

## Моделирование частотных и мощностных характеристик мемристора на основе оксида титана

# 05, май 2012

DOI: 10.7463/0512.0409216

Храповицкая Ю. В., Маслова Н. Е., Занавескин М. Л., Марченков А. Н.

УДК 004.942

Россия, ФГБУ НИЦ «Курчатовский институт»

[lcrom@mail.ru](mailto:lcrom@mail.ru)

[dorothy@mail.ru](mailto:dorothy@mail.ru)

[znaveskin.maxim@gmail.com](mailto:znaveskin.maxim@gmail.com)

[alexei.marchenkov@gmail.com](mailto:alexei.marchenkov@gmail.com)

### ВВЕДЕНИЕ

Мемристор – это пассивный элемент в микроэлектронике, сопротивление которого зависит от прошедшего через него заряда. В момент отключения напряжения в цепи мемристор не изменяет своего состояния, «запоминая» последнее значение сопротивления. Основополагающая работа в области теории пассивных элементов с эффектом памяти, в которой было введено понятие «мемристор» (сопротивление с эффектом памяти), была опубликована в 1971 году [1]. Однако, данная концепция оставалась чисто теоретической до демонстрации в 2008 году экспериментальной модели мемристора сотрудниками Hewlett-Packard [2].

В продемонстрированном устройстве изменения в сопротивлении происходили при приложении напряжения за счет миграции атомных дефектов (вакансий атома кислорода) в тонкопленочной (около 80 нм) слоистой структуре на основе оксида титана ( $\text{TiO}_{2-x}$ , где  $x$  обозначает наличие вакансий в тонкой пленке бинарного оксида). В результате миграции дефектов (ионов кислорода) под действием электрического поля, при выключении напряжения практически не происходит миграции дефектов к своим изначальным положениям, и система остается в состоянии, существующем на момент выключения напряжения.

Наибольшее число разработок в области мемристоров ведется с использованием материалов, изменяющих фазовый состав при приложении к системе напряжения. Также достаточно большое число исследований посвящено созданию мемристоров на основе твердотельных электролитов и с использованием молекулярных или полимерных материалов и сред. Вместе с тем, недостатком таких материалов является их несовместимость со стандартными в области полупроводниковой индустрии процессами КМОП (комплементарная логика на транзисторах металл-оксид-полупроводник) и КНИ (кремний на изоляторе). Кроме того, подобные материалы, как правило, деградируют в условиях, характерных для условий эксплуатации электронных микросхем. Металлоксидные материалы с вакансиями кислорода, включая оксид титана, являются полностью совместимыми и используемыми в КМОП и КНИ технологиях, поэтому исследования, проводимые в данной работе, будут основаны на использовании оксида титана

Благодаря преимуществам характеристик ячеек памяти на основе мемристоров по сравнению с flash-памятью, а именно, большей плотности хранения данных, более высоким скоростям записи и чтения данных, а также большему выдерживаемому числу циклов перезаписи, многие компании ведут разработки по изготовлению мемристоров для портативных устройств. Однако в настоящее время является открытым вопрос выбора оптимальных структурных параметров мемристора. Известные конструкции мемристоров характеризуются большим разбросом как толщины двухслойной пленки оксида титана (общей толщины), так и толщины необедненного, донорного слоя оксида титана (активного слоя) [2-5], которые лежат в диапазоне от 10 до 50 нм и от 1 до 30 нм, соответственно.

Помимо экспериментальных исследований большое внимание научными группами уделяется теоретическому моделированию свойств мемристоров [2-6]. В рассмотренных работах методами численного моделирования были проведены исследования влияния частоты приложенного напряжения на вольт-амперную характеристику мемристора для отдельных структур. При этом следует отметить работы [2-4]. В частности, в работе [2] теоретическое исследование мемристора проводилось с учетом нелинейного характера протекания диффузии зарядов. Для этого в модель была введена функция, определяющая изменение скорости диффузии зарядов в зависимости от их положения в слое. В работе [3] при моделировании также учитывался нелинейный характер диффузии зарядов, но, как будет показано ниже, при другом изменении скорости диффузии зарядов в зависимости от их положения в слое, а именно, была введена более плавная, по сравнению с работой [2],

функция, описывающая миграцию зарядов в системе. Работа [4] описывает теоретические исследования частотных свойств мемристора в зависимости от амплитуды прикладываемого к нему напряжения.

Однако на основании этих работ нельзя сделать однозначный вывод об оптимальной структуре мемристора, поскольку каждое исследование [2-4] имеет локальный характер и не рассматривает полной зависимости частотных и мощностных свойств мемристора. Поэтому целью данной работы является определение оптимальных структурных параметров мемристоров на основе численного моделирования таких их функциональных свойств, как рабочая частота и потребляемая мощность. Увеличение рабочей частоты и снижение потребляемой мощности мемристора обеспечивают увеличение скорости записи и чтения данных, уменьшение расхода энергии и увеличение числа циклов перезаписи данных.

## ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Математически вольт-амперная характеристика мемристора, изготовленного на основе оксида титана, описывается следующим образом [6]:

$$V(t) = \left( \frac{R_{ON} \cdot w(t)}{D} + R_{OFF} \left( 1 - \frac{w(t)}{D} \right) \right) \cdot I(t) \quad (1)$$

Это уравнение задает модель мемристора в виде двух сопротивлений, соединенных последовательно, причем сопротивление каждого зависит от параметра  $w(t)$ , связанного с изменяющейся толщиной слоя с недостатком кислорода (более низким сопротивлением). Для математического анализа достаточно считать, что  $w(t)$  описывает положение границы раздела между двумя слоями с избытком/недостатком кислорода.  $R_{ON}$  представляет собой сопротивление прибора, когда  $w(t)/D = 1$ , тогда как  $R_{OFF}$  представляет собой сопротивление устройства, когда  $w(t)/D = 0$ . В данной модели суммарная толщина обоих оксидных слоев равна  $D$ .

В соответствии с теорией диффузии, скорость диффузии вакансий в слое с недостатком кислорода может быть описана уравнением:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{\eta \mu_V \cdot R_{ON}}{D} \cdot I(t) \quad (2)$$

Здесь коэффициент  $\eta = \pm 1$ . Если  $\eta = 1$ , то происходит расширение слоя с недостатком кислорода при положительном приложенном напряжении, в противоположном случае он (слой) будет сжиматься. Коэффициент  $\mu_V$  представляет собой подвижность зарядов в слое с низким удельным сопротивлением. Уравнение (2) описывает линейную модель диффузии зарядов, в соответствии с которой заряды движутся с одинаковой скоростью вне зависимости от их положения внутри слоя, что, строго говоря, не является верным. Скорость диффузии зависит от положения заряда внутри каждого из слоев и должна быть максимальной, когда граница активного слоя находится точно посередине устройства, и быть равной нулю, когда она сдвигается к одному из электродов. Математически это означает, что формула (2), описывающая скорость диффузии, должна быть помножена на взвешивающую функцию, отражающую неоднородность условий диффузии внутри устройства [3, 4, 6]. Тогда уравнение (2) принимает вид:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{\eta \mu_V \cdot R_{ON}}{D} \cdot I(t) \cdot f\left(\frac{w(t)}{D}\right), \quad (3)$$

$$f\left(\frac{w(t)}{D}\right) = 1 - \left(\frac{2 \cdot w(t)}{D} - 1\right)^{2p}, \quad (4)$$

где  $p$  – параметр, задающий на каком расстоянии от середины мемристора начинает снижаться скорость диффузии зарядов.

В соответствии с теорией электрических цепей сопротивление элемента рассчитывается по формуле:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (5)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление материала;  $l$  – толщина мемристора;  $S$  – площадь контактов мемристора. Как было показано в формуле (1), сопротивление мемристора можно представить в виде сопротивлений двух слоев – активного слоя  $\text{TiO}_2$  и обедненного слоя  $\text{Ti}_4\text{O}_7$ . Удельное сопротивление  $\text{TiO}_2$  при комнатной температуре составляет 3000 Ом·м, а удельное сопротивление  $\text{TiO}_{2-x}$  на шесть порядков меньше [7]. Поэтому вкладом сопротивления слоя  $\text{Ti}_4\text{O}_7$  можно пренебречь, и формула (5) принимает вид:

$$R = \rho \frac{d}{S}, \quad (6)$$

где  $d$  – толщина активного слоя  $\text{TiO}_2$ .

В настоящее время экспериментально изготавливаются мемристоры с площадью контактов в диапазоне от  $40 \times 40$  мкм до  $100 \times 100$  мкм [2, 4, 5]. Поэтому для моделирования в данном исследовании было выбрано значение площади контактов, равное  $70 \times 70$  мкм.

Численное решение системы уравнений (1), (3), (4) дает вольт-амперную характеристику мемристора, представляющую собой петлю гистерезиса. В зависимости от направления изменения напряжения, одному значению напряжения может соответствовать два значения тока. Данный эффект является следствием того, что сопротивление мемристора зависит от протекшего через него тока. Типичная вольт-амперная характеристика мемристора представлена на рис. 1.

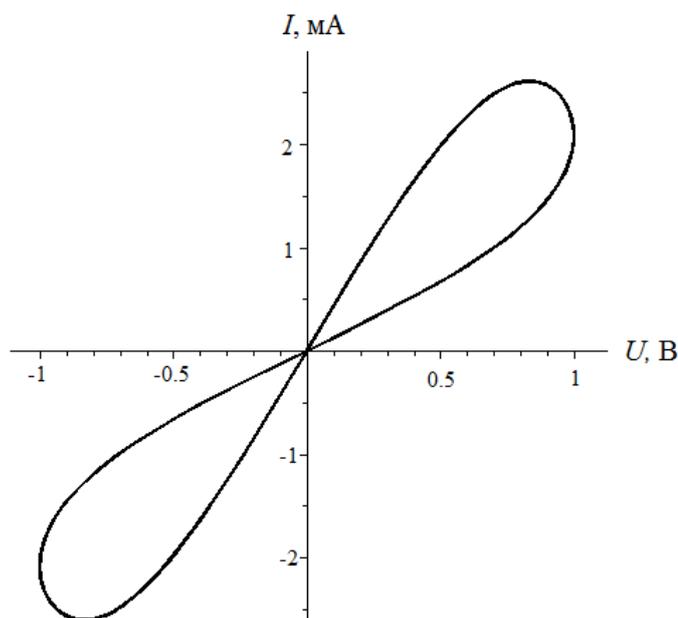


Рис. 1. Типичная вольт-амперная характеристика мемристора.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследования зависимостей рабочей частоты ( $f$ ) и потребляемой мощности ( $W$ ) мемристора от толщины активного слоя ( $d$ ) и его общей толщины ( $D$ ) проводились в два этапа. При этом для всех рассматриваемых структур мемристора отношение максимального сопротивления мемристора  $R_{OFF}$  к минимальному  $R_{ON}$  составляло 100:1, параметр  $p = 10$ . На первом этапе исследования были рассмотрены структуры мемристора, толщина активного слоя которых варьировалась в диапазоне от 1 до 10 нм с шагом 1 нм, а общая толщина мемристора - в диапазоне от 5 до 50 нм с шагом 5 нм. Амплитуда приложенного напряжения в данном моделировании составляла 1 В.

