

УДК 537.622: 544.015.4

Применение численного моделирования в исследовании мемристивных структур на основе оксидов и халькогенидов*

В. В. Сироткин^{1,§}, Н. А. Тулина²

¹ *Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН,
ул. Академика Осипьяна, д. 6, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия*

² *Институт физики твердого тела РАН,
ул. Академика Осипьяна, д. 2, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия*

Аннотация. Рассмотрены модели, которые описывают биполярные резистивные переключения в планарных микроструктурах, созданных на основе оксидных соединений ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$, $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4-y}$) и селенида висмута. Исследованы мемристивные гетероструктуры металл—изолятор—металл планарного типа, в которых микроразмер формируется электродом, диаметр которого значительно меньше общего размера структуры (это могут быть и микроконтакты шарвинского типа, и пленочные электрические электроды). Другой важной особенностью этих гетероструктур является наличие поверхностного слоя толщиной несколько десятков нанометров с удельной проводимостью, значительно пониженной относительно объемной. Изменение резистивных свойств подобных гетероструктур обусловлено формированием или разрушением проводящего канала через указанный слой. Численное моделирование показало, что при этом на биполярные резистивные переключения значительное влияние оказывает топология распределения электрического поля. Предложена модель «критического поля» для описания экспериментально наблюдаемых мемристивных эффектов в исследуемых гетероструктурах. В этой модели предполагается, что изменение удельной проводимости происходит в тех частях поверхностного слоя, где напряженность электрического поля превышает некоторое критическое значение. Модель «критического поля» основана на численном расчете распределения электрического потенциала по распределению удельной проводимости в структуре. Кроме того, рассмотрена модель позволяющая проанализировать влияние электродиффузии ионов кислорода на резистивные переключения в гетероструктурах на основе $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$. При численной реализации моделей использовалось сочетание интегро—разностной аппроксимации дифференциальных уравнений, многосеточного подхода для локализации неоднородностей физических характеристик, итерационного метода декомпозиции и составных адаптивных сеток. Это позволило с необходимой точностью отслеживать исследуемые процессы. Приведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными.

Ключевые слова: биполярные резистивные переключения, мемристоры, высокотемпературные сверхпроводники, селенид висмута, электродиффузия, математическое моделирование, численные алгоритмы

Введение

Биполярные резистивные переключения (БРП) в гетерогенных структурах металл—изолятор—металл (МИМ) различных соединений рассматриваются и реализуются на практике в качестве элементов памяти нового поколения (мемристоров). Мемристор можно определить как пассивный элемент электрической цепи, сопротивление которого зависит от прошедшего через него заряда. После отключения напряжения в цепи мемристор не изменяет свое состояние, т. е. «запоминает» последнее значение сопротивления (метастабильные высоко-резистивное (ВРС) или низкорезистивное (НРС) состояния) [1, 2]. Дальнейшие исследования показали, что свойства мемристора дают возможность применять его и в качестве переключателя, элемента памяти ReRAM [3—5]. Эффект БРП наблюдается

в широком спектре МИМ структур, состоящим как из простых оксидов, халькогенидов, так и сложных соединений [6]. В работах [7—17] было показано, как, используя функциональные свойства высокотемпературных сверхпроводников и селенида висмута, можно формировать мемристивные гетероструктуры. В этих работах также с помощью численного моделирования было изучено влияние неоднородного распределения электрического поля в интерфейсе

Сироткин Вадим Владимирович^{1,§} — канд. физ.—мат. наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: sirotkin@iptm.ru; **Тулина Наталья Алексеевна**² — канд. физ.—мат. наук, старший научный сотрудник, e-mail: tulina@issp.ac.ru

§ Автор для переписки

* Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на I-й международной конференции «Математическое моделирование в материаловедении электронных компонентов», Москва, 21—23 октября 2019 г.

гетероконтактов на мемристивные свойства полученных структур.

В данной работе дается обзор математических моделей, разработанных для численного исследования БПП в гетероструктурах, построенных на основе высокотемпературных сверхпроводников $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4-y}$ (NCCO), $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ (BSCCO), и селениде висмута (Bi_2Se_3). Приводятся как результаты моделирования, так и их сравнение с экспериментальными данными.

Особенности моделируемых процессов

Все рассматриваемые в данной работе гетероструктуры являются планарными. Такие структуры представляют собой М(верхний)—И—М(нижний) переходы, в которых нано- или микроразмер формируется электродом (как правило, верхним), имеющим диаметр значительно меньше, чем общие размеры структуры (далее этот электрод обозначается как «контакт 1»). Другой важной особенностью исследуемых гетероструктур является наличие поверхностного слоя толщиной несколько десятков нанометров с удельной проводимостью, значительно пониженной относительно объемной. Изменение резистивных свойств подобных гетероструктур обуславливается формированием или разрушением проводящего канала через указанный слой. Предполагается, что существенную роль при этом играет электродиффузия ионов либо кислорода, либо селена. Наиболее интенсивно этот процесс протекает в зоне, которая расположена в окрестностях края контакта 1 и характеризуется сильным локальным повышением напряженности электрического поля. Таким образом, при моделировании БПП в рассматриваемых гетероструктурах, необходимо учитывать существование трех масштабов: вся гетероструктура (миллиметры – сотни микрон), поверхностный слой + контакт 1 (микроны — сотни нанометров), поверхностный слой + край контакта 1 (десятки нанометров). Далее представлены математические модели, при численной реализации которых проблема многомасштабности решается сочетанием интегро-разностной аппроксимации дифференциальных уравнений [18], многосеточного подхода для локализации неоднородностей [19], специального итерационного метода декомпозиции [20] и составных адаптивных сеток. Использование перечисленных подходов дало возможность создать вычислительно-эффективные компьютерные программы, позволяющие с необходимой точностью отслеживать исследуемые процессы.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1, а показана схема гетероструктуры на основе эпитаксиальных пленок NCCO. В этом случае

