

Александр Дмитриевич ПИСАРЕВ¹
Александр Николаевич БУСЫГИН²
Андрей Николаевич БОБЫЛЕВ³
Сергей Юрьевич УДОВИЧЕНКО⁴

УДК 621.382; 004.33

КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕМРИСТОРНО-ДИОДНЫЙ КРОССБАР КАК ОСНОВА ЗАПОМИНАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

¹ кандидат технических наук, доцент
кафедры экспериментальной физики и нанотехнологий,
заведующий лабораторией пучково-плазменных технологий
НОЦ «Нанотехнологии», Тюменский государственный университет
spcb.doc@gmail.com

² аспирант кафедры экспериментальной физики и нанотехнологий,
Тюменский государственный университет
daenur.al@gmail.com

³ аспирант кафедры экспериментальной физики и нанотехнологий,
Тюменский государственный университет
andreaubobylev@gmail.com

⁴ доктор физико-математических наук, профессор
кафедры экспериментальной физики и нанотехнологий,
руководитель НОЦ «Нанотехнологии»,
Тюменский государственный университет
udotgu@mail.ru

Аннотация

Представлена топология и технология изготовления нового компонента электроники — комбинированного кроссбара, включающего активный мемристорный слой и полупроводниковый слой диодов Зенера. Оба слоя, как и проводящие дорожки, могут

Цитирование: Писарев А. Д. Комбинированный мемристорно-диодный кроссбар как основа запоминающего устройства / А. Д. Писарев, А. Н. Бусыгин, А. Н. Бобылев, С. Ю. Удовиченко // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2017. Том 3. № 4. С. 142-149.
DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-4-142-149

изготавливаться простым промышленным способом — в магнетронном технологическом модуле. Моделирование процесса записи в ячейки комбинированного кроссбара показывает, что добавление диода Зенера увеличивает энергоэффективность. Новый компонент электроники позволяет изготавливать планарные и 3D сверхбольшие запоминающие устройства, которые могут быть использованы при создании нейроморфного процессора — инновационного продукта в ИТ.

Ключевые слова

Комбинированный кроссбар, мемристор, диод Зенера, запоминающая матрица, SPICE-моделирование.

DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-4-142-149

Введение

В работе [7] методом реактивного магнетронного распыления изготовлен электронный компонент — мемристорный кроссбар на основе активного слоя из смешанного оксида металлов, ячейки которого проявляют электрические свойства, подобные свойствам живого синапса.

Разработка аппаратной базы нейропроцессора на основе мемристорной микросхемы, интегрированной с КМОП логикой, начата в [6]. Для создания электрической схемы нейропроцессора требуется разработка отдельных его узлов таких, как запоминающее устройство, коммутатор логических схем, входное устройство, усилители и драйверы [1, 2].

Использование кроссбара из комплементарных мемристоров в качестве запоминающей матрицы впервые представлено в [4, 10]. В матрице реализована последовательная (поочередная) запись информации в комплементарные мемристоры ячейки и параллельное (построчное) считывание их состояния. Комплементарные ячейки уменьшают паразитные токи в матрице при параллельном считывании по сравнению с ячейками из отдельных мемристоров. При этом в режиме записи необходимо поддерживать на незадействованных шинах матрицы электрический потенциал, равный половине напряжения записи, что приводит к повышенному потреблению энергии.

Однако, разработанная в [10] матрица не может быть использована в качестве сверхбольшей запоминающей матрицы нейропроцессора из-за низкой энергоэффективности мемристорной ячейки при записи, обусловленной паразитными токами через соседние ячейки, и высокой деградации выходного сигнала при считывании. Повышенное потребление энергии возникает из-за паразитных токов через соседние ячейки в кроссбаре. Применение полупроводникового диода для исключения взаимовлияния ячеек возможно только для униполярных мемристоров, поскольку для перевода биполярного мемристора в непроводящее состояние требуется протекание тока в обратном направлении.

Проблема энергоэффективности сверхбольшей запоминающей матрицы решается путем использования комплементарной мемристорно-диодной ячейки, которая представляет собой двухслойное соединение комплементарных мемри-

сторов и одного диода Зенера [3]. Кроме того, применение диода Зенера позволяет уменьшить деградацию выходного сигнала при суммировании входных импульсов напряжения.