Форма петли гистерезиса вольт-амперной характеристики мемристора зависит от амплитуды и частоты прикладываемого к нему напряжения. Более того, в зависимости от того, в какой фазе находится напряжение (положительная или отрицательная), кислородные вакансии будут перемещаться между донорным и акцепторным слоями. На рис. 2 приведены графики вольт-амперных характеристик мемристора ( $d = 2$  нм,  $D = 20$  нм,  $U_m = 1$  В) в зависимости от частоты прикладываемого к ним напряжения. Также показаны зависимости положения  $w(t)$  границы раздела слоев, отнесенного к общей толщине  $D$  структуры, от времени.

Из приведенных графиков видно, что в случае напряжения с низкой частотой, атомы кислорода из активного слоя успевают полностью продиффундировать в обедненный слой, образуя структуру со стехиометрией  $TiO_{2-x}$ , до того, как закончится положительная фаза напряжения. Вследствие этого наступает насыщение мемристора, что показано на рис. 2.а. Увеличивая частоту прикладываемого напряжения (рис. 2.б), можно добиться такого подбора рабочих характеристик, при котором атомы кислорода активного слоя полностью продиффундируют в акцепторный слой ровно за полпериода напряжения ( $w/D = 1$ ), не достигая при этом насыщения. При дальнейшем увеличении частоты не все атомы кислорода успевают продиффундировать в обедненный слой за положительную фазу напряжения, петля гистерезиса становится более узкой, а соотношение  $w/D$  не достигает соотношения, равного 1 (рис. 2.в). Это позволяет использовать напряжение с высокой частотой для считывания информации о текущем сопротивлении мемристора, не меняя при этом его состояние.

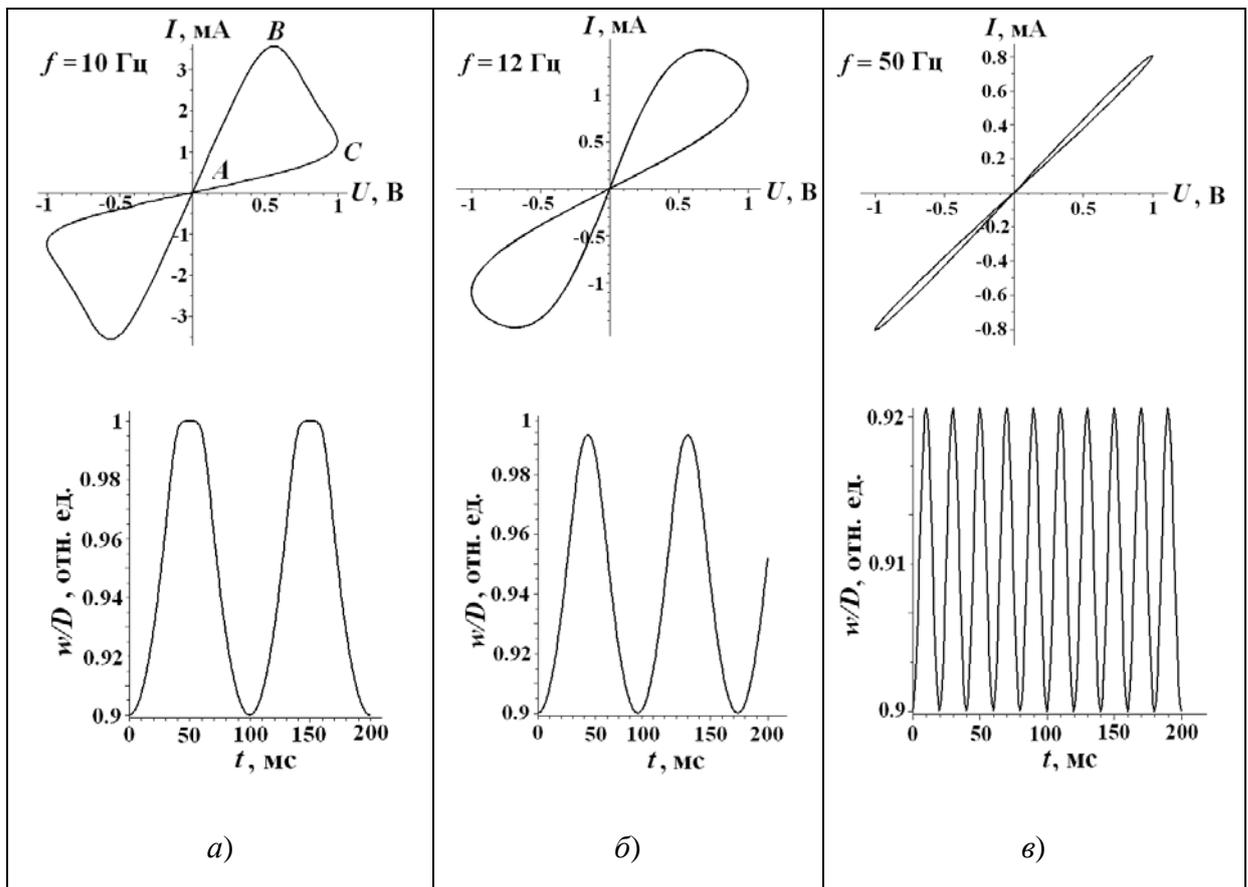


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика мемристора ( $d = 2$  нм,  $D = 20$  нм,  $U_m = 1$  В) и зависимость положения  $w(t)$  границы раздела слоев мемристора от времени при различных частотах приложенного напряжения.

