

ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА
И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 537.9+004.8

ВЛИЯНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ ЭЛЕКТРОДНЫХ ШИН В МАССИВЕ
КРОССБАР-МЕМРИСТОРОВ НА РАЗБРОС ИХ ХАРАКТЕРИСТИК

© 2022 г. А. И. Ильясов^{1, 2, *}, К. Э. Никируй¹, А. В. Емельянов^{1, **},
К. Ю. Черноглазов¹, В. В. Рыльков^{1, 3}, В. А. Демин¹

¹ Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³ Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Россия

*E-mail: sashailyasov99@gmail.com,

**E-mail: emelyanov_av@nrcki.ru

Поступила в редакцию 20.12.2021 г.

После доработки 14.01.2022 г.

Принята к публикации 14.01.2022 г.

Применение мемристоров в качестве физических аналогов синапсов в аппаратных нейроморфных вычислительных системах — многообещающий способ повышения их энергоэффективности. При этом для реализации систем, решающих сложные когнитивные задачи, необходимо большое количество плотно упакованных мемристоров, что на практике достигается созданием их массивов в кроссбар-архитектуре. Изучены резистивные переключения в мемристивных структурах на основе нанокompозита $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$, созданных в кроссбар-архитектуре с относительно тонкими шинами (не более 100 нм), обнаружено заметное влияние сопротивления шин кроссбар-элементов на разброс их характеристик, а также предложен способ решения этой проблемы. Полученные результаты могут быть использованы в дальнейшей разработке массивов кроссбар-мемристоров для нейроморфных применений.

DOI: 10.56304/S2782375X22010144

ВВЕДЕНИЕ

Мемристоры — устройства, способные изменять свою проводимость под действием приложенного напряжения, превышающего некоторый порог, а также сохранять резистивное состояние после прекращения внешнего воздействия [1–4]. По этой причине одним из наиболее перспективных направлений их применения является использование в качестве синапсов (весовых связей) в аппаратных формальных и импульсных нейронных вычислительных сетях (НВС). В рамках такого подхода в последнее время были реализованы, например, перцептроны [5, 6], кратковременная—долговременная память [7], резервуарные вычислители [8], а также распознаватели простых образов [9] и обучение шумовым сигналом [10] в спайковых нейронных сетях. Использование мемристоров в таких системах позволяет снизить их энергопотребление, однако для решения сложных задач необходимо большое количество весовых связей. В связи с этим требуется создание массивов мемристоров с высокой плотностью их расположения на подложке. На практике это достигается за счет формирования мемристивных элементов в матричном исполнении в

кроссбар-геометрии (элементы находятся на пересечениях взаимно перпендикулярных электродных шин “строк” и “столбцов”) [11, 12].

Необходимым условием возможности создания НВС являются невысокие рабочие напряжения мемристоров кроссбара для совместимости с современной КМОП-логикой на комплементарных транзисторах металл—оксид—полупроводник, работающих при напряжениях не более 3 В, а кроме того, относительно небольшой разброс характеристик мемристоров от устройства к устройству [13].

Настоящая работа посвящена исследованию резистивных переключений (РП) мемристивных элементов кроссбара 4×4 при использовании относительно тонких шин (≤ 100 нм), а также обнаруженной при этом зависимости их вольт-амперных характеристик (ВАХ) от места подключения к проводящим шинам элементов. Получающийся разброс напряжений переключения в низкоомное состояние (U_{set}) может быть критичным для уменьшения энергопотребления систем на основе таких кроссбаров, а также вариативности параметров мемристоров от устройства к устройству