поверхностный слой (30 нм) состоит из дефектного оксида $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{O}_y$ [11]. При подаче на контакты такой структуры синусоидального сигнала наблюдаются ВАХ, на которых фиксируются БПП (см. рис. 1, б).

В работе [9] для описания подобных БПП была предложена модель «критического поля» (МКП), в которой, без указания конкретного механизма образования проводящего канала, полагается, что изменение удельной проводимости происходит в тех частях поверхностного слоя, где напряженность электрического поля превышает некоторое критическое значение. МКП основана на численном расчете по распределению в структуре удельной проводимости σ распределения электрического потенциала ϕ :

$$\nabla[\sigma(r, z)\nabla\phi(r, z)] = 0. \quad (1)$$

Результаты расчетов по МКП для NCCO гетероструктуры изображены на рис. 2. Видно, что переход гетероструктуры из ВРС (рис. 2, а) в НРС (рис. 2, б) связан с проращиванием проводящего канала от края контакта 1 к слою NCCO (рис. 2, в). Разрушение канала при смене полярности сигнала происходит

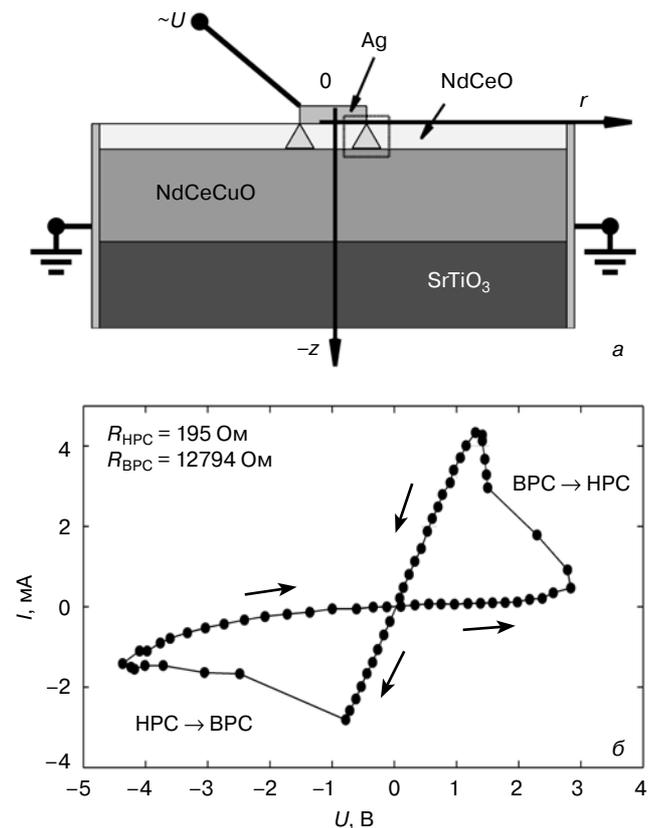


Рис. 1. Схема гетероструктуры на основе NCCO (а) и пример экспериментальной ВАХ для NCCO гетероструктуры при подаче на ее контакты синусоидального сигнала (б) [11]

Fig. 1. Schematic of a heterostructure based on NCCO (a) and an example of an experimental I-V curve for an NCCO heterostructure when a sinusoidal signal is applied to its contacts (b) [11]

