

Анализ стандартных моделей мемристоров на основе оксида титана для применения в системах искусственного интеллекта

В.Н. Ефанов, А.В. Бондарев, А.А. Кучкарова

Уфимский университет науки и технологий

Аннотация: В статье рассматриваются стандартные модели мемристоров на основе диоксида титана. Мемристор похож на резистор с памятью и демонстрирует нелинейную характеристику сопротивления, при которой параметр заряда является переменной состояния. Они могут быть использованы для создания новых видов электронных устройств с высокой энергоэффективностью и производительностью, а также для создания машин, которые могут учиться и адаптироваться к изменяющимся условиям окружающей среды и во многих практических приложениях: память для хранения данных (двоичная и многоуровневая), переключатели в логических электронных схемах, пластичные компоненты в нейроморфных системах искусственного интеллекта, построенных на базе нанoeлектронных компонентов. Было показано, что при подаче напряжения на заряженные ионы начинают дрейфовать, и граница между двумя областями смещается. Когда к мемристору прикладывается синусоидальное переменное напряжение заданной частоты, форма вольт-амперной характеристики (ВАХ) напоминает диаграмму Лиссажу с центром в начале координат.

Ключевые слова: мемристор, модель, вольт-амперная характеристика, нелинейность.

Введение

В 1971 году Леон Чуа, американский физик из Калифорнийского университета в Беркли, выдвинул гипотезу о том, что в электрической цепи должен существовать четвертый фундаментальный элемент, описывающий связь между магнитным потоком и электрическим зарядом. Чуа назвал его мемристором (от англ. memory – память, и англ. resistor – электрическое сопротивление), Одно из свойств мемристора - "эффект памяти", означает, что свойства этого элемента зависят от ранее приложенных воздействий.

Мемристор - это элемент электрической цепи, сопротивление которого определенным образом зависит от проходящего через него заряда. Отключение напряжения в цепи не изменяет состояние мемристора [1]. Чтобы восстановить свойства памяти мемристора, необходимо изменить полярность подаваемого напряжения.

Чистая идея Чуа не имела практического применения в 1970-е годы и

была признана лишь красивой математической фантазией. Однако, в конце 1990-х годов, в исследовательском центре HP Labs был создан новый Институт квантовых информационных систем, который возглавил Стэн Уильямс, опытный специалист в области химической физики и нанотехнологий. На основе работ Чуа ученые начали создавать новаторское запоминающее устройство в качестве специфической разновидности резистивной памяти RAM [2, 3].

Мемристоры принципиально отличаются от современных полупроводниковых устройств памяти, в которых для хранения информации используется электрический заряд. Вместо того, чтобы хранить данные в виде зарядов, мемристоры используют изменения электрического сопротивления. Это означает, что они менее подвержены утечке заряда, что является основной проблемой для чипов нанометрового размера. Долговечность и надежность-главные преимущества мемристоров перед другими типами полупроводниковой памяти. Мемристоры хранят данные до тех пор, пока доступен материал.

Мемристоры уже сегодня находят применение в различных областях, включая энергетику, медицину, электронику и компьютерную технику. С учетом быстрого развития новых технологий, мемристоры имеют хорошие шансы на широкое использование в будущем:

1. Более эффективное хранение и обработку данных в компьютерных системах, таких, как сети нейронных машин и синаптические компьютеры, благодаря их способности изменять свои свойства в зависимости от полученного опыта.

2. Создание более энергоэффективных устройств для хранения информации, которые могут работать дольше от батарей и имеют более высокую плотность хранения данных.

3. Создание гибридных устройств, объединяющих функции

мемристоров с другими технологиями, такими, как кремниевые транзисторы, для более эффективной и точной обработки сигналов и данных.

4. Использование мемристоров в медицинских сенсорах и устройствах, таких, как искусственные слуховые и зрительные системы, для лучшей имитации человеческого восприятия.

5. Применение мемристоров в энергоэффективных сверхвысокоскоростных микросхемах для использования в системах связи и быстродействующих системах управления.

6. Использование мемристоров в качестве элементов памяти и обработки данных в квантовых компьютерах для увеличения скорости и эффективности квантовых вычислений.