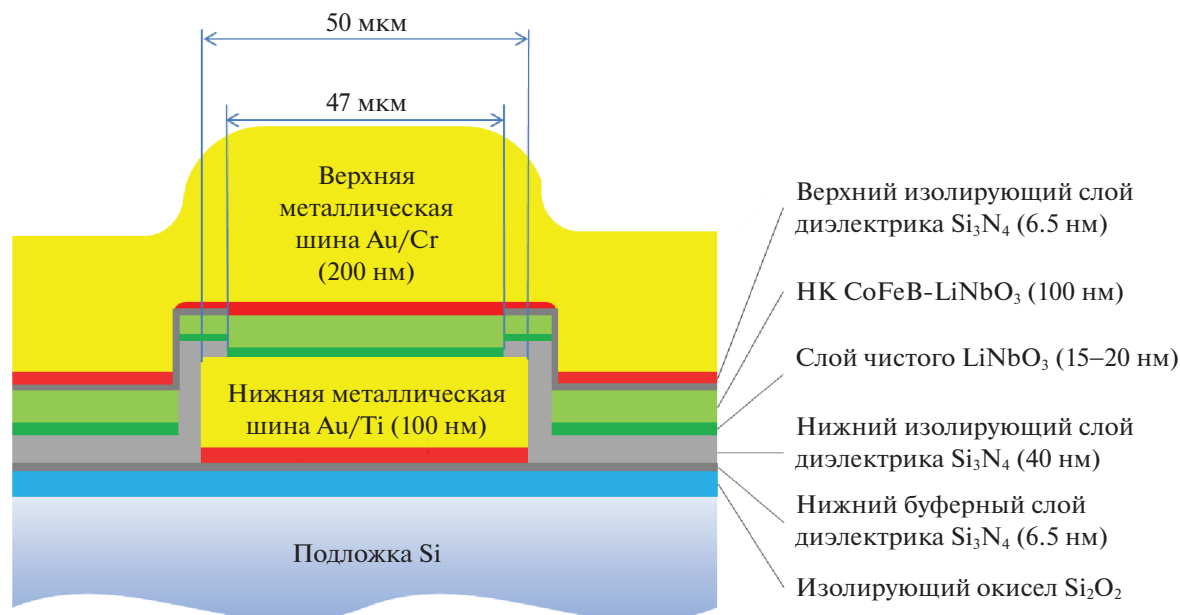


Рис. 1. Схематическое изображение сечения отдельного мемристового кроссбар-элемента на базе структур $M/(CoFeB)_x(LiNbO_3)_{100-x}/LiNbO_3/M$ с защитными изолирующими слоями Si_3N_4 , выращенными плазмохимическим осаждением.

[14]. Один из возможных способов решения данной проблемы предлагается в работе.

МЕТОДЫ

Как показано в [15–17], многообещающим направлением в разработке мемристоров с низким энергопотреблением является использование двухслойных структур типа металл/наноконкомпозит/диэлектрик/металл ($M/HK/D/M$) на основе нанометровых слоев НК = $(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_x(LiNbO_3)_{100-x}$ и Д = $LiNbO_3$ (LNO) с суммарной толщиной активной области ≤ 100 нм. Одной из проблем при создании кроссбар-структур с относительно толстыми шинами (≥ 100 нм) являются краевые эффекты, которые могут приводить к утечкам тока и локальному диэлектрическому пробоем структуры. В связи с этим в работе использовали относительно тонкие шины из Au (толщиной не более 100 нм). Дополнительно формировали изоляцию наноконкомпозита от проводящих шин с использованием плазмохимического осаждения (например, Si_3N_4) при температуре $300^\circ C$. В этом случае формируется плотный диэлектрик, поэтому при относительно небольшой толщине диэлектрической пленки (5–10 нм) эффекты туннелирования электронов должны быть пренебрежимо малы.

Мемристовые матрицы были созданы с использованием лазерной фотолитографии (литограф Heidelberg 66fs с разрешением 1 мкм), плазмохимического осаждения (Trion Oracle III) и

ионно-лучевого распыления составной мишени на оригинальной установке, позволяющей получать слои НК различного состава в едином цикле [18]. Важная особенность при создании структур состояла в том, что при осаждении НК- и LNO-слоев использовали теневые маски, что позволило сформировать полоски НК необходимых размеров без использования химического травления, которое трудноосуществимо при различных составах НК. Шины из Au создавали с помощью термического напыления на предварительно нанесенные адгезионные слои из Ti (Cr) толщиной ~ 25 нм.