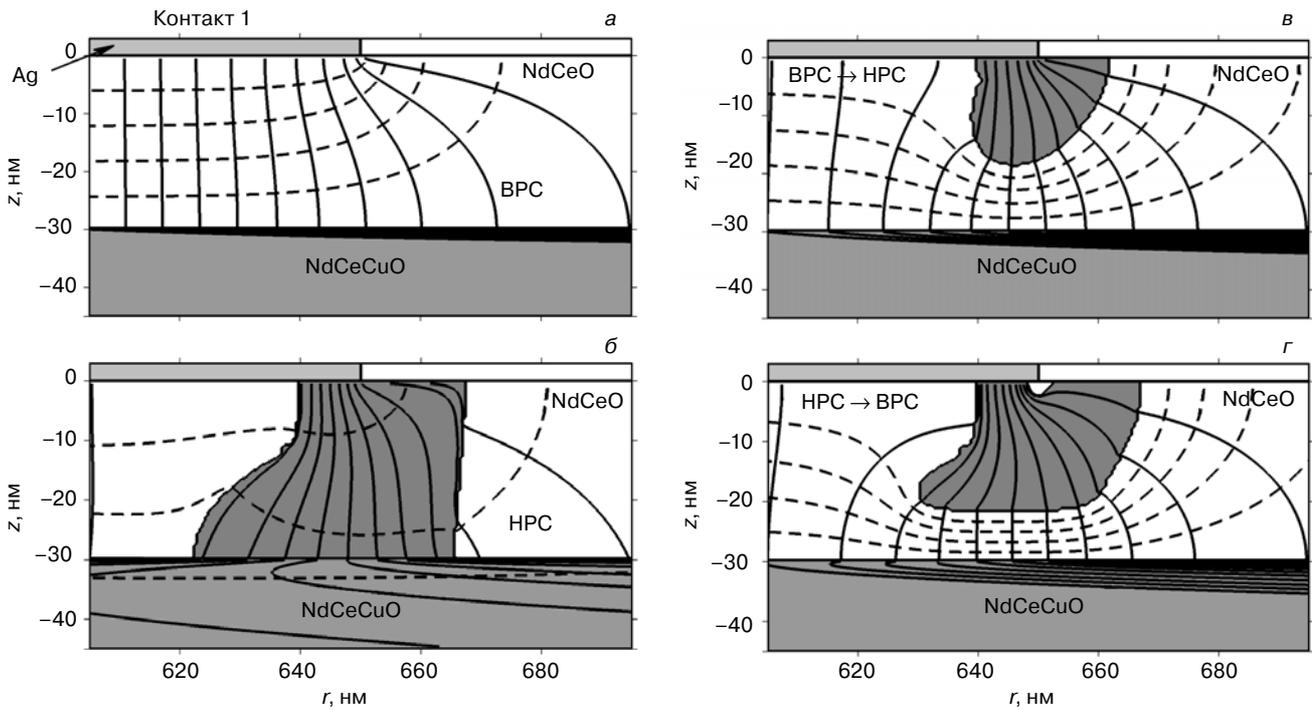


Рис. 2. Результаты расчетов по МКП для NCCO гетероструктуры с параметрами, соответствующими рис. 1, б. На рисунках проведены эквипотенциалы (пунктирные кривые) и линии тока (сплошные)
 Fig. 2. Results of calculations using the «critical field» model for an NCCO heterostructure with parameters corresponding to Fig. 1, б. The figures show equipotentials (dashed curves) and streamlines (solid curves)

в обратном направлении (рис. 2, г). Полученные при моделировании данные о форме и размерах проводящего канала хорошо соответствуют экспериментальным оценкам [11].

Для описания БПИ в BSCCO гетероструктуре (рис. 3) использовалась модель, основанная на самоогласованном решении уравнения Пуассона (1) и диффузионно-дрейфового уравнения для концентрации «подвижных» ионов кислорода N

$$N_t(r, z, t) = \nabla [DVN(r, z, t)] - \left(\frac{q}{kT}\right) \nabla [DN(r, z, t) \nabla \phi(r, z, t)], \quad (2)$$

D — коэффициент диффузии [12]. В модели предполагается, что при приложении к контакту положительного потенциала уменьшение удельного сопротивления в данной точке поверхностного слоя происходит при превышении некоторой концентрации N_a и при наличии поперечного электрического поля напряженностью $|E_a|$ и более. Считается, что сопротивление изменяется пропорционально величине «избыточной» концентрации n . Исходно эта концентрация равна 0, что соответствует ВРС. При ее максимальном значении n_f реализуется НРС. Накопление n происходит за счет избытка $N - N_a$. При отрицательном потенциале условия роста локального удельного сопротивления следующие: уменьшение концентрации до значения менее N_a и наличие поперечного электрического поля напря-

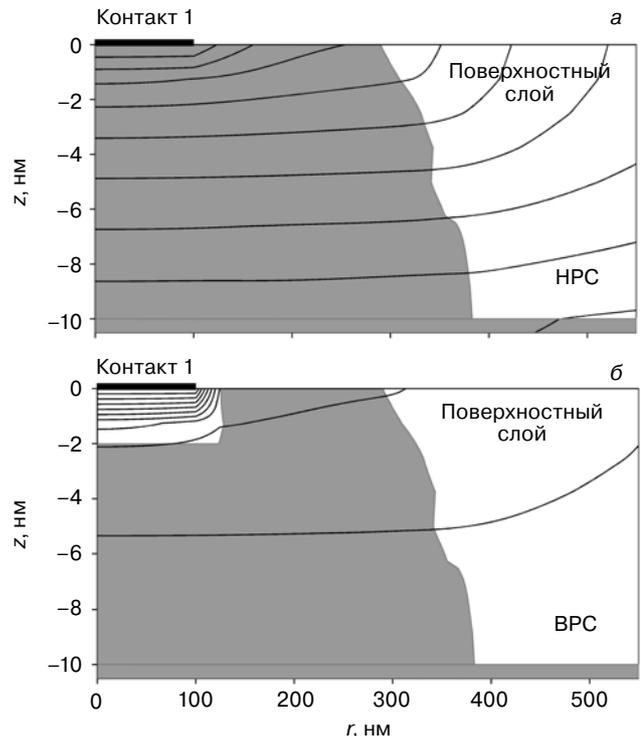


Рис. 3. Результаты моделирования для BSCCO гетероструктуры. Гетероструктура показана в НРС (а) и ВРС (б). На рисунках проведены эквипотенциалы. Серым цветом отмечен проводящий канал, возникший после электроформинга
 Fig. 3. Simulation results for the BSCCO heterostructure. The heterostructure is shown in LRS (a) and HRS (б). Equipotentials are plotted in the figures. The conductive channel after electroforming is marked in gray