На рис. 3 показана зависимость рабочей частоты мемристора от толщины активного слоя, полученная в результате моделирования. Данные приведены для структур, общая толщина которых изменялась в диапазоне от 10 до 50 нм.

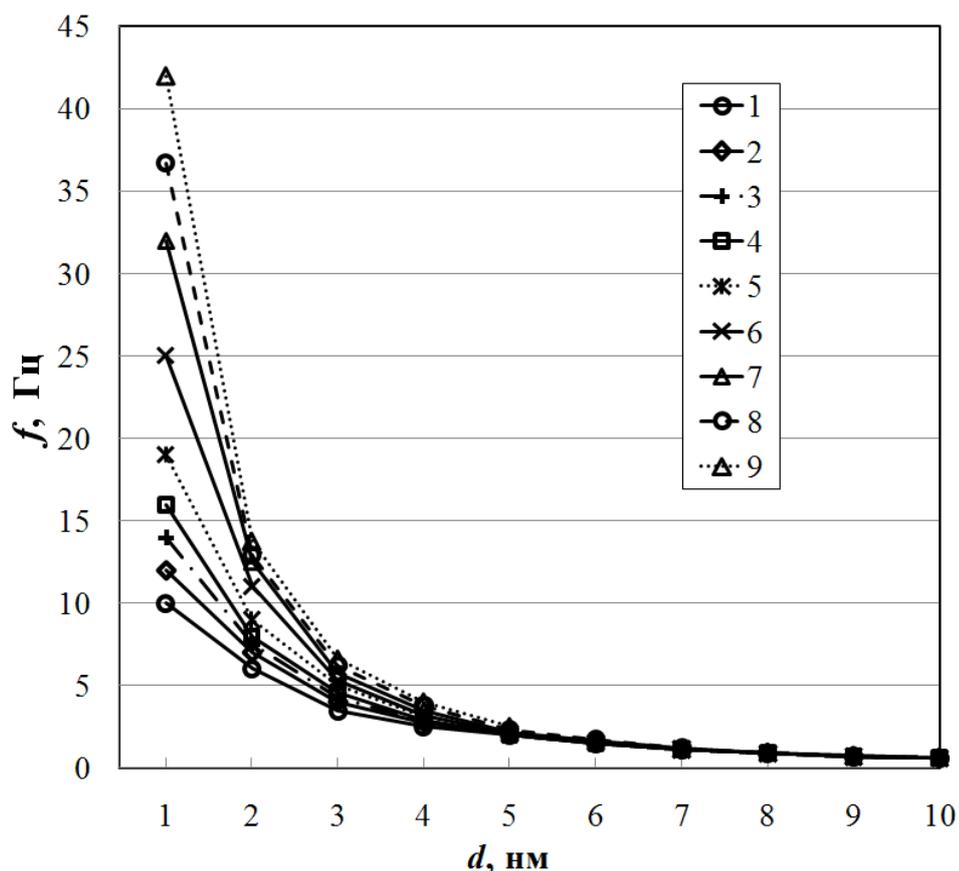


Рис. 3. Зависимость рабочей частоты мемристора от толщины активного слоя. Общая толщина для исследуемых структур составляла: 1) 50 нм; 2) 45 нм; 3) 40 нм; 4) 35 нм; 5) 30 нм; 6) 25 нм; 7) 20 нм; 8) 15 нм; 9) 10 нм.

Из приведенных графиков (рис. 3) видно, что при уменьшении толщины активного слоя ( $\text{TiO}_2$ ) происходит значительное увеличение рабочей частоты мемристора. При толщине активного слоя равной 4 нм и более для исследуемых структур не были выявлены значительные изменения в рабочей частоте мемристора вне зависимости от его общей толщины. С другой стороны, при уменьшении толщины активного слоя до 1 нм можно заметить проявление довольно сильной зависимости рабочей частоты мемристора от общей толщины пленки. При этом значимый скачок частотных свойств (увеличение частоты в два раза) наблюдается для более тонких структур с общей толщиной 10, 15 и 20 нм. Структуры с общей толщиной 30 нм и более не проявляют сильных изменений рабочей частоты (изменение составляет не более 14 %).

На рис. 4 показана зависимость потребляемой мощности исследуемых мемристоров от их структуры. При уменьшении толщины активного слоя ( $\text{TiO}_2$ ) наблюдается увеличение энергопотребления пассивного элемента. Так при уменьшении толщины активного слоя с 2 до 1 нм при общей толщине в 15 нм потребляемая мощность

мемристора увеличивается с 1.1 до 1.7 мВт. Уменьшение общей толщины мемристора при фиксированной толщине активного слоя приводит к снижению сопротивления мемристора, а значит, к увеличению потребляемой мощности мемристора. А именно, при уменьшении общей толщины мемристора с 50 до 15 нм при толщине активного слоя в 1 нм потребляемая мощность увеличивается с 1.0 до 1.8 мВт.

