

Максим Викторович СОЗОНОВ¹
Александр Николаевич БУСЫГИН²
Андрей Николаевич БОБЫЛЕВ³
Анатолий Александрович КИСЛИЦЫН⁴

УДК 536.2+621.382

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕМРИСТОРНО-ДИОДНОГО МИКРОЧИПА

- ¹ аспирант кафедры прикладной и технической физики, Тюменский государственный университет
m.v.sozonov@yandex.ru; ORCID: 0000-0003-1232-0389
- ² аспирант кафедры прикладной и технической физики, лаборант-исследователь НОЦ «Нанотехнологии», Тюменский государственный университет
a.n.busygin@utmn.ru; ORCID: 0000-0002-3439-8067
- ³ заведующий лабораторией электронной и зондовой микроскопии НОЦ «Нанотехнологии», Тюменский государственный университет
andreaubobylev@gmail.com; ORCID: 0000-0001-5488-8736
- ⁴ доктор физико-математических наук, профессор кафедры прикладной и технической физики, Тюменский государственный университет
a.a.kislitsyn@utmn.ru; ORCID: 0000-0003-3863-0510

Аннотация

Наиболее популярные модели работы мемристора, основанные на принципе формирования и разрыва нитей проводимости в мемристивном слое, применяются к рассмотрению работы единичного мемристора. Однако интерес представляет рассмотрение работы полноценного микроципа со множеством мемристоров. В этом случае очень важным становится определение теплового режима работы такого устройства. В частности, определение необходимости

Цитирование: Созонов М. В. Теплофизическая модель мемристорно-диодного микроципа / М. В. Созонов, А. Н. Бусыгин, А. Н. Бобылев, А. А. Кислицын // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2021. Том 7. № 4 (28). С. 62-78.
DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-4-62-78

его охлаждения и влияния архитектуры микрочипа на характер теплообмена. При этом предлагаемая модель должна быть достаточно простой, т. к. моделирование в каждом мемристоре проводящих нитей сильно усложняет работу с моделью и требует больших вычислительных ресурсов.

В работе представлена теплофизическая модель работы микрочипа на основе мемристорно-диодного кроссбара, созданного в НОЦ «Нанотехнологии» ТюмГУ. В модели учитывается Джоулев нагрев и конвективный теплообмен. Особенностью модели является упрощенное определение состояния мемристора по величине удельного сопротивления мемристивного слоя по данным вольт-амперной характеристики реального образца мемристора. Моделирование проводится в программном комплексе ANSYS. В рамках модели решаются самосогласованные электрическая и теплофизическая задачи в нестационарной постановке. Получены температурные поля и графики зависимости температуры от времени для различных режимов работы. Получены результаты, хорошо согласующиеся с аналогичными данными других исследований, опубликованными в литературе. Модель хорошо показывает себя на различных режимах работы микрочипа: как на тех, где не происходит переключения состояний мемристоров, так и на режимах с переключением состояний. Представленная модель может быть использована на этапе проектирования для учета особенностей архитектуры микрочипа, которые могут значительно повлиять на тепловой режим его работы.

Ключевые слова

Мемристор, кроссбар, Джоулев нагрев, численное моделирование, теплофизика, нанотехнологии.

DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-4-62-78

Введение

Мемристор — новый представитель электронной компонентной базы, совмещающий принципы работы ячейки памяти и ячейки логической схемы. Объединение этих двух принципов возможно благодаря эффекту мемристивности — зависимости величины сопротивления мемристора от величины и направления прошедшего через него электрического тока. Теоретически был описан в 1971 г. профессором Калифорнийского университета в Беркли Леоном Чуа [14], а впервые создан в 2008 г. группой исследователей лаборатории Hewlett-Packard под руководством Стэнли Уильямса [21].

Мемристор позволяет преодолеть ряд ограничений современных компьютерных платформ: увеличить плотность записи данных благодаря наномасштабной структуре и возможности реализовать в мемристоре несколько логических состояний; совместить логический и запоминающий компонент в одном устройстве; создать энергонезависимое и более энергоэффективное запоминающее устройство; реализовать полноценный нейроморфный компьютер, в котором напрямую возможно проводить параллельные вычисления и создавать системы искусственного интеллекта; реализовать систему с неограниченным временем хранения данных [1].

Несмотря на большие перспективы мемристора и относительно давнее открытие этого компонента, он всё еще остается лишь предметом теоретических и экспериментальных исследований. В первую очередь это обусловлено сложностью в создании потокового производственного процесса. Т. к. мемристивный эффект обнаруживается в различных вариантах структур «металл — диэлектрик — металл» (МДМ), то выбор материалов структуры МДМ и требования к ее качеству обуславливают выбор метода создания мемристора. Кроме этого, в работе [7] показано влияние различных параметров выбранного метода производства на качество и характеристики мемристора. Также присутствует экономический фактор, связанный с проблемой переоборудования производств под новые технологические процессы [2].

Вторая причина отсутствия массового использования технологии — отсутствие единой математической и физической модели, описывающей мемристивный эффект. Существуют различные теории и физические модели, объясняющие механизмы изменения сопротивления в подобных устройствах. Наиболее развитыми являются модели, основанные на принципе формирования и разрыва нитей проводимости внутри слоя диэлектрика из-за изменения концентрации кислородных вакансий в проводящих нитях. Такой принцип признается большинством исследователей как основной механизм изменения сопротивления в структурах МДМ. Однако для описания механизма этого процесса существуют различные подходы, не всегда учитывающие те или иные факторы или заточенные под конкретный вариант структуры МДМ [1].

При переходе к многослойной структуре с тысячами или миллионами мемристоров также требуется определить характер теплового режима работы такого устройства: необходимо ли его охлаждать и каким образом, как Джоулев нагрев влияет на стабильность работы устройства и характеристики мемристоров. В некоторых исследованиях [3, 9] модель работы мемристора не учитывает тепловые эффекты. В других работах [4, 11, 16] учитывается влияние температуры мемристора на некоторые его свойства, при этом величина температуры задается напрямую. В работах [6, 15, 17, 19, 20], где непосредственно учитывается Джоулев нагрев и рассматривается теплофизика процесса, сделан упор на рассмотрение модели работы единичного мемристора преимущественно в двумерной постановке. Однако интерес также представляет рассмотрение теплофизики работы полноценного чипа, содержащего множество мемристоров. В рамках такой задачи можно оценить влияние работы мемристоров друг на друга с точки зрения теплофизики и определить тепловой режим работы чипа еще на этапе проектирования. Актуальность проведения подобного моделирования подкрепляется также тем, что определить тепловой режим работы даже единичного мемристора в реальном эксперименте достаточно сложно. Методы [8, 12] измерения температур наномасштабных объектов, в частности наиболее применяемый для исследования мемристоров спектрометрический метод [13, 17, 19], имеют ряд ограничений и недостатков, а измерение температуры макромасштабными методами, например тепловизионным сканированием, могут дать

