

**Оспанова А.Ж.**, Карагандинский национальный исследовательский университет имени академика Е.А.Букетова, физико-технический факультет, гр. ТФ-22-1р, студент

(Научный руководитель — Профессор кафедры радиофизики и электроники Афанасьев Д.А.)

**Бекешева А.М.** Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, институт физико-технических наук, гр. МРЭТ-21, магистрант

(Научный руководитель — Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, институт физико-технических наук к.ф.-м.н. Маханов К.М.)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕМРИСТОРА В COMSOL MULTIPHYSICS

Развитие энергоэффективных вычислительных систем и нейроморфных архитектур требует создания новых электронных элементов, способных совмещать функции памяти и обработки информации. Одним из перспективных направлений является использование мемристоров — устройств с изменяемым сопротивлением, состояние которых зависит от предыстории приложенного электрического сигнала. Математические и численные модели мемристоров позволяют анализировать их электрические параметры, прогнозировать поведение при различных режимах работы и оптимизировать характеристики устройств для применения в современных вычислительных системах [2], [3]. Особый интерес представляют оксидные мемристоры, где переключение сопротивления обусловлено миграцией кислородных вакансий — дефектов кристаллической решётки, формирующих локальные области повышенной проводимости. Изменение распределения этих дефектов приводит к переходам между состояниями высокого и низкого сопротивления и формированию характерной гистерезисной вольт-амперной характеристики [1], [4].

Численное моделирование широко применяется при исследовании мемристоров, поскольку позволяет анализировать процессы, которые сложно наблюдать экспериментально, такие как распределение электрического поля, локальный нагрев и перенос дефектов внутри активного слоя. Использование вычислительных моделей даёт возможность оценивать влияние параметров материала и условий работы на электрические характеристики устройства и прогнозировать его поведение при различных режимах переключения [1], [4].

В данной работе моделирование выполнялось в среде COMSOL Multiphysics — программной платформе, предназначенной для одновременного моделирования различных физических процессов в рамках единой вычислительной среды. Возможность объединения нескольких физических процессов в одной вычислительной модели делает COMSOL удобным инструментом при моделировании мемристоров, где необходимо совместно учитывать электрические, тепловые и диффузионные процессы [5].

Для описания работы мемристора использовалась физическая модель, основанная на дрейфово-диффузионном переносе кислородных вакансий в активном оксидном слое. Изменение концентрации вакансий во времени и пространстве описывалось уравнением переноса (1), учитывающим диффузию, дрейф под действием электрического поля и термодиффузионные эффекты:

$$\frac{\partial n_D}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla n_D - v n_D + D S n_D \nabla T)$$

где  $n_D$  - концентрация вакансий;  $D$  - коэффициент диффузии;  $v$  - скорость дрейфа вакансий;  $S$  - температурный коэффициент, учитывающий вклад термодиффузии (эффекта Соре);  $\nabla T$  — градиент температуры.

Такой подход позволяет учитывать взаимосвязь электрических и тепловых процессов, которые оказывают существенное влияние на переключение сопротивления. Дополнительно решались уравнения электрического тока и теплопроводности, что позволило исследовать влияние Джоулева нагрева на динамику формирования проводящего канала.

Геометрическая модель мемристора была реализована в двумерной ось-симметричной постановке. Рассматриваемая структура включала оксидный (активный) слой, верхний и нижний электрод из палладия. Использование ось-симметричной геометрии позволило описывать трёхмерную структуру устройства посредством двумерного поперечного сечения, что существенно снижает вычислительные затраты при сохранении физической корректности результатов. В качестве граничных условий задавалось переменное во времени напряжение, обеспечивающее последовательное прохождение процессов SET и RESET.

