

Влияние амплитуды импульса на линейность обновления веса в мемристорах на основе оксида гафния

О.О. Пермякова

Московский физико-технический институт

Долгопрудный, Россия

Физико-технологический институт

им. К. А. Валиева РАН

Москва, Россия

o.permyakova@phystech.edu

А.Е. Рогожин

Физико-технологический институт

им. К. А. Валиева РАН

Москва, Россия

rogozhin@ftian.ru

А.В. Мьяконких

Физико-технологический институт

им. К. А. Валиева РАН

Москва, Россия

miakonkikh@ftian.ru

Е.А. Смирнова

Физико-технологический институт

им. К. А. Валиева РАН

Москва, Россия

smirnova@ftian.ru

К.В. Руденко

Физико-технологический институт

им. К. А. Валиева РАН

Москва, Россия

rudenko@ftian.ru

Аннотация—Линейность изменения проводимости мемристора влияет на точность обучения аналоговых нейроморфных систем. Обычно линейности изменения веса добиваются за счет изменения формы сигнала, но это требует включения в аналоговую цепь дополнительной периферии. В работе рассмотрено влияние амплитуды импульса сигнала на потенциацию мемристора на основе оксида гафния. Показано, что при уменьшении модуля амплитуды импульса увеличивается линейность изменения проводимости прибора. Также показано, что существует напряжение при котором проводимость изменяется наилучшим образом.

Ключевые слова— мемристор, резистивное переключение, оксид гафния, потенциация.

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее перспективных устройств для аппаратной реализации искусственного интеллекта является мемристор. По сути мемристор представляет собой наноразмерный электронный синапс с низким потреблением энергии (пикоджоуль на операцию) [1], сравнимым с потреблением биологического синапса. Обычно мемристор представляет собой планарную структуру металл-диэлектрик-металл. При подаче сигнала напряжения на электроды, с амплитудой выше порогового происходит постепенное (аналоговое) изменение значения сопротивления прибора.

Высокоплотный кроссбар-массив мемристоров может быть использован для нейроморфных вычислений [1, 2]. Такой массив позволяет реализовать не только аналоговые искусственные нейронные сети, но и импульсные нейронные сети.

Одним из основных факторов, влияющих на точность обучения нейроморфных систем на основе мемристоров является линейность и симметрия обновления значения сопротивления (веса) прибора [2]. Почти линейное изменение значения сопротивления мемристора возможно при использовании импульсов с увеличивающейся амплитудой [3]. Но для полностью аналоговой нейроморфной системы на основе мемристоров требуется аппаратная реализация

периферии для настройки таких сигналов в реальном времени. Такая периферия не только занимает дополнительное место на чипе, из-за чего теряется смысл формирования высокоплотного кроссбар-массива, но и потребляет дополнительную мощность.

Увеличении линейности изменения веса мемристора при использовании одинаковой последовательности импульсов не зависимо от состояния мемристора было продемонстрировано для нефиламентарных приборов [4]. Последовательно прикладывая к мемристорам импульсы разной полярности с большей амплитудой переключающих импульсов, можно уменьшить начальный резкий рост проводимости.

На данный момент нет устоявшихся требований к значению амплитуды напряжения для аналоговых нейроморфных систем. Значение амплитуды напряжения для используемых импульсов переключения зависит от структуры мемристора и влияет на мощность потребляемую нейроморфной системой во время обучения. Исследование изменения значения сопротивления мемристоров в зависимости от значения амплитуды напряжения переключающего импульса проводилось для мемристоров на основе NiO_x в диапазоне напряжений от 1,4 В до 3,0 В [5], на основе FeO_x в диапазоне напряжений от 1,3 В до 1,9 В [6] и для мемристоров с химически активным медным электродом Cu/a-Si/Pt в диапазоне напряжений от 1,4 В до 2,4 В [7].

В этой работе рассматривается зависимость линейности обновления сопротивления мемристора во время потенциации одинаковыми импульсами в зависимости от амплитуды напряжения прикладываемого сигнала.