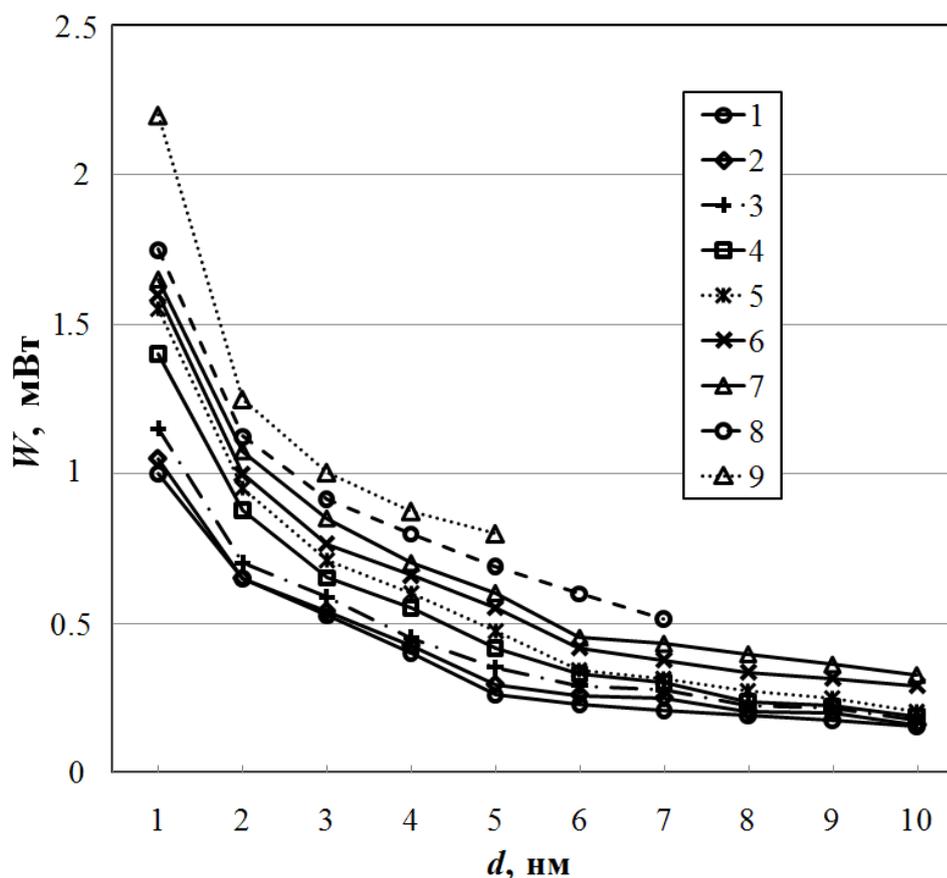


Рис. 4. Зависимость потребляемой мощности мемристора от толщины активного слоя.

Общая толщина для исследуемых структур составляла: 1) 50 нм; 2) 45 нм; 3) 40 нм; 4) 35 нм; 5) 30 нм; 6) 25 нм; 7) 20 нм; 8) 15 нм; 9) 10 нм.

Таким образом, уменьшение значения толщины активного слоя с 3 до 2 нм и с 2 до 1 нм при фиксированной общей толщине мемристора, лежащей в диапазоне значений от 5 до 30 нм, вызывает увеличение рабочей частоты мемристора в 2 раза (рис. 3). При этом потребляемая мощность увеличивается только на 35 % (рис. 4). Поэтому дальнейшее исследование зависимостей рабочей частоты и потребляемой мощности от амплитуды приложенного напряжения было проведено для структур, толщина активного слоя

которых изменялась в диапазоне от 1 до 3 нм, а общая толщина двухслойной пленки - от 5 до 30 нм.

На втором этапе моделирования было проведено исследование зависимостей рабочей частоты и потребляемой мощности мемристора от амплитуды приложенного напряжения, которая изменялась в диапазоне от 1 до 4 В с шагом 1 В. Данный выбор величины напряжения связан с возможностью встраивания мемристоров, изготовленных на основе оксида титана, в существующие КМОП и КНИ технологии, поскольку рабочее напряжение для ячеек flash-памяти на сегодняшний день составляет 3,3 В [8]. На рис. 5 и рис. 6 представлены зависимости рабочей частоты и потребляемой мощности мемристора от амплитуды приложенного напряжения для выбранных структур мемристоров.