Особое свойство мемристора заключается в том, что его сопротивление может быть запрограммировано (функция резистора), которое впоследствии сохраняется (функция памяти). В отличие от других видов памяти, существующих сегодня в современной электронике, мемристоры запоминают свое состояние, даже если на устройство не подается питания – то есть они выступают в качестве энергонезависимой памяти.

Разработка систем искусственного интеллекта, нацеленных на решение сложных когнитивных задач, требует использования достаточно больших массивов данных [4]. Синаптические запоминающие элементы системы должны быть организованы с высокой плотностью. Для этого используется топология "перекладина". (Элементы размещаются на пересечении перпендикулярных друг другу путей электродов "бит" и "слово"). В данном случае одним из основных требований к элементам планок памяти является низкое энергопотребление при резистивном переключении. Энергопотребление и низкое напряжение RP при резистивном переключении элемента матрица может быть эффективно интегрирована в современные КМОП-процессоры, работающие при напряжении 3 В и менее. Для

эффективной интеграции матрицы в современные КМОП-процессоры требуются устройства, работающие при напряжении ниже 3 В [5]. В этом случае параметром мемристора является пластичность. Набор промежуточных состояний веса переходов между максимальным и минимальным [6].

Методы

Модель мемристора Струкова-Вильямса (К1). В этой модели используется простая параболическая оконная функция, обозначаемая $f_{sw}(x, i)$. Из-за постоянной подвижности ионных легирующих примесей эта модель не может представить нелинейный дрейф в зависимости от напряжения, приложенного к мемристор. Модель полностью описывается набором уравнений (1) и (2). Уравнение (2) описывает оконную функцию, предложенную Струковым и Уильямсом [7]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{dt} = k \cdot i \cdot f(x) \\ v = i \cdot [R_{ON}x + R_{OFF}(1 - x)] \\ k = \frac{\mu R_{ON}}{D^2} \end{array} \right. \quad (1)$$

$$f_{sw}(x) = 4x \cdot (1 - x) \quad (2)$$

где x – переменная состояния мемристора; $k = 1000$ – константа, зависящая от физических параметров мемристора; $\mu = 1 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ – подвижность ионного дрейфа; $D = 10 \text{ нм}$ – длина мемристора; $R_{ON} = 100 \text{ Ом}$ и $R_{OFF} = 16 \text{ кОм}$ – сопротивления включения и выключения мемристора; v – приложенное напряжение; I – ток мемристора; $f(x)$ – оконная функция. Начальное значение переменной состояния x_0 , необходимое для решения уравнения (1) и находится в интервале $[0, 1]$, а его обычное значение равно 0,1.

Модель мемристора Джоглекара (К2). Эта модель использует полиномиальную оконную функцию, в которой нелинейность зависит от

применяемой положительной целочисленной экспоненты p . Модель основана на фиксированной ионной подвижности, и она не способна полностью представить нелинейный дрейф ионной легирующей примеси в зависимости от приложенного к мемристорам напряжения. Параметр p обычно находится в диапазоне от 1 до 100. Модель описывается уравнениями (1) и (3), где последнее представляет собой окно Джоглекара [8]:

$$f_J(x) = 1 - (2x - 1)^{2p} \quad (3)$$

Нелинейность применяемой оконной функции и мемристорной модели увеличивается при уменьшении значения целочисленной экспоненты p . Если $p = 1$. В этом случае модель ведет себя, как модель с памятью Струкова-Уильямса, описанная ранее.

Модель мемристора компании Biolek (K3). Эта модель мемристора основана на уравнениях (1) и (4), где второе уравнение представляет собой нелинейную оконную функцию на основе переключателя, предложенную компанией Biolek:

$$\left| \begin{array}{l} f_B(x, i) = 1 - [x - \text{stp}(-i)]^{2p} \\ \text{stp}(i) = \begin{cases} 1, & \text{если } i \geq 0 \\ 0, & \text{если } i < 0 \end{cases} \end{array} \right. \quad (4)$$

Целочисленная экспонента p обычно находится в диапазоне от 1 до 100. Если значение p очень велико, то модель ведет себя подобно модели мемристора с граничными условиями. Оригинальная ступенчатая функция Хевисайда stp , включенная в уравнение (17), не является непрерывной и недифференцируемой, и заменяется другой ступенчатой логистической функцией для генерации моделей библиотеки мемристоров LTSPICE, чтобы избежать проблем со сходимостью. Такая модель может правильно представить граничные эффекты для режима жёсткого переключения.