лишь общую картину теплового режима устройства или вовсе не показать результат. Получая температурное поле мемристора в процессе работы с помощью компьютерного моделирования можно избежать различных тепловых флуктуаций, возникающих при измерении температуры нанообъектов, и преодолеть ряд ограничений: например, получить температурное поле слоя диэлектрика, а не только температуру поверхности структуры МДМ. Кроме этого, возможно оценить влияние используемых материалов на теплофизику работы и, используя готовые решения охлаждающих устройств, например реализованные в программном комплексе ANSYS [10], подобрать готовый вариант охлаждения чипа из уже существующих на рынке.

Описание модели и используемые методы

При рассмотрении теплофизики работы мемристора искомым результатом будет получение температурного поля в процессе работы. В некоторых из указанных ранее моделей, учитывающих Джоулев нагрев, проводится численное моделирование процесса переключения состояний мемристора с получением температурного поля. Модели несколько отличаются в их аналитическом представлении, но имеют общий подход к численному моделированию: моделируется перемещение кислородных вакансий внутри проводящей нити структуры МДМ (рис. 1), что приводит к изменению состояния мемристора (из состояния с высоким сопротивлением (ВЫКЛ) в состояние с низким сопротивлением (ВКЛ) и наоборот). По сути, из-за перемещения вакансий изменяется проводимость небольшого участка мемристивного слоя — проводящей нити. Однако у такого подхода к моделированию есть минусы, которые становятся очевидными при переходе к моделированию работы множества мемристоров: необходимость усложнять 3D-модель наличием проводящих нитей в каждом мемристоре, при том что не все мемристоры в процессе работы могут переключаться; моделирование процесса перемещения вакансий требует учитывать множество факторов, при том что в итоге это отражается на изменении проводимости мемристивного слоя, которое можно задать напрямую (например, зная вольт-амперную характеристику (ВАХ) мемристора).

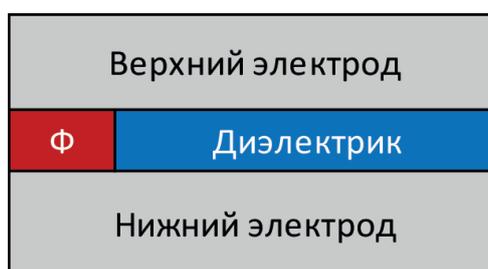


Рис. 1. Общая структура мемристора для численного моделирования; Ф — проводящая нить (филамент)

Fig. 1. General structure of a memristor for numerical simulation; Ф — conductive filament

В представленной модели состояние мемристора определяется величиной удельного сопротивления материала мемристивного слоя, получаемой по данным ВАХ. Благодаря такому подходу не требуется моделировать для каждого мемристора проводящую нить и вводить в модель уравнения диффузии и дрейфа вакансий. Таким образом, процесс переключения состояний можно описать функцией $\rho_e(V)$, где ρ_e — удельное сопротивление мемристивного слоя, V — напряжение проходящего через мемристор тока. Исходя из рассмотренных работ, в частности [20], максимальный нагрев в процессе переключения возникает в момент начала процесса, когда сопротивление мемристора еще не успело сильно измениться. Таким образом, для теплофизического моделирования можно рассматривать некоторую статичную конфигурацию состояний мемристоров, что позволяет от определения функции $\rho_e(V)$ перейти к определению двух значений ρ_e , соответствующих состоянию ВКЛ и ВЫКЛ. Для теплофизического моделирования также важно учесть взаимодействие с окружающей средой, в частности конвективный теплообмен. Теплообмен излучением, как было выявлено в ходе исследования, не вносит сколь-либо значимый вклад в общую теплофизическую картину, при этом в 1,5-1,7 раз увеличивает время решения задачи в ANSYS, поэтому в данной модели теплообмен излучением не учитывается. С учетом данных факторов аналитическое представление каждого элемента модели будет иметь вид:

$$\begin{cases} c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \operatorname{grad} T + \rho_e j^2, \\ q_{\text{пов}} = \alpha(T_0 - T_{\text{пов}}), \end{cases} \quad (1)$$

где c_p — удельная теплоемкость вещества, Дж/(кг·К); ρ — плотность вещества, кг/м³; λ — теплопроводность вещества, Вт/(м·К); j — плотность электрического тока в единице объема, А/м²; α — коэффициент теплообмена между воздухом и поверхностью элемента, Вт/(м²·К); T_0 — температура окружающей среды; $T_{\text{пов}}$ — температура поверхности элемента.

Корректность такого подхода к моделированию косвенно подтверждается работой [5], где проводилось определение температурного поля чипа с одним активным мемристором. В указанной работе моделировался процесс нагрева чипа в процессе прохождения через контактные дорожки электрического тока. Прохождение тока моделировалось косвенно: через тепловыделение на контактных дорожках. Результаты моделирования соответствуют снятому с помощью термопары температурному полю реального образца (рис. 2). Также в указанной работе показано изменение теплопроводности мемристивного слоя при протекании через него электрического тока.

Для реализации модели был выбран программный комплекс ANSYS (версия 19.2), реализующий метод конечных элементов (МКЭ). ANSYS включает ряд модулей-решателей, реализующих моделирование различных физических процессов. В данном исследовании используются модули Electric (моделирование

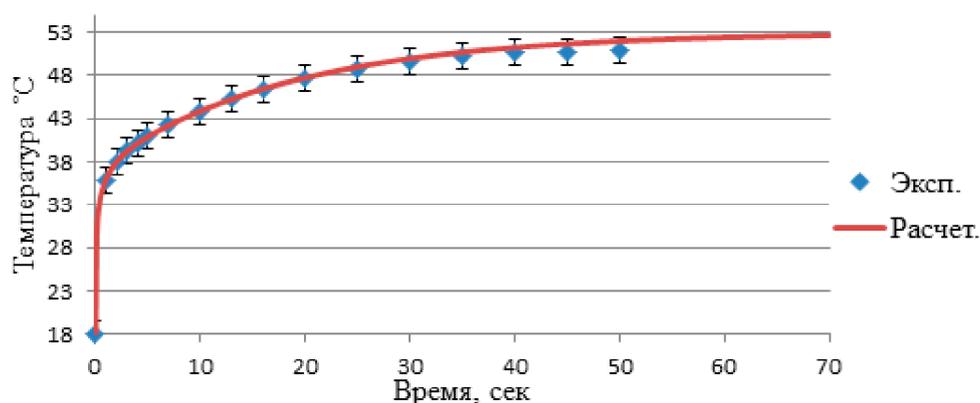


Рис. 2. График зависимости температуры поверхности чипа в области мемристора от времени для численного и реального эксперимента [5]