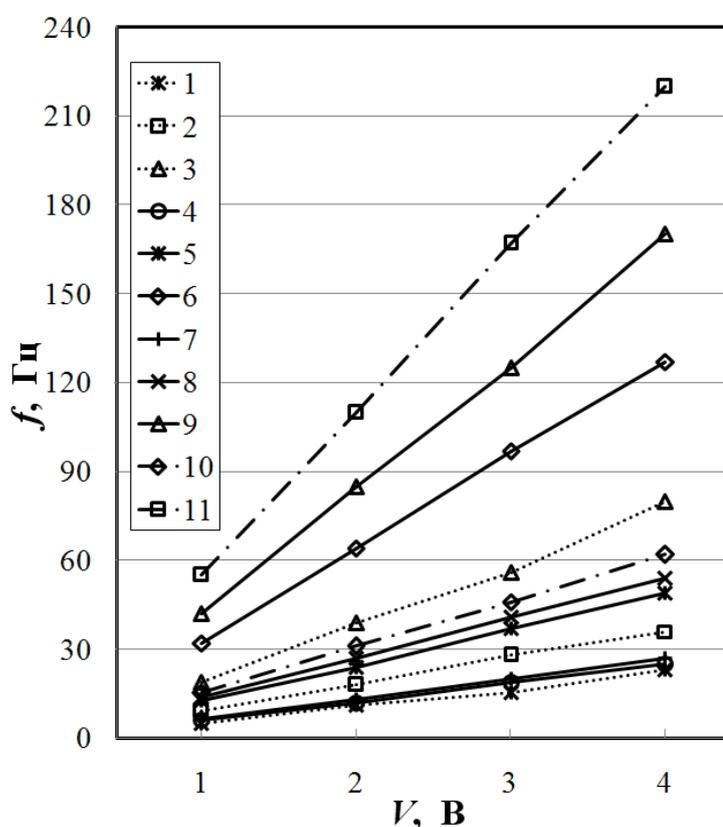


Рис. 5. Зависимость рабочей частоты мемристора от амплитуды приложенного напряжения. Графики представлены для структур со следующими параметрами:

- 1)  $D = 30$  нм,  $d = 3$  нм; 2)  $D = 30$  нм,  $d = 2$  нм; 3)  $D = 30$  нм,  $d = 1$  нм; 4)  $D = 20$  нм,  $d = 3$  нм;
- 5)  $D = 20$  нм,  $d = 2$  нм; 6)  $D = 20$  нм,  $d = 1$  нм; 7)  $D = 10$  нм,  $d = 3$  нм; 8)  $D = 10$  нм,  $d = 2$  нм;
- 9)  $D = 10$  нм,  $d = 1$  нм; 10)  $D = 5$  нм,  $d = 2$  нм; 11)  $D = 5$  нм,  $d = 1$  нм.

При увеличении амплитуды приложенного напряжения в исследуемом диапазоне для всех изучаемых структур наблюдается линейное увеличение рабочей частоты и квадратичное увеличение потребляемой мощности мемристора. Кроме того, уменьшение общей толщины мемристора приводит к увеличению рабочей частоты и потребляемой мощности мемристора. Так, при уменьшении общей толщины мемристора с 30 до 5 нм при напряжении 4 В и толщине донорного слоя равной 1 нм рабочая частота мемристора увеличивается с 80 до 220 Гц, а потребляемая мощность – с 25 до 40 мВт. Уменьшение толщины донорного слоя ( $\text{TiO}_2$ ) также приводит к увеличению потребляемой мощности мемристора и более резкому увеличению рабочей частоты по сравнению с влиянием уменьшения общей толщины мемристора. В частности, при уменьшении донорного слоя с 2 до 1 нм при амплитуде приложенного напряжения равной 4 В и общей толщине мемристора равной 5 нм рабочая частота увеличивается с 62 до 220 Гц (в 3.5 раза), а потребляемая мощность – с 22 до 40 мВт (в 1.8 раз).

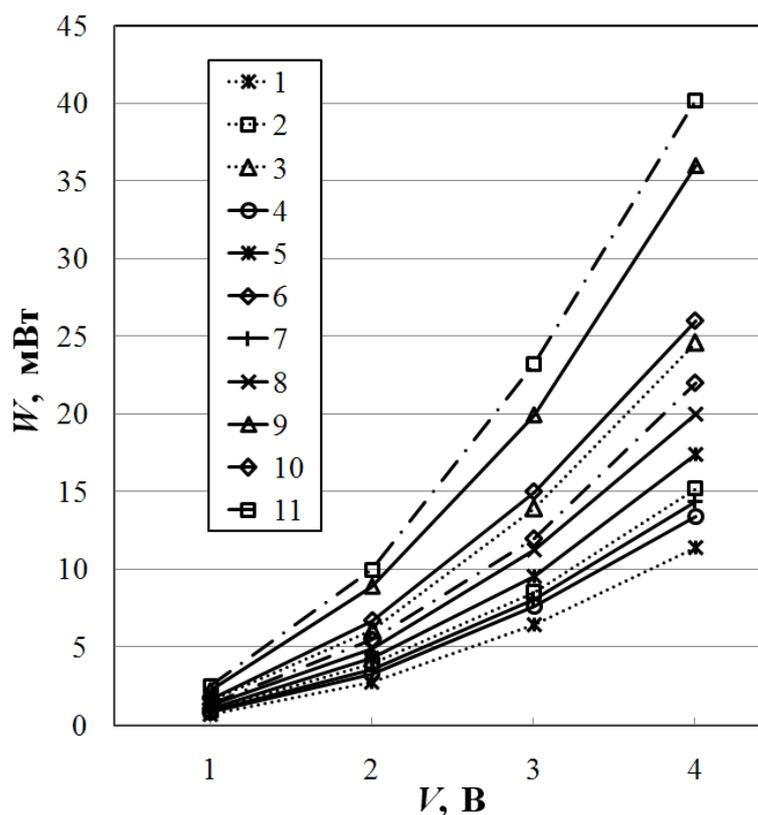


Рис. 6. Зависимость потребляемой мощности мемристора от амплитуды приложенного напряжения. Графики представлены для структур со следующими параметрами:

- 1)  $D = 30$  нм,  $d = 3$  нм; 2)  $D = 30$  нм,  $d = 2$  нм; 3)  $D = 30$  нм,  $d = 1$  нм; 4)  $D = 20$  нм,  $d = 3$  нм;
- 5)  $D = 20$  нм,  $d = 2$  нм; 6)  $D = 20$  нм,  $d = 1$  нм; 7)  $D = 10$  нм,  $d = 3$  нм; 8)  $D = 10$  нм,  $d = 2$  нм;
- 9)  $D = 10$  нм,  $d = 1$  нм; 10)  $D = 5$  нм,  $d = 2$  нм; 11)  $D = 5$  нм,  $d = 1$  нм.