Модель мемристора с граничными условиями (Асколи-Коринто) (K4). Данная модель основана на уравнениях (1) и (5). Функция окна предложена Коринто и Асколи [9]:

$$\left| \begin{array}{l} f_{BCM}(x) = 1, \quad (0 < x < 1) \text{ или } (x = 0 \text{ и } v \geq v_{thr}) \text{ или } (x = 1 \text{ и } v \leq -v_{thr}) \\ f_{BCM}(x) = 0, \quad (x = 0 \text{ и } v < v_{thr}) \text{ или } (x = 1 \text{ и } v > -v_{thr}) \end{array} \right. \quad (5)$$

где $v_{thr} = 0,15$ В – порог активации.

Эта оконная функция хорошо отображает граничные эффекты в области жесткого переключения. Граничные эффекты возникают, когда переменная состояния x равна 0 или 1 (5). В этой модели мемристора применяется порог активации v_{thr} . Когда напряжение, приложенное к мемристор, падает ниже порога активации, переменная состояния x остается неизменной, и мемристор ведет себя как линейный резистор.

Модель Лехтонена-Лайхо (K5). Эта мемристорная модель использует крайне нелинейные зависимости между производной по времени переменной состояния x и между током i и напряжением v мемристора, соответственно [10]. Модель полностью описывается системой уравнений (6):

$$\left| \begin{array}{l} i = x^n \beta \cdot \sinh(\alpha v) + \chi[\exp(\gamma v) - 1] \\ \frac{dx}{dt} = a \cdot f_B(x, i) \cdot v^m \end{array} \right. \quad (6)$$

где β , α , χ , γ , a , m и n – параметры подгонки: $m, n = 5$, $\beta = 150$ мкА, $\alpha = 3,55$ В-1, $\chi = 50$ мкА, $\gamma = 0,07$ В-1, $a = 3,34$. Стандартная оконная функция компании Biolek $f_B(x, i)$ включена в модель мемристора для представления граничных эффектов режима жесткого переключения. Данная модель мемристора обладает хорошей перестраиваемостью и подходит для представления асимметричных вольт-амперных характеристик, которые соответствуют выпрямляющему эффекту.

Результаты

Оценка параметров модели мемристора с помощью экспериментальной вольт-амперной характеристики представлена на рис.1. Данный эксперимент проводится в MATLAB и основан на изменении параметров модели до получения минимальной ошибки между смоделированными и экспериментальными зависимостями.

