

момент результаты подтверждают потенциальную возможность применения таких суспензий, для повышения баллистической прочности тканей, что является простым и экономичным решением для производства мягкой брони.

Список использованных источников

1. Lee, Y.S.; Wetzel, E.D.; Wagner, N.J. The ballistic impact characteristics of Kevlar R woven fabrics impregnated with a colloidal shear thickening fluid. J. Mater. Sci. 2003, 38, 9.
2. Crineviciute, D.; Abraitene, A.; Sankauskaite, A.; Tumeiene, D.M.; Lenkauskaitė, L.; Barauskas, R. Influence of Chemical Surface Modification of Woven Fabrics on Ballistic and Stab Protection of Multilayer Packets. Mater. Sci. Medžiagotyra 2014, 20, 193–197.
3. Cho, H.; Lee, J.; Hong, S.; Kim, S. Bulletproof Performance of Composite Plate Fabricated Using Shear Thickening Fluid and Natural Fiber Paper. Appl. Sci. 2019, 10, 88.
4. Olszewska, K.; Zielinska, D.; Struszczyk, M.H.; Wierzbicki, L.; Leonowicz, M.K. Thermal stability of the elastomeric anti-trauma pad. Pol. J. Chem. Technol. 2017, 19, 93–100.
5. Huang, Chen-Hung & Chien, Chih-Hua & Shiu, Bing-Chiuan & Chen, Yueh-Sheng & Lin, Jia-Horng & Lou, ching-wen. (2022). Reinforcement Effects of Shear Thickening Fluid over Mechanical Properties of Nonwoven Fabrics. Polymers. 14. 4816.

УДК 621.389

А. Ю. Резнюков^{1,2}, А. Е. Рогожин^{1,2}, О. О. Пермякова²

¹ ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»,

² НИЦ «Курчатовский институт»
г. Москва, Российская Федерация

МЕМРИСТОРЫ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ГАФНИЯ ДЛЯ НЕЙРОМОРФНЫХ СИСТЕМ

***Аннотация:** На текущий момент для реализации процессов обучения ИИ используются схемы на КМОП-транзисторах на архитектуре фон Неймана. В работе предлагается использование мемристоров – электронных приборов, способных проводить «измерения в памяти», с рабочим слоем на основе HfO_2 , улучшающие быстродействие и энергоэффективность нейроморфных систем.*

A. Yu. Reznyukov^{1,2}, A. E. Rogozhin^{1,2}, O. O. Permyakova²

¹ National Research University «MPEI»

HAFNIUM OXIDE-BASED MEMRISTORS FOR NEUROMORPHIC SYSTEMS

Abstract: *Currently, CMOS transistor circuits based on the von Neumann architecture are used to implement AI learning processes. The paper proposes the use of memristors—electronic devices capable of performing "memory measurements" with an HfO₂-based working layer—to improve the performance and energy efficiency of neuromorphic systems.*

В современном мире наблюдается быстрый рост в области искусственного интеллекта (ИИ). На текущий момент, процесс обучения ИИ строится на цифровых нейроморфных, либо на классических интегральных схемах, построенных по КМОП-технологии с архитектурой фон Неймана. Оба варианта требуют огромных энергетических затрат. Для создания нового поколения биоподобных нейроморфных систем, состоящих из искусственных синапсов и нейронов, и имитирующих работу человеческого мозга, можно использовать мемристоры – энергонезависимые приборы, которые можно использовать для логических вычислений и хранения информации одновременно [1].

Мемристор представляет собой многослойную структуру с двумя электродами. В активном диэлектрическом слое, для которого обычно используются оксиды переходных металлов, в электрическом поле формируется проводящий филамент. В зависимости от материала, структуры прибора и подаваемых импульсов напряжения на электроды, мемристоры могут обладать большим количеством состояний проводимости. Ширина окна проводимости является одной из главных характеристик мемристора. Для некоторых материалов, проводимость может меняться до 10^4 раз [2]. При использовании разных диэлектриков, также изменяются и параметры надёжности мемристора, а именно время удержания заряда, количество циклов записи/стирания без потери работоспособности устройства.

Одним из наиболее перспективных материалов является оксид гафния. Этот материал совместим с КМОП-технологией и широко используется в полупроводниковой промышленности. Также описаны многослойные структуры на основе HfO₂ и структуры с различными примесями в HfO₂[3]. Мемристоры на основе оксида гафния могут использоваться в качестве искусственных синапсов в нейроморфных системах. Один из возможных подходов реализации нейроморфной системы на мемристорах – кроссбар архитектура [4]. В системе с такой

архитектурой возможно выполнение аналогово векторно-матричного умножения, ключевой операции в алгоритмах нейронных сетей. Схема мемристорного кроссбара для такого типа операций представлена на рис. 2 [1]:

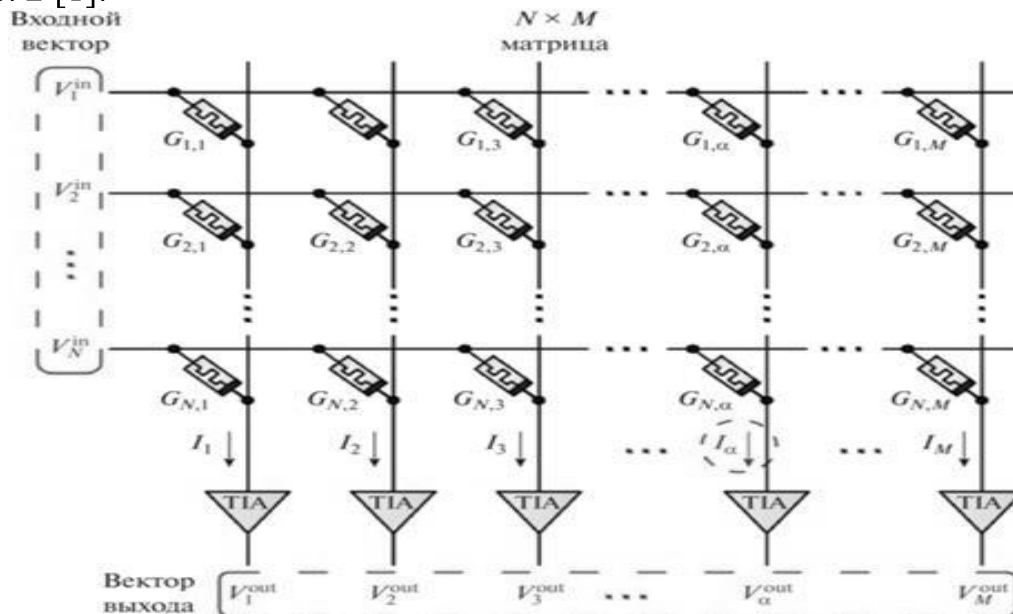


Рис. 2 – Схема мемристорного кроссбара для векторно-матричного умножения [1]

Исследование мемристорных структур предполагает снятие ВАХ зависимостей, исследование времени удержания состояний и числа циклов переключения мемристора. Особый интерес представляет воспроизводимость характеристик мемристоров, разброс напряжений во включенном и выключенном состояниях, проводимость мемристоров в различных состояниях. Для нейроморфных приложений, значительный интерес представляет стабильность промежуточных состояний проводимости мемристоров, а также возможность получения характеристик пластичности при потенциации (LTP), депрессии (LTD), а также пластичности, зависящей от времени импульса (STDP).

В процессе работы удалось создать слоистую структуру Pt/HfO₂(6нм)/HfO_xN_y(3нм)/TiN. Для неё были получены ВАХ зависимости, снятые при напряжении переключения в диапазоне от -2 В до + 1.5 В при различных значениях тока ограничения (рис.3). В этом мемристоре можно различить 8 стабильных состояний, а окно сопротивлений составило 10². Также была получена STDP пластичность при подаче сигналов напряжения с амплитудой 0.6 В и 0.8 В, в зависимости от времени между подаваемыми импульсами (рис.4).

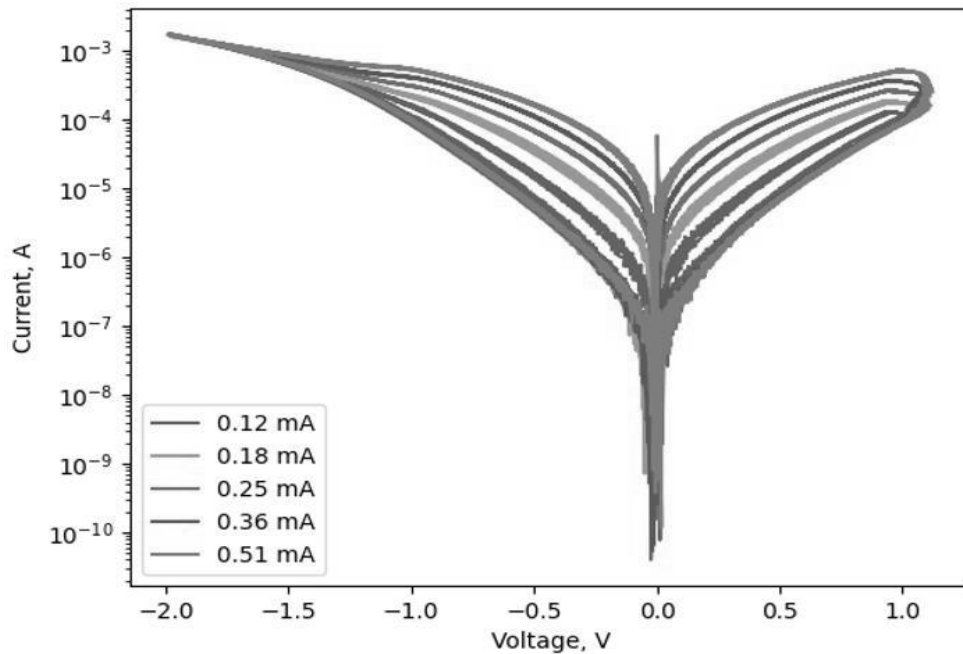


Рис. 3 – ВАХ зависимость Pt/HfO₂(6нм)/HfO_xN_y(3нм)/TiN при различном значении тока ограничения