Как верхний, так и нижний защитные слои Si_3N_4 создавали с помощью плазмохимического осаждения. Для подавления нежелательного влияния краевых эффектов, результатом которых могут быть токовые утечки и локальный электрический пробой структуры, размер окон в защитном слое Si_3N_4 на обеих шинах был выбран заметно меньшим, чем их ширина (50 мкм) (рис. 1). Были изготовлены массивы мемристоров в кроссбар-геометрии с числом элементов 4×4 площадью $S = 50 \times 50$ мкм² каждый. Содержание металла в НК составляло $x \approx 19$ ат. %.

Электрофизические измерения мемристовых свойств $M/HK/LNO/M$ кроссбар-элементов проводили при комнатной температуре с помощью многофункционального источника-измерителя Keithley 2636B и аналитической зондовой станции EPS4 (Swin).

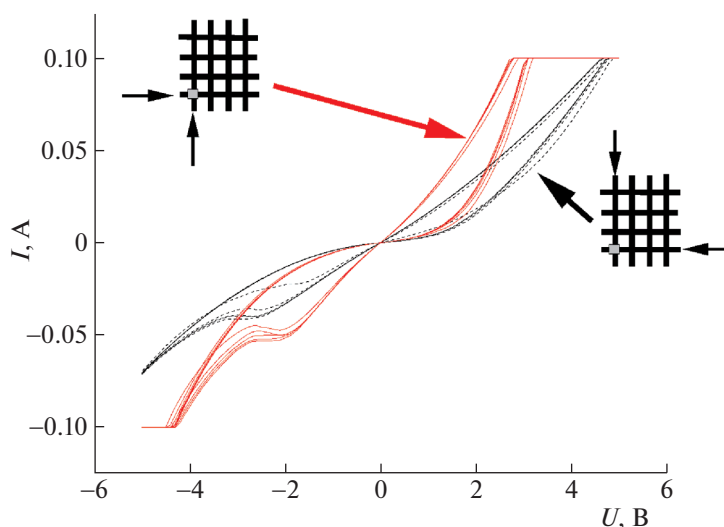


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики одного из мемристоров массива. Схематично изображены его положение в кроссбаре и способы подключения зондов к шинам при каждом из измерений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Механизм РП в НК-мемристорах основан на движении вакансий кислорода под действием электрического поля по большому числу филаментов [17]. На рис. 2 представлены ВАХ для одного из мемристоров кроссбара, измеренные для двух разных способов подключения зондов к нижней и верхней шинам. Скорость развертки по напряжению составляла 2 В/с, тогда как токи ограничения были установлены на уровне 100 мА для обеих полярностей приложенного напряжения. Для каждого метода подключения было измерено по пять кривых ВАХ. Отметим, что различия от цикла к циклу при одинаковом подключении невелики, однако ВАХ для разных подключений различаются между собой весьма заметно – как общим наклоном петель гистерезиса, так и напряжением достижения ограничения по току при положительных напряжениях на структурах (напряжение включения, U_{set}), при этом общий вид кривых принципиальных различий не имеет.

Это может быть вызвано собственным последовательным сопротивлением участков шин от выбранного контакта до исследуемого мемристора. Это приводит к падению части приложенного напряжения на шинах, эффективно увеличивая сопротивление мемристора и напряжение U_{set} с ростом суммарной длины задействованных частей шин.

Для проверки этой гипотезы были измерены ВАХ для всех 16 мемристоров одного кроссбар-массива. Подключение при этом происходило только с двух сторон (с одной для нижних шин и одной для верхних). После этого по полученным кривым были найдены значения напряжения U_{set}

для каждого мемристора при данном подключении.