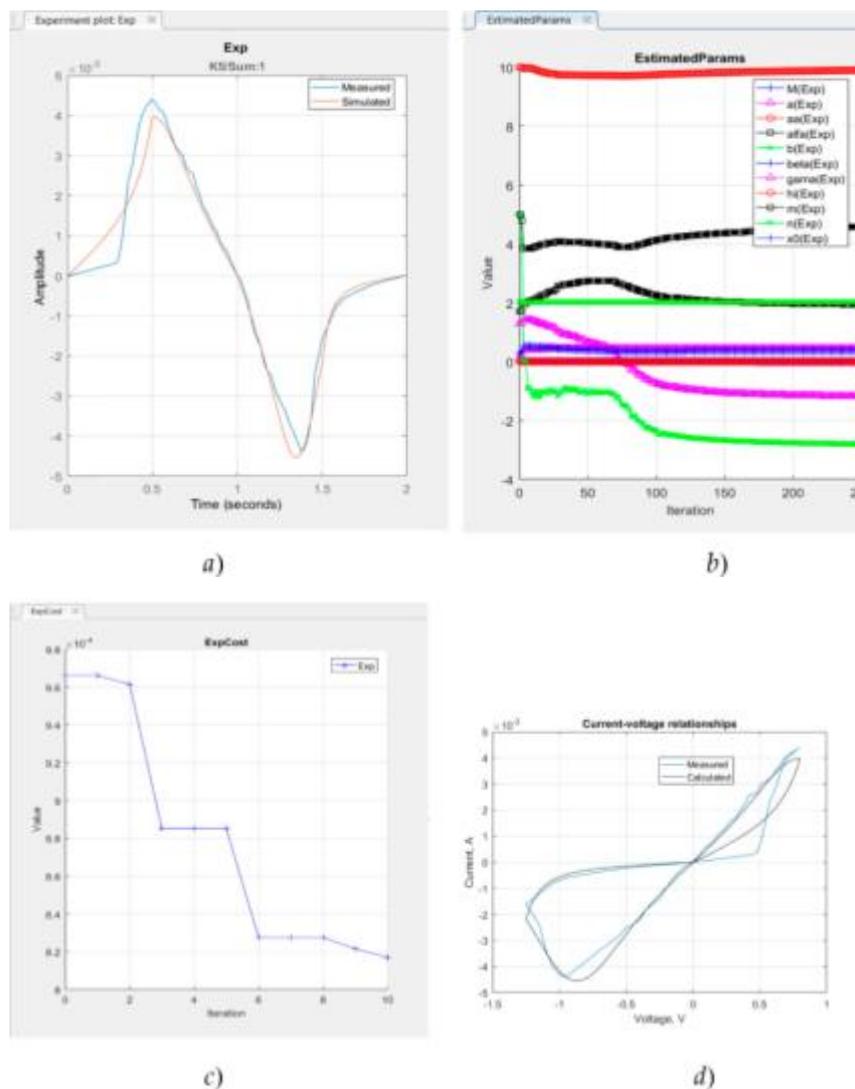


Рис. 1. – а) Смоделированные и экспериментальные ВАХ мемристора из диоксида титана после настройки модели K5; б) Изменение параметров модели мемристора во время процедуры оценки; в) График убывания функции стоимости во время оценки параметров модели; г) Соответствующие экспериментальные и смоделированные ВАХ рассматриваемого элемента мемристора.

Распространенные стандартные модели мемристоров на диоксиде титана K1, K2, K3 и K4 анализировались для синусоидальных сигналов напряжения с амплитудой 1,15 В и частотой 1 Гц. Зависимость полученных состояний от напряжения показана на рис.2. Соответствующие характеристики ток-напряжение, полученные в среде LTSPICE, показаны на рис.2, б.

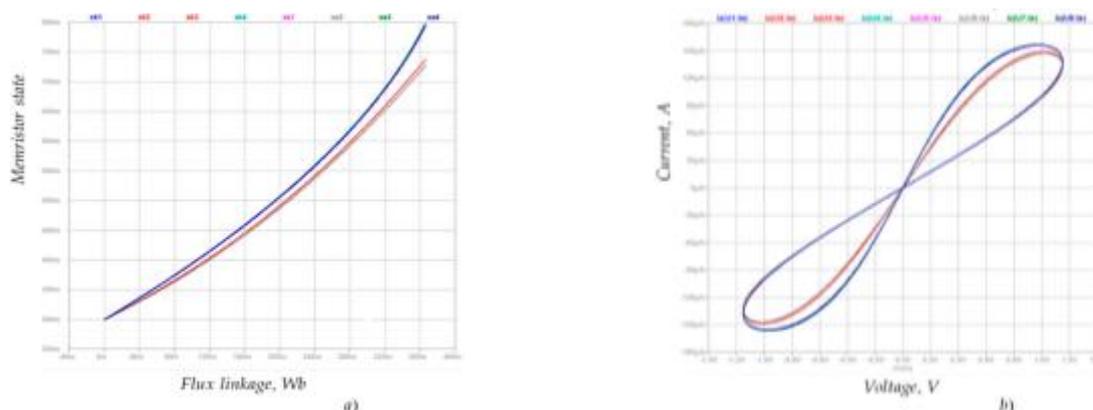


Рис. 2. – а) Зависимости состояния от потока для стандартных моделей мемристоров на диоксиде титана K1, K2, K3 и K4 при синусоидальном напряжении 1,15 В и частоте 1 Гц; б) Соответствующие ВАХ для рассматриваемых моделей.