Таким образом, для увеличения рабочей частоты исследуемых структур необходимо стремиться к уменьшению толщины донорного слоя ( $\text{TiO}_2$ ) до значений в 1 - 2 нм и к уменьшению толщины акцепторного слоя ( $\text{Ti}_4\text{O}_7$ ) до получения значения общей толщины мемристора в 5 - 10 нм. Однако, при работе с такими значениями толщин пленок мемристора перед изготовителем встает ряд задач.

Во-первых, наблюдаемое при таких структурных параметрах увеличение потребляемой мощности мемристора приводит к увеличению тепловыделения элемента. А значит, необходимо обеспечить эффективный теплоотвод, что представляет собой отдельную конструкторскую задачу.

Во-вторых, при выращивании тонких пленок возникают сложности экспериментального получения равномерного и сплошного обедненного слоя. В частности, при выращивании обедненного слоя ( $\text{Ti}_4\text{O}_7$ ) методом импульсного лазерного осаждения толщиной менее 10 нм сохраняется неравномерная структура пленки, обусловленная первоначальным островковым ростом [9].

В третьих, в ультратонких слоях (при толщине активного слоя 1 нм и менее) проводимость определяют эффекты туннелирования. Туннелирование носителей заряда через барьер увеличивается экспоненциально при уменьшении толщины активного слоя. На рис. 7 показаны графики зависимостей рабочего тока мемристора с общей толщиной 30 нм и площадью контактов 70 x 70 мкм и туннельного тока, протекающего через активный слой мемристора, от толщины активного слоя. При толщине активного слоя равной 1 нм туннельный ток, протекающий через активный слой мемристора, значительно превышает значение рабочего тока мемристора. Однако, при толщине активного слоя в 2 нм туннельный ток перестает вносить ощутимый вклад. Таким образом, толщина активного слоя мемристора должна быть не менее 2 нм.

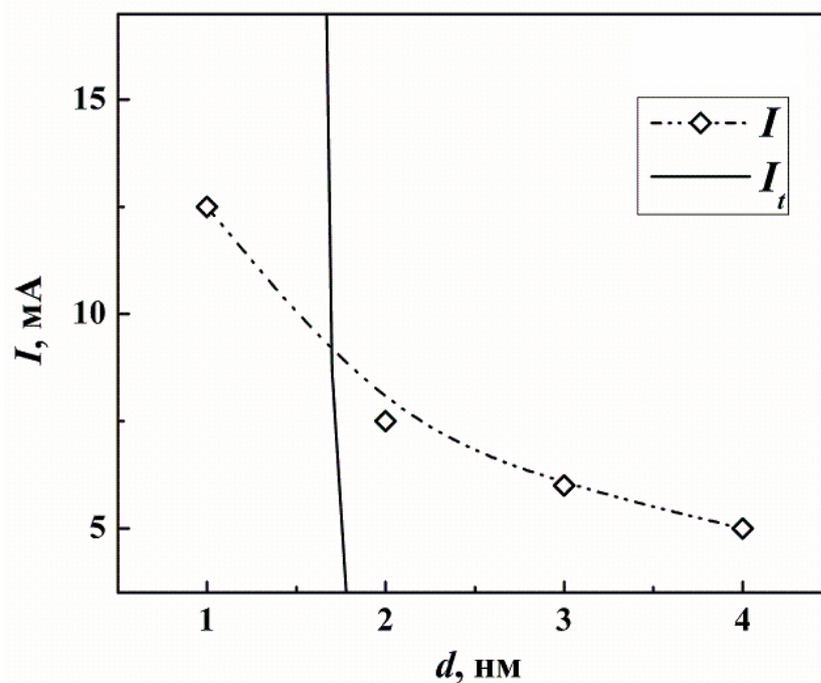


Рис. 7. Зависимость рабочего тока мемристора ( $I$ ) с общей толщиной 30 нм и площадью контактов 70 x 70 мкм и туннельного тока ( $I_t$ ), протекающего через активный слой, от толщины активного слоя мемристора.

## ВЫВОДЫ

В данной работе было выполнено численное моделирование функциональных свойств мемристора для структур с общей толщиной, лежащей в диапазоне от 5 до 50 нм, и толщиной активного слоя - в диапазоне от 1 до 10 нм. При этом впервые помимо исследования частотных характеристик мемристора был проведен анализ зависимости мощностных характеристик мемристора от его структурных параметров.

Показано, что значительное увеличение рабочей частоты мемристора (в 3,5 раза) наблюдается при уменьшении толщины активного слоя ( $\text{TiO}_2$ ) до значений в 1-2 нм при значении общей толщины мемристора в 5-10 нм. При этом происходит увеличение потребляемой мощности мемристора в 1,8 раз.