Fig. 2. The chip surface temperature at the memristor region versus time graph for numerical simulation and real experiment [5]

стационарных электротехнических задач) и Transient Thermal (моделирование нестационарных теплофизических задач). Порядок реализации модели разделен на два этапа: решение электротехнической задачи в модуле Electric с получением распределения Джоулева нагрева по всему объему чипа, затем решение нестационарной теплофизической задачи в модуле Transient Thermal, где Джоулев нагрев считается постоянным внутренним источником тепла.

В качестве модельного чипа был выбран экспериментальный микрочип на основе мемристорно-диодного кроссбара, созданного в НОЦ «Нанотехнологии» ТюмГУ [18]. Кроссбар составляют восемь ячеек, каждая из которых состоит из двух мемристоров и диода Зенера. Топология ячейки показана на рис. 3а. Для n -слоя диода Зенера выбран n -Si, как наиболее предпочтительный материал по данным работы [18], также в топологию включен 5 нм адгезивный слой титана, находящийся под нижними проводящими дорожками. Ячейки в кроссбаре (рис. 3б) расположены парами, каждая из которых покрыта единым слоем $Ti_{0,93}Al_{0,07}O_x$. Ячейки формируются на 0,5 мм кремниевой подложке с поверхностным 100 нм слоем из диоксида кремния. В процессе работы микрочип находится на управляющей плате (рис. 4б) из текстолита толщиной 1 мм, обеспечивающей подвод сигнала к проводящим дорожкам чипа. Проводящие дорожки чипа соединяются с платой тонкими медными проводками, моделируемыми в виде небольших цилиндров на контактных площадках дорожек (рис. 4а) диаметром 0,25 мм и высотой 0,1 мм. Проводящие дорожки платы не моделируются, т. к. они не вносят вклад в тепловой режим работы микрочипа. Размеры микрочипа в плане — 5×5 мм, платы — $6,3 \times 2,6$ см.

Расчетные свойства материалов взяты по данным работ [5, 18] и из справочных материалов. Удельное сопротивление ρ_e для двух вариантов $Ti_{0,93}Al_{0,07}O_x$ рассчитано по данным ВАХ мемристора из работы [18] (для ВКЛ и ВЫКЛ состояния

соответственно). Свойства слоев $\text{Ti}_{0,93}\text{Al}_{0,07}\text{O}_x$, не лежащих в области мемристоров, соответствуют свойствам материала $\text{Ti}_{0,93}\text{Al}_{0,07}\text{O}_x$ для состояния ВЫКЛ. Свойства SiO_2 , за исключением ρ_e , взяты по данным свойств материала Silicon Dioxide из стандартной библиотеки материалов ANSYS.

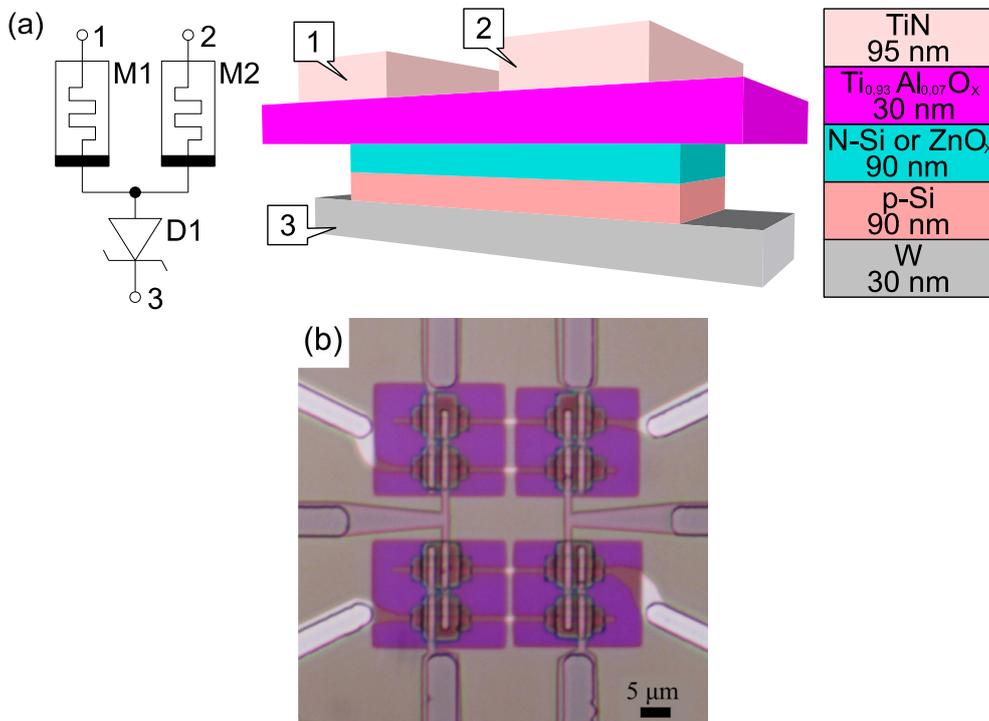


Рис. 3. Топология и схема ячейки (а), микрофотография кроссбара (b) [18]

Fig. 3. Topology and electrical circuit of cell (a), microphotograph of the crossbar (b) [18]

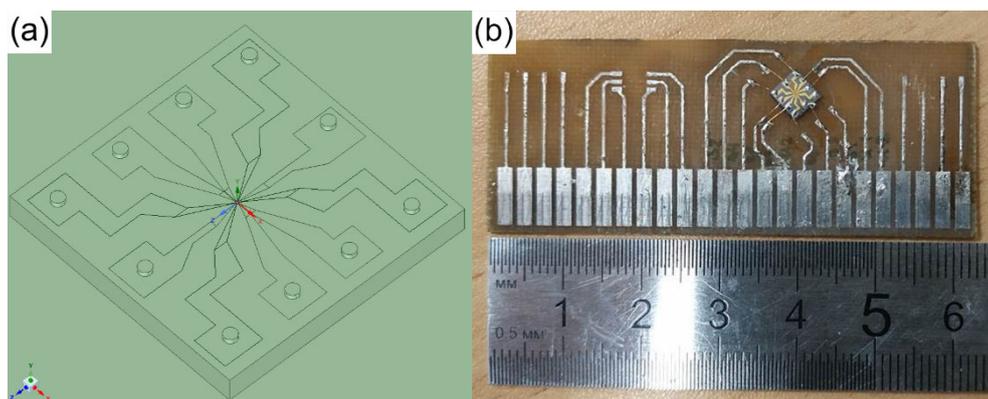


Рис. 4. 3D-модель чипа (а) и фотография чипа на плате (b)