Также автор приводит математические модели мемристоров на основе диоксида гафния (рис.3) и танталовых оксидных мемристоров (рис.4), которые подробно описаны в работе [3]. Приведем графики зависимостей параметров для того, чтобы увидеть различия в характеристиках мемристоров на основе диоксида гафния и танталовых оксидных мемристоров от мемристоров на основе диоксида титана.

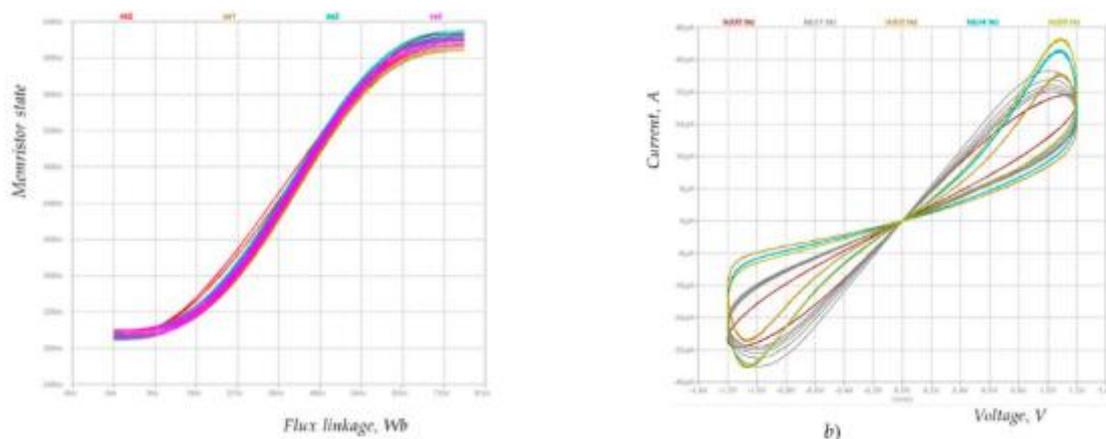


Рис. 3. – а) Зависимости состояния от времени моделей мемристоров на основе диоксида гафния при синусоидальном напряжении величиной 1,2 В и частотой 5 Гц; б) Соответствующие зависимости тока от напряжения для рассмотренных моделей мемристоров на основе диоксида гафния.

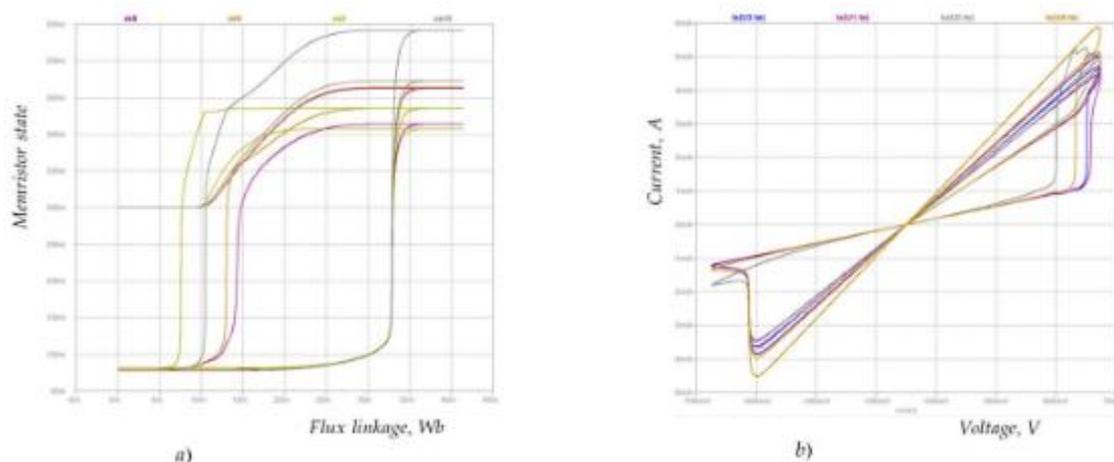


Рис. 4. – а) Зависимости состояния от времени стандартных моделей мемристоров на основе оксида тантала при синусоидальном напряжении величиной 0,65 В и частотой 5 Гц; б) Соответствующие зависимости тока от напряжения для рассматриваемых моделей мемристоров на основе оксида тантала.