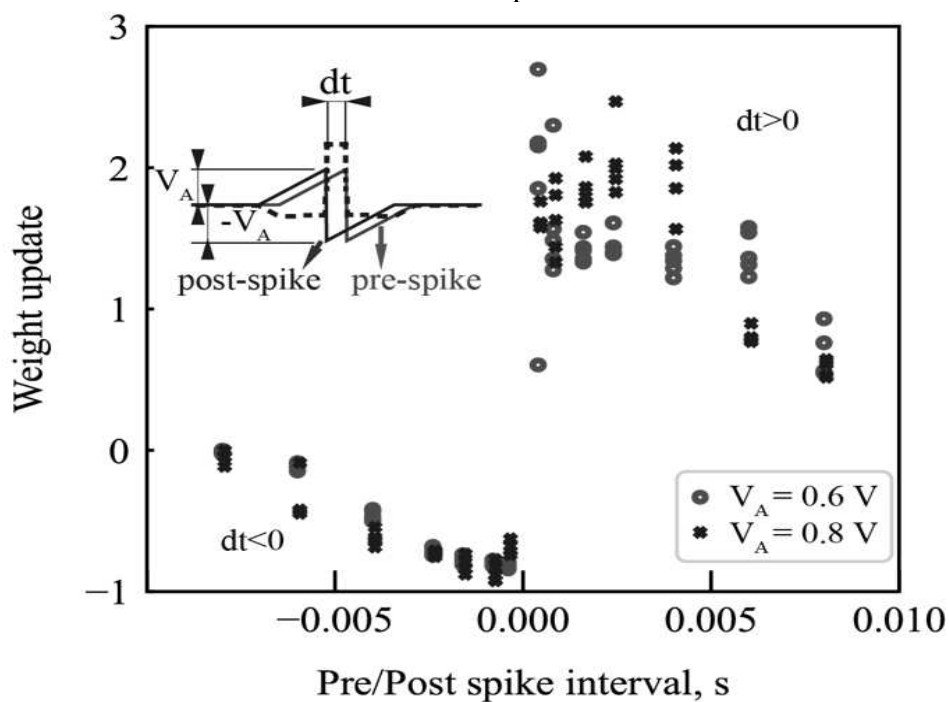


Рис. 4 - STDP Pt/HfO₂(6нм)/HfO_xN_y(3нм)/TiN для различных амплитуд импульсов

По результатам работы можно сделать вывод, что при использовании мемристоров на основе оксида гафния возможно создание систем с множеством состояний проводимости и, что они являются перспективными для развития микроэлектроники.

Список использованных источников

1. Фетисенкова К.А., Рогожин А.Е. Нейроморфные системы: приборы, архитектура и алгоритмы // Микроэлектроника – Т.52(5) – С.404-422 (2023). DOI: 10.31857/S0544126923700461
2. Wang, C, Si, Z, Jiang, X, Malik, A, Pan, Y, Stathopoulos, S, Serb, A, Wang, S, Prodromakis, T & Papavassiliou, C. 2022, 'Multi-State Memristors and Their Applications: An Overview', IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems. DOI: 10.1109/JETCAS.2022.3223295
3. Z. Peng, F. Wu, L. Jiang, G. Cao, B. Jiang, G. Cheng, S. Ke, K.-C. Chang, L. Li, C. Ye, HfO₂-Based Memristor as an Artificial Synapse for Neuromorphic Computing with Tri-Layer HfO₂/BiFeO₃/HfO₂ Design. Adv. Funct. Mater. 2021, 31, 2107131. DOI: 10.1002/adfm.202107131
4. Liu, X., Zeng, Z. Memristor crossbar architectures for implementing deep neural networks. Complex Intell. Syst. 8, 787–802 (2022). DOI: 10.1007/s40747-021-00282-4

УДК 681.5.08: 621.37

И.А. Третьяков, Я.И. Рушечников, В.В. Данилов

Донецкий государственный университет
Донецк, Российская Федерация

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛА ПЭМИН

***Аннотация.** В работе рассматривается методика, позволяющая выделить из спектра экспериментальных данных составляющие, идентифицирующие и показывающие порядок размерности величин ПЭМИН во время проведения эксперимента.*

I.A. Tretiakov, Y.I. Rushechnikov, V.V. Danilov

Donetsk State University
Donetsk, Russian Federation

THE METHOD OF DETERMINING THE POWER CHARACTERISTICS OF THE TEMPEST SIGNAL

***Abstract.** The paper considers a technique that makes it possible to identify components from the spectrum of experimental data that identify and show the order of dimension of the TEMPEST values during the experiment.*

Побочные электромагнитные излучения и наводки (ПЭМИН) представляют собой совокупность спектральных компонент, анализ