Fig. 4. 3D model of the chip (a) and the photo of the chip on the board (b)

Результаты и обсуждение

Проведено исследование нескольких расчетных случаев, соответствующих разным режимам работы чипа. Параметры расчетных случаев представлены в таблице 1. В первом случае моделируется режим сложения выходных импульсов, представленный в работе [18]. Он соответствует режиму чтения данных, записанных на чип (подаваемое на мемристоры напряжение $\pm 1,5$ В меньше напряжения переключения состояний ± 4 В). В данном расчетном случае задействованы две ячейки, имеющие общую вольфрамовую проводящую дорожку. Сначала на одну из ячеек одновременно подается два импульса напряжения, каждый на один из мемристоров ячейки, одинаковой амплитуды, но разных по знаку. Затем такой же сигнал подается на другую ячейку, затем на обе одновременно. Конфигурация ячейки включает один мемристор в состоянии ВКЛ и один в состоянии ВЫКЛ. Недействующие ячейки имеют конфигурацию ВЫКЛ + ВЫКЛ. В остальных расчетных случаях моделируется прохождение постоянного тока с участием большего количества мемристоров в разных конфигурациях. В случаях № 2 и № 3 исследуется влияние недействующих ячеек на температурное поле. В случаях № 4-6 исследуется температурное поле при задействовании всех ячеек. Для случая № 4 исследуется влияние стеклянной и кремниевой подложек на температурное поле, аналогично работе [17]. Расчетные свойства стекла берутся по данным материала Glass из библиотеки материалов ANSYS.

На рис. 5 показан график зависимости средней температуры $T_{\text{ср}}$ исследуемой области от времени для случая № 1. На графике первый сигнал показан большей длительности, чем последующие. Это является следствием характера импорта распределения Джоулева нагрева в модуль Transient Thermal. Однако с точностью до шага по времени сигналы, как и промежутки между ними, имеют одинаковую длину. Из графика видно, что нагрев/охлаждение в момент подачи/исчезновения

Таблица 1

Характеристика расчетных случаев

Table 1

Characteristics of design cases

№	Подаваемое напряжение	Конфигурация активных ячеек	Конфигурация неактивных ячеек	Кол-во активных ячеек	Время работы
1	$\pm 1,5$ В	ВКЛ + ВЫКЛ	ВЫКЛ + ВЫКЛ	2	1 цикл
2	$\pm 1,5$ В	ВКЛ + ВЫКЛ	ВЫКЛ + ВЫКЛ	4	3 мин.
3	$\pm 1,5$ В	ВКЛ + ВЫКЛ	ВКЛ + ВЫКЛ	4	3 мин.
4	$\pm 1,5$ В	ВКЛ + ВЫКЛ	—	8	3 мин.
5	± 4 В	ВКЛ + ВЫКЛ	—	8	3 мин.
6	± 4 В	ВКЛ + ВКЛ	—	8	3 мин.

сигнала происходит практически мгновенно. Также видно, что за время действия сигнала чип продолжает нагреваться, хоть и достаточно медленно. Кроме этого, заметно, что температуры для второго сигнала больше, чем для первого, при том что оба сигнала имеют одинаковые параметры. Для третьего сигнала нагрев закономерно больше, но величина нагрева увеличилась кратно. Скорее всего, это является следствием архитектуры чипа. Характер зависимости $T_{\text{ср}}$ от времени для остальных расчетных случаев аналогичен случаю № 2 (рис. 6). Все остальные случаи показывают постепенный нагрев чипа и увеличение максимальной температуры. Ближе к концу 3 минуты происходит выход на стационарный режим.