Моделирование мемристора в симуляторе электронных схем SPICE.

Стандартный подход к моделированию элементов памяти в SPICE (англ. Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis), где мемристор представлен эквивалентной схемой, показан на рис.5.



Рис.5. – Эквивалентная схема мемристора в SPICE

На рис.5 TE и BE обозначают верхний и нижний электроды мемристора, соответственно; $G(x)$ - проводимость устройства, смоделированного как источник тока, управляемый напряжением между электродами. Внутренняя переменная состояния мемристора x моделируется параллельным соединением между источником тока IGx и конденсатором емкостью 1 Ф.

Модель Струкова была впервые создана как представление устройства TiO_2 компании HP является наиболее широко используемой средой моделирования, включая MATLAB Simulink. Сегодня модель мемристора Струкова является базовой моделью для построения сложных систем, включая искусственные нейронные сети [3].

Базовая макромодель SPICE для мемристора. В целом, существует три способа моделирования электрических характеристик мемристора: макромодели SPICE, язык описания аппаратуры (HDL) и программирование на языке C. Первый подход, макромодель SPICE, более удобен, поскольку он более читабелен и доступен во всех версиях SPICE, в то время как моделирование в SPICE-более удобный способ описания реального поведения устройства. Базовая макромодель мемристора в среде SPICE показана на рис.6.

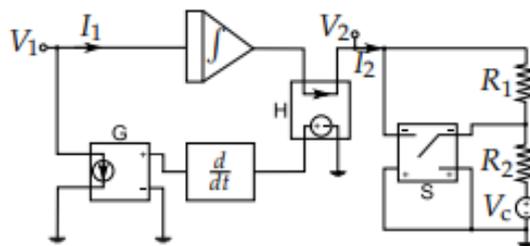


Рис. 6. – Базовая макромодель мемристора SPICE

Моделирование SPICE с макромоделью мемристора показано на рис.7 и 8. В этом конкретном моделировании монотонно увеличивающейся и кусочно-линейной для характеристики мемристора предполагается функция $q-\Phi$. Эта функция показана на рис.7, б. Критический поток (ϕ_c) может изменяться в зависимости от напряжения включения переключателя в макромодели. На рис.7, а показана характеристика гистерезиса с заземлением мемристора.

Входное напряжение на мемристор представляет собой рампу с наклоном $+1$ В/с и -1 В/с. Когда входное напряжение возрастает,

запоминающее сопротивление составляет 1 кОм, а наклон характеристик текущего напряжения составляет 1 мА/В, прежде чем поток достигнет Φ_c . Но когда поток становится 2 Вб, значение сопротивления памяти изменяется на 2 кОм, и кривая ввода-вывода наклон теперь составляет 0,5 мА/В. После того, как входное напряжение достигает максимальной точки, оно снижается, и наклон сохраняется, поскольку запоминающее сопротивление по-прежнему составляет 2 кОм.

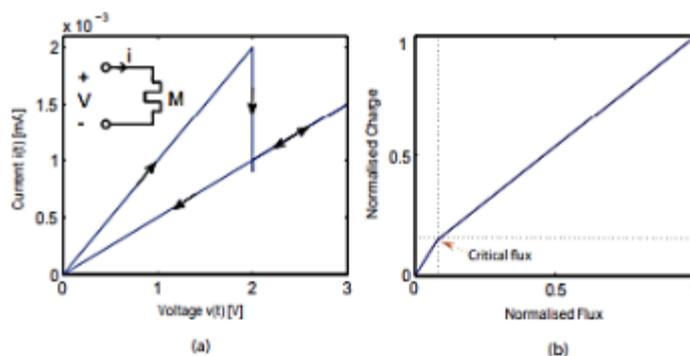


Рис. 7. - Основные характеристики мемристора для переключения между двумя высокими и низкими сопротивлениями: а) гистерезисные характеристики мемристора; б) Монотонно возрастающая и кусочно-линейная функция $q-\Phi$ в качестве базовой характеристики мемристора.