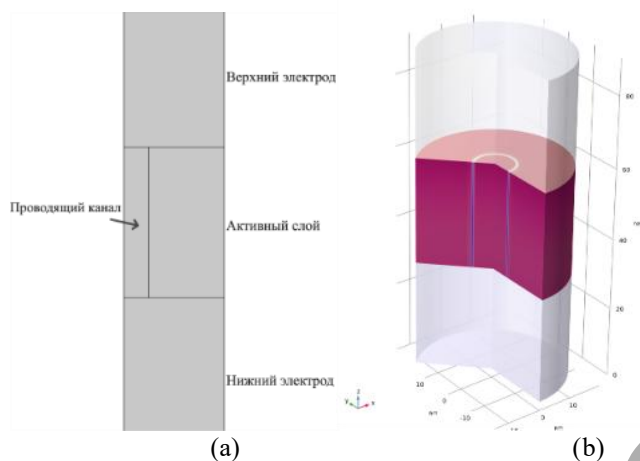


Рисунок 1. (a) Схематичная модель мемристора; (b) геометрическая модель оксидного мемристора в ось-симметричной постановке

В ходе моделирования были получены пространственные распределения проводимости и электрического поля, позволяющие визуализировать процессы формирования и разрушения проводящего канала (рисунок 2). На начальном этапе распределение проводимости в оксидном слое было практически однородным. При приложении напряжения происходила миграция кислородных вакансий, приводящая к локальному увеличению проводимости и формированию узкого проводящего пути между электродами. Дальнейшее изменение полярности напряжения вызывало разрушение канала и переход устройства обратно в высокоомное состояние. Полученные распределения хорошо согласуются с физическими представлениями о механизме резистивного переключения в оксидных мемристорах [1], [4].

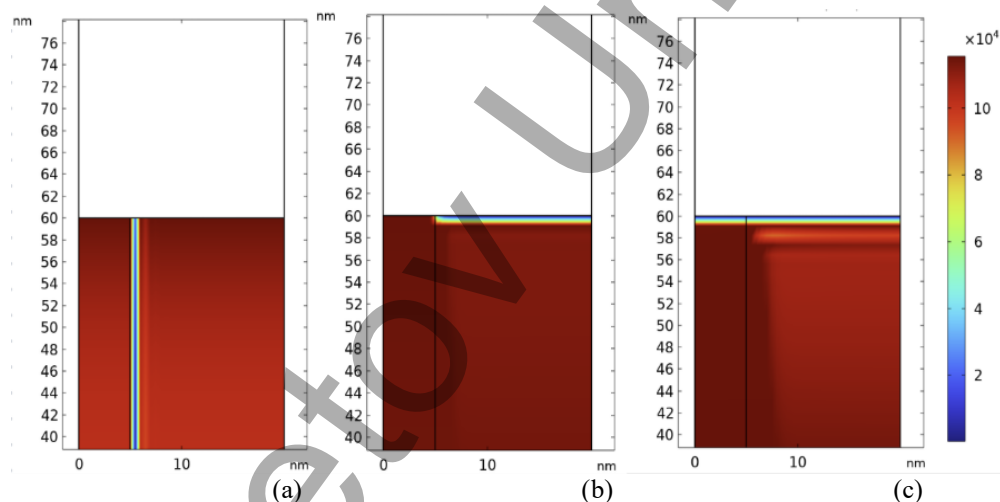


Рисунок 2. (a) Начальное распределение проводимости в оксидном слое мемристора; (b) формирование проводящего канала при SET-переходе; (c) разрушение проводящего канала при RESET-переходе

Результаты численного моделирования показали наличие гистерезисной вольт-амперной характеристики, характерной для мемристивных устройств (рисунок 3). При положительном напряжении наблюдался SET-переход, сопровождающийся увеличением тока и формированием низкоомного состояния. При отрицательном напряжении происходил RESET-переход, связанный с разрушением проводящего канала и уменьшением проводимости. Анализ полученных зависимостей показал нелинейный характер проводимости, обусловленный перераспределением дефектов и локальным нагревом активного слоя.