Комбинированный мемристорно-диодный кроссбар

Комплементарное включение двух мемристоров позволяет постоянно поддерживать высокое входное сопротивление ячейки в рабочем режиме, что обеспечивает ее низкое энергопотребление. Поскольку комплементарные мемристоры пространственно находятся в одном активном слое рядом друг с другом, то влияние неоднородности их характеристик на выходное напряжение ячейки будет минимальным.

При использовании комплементарных мемристоров изменение их состояния в ячейке производится последовательно. При этом возможны три комбинации высокоомного и низкоомного состояний мемристоров в паре. Таким образом, в ячейку можно записать три состояния, если мемристоры работают в режиме ключа и больше трех состояний, если мемристорный материал обеспечивает несколько устойчивых значений проводимости.

Предлагаемый новый компонент электроники — комбинированный кроссбар (рис. 1) образован из ячеек, содержащих два мемристора M1 и M2 с общим электродом, совмещенным с анодом диода Зенера D1. На нижнем электроде ячейки 3 расположены диоды Зенера, состоящие из последовательно наносимых слоев сильнолегированного n-полупроводника, слаболегированного n-полупроводника и сильнолегированного p-полупроводника. На аноде диода располагается общий металлический электрод комплементарных мемристоров, непосредственно соприкасающийся с вышележащим сплошным мемристорным слоем, на котором расположены верхние электроды ячейки 1 и 2.

Мемристорный слой и полупроводниковые слои диода изготавливаются промышленным способом — в магнетронном технологическом модуле. Слои полупроводников с донорной или акцепторной примесью и разным уровнем легирования создаются путем одновременного распыления катодов из материалов чистого полупроводника и легирующей примеси [8].

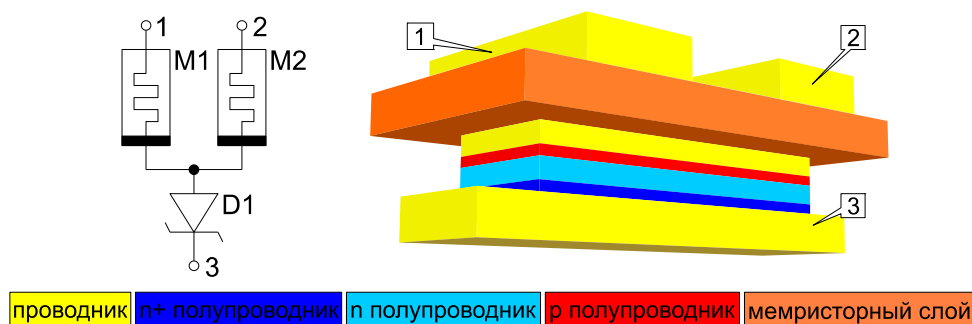


Рис. 1. Электрическая схема и топология отдельной ячейки кроссбара

Fig. 1. Electrical circuit and topology of a separate crossbar cell

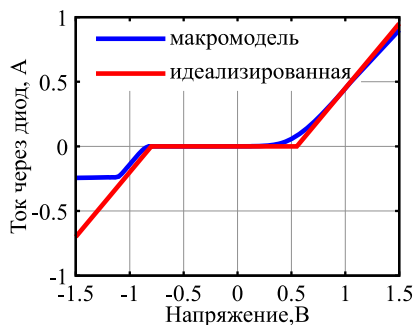
SPICE – моделирование

Для моделирования работы электрической схемы нового компонента электроники — комбинированного мемристорного кроссбара с диодом Зенера построена SPICE-модель его элементарной ячейки. В качестве модели мемристора использована разработка [9], а модель диода Зенера представляет собой идеализированную модель, в которой вольтамперная характеристика представлена кусочной функцией из трех прямых и сопротивление остается высоким в диапазоне от напряжения обратимого пробоя до напряжения открытия р-п перехода.

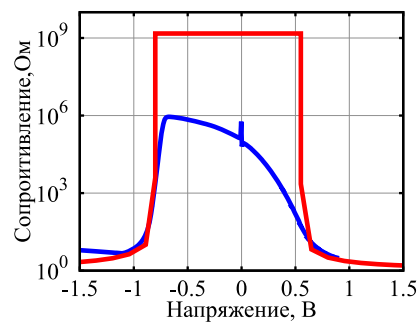
Выбор в пользу этой модели диода сделан на основании того, что существующая детальная макроскопическая модель [9] при совпадении задействованных в моделировании участков вольтамперных характеристик (рис. 2а) обладает существенным недостатком, связанным с неправильным моделированием сопротивления утечки (рис. 2б). Кроме этого, расчет матрицы из большого числа ячеек с использованием идеализированной модели требует намного меньше времени.