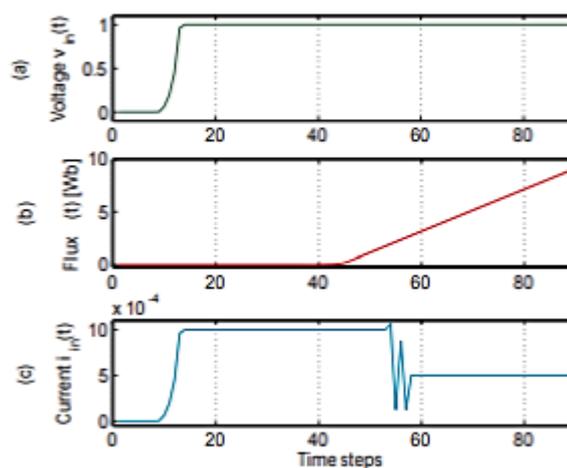


Рис. 8. – Поведение мемристора при подаче на вход ступенчатого напряжения - а) Кривая напряжения; б) Кривая связи потоков; с) Кривая тока.

На рис.8 показаны характеристики мемристора при подаче ступенчатого входного напряжения. Первоначально сопротивление памяти составляет 1 кОм, поэтому входной ток составляет 1 мА. Когда поток достигает 2 Вб, сопротивление памяти составляет 2 кОм, и поэтому входной ток теперь составляет 0,5 мА.

Теперь, если к модели мемристора подключен источник синусоидального напряжения частотой 1 кГц, поток не достигает 2 Вб, поэтому $M = M1 = 1$ кОм и $i = 10$ мА. На рис.9(I) показаны характеристики мемристора при подаче синусоидального входного напряжения. Как показано на рис.9(II), когда частота источника напряжения снижается до 10 Гц, потокосцепление достигает 2 Вб за 30 мс. Опираясь на результат, существует два уровня устойчивости к запоминанию: $M = M1 = 1$ кОм, а затем оно меняется на $M2 = 2$ кОм.

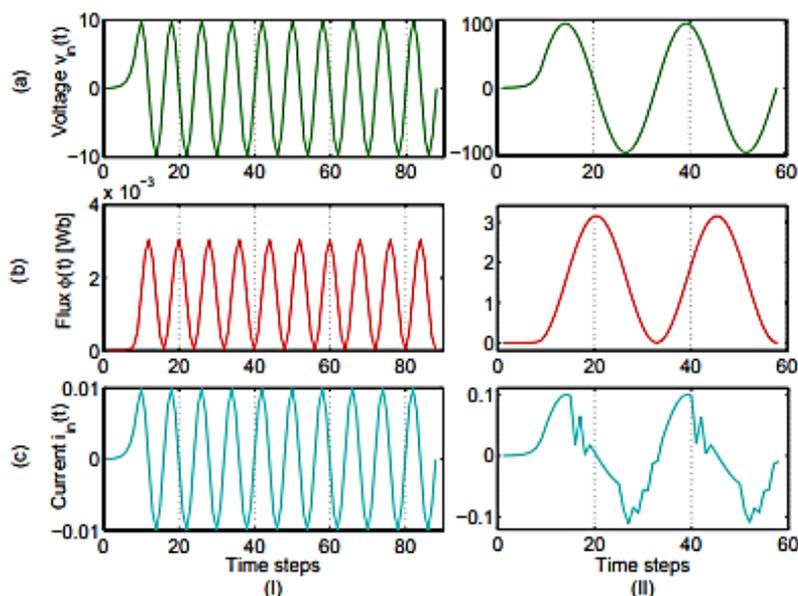


Рис. 9. – Поведение мемристора при подаче на вход синусоидального напряжения

Обсуждение результатов

Таким образом, когда на металлический контакт подается напряжение,

заряженные ионы начинают дрейфовать, и граница между двумя областями смещается. Когда к мемристору прикладывается синусоидальное переменное напряжение определенной частоты, его вольт-амперная характеристика (ВАХ) приобретает форму, похожую на диаграмму Лиссажу с центром в начале координат. ВАХ мемристора имеет следующие основные характеристики:

- когда к мемристору прикладываются биполярные циклические токи или напряжения, ВАХ имеет гистерезисную характеристику (тип Лиссажу независимо от начальных условий). Важно отметить, что гистерезисная характеристика является специфической характеристикой мемристора, а не измерительной схемы;
- с увеличением частоты периодического сигнала амплитуда гистерезиса уменьшается, и форма ВАХ меняется на прямую линию, наклон которой зависит от амплитуды питающего сигнала.