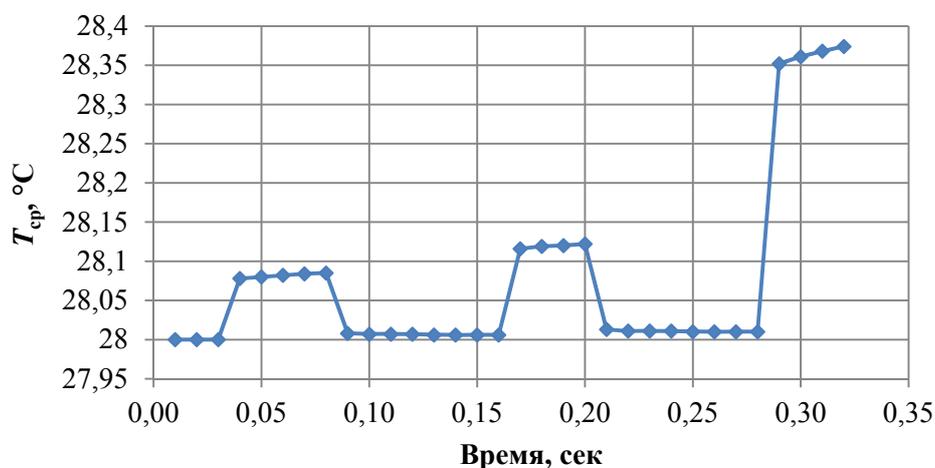


Рис. 5. График зависимости $T_{\text{ср}}$ от времени для случая № 1

Fig. 5. The average temperature versus time graph for case no. 1

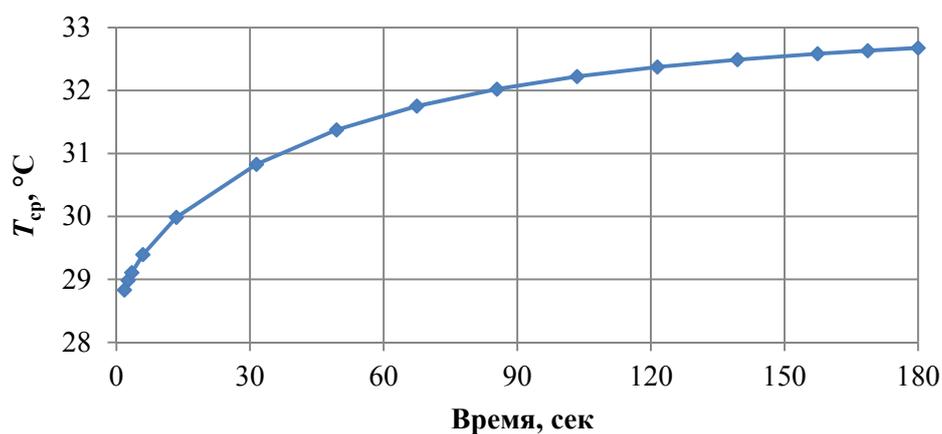


Рис. 6. График зависимости $T_{\text{ср}}$ от времени для случая № 2

Fig. 6. The average temperature versus time graph for case no. 2

На рис. 7 представлено температурное поле рабочей области чипа для случаев № 1 и № 6. Видно сходство характера распределения температур для обоих случаев. Остальные расчетные случаи показывают схожий характер распределения температур: температурные максимумы локализованы в мемристорах в состоянии ВКЛ; основной нагрев локализован в области ячеек, при этом в незадействованных ячейках также заметен нагрев, что может являться следствием паразитных токов, выявленных в работе [18]; температура близлежащих областей примерно соответствует $T_{\text{ср}}$.

По характеру температурного поля расчетные случаи отличаются лишь значениями температур и некоторыми локальными особенностями распределения температур. Так, для случая № 1 максимальная температура составляет 32,15 °С, а для случая № 6 — 109,48 °С. При этом для случаев № 1-4 максимальная температура не превышает 40 °С. Для предельных тепловых режимов (случаи № 5 и № 6), модель показывает достаточно сильный нагрев, что говорит о необходимости охлаждения такого устройства, особенно при увеличении числа и плотности расположения мемристоров. Охлаждение также может потребоваться и для импульсного режима, т. к. наблюдается остаточный нагрев, который не успевает полностью рассеяться к началу следующего сигнала. Такой остаточный нагрев может быть достаточно значимым в случае увеличения количества и плотности расположения мемристоров. Также высокие температуры, продемонстрированные моделью на предельных режимах, могут быть следствием постоянного коэффициента теплообмена α , который следует пересчитывать в зависимости от текущей температуры поверхности чипа и локальной температуры воздуха.

Заметно влияние архитектуры чипа и его расположения на управляющей плате на характер температурного поля. В частности, начиная со второго расчетного случая, максимальная температура достигается всегда в одном и том же мемристоре. Такая асимметрия температурного поля может повлиять на стабильность работы отдельных мемристоров и неравномерное уменьшение ресурса работы чипа в целом. Конфигурация незадействованных ячеек также влияет на температурное поле в процессе работы. Если рассматривать такой чип как запоминающее устройство, то в процессе считывания полностью заполненный данными чип (количество мемристоров в состоянии ВКЛ будет максимально возможным) будет показывать большие температуры в процессе работы по сравнению с полностью пустым чипом, когда все мемристоры находятся в состоянии ВЫКЛ.

Выбранные материалы для слоев чипа также влияют на характер температурного поля. Так, для случая № 4, аналогично работе [17], использование стеклянной подложки показывает большие температуры, по сравнению с кремниевой. Максимальная температура в случае применения стеклянной подложки примерно на 7,6 °С больше соответствующего значения для случая с кремниевой подложкой. Средняя температура в этом случае больше примерно на 3,9 °С. Также появляются новые температурные максимумы, находящиеся на краю ячеек в области контакта с TiN проводящими дорожками (на рис. 7b такие области имеют оранжевый цвет). При этом новые максимумы проявляются только в некоторых ячейках, а половина задействованных ячеек в этом случае не имеет ярко выраженных температурных