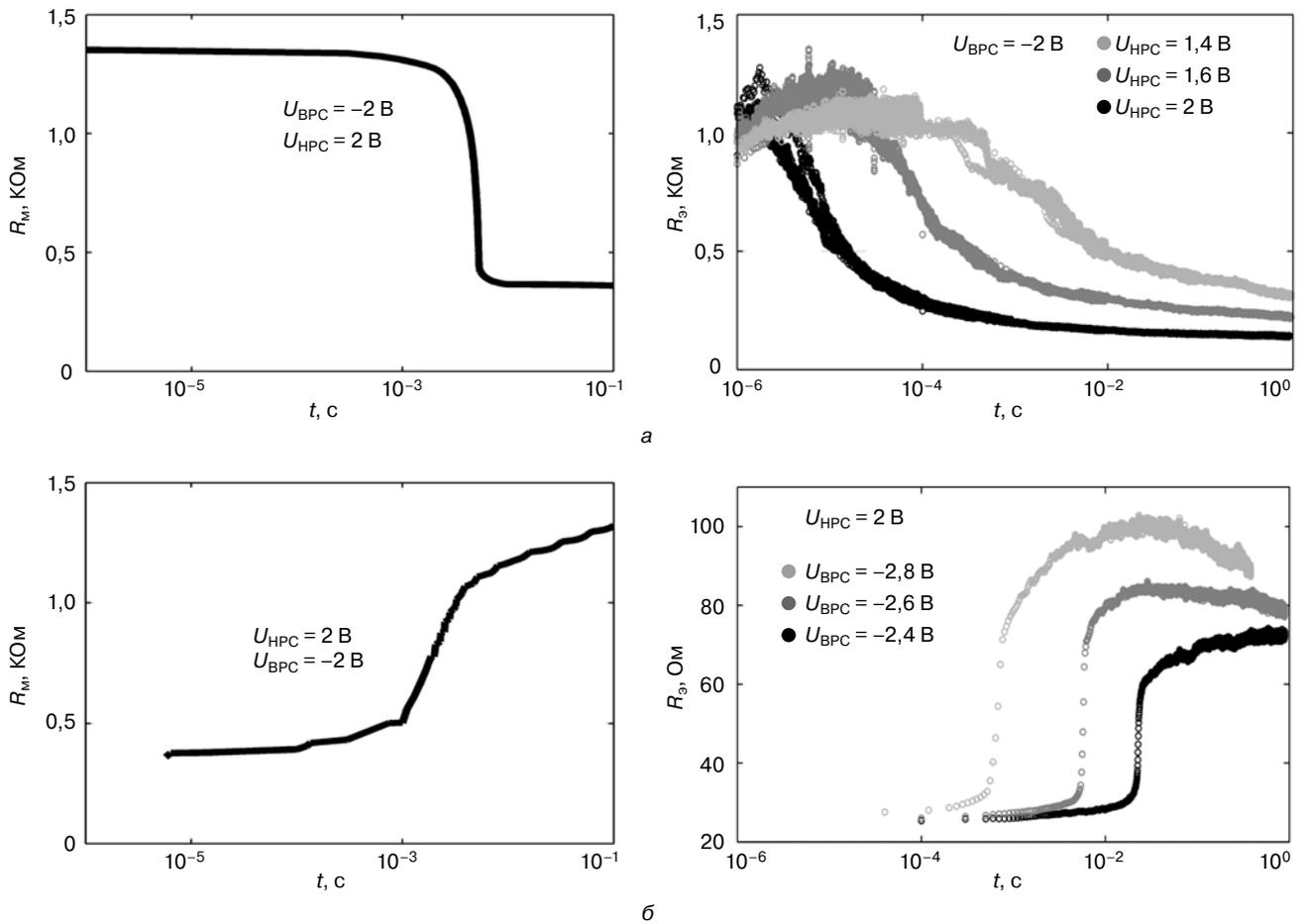


Рис. 4. Временные зависимости перехода BSCCO гетероструктуры: а — из ВРС в НРС; б — из НРС в ВРС.

Расчетные зависимости (слева), получены после трехкратного переключения (с промежутками 0,1 с) напряжения на контакте ± 2 В. Экспериментальные переходные зависимости (справа) при разных соотношениях переключающих напряжений [12]

Fig. 4. Time dependences of the BSCCO transition of the heterostructure: (a) from LRS to LDC, (b) from LRS to HRS.

Calculated dependences (left), obtained after triple switching (with intervals of 0.1 s) voltage at the contact ± 2 V. Experimental transient dependences (right) for different ratios of switching voltages [12]

женностью $|E_a|$ и более. В этом случае n уменьшается на величину $N_a - N$, пока не достигнет 0.

Модель (1), (2) позволила рассчитать временные зависимости перехода BSCCO гетероструктуры из ВРС в НРС и обратно (рис. 4). Из анализа численных результатов следует, что время переключения существенно зависит как от геометрических размеров структуры, анизотропии ее резистивных свойств, так и от величины приложенного напряжения, что подтверждается экспериментальными исследованиями [12]. Кроме того, моделирование показало, что значительные задержки на переходных характеристиках могут быть связаны с формированием вокруг контакта протяженной области, в которой концентрация «подвижных» ионов кислорода имеет максимально возможное значение. В данном случае скорость переключения задается медленным преимущественно диффузионным переносом ионов на периферии этой области, а не их быстрым дрейфом в зоне контакта.