Полученные значения представлены в виде “тепловой” карты на рис. 3. Нетрудно заметить, что напряжение монотонно возрастает при увеличении суммарного расстояния от мемристора до контактов, которые используются для измерения ВАХ. Этот факт подтверждает предположение о влиянии сопротивления шин на эффективные мемристивные параметры кроссбар-элементов массива. Прямые измерения сопротивления шин дают значения 7.6 и 22.6 Ом для верхней и нижней шин соответственно, т.е. удельное сопротивление нижних шин превосходит сопротивление верхних. По этой причине для мемристоров, расположенных ниже главной диагонали, для которых суммарная длина участков шин до контактов приходится в большей степени на нижние шины (вертикальные на рисунке), напряжение U_{set} превосходит U_{set} для мемристоров, симметричных первым относительно главной диагонали (т.е. таких, для которых при прежнем суммарном расстоянии до контактов, оно в большей степени приходится на верхние горизонтальные шины).

На рис. 4 показана гистограмма распределения напряжений U_{set} для всех 16 мемристоров кроссбар-массива. Форма гистограммы близка к гауссовой, однако разброс напряжений преимущественно связан с влиянием сопротивления шин кроссбара. Разброс характеристик оказывается довольно велик, максимальное и минимальное значения U_{set} различаются почти в 2 раза.

Значительная деградация характеристик препятствует эффективному использованию для создания импульсных и формальных нейронных сетей всего кроссбар-массива целиком, ограни-

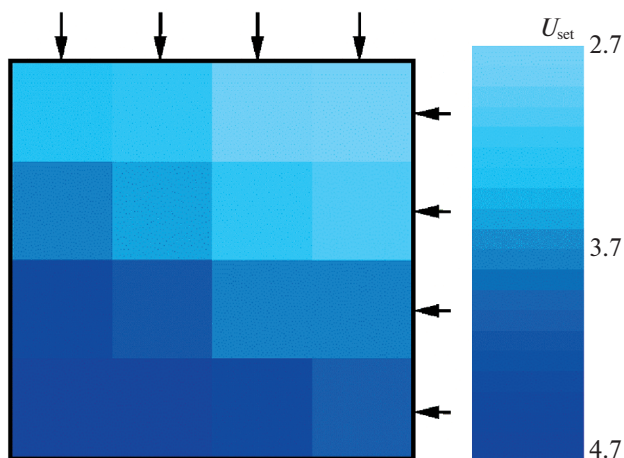


Рис. 3. Тепловая карта напряжений перевода в высокопроводящее состояние мемристоров кроссбар-массива. Стрелками показаны места подключения к шинам.

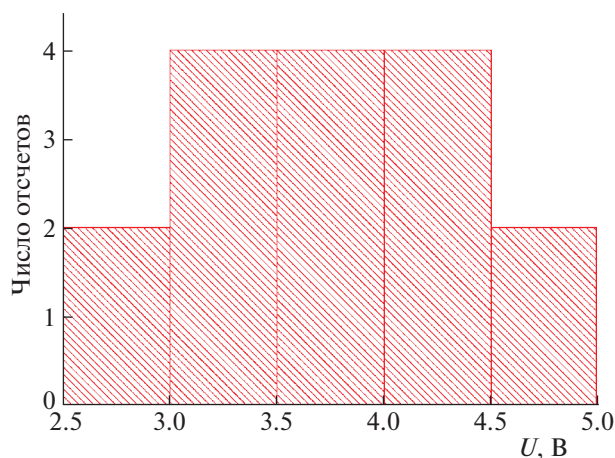


Рис. 4. Гистограмма распределения напряжений U_{set} мемристоров кроссбара.

чивая его рабочую область матрицы мемристорами, расположенными вблизи центра структуры (четыре мемристора для кроссбаров 4×4 , т.е. всего 25%). Это обстоятельство снижает преимущество кроссбар-геометрии, состоящее в высокой плотности упаковки мемристивных элементов. Кроме того, энергоэффективность матрицы снижается за счет повышения напряжений РП.