Моделирование матриц производилось в программном пакете LTSpice фирмы Linear Technology. Для подачи напряжений в матрицу были использованы управляемые источники напряжения с заданной последовательностью изменения потенциала на выходе, имитирующие работу периферийных коммутационных схем на полевых транзисторах.

Процесс записи в выбранную ячейку происходит в два этапа. Сначала на контакты 1 и 3 (см. рис. 1) подаются потенциалы разного знака, которые по абсолютной величине меньше порога изменения состояния мемристора. Потенциалы на контактах 2 и 3 при этом равны. Итоговое напряжение между точками 1 и 3 оказывается выше порогового, а между точками 2 и 3 равно нулю. Таким образом, происходит изменение состояния только одного мемристора в ячейке. Второй этап записи заключается в изменении состояния второго мемристора в ячейке и выполняется аналогично первому.



(a)



(b)

Рис. 2. Сравнение идеализированной и детальной моделей диода Зенера: (а) вольтамперные характеристики, (б) сопротивление диода Зенера от напряжения на его контактах

Fig. 2. Comparison of the idealized and detailed models of the Zener diode: (a) current-voltage characteristics, (b) the resistance of the Zener diode from the voltage at its contacts

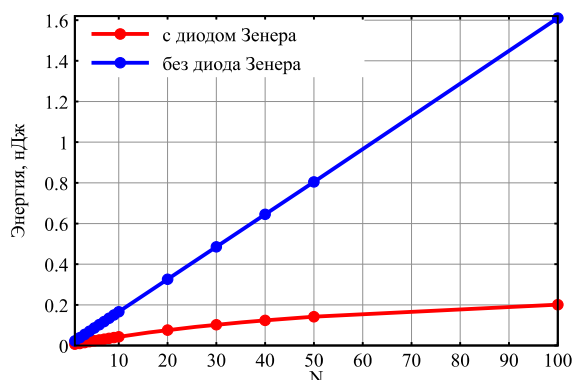


Рис. 3. Затраты энергии на запись одной ячейки комплементарных мемристоров без диода и с диодом Зенера в зависимости от числа ячеек в квадратной матрице $N \times N$

Fig. 3. The energy costs for writing one cell of complementary memristors without a diode and with a Zener diode depending on the number of cells in a square matrix $N \times N$

Для исключения паразитной записи в матрице без диодов [10] на незадействованные шины подается половина напряжения записи, при этом напряжение на контактах невыбранных мемристоров остается ниже порогового. Диод Зенера позволяет подавать напряжения только на выбранную ячейку, выступая в качестве селективного элемента и предотвращая паразитную запись в соседние ячейки кроссбара через смежные шины.

Результаты моделирования показывают, что поддержание потенциала на шинах незадействованных ячеек вносит значительный вклад в итоговое потребление запоминающей матрицы. Как видно из рис. 3, затраты энергии на запись одной ячейки из комплементарных мемристоров в матрице размером 100×100 снижаются в 8 раз при добавлении в каждую ячейку диода Зенера. В обоих вариантах использовались худшие условия для записи, при которых все ячейки матрицы изначально находились в одинаковом состоянии. Максимальное и минимальное сопротивления мемристоров равно соответственно 110 кОм и 10 кОм.

Выводы

Простая вакуумная технология нанесения мемристорного слоя, легированных полупроводниковых слоев диода Зенера и проводящих дорожек в магнетронном технологическом модуле с двумя одновременно распыляющимися катодами обеспечивает промышленный способ изготовления комбинированного мемристорного кроссбара с нелинейным элементом для сверхбольшой запоминающей матрицы. Чистота процесса изготовления матрицы может быть достигнута в едином вакуумном объеме нано-технологического комплекса, например, «НаноФаб-100» фирмы NT-MDT. Кроме последовательного нанесения в магнетронном модуле мемристорных, полупроводниковых и проводящих слоев возможно создание необходимой топологии в каждом слое путем физического травления в технологическом модуле фокусированных ионных пучков без использования маски.