Большинство соединений, в которых наблюдается эффект резистивных переключений — оксидные соединения. Поэтому изучение БРП в гетероструктурах на основе селенида висмута интересно, прежде всего, с точки зрения наблюдения БРП в неоксидных соединениях. Bi_2Se_3 является узкозонным полупроводником, селеновые вакансии и легирование по катиону меняют в нем число носителей в довольно широком диапазоне, при этом тип носителей изменяется от электронного к дырочному. В математической модели для этого типа мемристивных структур было учтено служебное свойство Bi_2Se_3 — легко переходить из монокристаллического в многофазное состояние при небольших перегревах.

В Bi_2Se_3 гетероструктуре (рис. 5, а) поверхностный слой формирует дефектная фаза, возникающая вокруг контакта 1 при предварительном электроформинге. При моделировании этой гетероструктуры, основанном на совместном решении уравне-

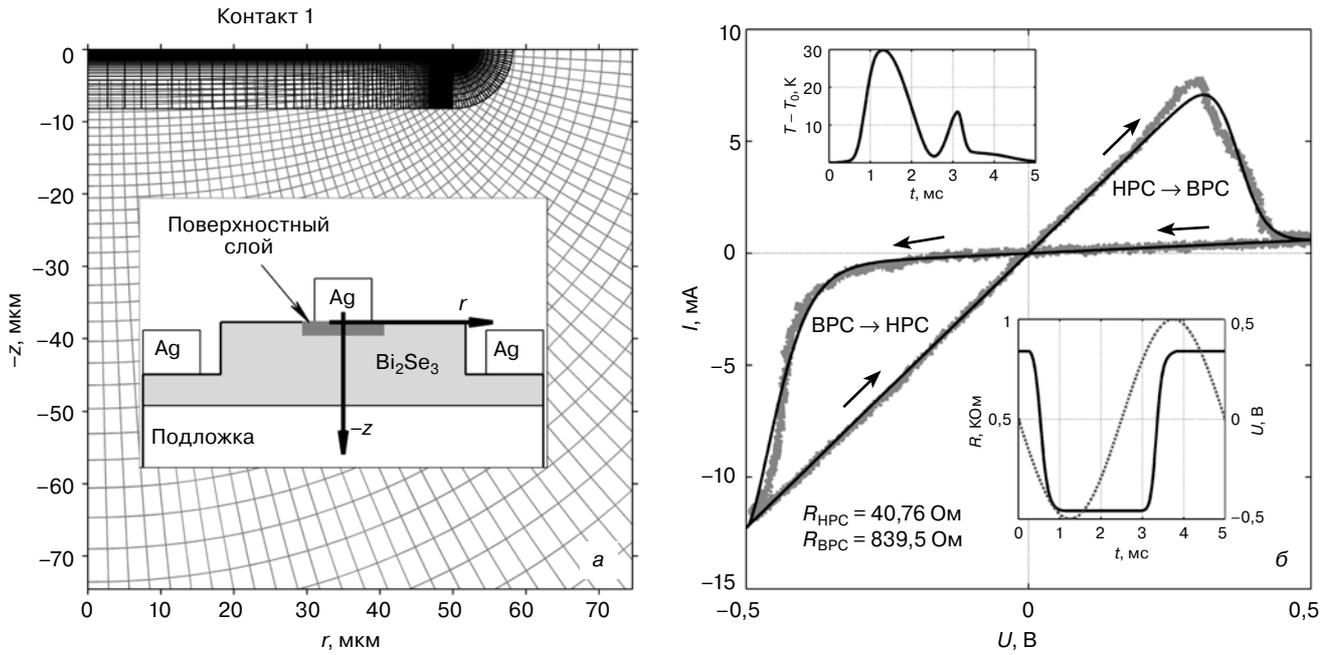


Рис. 5. Схема Bi_2Se_3 гетероструктуры (врезка) и фрагмент составных адаптивных сеток, используемых при моделировании, (а), а также экспериментальная [13] (серая линия) и расчетная (черная линия) ВАХ (б). Врезки (рис. 5, б) — рассчитанные по модели (1), (3) изменение во времени максимального перегрева (верхняя) и сопротивления структуры (нижняя)

Fig. 5. Schematic diagram of Bi_2Se_3 heterostructure (inset) and a fragment of composite adaptive grids used in modeling (a), as well as experimental [13] (gray) and calculated (black) I-V curve (b). Insets (Fig. 5, б) is calculated according to the model (1), (3) time variation of the maximum superheat (upper) and the resistance of the structure (bottom)

ния (1) и уравнения теплопроводности

$$\begin{aligned} \nabla[\lambda(r,z,T)\nabla T(r,z,t)] = \\ = c_p(T)T_t(r,z,t) - \sigma(r,z,T)[\nabla\phi(r,z,t)]^2, \end{aligned} \quad (3)$$

здесь T — температура, λ — удельная теплопроводность, c_p — удельная теплоемкость, исследовалось влияние локального перегрева и частоты переключающего напряжения на НРС и ВРС гетероструктуры [13].