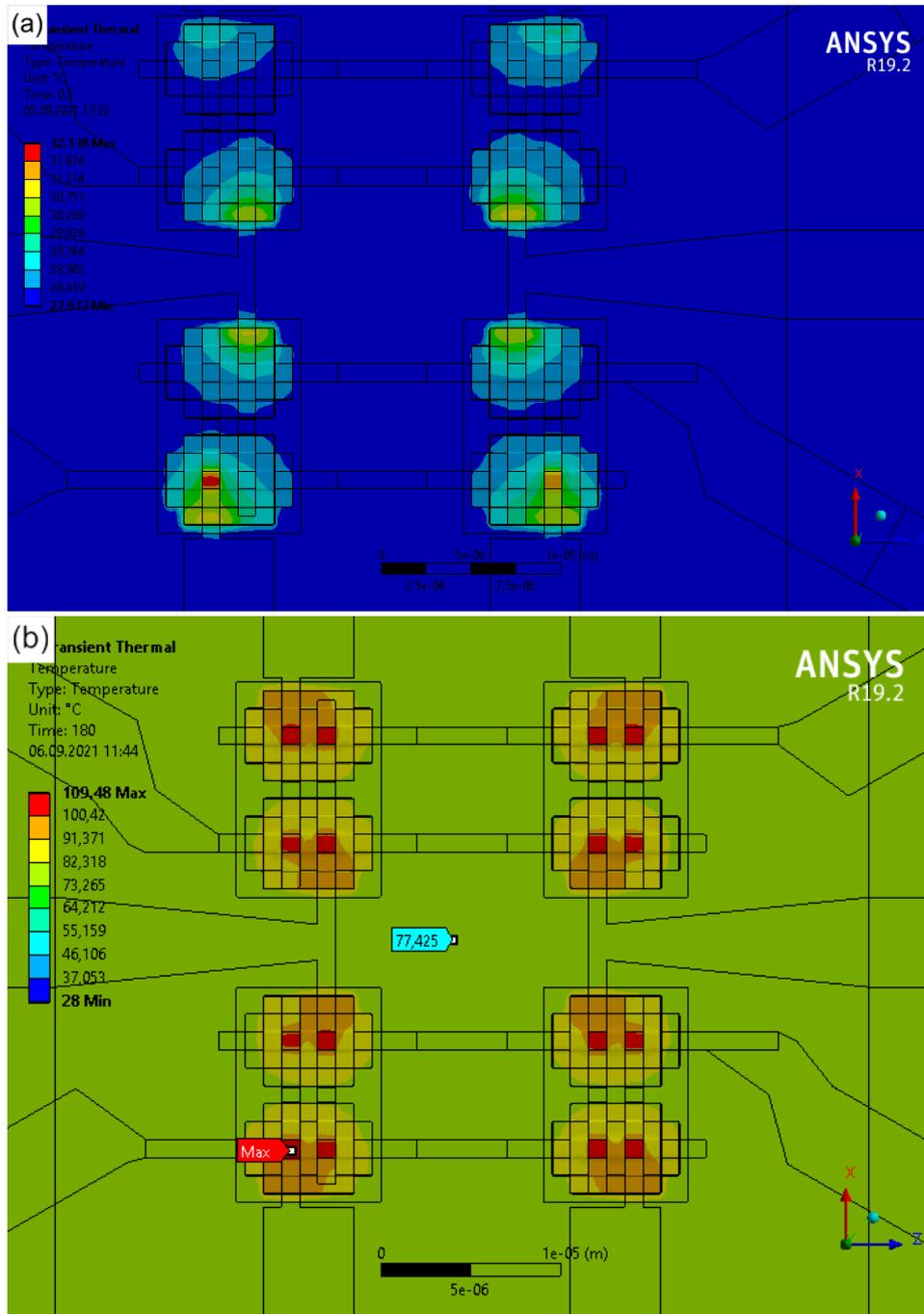


Рис. 7. Температурное поле рабочей области в момент 0,3 сек для случая № 1 (а), температурное поле рабочей области в конце расчета для случая № 6 (б)

Fig. 7. Temperature field of the working area at 0.3 sec for case no. 1 (a), temperature field of the working area at the end of the calculation for case no. 6 (b)

максимумов, как при использовании кремниевой подложки. Учитывая, что чип построен симметрично, смещение максимумов может быть обусловлено характером размещения чипа на плате. В макромасштабе (рис. 8) модель показывает смещение области нагрева в сторону кратчайшего расстояния от края чипа до края управляющей платы. Следовательно, в этом направлении в окружающую среду уходит большее количество тепла, и тепловой поток по другим направлениям меньше. При этом для остальных расчетных случаев при использовании кремниевой подложки в макромасштабе наблюдается такая же картина температурного поля при сохранении симметричного распределения температурных максимумов в рабочей области.

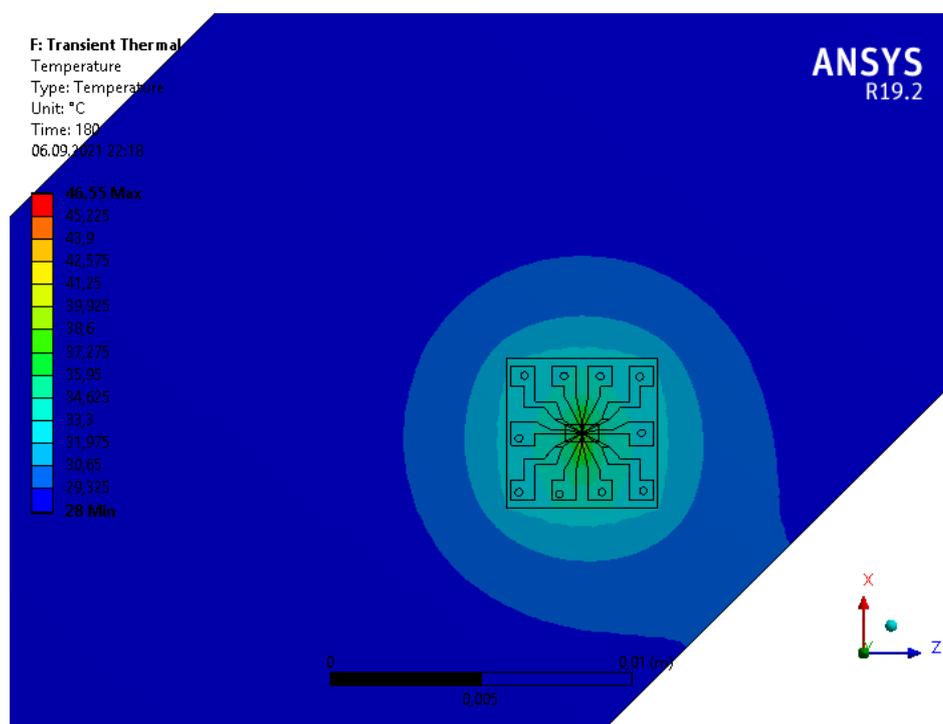


Рис. 8. Температурное поле в макромасштабе

Fig. 8. Temperature field in macroscale

Выводы и заключение

Разработана численная модель для исследования тепловых режимов работы микрочипа на основе мемристорно-диодного кроссбара, созданного в НОЦ «Нанотехнологии» ТюмГУ. Состояние мемристора ВКЛ/ВЫКЛ определяется величиной удельного сопротивления материала мемристивного слоя ρ_e , а процесс переключения состояний — функцией зависимости ρ_e от напряжений проходящего через мемристор тока. Для реализации модели выбран программный комплекс ANSYS.

Проведено исследование нескольких расчетных случаев, соответствующих разным режимам работы микрочипа. Показано, что модель хорошо работает

на режимах, где не происходит переключения состояний мемристоров. Получены распределения температурных полей, согласующиеся с результатами других авторов, опубликованными в литературе. В частности, показано, что максимальная температура достигается в мемристорах в состоянии ВКЛ.

Показано, что для процесса переключения состояний мемристора ВКЛ/ВЫКЛ переход от моделирования проводящей нити со взаимосвязанными процессами перемещения кислородных вакансий к более простому определению удельного сопротивления мемристивного слоя по данным вольт-амперной характеристики дает достаточно хорошие результаты.

Для моделирования предельных режимов работы требуется внесение дополнений в модель, в частности пересчет коэффициента теплообмена α и учет зависимости теплофизических свойств материалов от температуры.

Для дальнейшей проверки корректности модели требуется проведение термометрии реального образца микрочипа в процессе работы и проверка модели на более сложном типе микрочипа, в частности на многослойном варианте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеева Л. Г. Мемристор — новый наноразмерный элемент многоуровневой нейроподобной логики / Л. Г. Алексеева, А. С. Иванов, В. В. Лучинин, А. А. Петров, Т. Тикёу, Т. Набатамэ // Биотехносфера. 2016. № 3-4. С. 45-46.
2. Белавин А. А. Анализ и оценка рынка устройств на основе мемристоров / А. А. Белавин // Молодой ученый. 2019. № 19 (257). С. 105-107.
3. Васильев В. А. Математическое моделирование мемристора в присутствии шума / В. А. Васильев, П. С. Чернов // Математическое моделирование. 2014. Том 26. № 1. С. 122-132.
4. Ибрагим А. Х. А. Математическое моделирование резистивных состояний и динамического переключения мемристора на основе оксида металла / А. Х. А. Ибрагим, С. Ю. Удовиченко // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2020. Том 6. № 2 (22). С. 127-144. DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-2-127-144
5. Кислицын А. А. Исследование температурных режимов микросхемы с мемристорными ячейками / А. А. Кислицын, А. Ю. Кузьменко, М. В. Созонов // Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований: сб. ст. по матер. XXVII междунар. науч.-практ. конф. № 5 (21). Новосибирск: СибАК, 2020. С. 91-98.
6. Мацукатова А. Н. Наномасштабные тепловые эффекты второго порядка в мемристивных структурах на основе поли-*n*-ксиллена / А. Н. Мацукатова, А. В. Емельянов, А. А. Миннеханов, В. А. Демин, В. В. Рыльков, П. А. Форш, П. К. Кашкаров // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2020. Том 112. № 6. С. 379-386. DOI: 10.31857/S123456782018007X
7. Палагушкин А. Н. Технология мемристоров / А. Н. Палагушкин, Ф. А. Юдкин, С. А. Прокопенко, А. П. Сергеев // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника. 2018. № 2 (170). С. 20-26.