Комплементарное включение мемристоров позволяет уменьшить сквозной ток через ячейку в ходе операции считывания и, соответственно, энергопотребление, а также влияние неоднородности характеристик мемристоров на выходное напряжение ячейки. Применение в ячейке диода Зенера, пропускающего ток в обоих направлениях, позволяет исключить взаимовлияние биполярных резистивных ячеек в режиме записи и незначительно уменьшает интеграцию устройства.

Построена SPICE-модель комбинированного мемристорного кроссбара с диодом Зенера и проведено моделирование его работы в режиме записи.

Результат моделирования показывает, что запоминающая матрица на основе ячеек с комплементарными мемристорами и нелинейным селективным элементом — диодом Зенера является энергоэффективной и может быть использована в качестве сверхбольшой запоминающей матрицы в нейропроцессоре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маевский О. В. Логический коммутатор и запоминающее устройство на основе мемристорных ячеек для электрической схемы нейропроцессора / О. В. Маевский, А. Д. Писарев, А. Н. Бусыгин, С. Ю. Удовиченко // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2016. Том 2. № 4. С. 100-111. DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-4-100-111
2. Удовиченко С. Ю. 3D КМОП-мемристорная нанотехнология создания логической и запоминающей матриц нейропроцессора / С. Ю. Удовиченко, А. Д. Писарев, А. Н. Бусыгин, О. В. Маевский // Наноиндустрия. 2017. № 5. С. 26-34.
3. Удовиченко С. Ю. Комплементарная мемристорно-диодная ячейка для запоминающей матрицы нейроморфного процессора / С. Ю. Удовиченко, О. В. Маевский, А. Д. Писарев, А. Н. Бусыгин // Сборник тезисов VIII Конференции Нанотехнологического общества России. 2017. С. 37-40.
4. Bennet C. Spatio-temporal Learning with Arrays of Analog Nanosynapses / C. Bennet, D. Querlioz, J.-O Klein // 2017 IEEE/ACM International Symposium on Nanoscale Architectures (NANOARCH). 2017. Pp. 125-130.
5. Biolek D. Reliable SPICE Simulations of Memristors, Memcapacitors and Meminductors / D. Biolek, M. Di Ventra, Y. V. Pershin // Radioengineering 2013. Vol. 22. Ni 4. Pp. 945-968.
6. Bobylev A. N. Neuromorphic coprocessor prototype based on mixed metal oxide memristors / A. N. Bobylev, A. N. Busygin, A. D. Pisarev, S. Yu. Udovichenko, V. A. Filippov // International journal of nanotechnology. 2017. Vol. 14. No 7/8. Pp. 698-704.
7. Bobylev A. N. The Electrical Properties of Memristor Devices $TiN/Ti_x Al_{1-x} O_y/TiN$ Produced by Magnetron Sputtering / A. N. Bobylev, S. Yu. Udovichenko // Russian Microelectronics. 2016. Vol. 45. No 6. Pp. 396-401.
8. Kim H. K. Erbium Doped Semiconductor Thin Films Prepared by RF Magnetron Sputtering / H. K. Kim, C. C. Li, X. M. Fang, J. Solomon et al. // Materials Research Society Symposia Proceedings. 1993. Vol. 301. Pp. 55-60.
9. Wong S. SPICE Macro Model for the Simulation of Zener Diode I-V Characteristics / S. Wong, C. M. Hu // IEEE Circuits and Devices Magazine. 1991. Vol. 7. № 4. Pp. 9-12, 52.
10. Zhao W. Design and Analysis of Crossbar Architecture Based on Complementary Resistive Switching Non-Volatile Memory Cells / W. Zhao, J. Portal, W. Kang et al. // Journal of Parallel and Distributed Computing. 2014. Vol. 74. № 6. Pp. 2484-2496.