Заключение

Благодаря своим особым свойствам, мемристорные устройства могут эффективно использоваться во многих практических приложениях, таких, как память для хранения данных (двоичная и многоуровневая), переключатели в логических электронных схемах и пластичные элементы в нейроморфных системах искусственного интеллекта.

Литература

1. Бондарев А.В., Ефанов В.Н. Принципы формирования математической модели нанoeлектронных компонентов квантовых вычислительных комплексов с мемрезистивными ветвями // Системы управления и информационные технологии. 2020. № 1(79). С. 4-10.
2. Bondarev A.V., Efanov V.N. Dynamic mode of the mathematical model of an electric multipole with memresistive branches in conditions of interval

uncertainty // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 976. №1. p. 012013. URL: doi.org/10.1088/1757-899X/976/1/012013.

3. Mladenov V. A unified and open LTSPICE memristor model library // Electronics. 2021. V. 10. №13. p. 1594. URL: doi.org/10.3390/electronics10131594.

4. Тимохин М.Ю., Шаранин В.Ю. Искусственный интеллект и теория принятия решений: современные тенденции // Инженерный вестник Дона. 2023. №10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2023/8746

5. Рыбаков А.А., Кочетков Д.И. Проектирование КМОП ОУ с напряжением питания 1 В // Инженерный вестник Дона. 2015. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/2822

6. Бондарев А.В., Ефанов В.Н. Анализ динамических процессов в наноэлектронных структурах на базе мемрезистивных элементов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2021. Т. 23. № 2(100). С. 91-97.

7. Mladenov V. M., Zaykov I. D., Kirilov S. M. A Nonlinear Titanium Dioxide Memristor Model for Memory Crossbars Analysis // 2022 26th International Conference Electronics. IEEE, 2022. pp. 1-6.

8. Joglekar Y. N., Meijome N. Fourier response of a memristor: generation of high harmonics with increasing weights // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. 2012. V. 59. №11. pp. 830-834.

9. Wen S. X Xie, Z Yan, T Huang, Z Zeng. General memristor with applications in multilayer neural networks // Neural Networks. 2018. V. 103. pp. 142-149.

10. Kirilov S., Mladenov V. Application of New Metal-Oxide Memristor Models in Digital and Analog Electronic Circuits // 2023 19th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD). IEEE, 2023. pp. 1-4.

References

1. Bondarev A.V., Efanov V.N. Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii. 2020. № 1(79). pp. 4-10.
2. Bondarev A.V., Efanov V.N. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 976. №1. pp. 012013. URL: doi.org/10.1088/1757-899X/976/1/012013.
3. Mladenov V. Electronics. 2021. V. 10. №13. pp. 1594. URL: doi.org/10.3390/electronics10131594.
4. Timokhin M.Yu., Sharanin V.Yu. Inzhenernyj vestnik Dona. 2023. №10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2023/8746
5. Rybakov A.A., Kochetkov D.I. Inzhenernyj vestnik Dona. 2015. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/2822
6. Bondarev A.V., Efanov V.N. Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. 2021. V. 23. № 2(100). pp. 91-97.
7. Mladenov V. M., Zaykov I. D., Kirilov S. M. 2022 26th International Conference Electronics. IEEE, 2022. pp. 1-6.
8. Joglekar Y. N., Meijome N. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. 2012. V. 59. №11. pp. 830-834.
9. Wen S. X Xie, Z Yan, T Huang, Z Zeng. Neural Networks. 2018. V. 103. pp. 142-149.
10. Kirilov S., Mladenov V. 2023 19th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD). IEEE, 2023. pp. 1-4.

Дата поступления: 4.01.2024

Дата публикации: 13.02.2024