При расчетах предполагалось, что изначально в окрестностях контакта 1 расположен слой с удельной проводимостью, пониженной относительно объемной σ_b . Свойства этого слоя задавались следующим образом

$$\begin{aligned} \sigma(P,T,s) = \frac{\sigma_b(P,T)}{C(s)}, \\ C(s) = \begin{cases} C_{\max} + (1 - C_{\max})\frac{s}{z_L}, & s \leq z_L, \\ 1, & s > z_L, \end{cases} \end{aligned}$$

где s — кратчайшее расстояние от точки P до верхнего контакта; C_{\max} — понижающий коэффициент. Скорость разрушения низкопроводящего слоя выбиралась в виде экспоненты, спадающей со временем, а скорость восстановления — возрастающей.

Учет локального перегрева позволил численными методами описать ВАХ с БРП при физических параметрах, совпадающих с экспериментальными

(рис. 5, б). При этом было обнаружено, что по мере повышения частоты подгоночные параметры модели, обеспечивающие совпадение расчетных данных с экспериментом, заметно меняются. Это указывает на то, что при моделировании необходимо учитывать влияние переменного электрического поля на свойства материала [13].

Заключение

Проведен обзор математических моделей, разработанных для изучения биполярных резистивных переключений в планарных гетероструктурах, выполненных на основе высокотемпературных сверхпроводников $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4-y}$ и $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$, а также селениде висмута. Продемонстрировано, что предложенные модели позволяют объяснять некоторые особенности исследуемых процессов, а полученные с их помощью результаты, хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Библиографический список

1. Strukov D. B., Snider G. S., Stewart D. R., Williams R. S. The missing memristor found // Nature. 2008. V. 453. P. 80—83. DOI: 10.1038/nature06932
2. Ventra M. D., Pershin Yu. V., Chua L. O. Circuit elements with memory: memristors, memcapacitors, and meminductors // Proc. IEEE. 2009. V. 97, Iss. 10. P. 1717—1724. DOI: 10.1109/JPROC.2009.2021077
3. Jeong D. S., Thomas R., Katiyar R. S., Scott J. F., Kohlstedt H., Petraru A., Hwang Ch. S. Emerging memories: resistive switching mechanisms and current status // Rep. Prog. Phys. 2012. V. 75, N 7. Art. No. 076502. DOI: 10.1088/0034-4885/75/7/076502

4. Yang J. J., Strukov D. B., Stewart D. R. Memristive devices for computing // *Nature Nanotech.* 2013. V. 8. P. 13—24. DOI: 10.1038/nnano.2012.240
5. Петров А., Алексеева Л., Иванов А., Лучинин В., Романов А., Чиков Т., Набатма Т. На пути к нейроморфной мемристорной компьютерной платформе // *Наноиндустрия.* 2016. Вып. 1. С. 94—109. DOI: 10.22184/1993-8578.2016.63.1.94.109
6. Pershin Yu. V., Ventra M. D. Memory effects in complex materials and nanoscale systems // *Adv. Phys.* 2011. V. 60. P. 145—227. DOI: 10.1080/00018732.2010.544961
7. Tulina N. A., Sirotkin V. V. Electron instability in doped-manganites-based heterojunctions // *Physica C: Superconductivity.* 2004. V. 400, Iss. 3–4. P. 105—110. DOI: 10.1016/j.physc.2003.07.002
8. Tulina N. A., Borisenko I. Yu., Sirotkin V. V. Reproducible resistive switching effect for memory applications in heterocontacts based on strongly correlated electron systems // *Phys. Lett. A.* 2008. V. 372, Iss. 44. P. 6681—6686. DOI: 10.1016/j.physleta.2008.09.015
9. Tulina N. A., Borisenko I. Yu., Sirotkin V. V. Bipolar resistive switchings in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ // *Solid State Communications.* 2013. V. 170. P. 48—52. DOI: 10.1016/j.ssc.2013.07.023
10. Tulina N. A., Rossolenko A. N., Shmytko I. M., Kolesnikov N. N., Borisenko D. N., Bozhko S. I., Ionov A. M. Rectification and resistive switching in mesoscopic heterostructures based on Bi_2Se_3 // *Materials Letters.* 2015. V. 158. P. 403—405. DOI: 10.1016/j.matlet.2015.06.060
11. Tulina N. A., Rossolenko A. N., Ivanov A. A., Sirotkin V. V., Shmytko I. M., Borisenko I. Yu., Ionov A. M. $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4-y}/\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{O}_y$ boundary and resistive switchings in mesoscopic structures on base of epitaxial $\text{Nd}_{1.86}\text{Ce}_{0.14}\text{CuO}_{4-y}$ films // *Physica C: Superconductivity and its Applications.* 2016. V. 527. P. 41—45. DOI: 10.1016/j.physc.2016.05.015
12. Сироткин В. В., Тулина Н. А., Россоленко А. Н., Борисенко И. Ю. Исследование методом численного моделирования влияния анизотропии на резистивные переключения в гетероструктурах на основе оксидных соединений // *Известия РАН, сер. Физическая.* 2016. Т. 80, № 5. С. 551—553. DOI: 10.7868/S0367676516050197
13. Тулина Н. А., Россоленко А. Н., Шмытько И. М., Колесников Н. Н., Борисенко Д. Н., Сироткин В. В., Борисенко И. Ю. Частотные свойства гетероструктур на основе селенида висмута в эффектах резистивных переключений. Эксперимент, численное моделирование // *Известия РАН, сер. Физическая.* 2016. Т. 80, № 6. С. 741—743. DOI: 10.7868/S0367676516060387
14. Tulina N. A. Memristor properties of high temperature superconductors. URL: <https://arxiv.org/abs/1801.09428>
15. Tulina N. A., Rossolenko A. N., Shmytko I. M., Ivanov A. A., Sirotkin V. V., Borisenko I. Yu., Tulin V. A. Properties of percolation channels in planar memristive structures based on epitaxial films of a $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ high temperature superconductor // *Supercond. Sci. Technol.* 2018. V. 32, N 1. Art. No. 015003. DOI: 10.1088/1361-6668/aae966
16. Тулина Н. А., Россоленко А. Н., Шмытько И. М., Колесников Н. Н., Борисенко Д. Н., Сироткин В. В., Борисенко И. Ю., Тулин В. А. Исследование динамических эффектов в мемристорных структурах на основе селенида висмута. Нужен ли мемристор «хвост шаттла» // *Известия РАН, сер. Физическая.* 2019. Т. 83, № 6. С. 813—817. DOI: 10.1134/S0367676519060358
17. Тулина Н. А., Россоленко А. Н., Шмытько И. М., Иванов А. А., Ионов А. М., Божко С. И., Сироткин В. В., Борисенко И. Ю., Тулин В. А. Функциональные свойства анизотропных перовскитных соединений в мемристорных структурах для применения в электронике // *Наноиндустрия.* 2019. N S. С. 237—240. DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.237.240; URL: http://www.nanoindustry.su/files/article_pdf/7/article_7591_5.pdf
18. Марчук Г. И. Методы вычислительной математики. М.: Наука, 1977. 456 с.
19. Trottenberg U., Oosterlee C. W., Schüller A. Multigrid. London: Acad. Press, 2001. 631 p.
20. Сироткин В. В. Высокоэффективный декомпозиционный алгоритм для моделирования тепловых режимов мощных транзисторов // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения.* 2016. Т. 16, № 3. С. 181—183.