Alexander D. PISAREV¹
Alexander N. BUSYGIN²
Andrey N. BOBYLEV³
Sergey Yu. UDOVICHENKO⁴

COMBINED MEMRISTOR-DIODE CROSSBAR AS A MEMORY STORAGE BASE

¹ Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor,
Department of Experimental physics and Nanotechnology,
Head of the Laboratory of Beam-Plasma Technology,
REC “Nanotechnology”, University of Tyumen
spcb.doc@gmail.com

² Postgraduate Student, Department of Experimental Physics
and Nanotechnology, University of Tyumen
daenur.al@gmail.com

³ Postgraduate Student, Department of Experimental Physics
and Nanotechnology, University of Tyumen
andreaubobylev@gmail.com

⁴ Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor of Department
of Experimental Physics and Nanotechnology;
Head of REC “Nanotechnology”, University of Tyumen
udotgu@mail.ru

Abstract

This article presents the topology and manufacturing technology of the composite crossbar. A new electronics component includes an active memristive layer and a semiconductor layer of Zener diode. The layers and conductors can be manufactured in a simple industrial way — in a magnetron technological module. Simulation of the write operation in the cells of the composite crossbar shows that application of Zener diode improves energy efficiency. The new electronics component allows to create planar and 3D ultra large memory devices which can be part of a neuromorphic processor.

Citation: Pisarev A. D., Busygin A. N., Bobylev A. N., Udovichenko S. Yu. 2017. “Combined Memristor-Diode Crossbar as a Memory Storage Base”. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 3, no 4, pp. 142-149.
DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-4-142-149

Keywords

Composite crossbar, memristor, Zener diode, memory matrix, SPICE.

DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-4-142-149

REFERENCES

1. Maevsky O. V., Pisarev A. D., Busygin A. N., Udovichenko S. Yu. 2016. "Logicheskiy kommutator i zapominayushchee ustroystvo na osnove memristornykh yacheek dlya elektricheskoy skhemy neyroprotsessora" [Logical Commutator and a Storage Device Based on Memristor Cells for Electrical Circuits of Neuroprocessor]. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 2, no 4, pp. 100-111. DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-4-100-111
2. Udovichenko S., Pisarev A., Busygin A., Maevsky O. 2017. "3D KMOP-memristornaya nanotekhnologiya sozdaniya logicheskoy i zapominayushchey matritsy neyroprotsessora" [3D CMOS Memristor Nanotechnology for Creating Logical and Memory Matrices of Neuroprocessor]. Nanoindustry, no 5, pp. 26-34.
3. Udovichenko S. Yu., Maevsky O. V., Pisarev A. D., Busygin A. N. 2017. "Komplementarnaya memristorno-diodnaya yacheyka dlya zapominayushchey matritsy neyromorfnoy protsessora" [Complementary Memristor-Diode Cell for Memory Matrix of Neuromorphic Processor]. Proceeding of the 8th conference of Nanotechnological Society of Russia, pp. 37-40.
4. Bennet C., Querlioz D., Klein J.-O. 2017. "Spatio-temporal Learning with Arrays of Analog Nanosynapses". 2017 IEEE/ACM International Symposium on Nanoscale Architectures (NANOARCH), pp. 125-130.
5. Biolek D., Di Ventra M., Pershin Y. V. 2013. "Reliable SPICE Simulations of Memristors, Memcapacitors and Meminductors". Radioengineering, vol. 22, no 4, pp. 945-968.
6. Bobylev A. N., Busygin A. N., Pisarev A. D., Udovichenko S. Yu., Filippov V. A. 2017. "Neuromorphic Coprocessor Prototype Based on Mixed Metal Oxide Memristors". International journal of nanotechnology, vol. 14, no 7/8, pp. 698-704.
7. Bobylev A. N., Udovichenko S. Yu. 2016. "The Electrical Properties of Memristor Devices TiN/Ti_xAl_{1-x}O_y/TiN Produced by Magnetron Sputtering". Russian Microelectronics, vol. 45, no 6, pp. 396-401.
8. Kim H. K., Li C. C., Fang X. M., Solomon J. et al. 1993. "Erbium Doped Semiconductor Thin Films Prepared by RF Magnetron Sputtering". Materials Research Society Symposia Proceedings, vol. 301, pp. 55-60.
9. Wong S., Hu C. M. 1991. "SPICE Macro Model for the Simulation of Zener Diode I-V Characteristics". IEEE Circuits and Devices Magazine, vol. 7, no 4, pp.9-12, 52.
10. Zhao W., Portal J., Kang W. et al. 2014. "Design and Analysis of Crossbar Architecture Based on Complementary Resistive Switching Non-Volatile Memory Cells". Journal of Parallel and Distributed Computing, vol. 74, no 6, pp. 2484-2496.