Решением данной проблемы может являться увеличение внутреннего сопротивления кроссбар-мемристоров в матрице, например, посредством использования дополнительных тонких оксидных слоев с большой шириной запрещенной зоны и низкими значениями подвижности вакансий (Al_2O_3 , SiO_2), а также уменьшения сопротивления металлических шин за счет увеличе-

ния их толщины. При этом, очевидно, влияние сопротивления шин на характеристики РП окажется несущественным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформированы массивы мемристивных кроссбар-элементов на основе нанокompозита $CoFeB-LiNbO_3$ с прослойкой чистого $LiNbO_3$ на кремниевой подложке, демонстрирующие обратимые РП с хорошей повторяемостью от цикла к циклу. Обнаружена зависимость величин напряжений U_{set} от способа подключения к кроссбару, которая, как показано, вызвана влиянием конечного сопротивления токопроводящих шин структуры. Предложен способ решения данной проблемы с помощью увеличения внутреннего сопротивления мемристоров.

Исследования выполнены на оборудовании Ресурсного центра электрофизических методов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (приказ № 2753).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mikhaylov A.N., Guseinov D.V., Belov A.I. et al. // Chaos, Solitons Fractals. 2021. V. 144. P. 110723. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2021.110723>*
2. *Mikheev V., Choupruk A., Lebedinskii Y. et al. // Nanotechnology. 2020. V. 31. № 21. P. 215205. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab746d>*
3. *Bobylev A.N., Udovichenko S.Y. // Russ. Microelectron. 2016. V. 45. № 6. P. 396. <https://doi.org/10.1134/S1063739716060020>*
4. *Wang W., Panin G.N., Fu X. et al. // Sci. Rep. 2016. V. 6. № 1. P. 31224. <https://doi.org/10.1038/srep31224>*
5. *Prezioso M., Merrih-Bayat F., Hoskins B.D. et al. // Nature. 2015. V. 521. № 7550. P. 61. <https://doi.org/10.1038/nature14441>*
6. *Emelyanov A.V., Lapkin D.A., Demin V.A. et al. // AIP Adv. 2016. V. 6. № 11. <https://doi.org/10.1063/1.4966257>*
7. *Li C., Wang Z., Rao M. et al. // Nat. Mach. Intell. 2019. V. 1. № 1. P. 49. <https://doi.org/10.1038/s42256-018-0001-4>*
8. *Moon J., Ma W., Shin J.H. et al. // Nat. Electron. 2019. V. 2. № 10. P. 480. <https://doi.org/10.1038/s41928-019-0313-3>*
9. *Feldmann J., Youngblood N., Wright C.D. et al. // Nature. 2019. V. 569. № 7755. P. 208. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1157-8>*
10. *Surazhevsky I.A., Demin V.A., Ilyasov A.I. et al. // Chaos, Solitons Fractals. 2021. V. 146. P. 110890. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2021.110890>*
11. *Xia Q., Yang J.J. // Nat. Mater. 2019. V. 18. № 4. P. 309. <https://doi.org/10.1038/s41563-019-0291-x>*

12. *Pi S., Li C., Jiang H. et al.* // Nat. Nanotechnol. 2019. V. 14. № 1. P. 35.
<https://doi.org/10.1038/s41565-018-0302-0>
13. *Ryu J.-H., Kim S.* // Chaos, Solitons Fractals. 2020. V. 140. P. 110236.
<https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110236>
14. *Demin V.A., Surazhevsky I.A., Emelyanov A.V. et al.* // J. Comput. Electron. 2020. V. 19. № 2. P. 565.
<https://doi.org/10.1007/s10825-020-01470-0>
15. *Рыльков В.В., Емельянов А.В., Николаев С.Н. и др.* // ЖЭТФ. 2020. Т. 158. № 1 (7). С. 164.
<https://doi.org/10.31857/s0044451020070159>
16. *Emelyanov A.V., Nikiruy K.E., Serenko A.V. et al.* // Nanotechnology. 2020. V. 31. № 4. P. 045201.
<https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab4a6d>
17. *Martyshov M.N., Emelyanov A.V., Demin V.A. et al.* // Phys. Rev. Appl. 2020. V. 14. № 3. P. 034016.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.14.034016>
18. *Никируй К.Э., Емельянов А.В., Рыльков В.В. и др.* // Радиотехника и электроника. 2019. Т. 64. № 10. С. 1019.
<https://doi.org/10.1134/S0033849419100103>