   |                 |
|--------|---------------------------------------------------|-----------|----------------|-----------------|
|        |                                                   |           | $E = 9.2$ В/см | $E = 14.0$ В/см |
| I      | 70.9                                              | 232       | 132            | 119             |
| II     | 74.2                                              | 263       | 183            | 170             |
| III    | 75.6                                              | 267       | -              | -               |
| IV     | 41.3                                              | 178       | -              | -               |

Данные, представленные на рис. 3 демонстрируют эволюцию ВАХ (Fe, Sc)-замещенного манганита с повышением температуры. Ниже 140 К отрицательное дифференциальное сопротивление ( $R_d$ ) не наблюдается, затем появляются участки с  $R_d < 0$ ,  $|R_d|$  постепенно снижается, а при температуре выше 200 К отрицательное дифференциальное сопротивление снова не проявляется.

Вольтамперная характеристика (Ni, Ge)-содержащего манганита (рис. 4) имеет два S-образных участка при 260 К (область полупроводникового типа проводимости,  $T > T_{ms}$ ). При  $T \leq 140$  К (область металлического типа проводимости,  $T < T_{ms}$ ) ВАХ близки к линейным.

Форма вольт-амперной характеристики (Zn, Ge)-замещенного манганита (имеющего металлический тип проводимости) при 260 К ярко демонстрирует

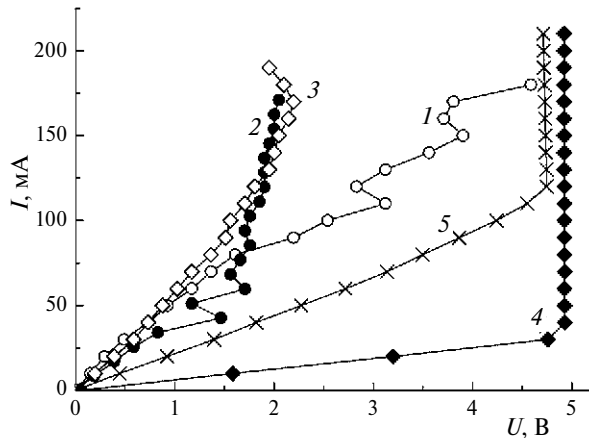


**Рис. 3.** ВАХ (Fe, Sc)-замещенного манганита при различных температурах: 1—130 К; 2—140 К; 3—160 К; 4—180 К; 5—200 К; 6—240 К.

множественные участки S-типа (рис. 4). Этот же образец при температуре 200 К также проявляет отрицательное дифференциальное сопротивление в области напряжений около 2 В. При низких температурах (110—140 К) ВАХ не имеют участков с  $R_d < 0$ .

(Mg, Ge)-содержащий манганит, имеющий полупроводниковый тип проводимости и относительно высокое сопротивление, проявляет интересные ВАХ с точками, вблизи которых производная  $dI/dV$  стремится к бесконечности (рис. 4). В диапазоне 190—280 К и относительно высоких напряжениях наблюдается свойство стабилизации напряжения, т. е. на ВАХ наблюдается резкий рост тока при почти постоянном напряжении. При этом вид зависимости тока от напряжения практически не зависит от температуры (меняются только количественные параметры). Напряжение стабилизации уменьшается с увеличением температуры (рис. 4).

Аналогичные вольтамперные характеристики наблюдались [17] в La-Sa манганите. Появление такого



**Рис. 4.** ВАХ манганитов, содержащих (Ni, Ge) — 1; (Zn, Ge) — 2, 3; (Mg, Ge) — 4, 5 при различных температурах: 1—260 К; 2—200 К; 3—260 К; 4—200 К; 5—240 К.

вида ВАХ, согласно [16, 17], скорее всего, связано со скачками ионов кислорода (или вакансий) в области туннельных контактов металл-полупроводник. Важную роль в этих процессах играют анионные вакансии. Возможно, в (Mg, Ge)-содержащих образцах проявлению этого эффекта способствуют малый размер зерен и специфическое строение межзеренных границ, а также возможная гибридизация  $d$ -уровней марганца и  $p$ -уровней магния, как это имеет место при взаимодействии марганца с кислородом [28].

Вольт-амперные характеристики с  $S$ -образными участками в полупроводниковой области (Fe, Sc)- и (Ni, Ge)-замещенных манганитов являются возможным проявлением внутреннего саморазогрева. Не исключен также эффект образования металлических ферромагнитных каналов.

Сложнее обстоит дело с формированием отрицательного дифференциального сопротивления  $S$ -типа в (Zn, Ge)-содержащем манганите, имеющем металлический тип проводимости в исследованном интервале температур. В данном случае можно говорить о связи этого эффекта с примесным фазовым расслоением, при котором в матричной ферромагнитной металлической фазе присутствуют включения антиферромагнитной диэлектрической фазы. Вблизи таких микронеоднородностей может происходить локальный перегрев манганита протекающим током [21], приводящий к разрушению диэлектрической фазы. В результате сопротивление образца должно уменьшиться.