8. Старостин А. А. Специальные температурные измерения / А. А. Старостин, Е. М. Шлеймович, В. Г. Лисиенко. Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2016. 168 с.
9. Теплов Г. С. Модель на языке Verilog-A многоуровневого биполярного мемристора с учетом девиаций параметров переключения / Г. С. Теплов, Е. С. Горнев // Микроэлектроника. 2019. Том 48. № 3. С. 163-175.
DOI: 10.1134/S0544126919030104
10. ANSYS Icepak // ANSYS в России и СНГ. CAE Expert. URL: <https://cae-expert.ru/product/ansys-icepak> (дата обращения: 01.09.2021).
11. Bhavani P. Mathematical modelling and analysis of memristors with and without its temperature effects / P. Bhavani, M. Kamaraju, L. Venkata // International Journal of Electronics and Telecommunications. 2017. Vol. 63. No. 2. Pp. 181-186. DOI: 10.1515/eletel-2017-0024
12. Borghetti J. Electrical transport and thermometry of electroformed titanium dioxide memristive switches / J. Borghetti, D. B. Strukov, M. D. Pickett, J. J. Yang, D. R. Stewart, S. R. Williams // Journal of Applied Physics. 2009. Vol. 106. No. 12. DOI: 10.1063/1.3264621
13. Burzo M. Noncontact transient temperature mapping of active electronic devices using the thermoreflectance method / M. Burzo, P. Komarov, P. Raad // IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. 2006. Vol. 28. No. 4. Pp. 637-643.
DOI: 10.1109/TCAPT.2005.859738
14. Chua L. O. Memristor — the missing circuit / L. O. Chua // IEEE Trans. Circuit Theory. 1971. Vol. CT-18. No. 5. Pp. 507-519.
15. Gao X. Three-dimensional fully-coupled electrical and thermal transport model of dynamic switching in oxide memristors / X. Gao, D. Mamaluy, P. R. Mickel, M. Marinella // ECS Transactions. 2015. Vol. 69. No. 5. Pp. 183-193. DOI: 10.1149/06905.0183ecst
16. Jeetendra S. Temperature dependent analytical modeling and simulations of nanoscale memristor / S. Jeetendra, R. Balwinder // Engineering Science and Technology, an International Journal. 2018. Vol. 21. No. 5. Pp. 862-868. DOI: 10.1016/j.jestch.2018.07.016
17. Pahinkar D. G. Experimental and computational analysis of thermal environment in the operation of HfO₂ memristors / D. G. Pahinkar, P. Basnet, M. P. West, B. Zivasatienraj, A. Weidenbach, A. W. Doolittle, E. Vogel, S. Graham // AIP Advances. 2020. Vol. 10. No. 3. DOI: 10.1063/1.5141347
18. Pisarev A. Fabrication technology and electrophysical properties of a composite memristor-diode crossbar used as a basis for hardware implementation of a biomorphic neuroprocessor / A. Pisarev, A. Busygin, A. Bobylev, A. Gubin, S. Udovichenko // Microelectronic Engineering. 2021. Vol. 236. DOI: 10.1016/j.mee.2020.111471
19. Shen W. Experimentally calibrated electro-thermal modeling of temperature dynamics in memristors / W. Shen, S. Kumar, S. Kumar // Applied Physics Letters. 2021. Vol. 118. No. 10. DOI: 10.1063/5.0039797
20. Strachan J. P. The switching location of a bipolar memristor: chemical, thermal and structural mapping / J. P. Strachan, D. B. Strukov, J. Borghetti, J. J. Yang, G. Medeiros-Ribeiro, S. R. Williams // Nanotechnology. 2011. Vol. 22. No. 25.
DOI: 10.1088/0957-4484/22/25/254015
21. Strukov D. B. The missing memristor found / D. B. Strukov, G. S. Snider, D. R. Stewart, R. S. Williams // Nature. 2008. Vol. 453. Pp. 80-83.

Maxim V. SOZONOV¹
Alexander N. BUSYGIN²
Andrey N. BOBYLEV³
Anatolii A. KISLITSYN⁴

UDC 536.2+621.382

THERMOPHYSICAL MODEL OF A MEMRISTOR-DIODE MICROCHIP

¹ Postgraduate Student,
Department of Applied and Technical Physics,
University of Tyumen
m.v.sozonov@yandex.ru; ORCID: 0000-0003-1232-0389

² Postgraduate Student,
Department of Applied and Technical Physics,
Researcher Laboratory Assistant,
REC “Nanotechnology”,
University of Tyumen
a.n.busygin@utmn.ru; ORCID: 0000-0002-3439-8067

³ Head of the Laboratory of Electronic and Probe Microscopy,
REC “Nanotechnology”,
University of Tyumen
andreaubobylev@gmail.com; ORCID: 0000-0001-5488-8736

⁴ Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor,
Department of Applied and Technical Physics,
University of Tyumen
a.a.kislitsyn@utmn.ru; ORCID: 0000-0003-3863-0510

Abstract

The most popular models of memristor, based on the principle of formation and breakage of conductive filaments in memristive layer, are applied to consideration of a single memristor. However, consideration of a full-fledged microchip with many memristors may be also interesting. In this case, it is very important to determine the thermal mode of work of

Citation: Sozonov M. V., Busygin A. N., Bobylev A. N., Kislitsyn A. A. 2021. “Thermophysical model of a memristor-diode microchip”. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 7, no. 4 (28), pp. 62-78.
DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-4-62-78

the device, in particular, to determine if it needs cooling and how the microchip architecture affects on the nature of heat transfer. At the same time, the proposed model should be quite simple, since modeling of conductive filaments in each memristor greatly complicates work with the model and requires large computational resources.