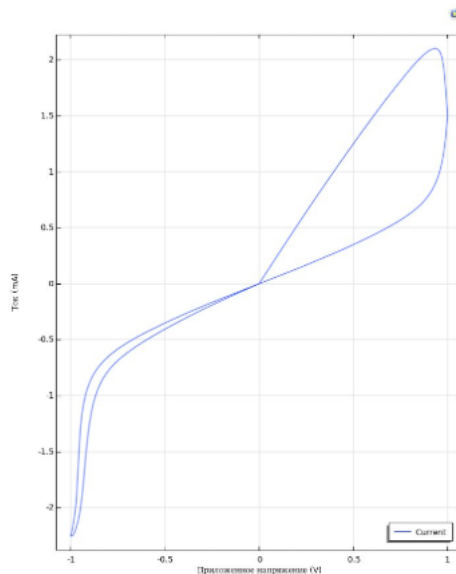


Рисунок 3. Вольт-амперная характеристика оксидного мемристора с гистерезисной петлей

Практическая значимость работы заключается в разработке универсальной параметризованной модели, которая может быть адаптирована для различных оксидных материалов путём изменения геометрических параметров и физических характеристик слоя. Такой подход позволяет использовать модель для оптимизации конструкции мемристоров и предварительной оценки их электрических характеристик без проведения большого количества экспериментальных исследований. Разработанная модель может быть применена для анализа перспективных структур на основе оксидов и оксинитрида титана, а также для исследования влияния размеров устройства и условий работы на стабильность переключения.

Таким образом, проведённое моделирование показало, что использование мультифизического подхода в среде COMSOL Multiphysics позволяет эффективно описывать электрические характеристики оксидных мемристоров и анализировать механизмы формирования и разрушения проводящего канала. Полученные результаты подтверждают применимость разработанной модели для дальнейших исследований мемристорных структур и их использования в энергоэффективных вычислительных системах и нейроморфных устройствах.

#### Литература:

1. Chua L. O. Memristor – The Missing Circuit Element // IEEE Transactions on Circuit Theory. – 1971. – Vol. 18, No. 5. – P. 507–519.
2. Strukov D. B., Snider G. S., Stewart D. R., Williams R. S. The missing memristor found // Nature. – 2008. – Vol. 453. – P. 80–83.
3. Yang J. J., Strukov D. B., Stewart D. R. Memristive devices for computing // Nature Nanotechnology. – 2013. – Vol. 8, No. 1. – P. 13–24.
4. Kim S., Choi S., Lu W. Comprehensive Physical Model of Dynamic Resistive Switching in an Oxide Memristor // ACS Nano. – 2014. – Vol. 8, No. 3. – P. 2369–2376.
5. Pryor R. W. Multiphysics Modeling Using COMSOL Multiphysics. – Burlington: Jones & Bartlett Learning, 2011.

**Тунгушбаева А. Т.** Академик Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды ұлттық зерттеу университеті, математика және ақпараттық технологиялар факультеті, ММатО-25-1к-топ, магистрант  
(*Ғылыми жетекші – ф.-м.ғ.к., профессор Д.М.Ахманова*)

### МАТЕМАТИКА САБАҚТАРЫНДА ЖОБАЛЫҚ ОҚЫТУ ӘДІСІН ҚОЛДАНУ (КОМБИНАТОРИКА МЫСАЛЫНДА)

**Аннотация.** Мақалада жалпы орта білім беру деңгейінде комбинаториканы оқыту барысында жобалық оқыту әдісін қолданудың педагогикалық мүмкіндіктері қарастырылды. Зерттеу жұмысының мақсаты – жобалық оқыту арқылы оқушылардың комбинаторикалық ойлауын, зерттеушілік және практикалық дағдыларын дамыту жолдары, сондай-ақ алынған нәтижелердің SAT халықаралық стандартына сәйкес математикалық дайындықпен байланысы анықталды. Эксперименттік зерттеу нәтижелері жобалық оқыту әдісінің тиімділігін дәлелдейді.

**Түйін сөздер:** жобалық оқыту, комбинаторика, математиканы оқыту әдістемесі, зерттеушілік дағдылар, функционалдық сауаттылық, SAT.