Для интерпретации полученных результатов важно учитывать, что одновременное присутствие двухвалентных и четырехвалентных катионов вносит вклад в неоднородное состояние манганитов [29, 30]. Возникновение микронеоднородностей различной конфигурации и проводимости обусловлено ассоциацией разновалентных ионов и дефектов нестехиометрии. Этот эффект наиболее выражен в манганитах, содержащих ионы  $Zn^{2+}$ , в которых могут присутствовать модулированные структуры [30].

Наличие нескольких  $S$ -образных участков ВАХ в (Zn, Ge)- и (Ni, Ge)-замещенных манганитах может быть связано с существованием микронеоднородностей с разными электрическими параметрами.

Изовалентные заместители  $Fe^{3+}$ ,  $Sc^{3+}$  не вызывают образования микронеоднородностей и множественных участков с отрицательным дифференциальным сопротивлением на вольтамперных характеристиках.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы свойства лантан-стронциевых манганитов с замещением марганца комбинацией трехвалентных ионов ( $Fe^{3+}$ ,  $Sc^{3+}$ ) и различными сочетаниями двухвалентных с четырехвалентными ионами ( $Ni^{2+}$ ,  $Ge^{4+}$ ;  $Zn^{2+}$ ,  $Ge^{4+}$ ;  $Mg^{2+}$ ,  $Ge^{4+}$ ) в интервале температур 110–290 К.

Все синтезированные манганиты имеют ромбоэдрическую структуру. (Mg, Ge)-содержащий манганит имеет самые низкие значения магнитных параметров, относительно высокое удельное сопротивление и отличающийся вид ВАХ.

Получены образцы, обладающие ВАХ с несколькими участками отрицательного дифференциального сопротивления  $S$ -типа. Формирование таких характеристик связано с саморазогревом и наличием микронеоднородностей различной конфигурации и проводимости, возникновению которых способствует одновременное присутствие разновалентных ионов, замещающих марганец.

Переключательные характеристики наиболее ярко проявляются в манганите, содержащем ионы  $Zn^{2+}(3d^{10})$ , которые имеют наибольший радиус среди используемых здесь двухвалентных заместителей марганца, в сочетании с четырехвалентным ионом  $Ge^{4+}(3d^{10})$ .

(Mg, Ge)-замещенные образцы при температурах 190–280 К проявляют эффект стабилизации напряжения. Эти образцы имеют наименьший диаметр зерен и наибольшую пористость по сравнению с манганитами других составов, что, вероятно, способствует перемещению ионов кислорода в переходном слое «металл-манганит» и между кристаллитами. Возможная гибридизация  $d$ -уровней марганца и  $p$ -уровней магния также может способствовать рассматриваемому процессу.

Полученные результаты важны для понимания природы нелинейных явлений в сложных оксидных системах типа манганитов, а также для получения необходимых свойств манганитов как перспективных функциональных материалов для магнитной и спиновой электроники.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-22-10005).

Авторы выражают благодарность А. А. Панкратову за получение СЭМ-микрофотографий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРА

1. Abdel-Latif I.A. // J. Physics. 2012. V. 1. No. 3. P. 15.
2. Бебенин Н.Г., Зайнуллина Р.И., Устинов В.В. // УФН. 2018. Т. 188. № 8. С. 801; Bebenin N.G., Zainullina R.I., Ustinov V.V. // Phys. Usp. 2018. V. 61. No. 8. P. 719.
3. Россоленко А.Н., Тулина Н.А., Шмытько И.М. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87. № 4. С. 541; Rossolenko A.N., Tulina N.A., Shmytko I.M. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87. No. 4. P. 468.
4. Pergament A., Stefanovich G., Malinenko V., Velichko A. // Adv. Cond. Matter Phys. 2015. V. 15. Art. No. 654840.
5. Guha A., Khare N., Raychaudhuri A.K., Rao C.N.R. // Phys. Rev. B. 2000. V. 62. Art. No. R11941(R).