Работа поддержана грантами РФФИ № 19–29–03011мк и № 19–29–03021мк.

Статья поступила в редакцию 26 декабря 2019 г.

Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering. 2019, vol. 22, no. 4, pp. 246—252. DOI: 10.17073/1609-3577-2019-4-246-252

Application of numerical simulation in investigation of memristor structures based on oxides and chalcogenides

V. V. Sirotkin^{1,§}, N. A. Tulina²

¹ *Institute of Microelectronics Technology and High Purity Materials of RAS, 6 Academician Ossipyan Str., Chernogolovka, Moscow Region 142432, Russia*

² *Institute of Solid State Physics of RAS, 2 Academician Ossipyan Str., Chernogolovka, Moscow Region 142432, Russia*

Abstract. Models that describe bipolar resistive switching in planar microstructures based on oxide compounds ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$, $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4-y}$) and bismuth selenide are considered. Metal–isolator–metal planar–type memristor heterostructures were investigated, in which the micro–size is formed by an electrode whose diameter is much smaller than the total size of the structure (it can be both Chervinsky–type microjunctions and film electric electrodes). Another important feature of these heterostructures is the presence of a surface layer several tens of nanometers thick with specific conductivity significantly reduced relative to volume. The change in the resistive properties of such heterostructures is caused by the formation or destruction of the conductive channel through the above–mentioned layer. Numerical simulation has shown that the bipolar resistive switching is significantly influenced by the electrical field distribution topology. A “critical field” model is

Information about authors:

Vadim V. Sirotkin^{1,§}: Cand. Sci. (Phys.–Math.), Leading Researcher (sirotkin@iptm.ru); **Nataliya A. Tulina**²: Cand. Sci. (Phys.–Math.), Senior Researcher (tulina@issp.ac.ru)

§ Corresponding author

proposed to describe experimentally observed memristor effects in investigated heterostructures. In this model it is assumed that the change in specific conductivity occurs in those parts of the surface layer where the electric field strength exceeds some critical value. The model of the “critical field” is based on the numerical calculation of the distribution of electrical potential on the distribution of specific conductivity in the structure. In addition, the model allowing to analyze the influence of electrodiffusion of oxygen ions on resistive switching in heterostructures based on $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ is considered. At numerical realization of the models a combination of the integro-differential approximation of the differential equations, the multi-grid approach for localization of heterogeneities of physical characteristics, the iterative decomposition method and composite adaptive meshes was used. It allowed tracking the processes under investigation with necessary accuracy. The comparison of simulation results with experimental data is presented.

Keywords: bipolar resistive switching, memristors, high-temperature superconductors, bismuth selenide, electrodiffusion, mathematical simulation, numerical algorithms