In this paper a thermophysical model of the microchip based on a memristor-diode crossbar created at the REC “Nanotechnology” at Tyumen State University is presented. The model takes into account Joule heating and convective heat transfer. A feature of the model is a simplified determination of memristor state by the resistivity value of memristive layer from the data of the current-voltage characteristic of a real memristor sample. Simulation is carried out in the ANSYS software package. Within the framework of the model, self-consistent electrical and thermophysical problems are solved in a non-stationary setting. The temperature fields and graphs of the temperature versus time were obtained for various operating modes. The results obtained are in good agreement with similar data from other studies published in the literature. The model shows itself well in various operating modes, both in modes with memristor state switching process and without it. The presented model can be used at the design stage to take into account the features of the microchip architecture, which can significantly affect the thermal state of microchip operating modes.

Keywords

Memristor, crossbar, Joule heating, numerical simulation, thermal physics, nanotechnology.

DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-4-62-78

REFERENCES

1. Alekseeva L. G., Ivanov A. S., Luchinin V. V., Petrov A. A., Tikeu T., Nabatame T. 2016. “Memristor — the new nanoscale element of multilevel neuromorphic logic”. *Biotechnosphere*, no. 3-4, pp. 45-46. [In Russian]
2. Belavin A. A. 2019. “Analysis and assessment of the market for devices based on memristors”. *Young scientist*, no. 19 (257), pp. 105-107. [In Russian]
3. Vasiliev V. A., Chernov P. S. 2014. “Mathematical modeling of memristor in the presence of noise”. *Mathematical Modeling*, vol. 26, no. 1, pp. 122-132. [In Russian]
4. Ebrahim A. H., Udovichenko S. Yu. 2020. “Mathematical modeling of resistive states and dynamic switching of a metal oxide memristor”. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, vol. 6, no. 2 (22), pp. 127-144. DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-2-127-144 [In Russian]
5. Kislitsyn A. A., Kuzmenko A. Yu., Sozonov M. V. 2020. “Investigation of temperature conditions of microcircuit with memristor cells”. *Questions of technical and physical and mathematical sciences in the light of modern research: collection of articles by materials of 27th int. scientific-practical conf.*, no. 5 (21), pp. 91-98. [In Russian]
6. Matsukatova A. N., Emelyanov A. V., Minnekhanov A. A., Demin V. A., Rylkov V. V., Forsh P. A., Kashkarov P. K. 2020. “Second-order nanoscale thermal effects in memristive structures based on poly-p-xylylene”. *JETP Letters*, vol. 112, no. 6, pp. 357-363. DOI: 10.1134/S0021364020180071 [In Russian]

7. Palagushkin A. N., Yudkin F. A., Prokopenko S. A., Sergeev A. P. 2018. "Technology of memristors". *Electronic engineering. Series 3. Microelectronics*, no. 2 (170), pp. 20-26. [In Russian]
8. Starostin A. A., Shleymovich E. M., Lisienko V. G. 2016. *Special temperature measurements*. Yekaterinburg: UrFU. 168 p. [In Russian]
9. Teplov G. S., Gornev E. S. 2019. "Multilevel bipolar memristor model considering deviations of switching parameters in the Verilog-A language". *Russian Microelectronics*, vol. 48, no. 3, pp. 163-175. DOI: 10.1134/S1063739719030107 [In Russian]
10. ANSYS in Russia and the CIS. CAE Expert. ANSYS Icepak. Accessed on 1 September 2021. <https://cae-expert.ru/product/ansys-icepak> [In Russian]
11. Bhavani P., Kamaraju M., Venkata L. 2017. "Mathematical modelling and analysis of memristors with and without its temperature effects". *International Journal of Electronics and Telecommunications*, vol. 63, no. 2, pp. 181-186. DOI: 10.1515/eletel-2017-0024
12. Borghetti J., Strukov D. B., Pickett M. D., Yang J. J., Stewart D. R., Williams S. R. 2009. "Electrical transport and thermometry of electroformed titanium dioxide memristive switches". *Journal of Applied Physics*, vol. 106, no. 12. DOI: 10.1063/1.3264621
13. Burzo M., Komarov P., Raad P. 2006. "Noncontact transient temperature mapping of active electronic devices using the thermoreflectance method". *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, vol. 28, no. 4, pp. 637-643. DOI: 10.1109/TCAPT.2005.859738
14. Chua L. O. 1971. "Memristor — the missing circuit" *IEEE Trans. Circuit Theory*, vol. CT-18, no. 5, pp. 507-519.
15. Gao X., Mamaluy D., Mickel P. R., Marinella M. 2015. "Three-dimensional fully-coupled electrical and thermal transport model of dynamic switching in oxide memristors". *ECS Transactions*, vol. 69, no. 5, pp. 183-193. DOI: 10.1149/06905.0183ecst
16. Jeetendra S., Balwinder R. 2018. "Temperature dependent analytical modeling and simulations of nanoscale memristor". *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 21, no. 5, pp. 862-868. DOI: 10.1016/j.jestch.2018.07.016
17. Pahinkar D. G., Basnet P., West M. P., Zivasatienraj B., Weidenbach A., Doolittle A. W., Vogel E., Graham S. 2020. "Experimental and computational analysis of thermal environment in the operation of HfO₂ memristors". *AIP Advances*, vol. 10, no. 3. DOI: 10.1063/1.5141347
18. Pisarev A., Busygin A., Bobylev A., Gubin A., Udovichenko S. 2021. "Fabrication technology and electrophysical properties of a composite memristor-diode crossbar used as a basis for hardware implementation of a biomorphic neuroprocessor". *Microelectronic Engineering*, vol. 236. DOI: 10.1016/j.mee.2020.111471
19. Shen W., Kumar S., Kumar S. 2021. "Experimentally calibrated electro-thermal modeling of temperature dynamics in memristors". *Applied Physics Letters*, vol. 118, no. 10. DOI: 10.1063/5.0039797
20. Strachan J. P., Strukov D. B., Borghetti J., Yang J. J., Medeiros-Ribeiro G., Williams S. R. 2011. "The switching location of a bipolar memristor: chemical, thermal and structural mapping". *Nanotechnology*, vol. 22, no. 25. DOI: 10.1088/0957-4484/22/25/254015
21. Strukov D. B., Snider G. S., Stewart D. R., Williams R. S. 2008. "The missing memristor found". *Nature*, vol. 453, pp. 80-83.