6. Камиллов И.К., Алиев К.М., Ибрагимов Х.О., Абакарова Я.С. // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т. 78. № 8. С. 957; Kamilov I.K., Aliev K.M., Ibragimov Kh.O., Abakarova N.S. // JETP Lett. 2003. V. 78. No. 8. P. 485.
7. Karpasyuk V.K., Badelin A.G., Smirnov A.M. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2010. V. 200. Art. No. 052026.
8. Belogolovskii M.A. // Cent. Eur. J. Phys. 2009. V. 7. No. 2. P. 304.
9. Bagdzevicius S., Maas K., Boudard M., Burriel M. // J. Electroceram. 2017. V. 39. P. 157.
10. Сизов В.Е., Шайхулов Т.А. // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87. № 10. С. 1507; Sizov V.E., Shaikhulov T.A. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87. No. 10. P. 1540.
11. Баделин А.Г., Державин И.М., Карпасюк В.К., Эстемирова С.Х. // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87. № 3. С. 396; Badelin A.G., Derzhavin I.M., Karpasyuk V.K., Estemirova S. Kh. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87. No. 3. P. 343.
12. Волков Д.В., Назаренко А.В., Шилкина Л.А., Вербенко И.А. // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87. № 9. С. 1248; Volkov D.V., Nazarenko A.V., Shilkina L.A., Verbenko I.A. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87. No. 9. P. 1288.
13. Гамзатов А.Г., Гудин С.А., Арсланов Т.Р. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2022. Т. 115. № 3—4 (2). С. 218; Gamzatov A.G., Arslanov T.R., Gudin S.A et al. // JETP Lett. 2022. V. 115. No. 4. P. 190.
14. Fisher B., Genossar J., Patlagan L., Reisner G.M. // EPJ Web Conf. 2013. V. 40. Art. No. 15009.
15. Baikarov A., Wang Y.Q., Shen B. et al. // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 83. P. 957.
16. Nian Y.B., Strozier J., Wu N.J. et al. // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 98. Art. No. 146403.
17. D'yachenko O.I., Tarenkov V.Yu., Boliasova O.O., Krivoruchko V.M. // Metallofiz. Noveishie Tekhnol. 2018. V. 40(3). P. 291.
18. Shaykhutdinov K.A., Popkov S.I., Balaev D.A. et al. // Phys. B. Cond. Matter. 2010. V. 405(24). P. 4961.
19. Tsendin K. // Phys. Stat. Solidi B. 2009. V. 246. P. 1831.
20. Babushkina N.A., Belova L.M., Khomskii D.I. et al. // Phys. Rev. B. 1999. V. 59. Art. No. 6994.
21. Tulina N.A., Uspenskaya L.S., Sirotkin V.V. et al. // Phys. C. 2006. V. 444. P. 19.
22. Povzner A.A., Volkov A.G. // J. Magn. Magn. Mater. 2017. V. 432. P. 466.
23. Böttger H., Bryksin V.V. Hopping conduction in solids. Berlin: Akademie Verlag, 1985. 169 p.
24. Shannon R.D. // Acta Crystallogr. A. 1976. V. 32. P. 751.
25. Balagurov A.M., Bobrikov I.A., Pomyakushin V. Yu. et al. // JETP Lett. 2005. V. 82. No. 9. P. 594.
26. Barandiaran J.M., Greneche J.M., Hernandez T. et al. // J. Phys. Cond. Matter. 2002. V. 4. No. 47. P. 12563.
27. V'yunov O.I., Belous A.G., Tovstolytkin A.I., Yanchevskii O.Z. // J. Eur. Ceram. Soc. 2007. V. 27. No. 13—15. P. 3919.
28. Pickett W., Singh D. // Europhys. Lett. 1995. V. 32. P. 759.
29. Karpasyuk V.K., Badelin A.G., Derzhavin I.M. et al. // Int. J. Appl. Eng. Res. 2015. V. 10. No. 21. Art. No. 42746.
30. Karpasyuk V.K., Badelin A.G., Derzhavin I.M. et al. // J. Magn. Magn. Mater. 2019. V. 476. P. 371.

## Regularities and mechanisms of composition influence on magnetic and nonlinear electrical characteristics of La-Sr manganites with combined substitution for manganese

V. K. Karpasyuk<sup>1</sup>, A. G. Badelin<sup>1</sup>, I. M. Derzhavin<sup>1</sup>\*, S. Kh. Estemirova<sup>1,2</sup>, D. I. Merkulov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Astrakhan State University, Astrakhan, 414000 Russia

<sup>2</sup>Institute for Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, 620000 Russia

\*e-mail: derzh\_igor@mail.ru

The data are shown on magnetic properties and peculiarities of current-voltage characteristics of manganites with substitution of ( $\text{Fe}^{3+}_{0.5}\text{Sc}^{3+}_{0.5}$ ), ( $\text{Ni}^{2+}_{0.5}\text{Ge}^{4+}_{0.5}$ ), ( $\text{Zn}^{2+}_{0.5}\text{Ge}^{4+}_{0.5}$ ), ( $\text{Mg}^{2+}_{0.5}\text{Ge}^{4+}_{0.5}$ ) ions pairs for manganese in La-Sr system. The samples containing (Fe, Sc), (Ni, Ge) and (Zn, Ge) have S-shaped sections of negative differential resistance, and (Mg, Ge)-substituted manganite exhibits the property of voltage stabilization.

**Keywords:** electronic configurations, charges and radii of ions, microstructure, inhomogeneities, temperature range, magnetization, Curie point, metal-semiconductor transition, current-voltage characteristic types