2. ПОДГОТОВКА ОБРАЗЦОВ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Для изучения синаптических характеристик мемристоров была изготовлена структура с общим электродом $\text{Pt/HfO}_2/\text{HfO}_x\text{N}_y/\text{TiN}$. Активный слой устройства имел толщину 6 нм и был нанесен с помощью плазма-стимулированного атомно-слоевого осаждения. Для слоев HfO_2 , HfO_xN_y использовались следующие прекурсоры ТЕМАН и пары воды, ТЕМАН и плазма

водорода, соответственно. Электроды были нанесены с помощью магнетронного распыления. Верхний электрод Pt был нанесен через теньевую маску и имел площадь $0.0360 \pm 0.0015 \text{ мм}^2$.

Исследование потенциации устройств проводилось с использованием параметрического анализатора Kethly-4200SCS. Импульсы подавались на верхний электрод со встроенной платы генератора импульсов 4205-PG2, при этом нижний электрод прибора был заземлен. Сигнал вышедший с устройства был усилен с помощью трансимпедансного усилителя после чего сигнал попадал на встроенный осциллограф 4200-SCP2HR.

До проведения измерения синаптических характеристик проводилась электроформовка устройств при постоянном напряжении -5 В и последовательно подключенном сопротивлении, со стороны заземленного электрода, 18 кОм .

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для исследования линейности обновления значения состояния сопротивления были проведены измерения потенциации структур Pt/HfO₂/HfO_xN_y/TiN. Во время потенциации на верхний электрод подавалась последовательность из ста прямоугольных импульсов амплитуды которых изменялась в диапазоне от $-0,7 \text{ В}$ до $-1,5 \text{ В}$ (Рис. 1), а расстояние между импульсами изменялось в диапазоне от $0,2 \text{ мс}$ до 16 мс (Рис. 2). Длина импульса составляла 5 мкс . Сопротивление изменялось в диапазоне от $0,04 \text{ мСм}$ до $0,3 \text{ мСм}$. Отношение сопротивлений составляло $7,5$.

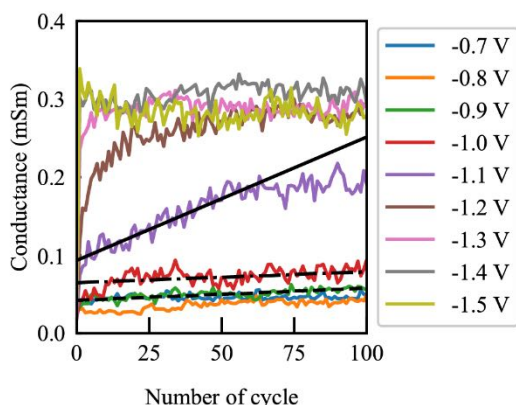


Рис. 1. Потенциация структуры Pt/HfO₂/HfO_xN_y/TiN в течении ста импульсов с расстоянием между импульсами $1,6 \text{ мс}$, в зависимости от амплитуды напряжения сигнала в диапазоне от $-0,7 \text{ В}$ до $-1,5 \text{ В}$

На рис. 1 видно, что при увеличении амплитуды импульса возрастает нелинейность изменения веса в зависимости от числа циклов. При амплитуде сигнала меньше $1,1 \text{ В}$ изменение проводимости было линейным, но при этом незначительным. А значит для изменения веса такого синапса необходимо затратить значительно большее количество импульсов, чем для сигнала с большей амплитудой, что напрямую скажется на скорости работы системы. При амплитуде сигнала больше $1,1 \text{ В}$ изменение проводимости переставало быть линейным. При амплитуде импульса равной $1,1 \text{ В}$

сопротивление возрастало практически линейно в течении первых 65 импульсах. В течении этих импульсов проводимость изменилась на 1 См . После чего скорость изменения сопротивления резко падала. Такое поведение прибора сохранялось при различных расстояниях между импульсами (Рис. 2). Эти данные показывают, что существует выделенное напряжение мемристора, которое является предпочтительным для проведения потенциации устройства.