Возникающие технологические ограничения, связанные с особенностями формирования пленочных покрытий, а также эффекты туннелирования не позволяют получить мемристоры с толщиной активного слоя равной 1 нм и общей толщиной мемристора равной 5 нм. В связи с этим оптимальной структурой мемристора, экспериментально достижимой на данный момент, можно считать структуру с общей толщиной в 10 нм и толщиной активного слоя в 2 нм.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках госконтракта № 16.513.11.3104.

### Список литературы

1. Chua L.O. Memristor – the missing circuit element // IEEE Transactions on circuit theory. 1971. V. 18. № 5. PP. 507-519.
2. Strukov D.B. [et al]. The missing memristor found // Nature. 2008. V. 453. PP. 80-83.  
[DOI:10.1038/nature06932](https://doi.org/10.1038/nature06932)
3. Zaplatilek K. Memristor modeling in MATLAB and Simulink // Proceedings of the European computing conference. 2011. PP. 62-67.
4. Biolek Z., Biolek D., Biolkova V. SPICE model of memristor with nonlinear dopant drift // Radioengineering. 2009. V. 18. № 2. PP. 210-214.
5. Yang J.J. et al. Memristive switching mechanism for metal/oxide/metal nanodevices // Nature nanotechnology. 2008. V. 3. PP. 429-433.
6. Miller K. Fabrication and modeling of thin-film anodic titania memristors. M.Sc. Thesis. Ames, Iowa: Iowa State University, 2010. PP.4-6.
7. Аракелян В.М. Фотоэлектрохимическое получение водорода с использованием металлоксидных полупроводниковых фотоэлектродов // Альтернативная энергетика и экология. 2006. № 11. С. 78-84.
8. Кузьмин Н., Бузмаков А. Промышленная флэш-память // Компоненты и технологии. 2009. № 10. С. 33-38.
9. Vogt K.W., Kohl P.A., Carter W.B., Bell R.A., Bottomley L.A. Characterization of thin titanium oxide adhesion layers on gold: resistivity, morphology and composition // Surface science. 1994. vol. 301. № 1-3. pp. 203-213.

## Modeling of frequency and power characteristics of titanium dioxide memristor

# 05, May 2012

DOI: 10.7463/0512.0409216

Hrapovickaya Yu.V., Maslova N.E., Zanaveskin M.L., Marchenkov A.N.

Russia, National Research Centre "Kurchatov Institute"

[lcrom@mail.ru](mailto:lcrom@mail.ru)

[dorothy@mail.ru](mailto:dorothy@mail.ru)

[zanaveskin.maxim@gmail.com](mailto:zanaveskin.maxim@gmail.com)

[alexei.marchenkov@gmail.com](mailto:alexei.marchenkov@gmail.com)

The authors carried out numerical modeling of titanium dioxide memristor working frequency and power consumption. The model of memristor consists of two resistors connected in series; their resistance depends on the layers barrier between the oxygen layer and the TiO<sub>2</sub> layer. For the first time the memristor power consumption at structural parameters dependences was analyzed. It was shown that significant increase of working frequency under the conditions of decrease of active layer thickness and total memristor thickness leads to the increase of memristor power consumption. The optimal values of active layer thickness and total memristor thickness were defined in this article, basing on the obtained data.

---

Publications with keywords: [numerical modelling](#), [memristor](#), [titanium oxide](#)

Publications with words: [numerical modelling](#), [memristor](#), [titanium oxide](#)

---

### References

1. Chua L.O. Memristor – the missing circuit element. *IEEE Transactions on circuit theory*, 1971, vol. 18, no. 5, pp. 507-519.
2. Strukov D.B., Snider G. S., Stewart D. R., Williams S. R. The missing memristor found, *Nature*, 2008, vol. 453, pp. 80-83. DOI:10.1038/nature06932
3. Zaplatilek K. Memristor modeling in MATLAB and Simulink. *Proc. of the European computing conference*, 2011, pp. 62-67.
4. Biolek Z., Biolek D., Biolkova V. SPICE model of memristor with nonlinear dopant drift. *Radioengineering*, 2009, vol. 18, no. 2, pp. 210-214.

5. Yang J.J. ., Picket M. D., Li X., Ohlberg D.A.A., Steward D. R., Williams R. S. Memristive switching mechanism for metal/oxide/metal nanodevices . *Nature nanotechnology*, 2008, no. 3, pp. 429-433.
6. Miller K. *Fabrication and modeling of thin-film anodic titania memristors*. M.Sc. Thesis. Ames, Iowa, Iowa State University, 2010, pp. 4-6.
7. Arakelian V.M. Fotoelektrokhimicheskoe poluchenie vodoroda s ispol'zovaniem metalloksidnykh poluprovodnikovykh fotoelektrodov [Photoelectrochemical production of hydrogen using metal oxide semiconductor photoelectrodes]. *Al'ternativnaia energetika i ekologiya*[Alternative energy and ecology], 2006, no. 11, pp. 78-84.
8. Kuz'min N., Buzmakov A. Promyshlennaia flesh-pamiat' [Industrial flash memory]. *Komponenty i tekhnologii* [Components and technologies], 2009, no. 10, pp. 33-38.
9. Vogt K.W., Kohl P.A., Carter W.B., Bell R.A., Bottomley L.A. Characterization of thin titanium oxide adhesion layers on gold: resistivity, morphology and composition, *Surface science*, 1994, vol. 301, no. 1-3, pp. 203-213.