References

- Strukov D. B., Snider G. S., Stewart D. R., Williams R. S. The missing memristor found. *Nature*, 2008, vol. 453, pp. 80—83. DOI: 10.1038/nature06932
- Ventra M. D., Pershin Yu. V., Chua L. O. Circuit elements with memory: memristors, memcapacitors, and meminductors. *Proc. IEEE*, 2009, vol. 97, no. 10, pp. 1717—1724. DOI: 10.1109/JPROC.2009.2021077
- Jeong D. S., Thomas R., Katiyar R. S., Scott J. F., Kohlstedt H., Petraru A., Hwang Ch. S. Emerging memories: resistive switching mechanisms and current status. *Rep. Prog. Phys.*, 2012, vol. 75, no. 7, art. no. 076502. DOI: 10.1088/0034-4885/75/7/076502
- Yang J. J., Strukov D. B., Stewart D. R. Memristive devices for computing. *Nature Nanotech.*, 2013, vol. 8, pp. 13—24. DOI: 10.1038/nnano.2012.240
- Petrov A., Alekseeva L., Ivanov A., Luchinin V., Romanov A., Chikyov T., Nabatame T. On the way to a neuromorphic memristor computer platform. *Nanoindustry*, 2016, no. 1, pp. 94—109. DOI: 10.22184/1993-8578.2016.63.1.94.109
- Pershin Yu. V., Ventra M. D. Memory effects in complex materials and nanoscale systems. *Adv. Phys.*, 2011, vol. 60, pp. 145—227. DOI: 10.1080/00018732.2010.544961
- Tulina N. A., Sirotkin V. V. Electron instability in doped-manganites-based heterojunctions. *Physica C: Superconductivity*, 2004, vol. 400, no. 3–4, pp. 105—110. DOI: 10.1016/j.physc.2003.07.002
- Tulina N. A., Borisenko I. Yu., Sirotkin V. V. Reproducible resistive switching effect for memory applications in heterocontacts based on strongly correlated electron systems. *Phys. Lett. A*, 2008, vol. 372, no. 44, pp. 6681—6686. DOI: 10.1016/j.physleta.2008.09.015
- Tulina N. A., Borisenko I. Yu., Sirotkin V. V. Bipolar resistive switchings in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$. *Solid State Communications*, 2013, vol. 170, pp. 48—52. DOI: 10.1016/j.ssc.2013.07.023
- Tulina N. A., Rossolenko A. N., Shmytko I. M., Kolesnikov N. N., Borisenko D. N., Bozhko S. I., Ionov A. M. Rectification and resistive switching in mesoscopic heterostructures based on Bi_2Se_3 . *Materials Letters*, 2015, vol. 158, pp. 403—405. DOI: 10.1016/j.matlet.2015.06.060
- Tulina N. A., Rossolenko A. N., Ivanov A. A., Sirotkin V. V., Shmytko I. M., Borisenko I. Yu., Ionov A. M. $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4-y}/\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{O}_y$ boundary and resistive switchings in mesoscopic structures on base of epitaxial $\text{Nd}_{1.86}\text{Ce}_{0.14}\text{CuO}_{4-y}$ films. *Physica C: Superconductivity and its Applications*, 2016, vol. 527, pp. 41—45. DOI: 10.1016/j.physc.2016.05.015
- Sirotkin V. V., Tulina N. A., Rossolenko A. N., Borisenko I. Yu. Numerical simulation of resistive switching in heterostructures based on anisotropic oxide compounds. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, 2016, vol. 80, no. 5, pp. 497—499. DOI: 10.3103/S1062873816050191
- Tulina N. A., Rossolenko A. N., Shmytko I. M., Kolesnikov N. N., Borisenko D. N., Sirotkin V. V., Borisenko I. Y. Frequency properties of heterostructures based on bismuth selenide upon bipolar resistive switching: Experiments and numerical simulation. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, 2016, vol. 80, no. 6, pp. 672—674. DOI: 10.3103/S1062873816060381
- Tulina N. A. Memristor properties of high temperature superconductors. URL: <https://arxiv.org/abs/1801.09428>
- Tulina N. A., Rossolenko A. N., Shmytko I. M., Ivanov A. A., Sirotkin V. V., Borisenko I. Yu., Tulin V. A. Properties of percolation channels in planar memristive structures based on epitaxial films of a $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ high temperature superconductor. *Supercond. Sci. Technol.*, 2018, vol. 32, no. 1, art. no. 015003. DOI: 10.1088/1361-6668/aae966
- Tulina N. A., Rossolenko A. N., Shmytko I. M., Kolesnikov N. N., Borisenko D. N., Sirotkin V. V., Borisenko I. Y., Tulin V. A. Studying the dynamic effects in memristive structures based on bismuth selenide: does a memristor need a shuttle tail? *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, 2019, vol. 83, no. 6, pp. 740—744. DOI: 10.3103/S1062873819060340
- Tulina V. A., Rossolenko A. N., Shmytko I. M., Ivanov A. A., Ionov A. M., Bozhko S. I., Borisenko I. Yu., Sirotkin V. V., Tulin V. A. Functional properties of anisotropic perovskite compounds in memristor structures for application in electronics. *Nanoindustry*, 2019, no. 5, pp. 237—240. URL: http://www.nanoindustry.su/files/article_pdf/7/article_7591_5.pdf
- Marchuk G. I. *Metody vychislitel'noi matematiki* [Methods of Computational Mathematics]. Moscow: Nauka, 1977, 456 p. (In Russ.)
- Trottenberg U., Oosterlee C. W., Schüller A. *Multigrid*. London: Acad. Press, 2001. 631 p.
- Sirotkin V. V. Highly efficient decomposition algorithm for modeling thermal modes of powerful transistors. *Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priborostroeniya*, 2016, vol. 16, no. 3, pp. 181—183. (In Russ.)

Acknowledgments. This work was supported by the RFBR grants No. 19-29-03011mk and No. 19-29-03021mk.

Received December 26, 2019