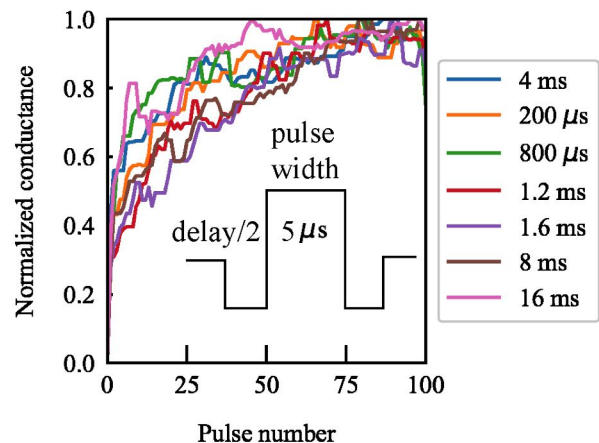


Рис. 2. Потенциация структуры Pt/HfO₂/HfO_xN_y/TiN в течении ста импульсов с амплитудой сигнала $-1,1$ в зависимости от расстояния между импульсами в диапазоне от $0,2 \text{ мс}$ до 16 мс . Вставка: форма импульсов

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках Государственного задания по теме FFNN-2022-0019 и, частично, в рамках гранта РФФИ проекта № 18-29-27029.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Liu, D. Low-Power Computing with Neuromorphic Engineering / D. Liu, H. Yu, Y. Chai // Adv. Intell. Syst. – 2021. – Vol. 3(2). – P. 2000150. DOI: 10.1002/aisy.202000150.
- [2] Zhang, Y. Brain-inspired computing with memristors: Challenges in devices, circuits, and systems / Y. Zhang, Z. Wang, J. Zhu, Y. Yang, M. Rao, W. Song, Y. Zhuo, X. Zhang, M. Cui, L. Shen, R. Huang // Appl. Phys. Rev. – 2020. – Vol. 7(1). – P. 011308. DOI: 10.1063/1.5124027
- [3] Liu, H. Optimization of non-linear conductance modulation based on metal oxide memristors / H. Liu, M. Wei, Y. Chen // Nanotechnol. Rev. – 2018. – Vol. 7(5). – P. 443-468. DOI: 10.1515/ntrv-2018-0045.
- [4] Wang, I-T. 3D Ta/TaO_x/TiO₂/Ti synaptic array and linearity tuning of weight update for hardware neural network applications / I-T. Wang, C.-C. Chang, L.-W. Chiu, T. Chou, T.-H. Hou. // Nanotechnol. – 2016. – Vol. 27. – P. 365204. DOI: 10.1088/0957-4484/27/36/365204.
- [5] Hu, S.G. Synaptic long-term potentiation realized in Pavlov's dog model based on a NiO_x-based memristor / S.G. Hu, Y. Liu, Z. Liu, T. P. Chen, Q. Yu, L.J. Deng, Y. Yin, S. Hosaka // J. Appl. Phys. – 2014. – Vol. 116. – P. 214502. DOI: 10.1063/1.4902515.
- [6] Wang, C. Investigation and Manipulation of Different Analog Behaviors of Memristor as Electronic Synapse for Neuromorphic Applications / C. Wang, W. He, Y. Tong, R. Zhao // Sci. Rep. – 2016. – Vol. 6. – P. 22970. DOI: 10.1038/srep22970.
- [7] Zhang, X. Emulating Short-Term and Long-Term Plasticity of Bio-Synapse Based on Cu/a-Si/Pt Memristor / X. Zhang, S. Liu, X. Zhao, F. Wu, Q. Wu, W. Wang, R. Cao, Y. Fang, H. Lv, S. Long, Q. Liu, M. Liu // IEEE Electron Device Lett. – 2017. – Vol. 38(9). – P. 1208-1211. DOI: 10.1109/LED.2017.2722.