

5. Glushko, K.A. Development of conceptual approaches to studying the process of infiltration of thawed waters through frozen soil / Glushko KA, Vodchits NN, Stelmashuk SS // Bulletin of Brest State Technical University, 2013.- №2. –Pp.18-21.
6. Smirnov, P.A. The variant of reconstruction of pigsties-fatteners according to the standard project 802-5-15 / Biological and ecological problems of land-division of the Volga region: Mat. All-Russ. sci. -pract. conf., dedicated to 80 years from the day of birth. prof. Kuznetsov A.I. -Cheboksary: OOO "Polygraph", 2010.-Pp. 236-240.
7. Smirnov, P.A. Some results of the study of soil moisture in the autumn-winter-spring period / P.A. Smirnov, I.I. Maksimov // Proceedings of ChSAA, -t.XX.- Cheboksary, 2005.-Pp.252-255.
8. Monitoring of agricultural land of the Chuvash Republic. - Cheboksary: Printing department of the Chuvash State Agricultural Academy, 2005. - 123 p.

Information about the authors

1. **Smirnov Pyotr Alekseyevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport and Technology Machines and Complexes, Chuvash State Agricultural Academy, 428003, Chuvash Republic, Cheboksary, 29, K. Marks Str.; e-mail: smirnov_p_a@mail.ru, Phone: 89603101909;
2. **Fedorov Dmitry Yurievich**, Magister of Engineering Faculty, Chuvash State Agricultural Academy, 428003, Chuvash Republic, Cheboksary, 29, K. Marks Str.; e-mail: ddiimmaann35@mail.ru, Phone: 89196613455;
3. **Prokopyeva Elena Vladimirovna**, Magister of Engineering Faculty, Chuvash State Agricultural Academy, 428003, Chuvash Republic, Cheboksary, 29, K. Marks Str.; e-mail: elena-prokopy@mail.ru, Phone: 89279930981.

УДК 621.382

УЛУЧШЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МЕМРИСТОРОВ НА ОСНОВЕ ОКСИДА КРЕМНИЯ МЕТОДОМ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

А.В. Степанов¹⁾, А.И. Белов²⁾, Е.В. Окулич²⁾, Р.А. Шуйский²⁾, Д.С. Королев²⁾, А.Н. Михайлов²⁾

¹⁾ Чувашская государственная сельскохозяйственная академия
428003, Чебоксары, Российская Федерация

²⁾ Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603950, Нижний Новгород, Российская Федерация

Исследование поддержано РФФИ в рамках проекта №18-37-00456.

Аннотация. Среди наиболее интенсивно развивающихся, «прорывных» направлений в области информационных технологий – разработка нейроморфных систем, которые по своей архитектуре и функциональным возможностям подобны мозгу. Создание таких систем означает качественный скачок в развитии технологий, актуальный для самых разнообразных сфер применения в быту и на производстве, в том числе и для сельского хозяйства. Одним из эффективных путей аппаратной реализации данной задачи является создание мемристоров – устройств компьютерной памяти на основе тонкопленочных структур (RRAM), изменяющих свое электросопротивление (испытывающих переключение) под действием электрического поля или протекающего тока. Наряду с несомненными достоинствами, мемристоры имеют существенный недостаток, тормозящий их коммерциализацию – большой разброс параметров и низкую воспроизводимость рабочих характеристик. Для мемристивных структур типа металл–диэлектрик–металл это в основном связано со случайным характером формирования ключевых элементов таких структур – филаментов.

В данной работе предложено управлять процессом формирования филаментов путем облучения поверхности диэлектрика ускоренными ионами. Последние создают в диэлектрике обогащенные дефектами области («каскады смещения»), в которых зарождаются филаменты. На примере облучения ионами Xe^+ (с энергией 5 кэВ) поверхности диэлектрика в мемристивной структуре $\text{Au/SiO}_2/\text{TiN}$ установлено, что облучение позволяет снизить разброс напряжения, необходимого для формирования филаментов, уменьшить вариацию вольтамперных характеристик при повторных циклах переключения, а также увеличить отношение токов в высокоомном и низкоомном состояниях мемристора. Предложено объяснение указанного эффекта. Таким образом, эксперимент указывает на перспективность данного способа управления параметрами мемристора.

Ключевые слова: мемристор, оксид кремния, ионное облучение, влияние на рабочие характеристики.

Введение. Исследования, которым посвящена данная публикация, носят междисциплинарный характер и актуальны для многих областей науки и техники.

Одно из авангардных направлений, находящихся на стыке биологии, медицины, компьютерной техники и робототехники, – разработка нейроморфных электронных систем [8], которые по своей архитектуре и функциональным возможностям подобны живой нервной системе и мозгу. Целью этого направления является

создание технологической базы производства продуктов совершенно нового технического уровня и формирование новых рынков [13, 1]. К таким продуктам, в частности, относятся нейроморфные вычислительные системы [3] и нейрогибридные системы и технологии, построенные на основе сопряжения электронных аналогов нейронных сетей и биологических тканей/культур [5, 16], используемые для производства робототехники с элементами искусственного интеллекта, разработки новых методов диагностики, лечения и «протезирования» (замещения частей) нервной системы, автоматизации производственных процессов, в том числе в сельском хозяйстве.

Одна из возможностей аппаратной реализации компактных и энергоэффективных вычислительных систем связана с созданием электронных моделей нейронных сетей на основе тонкопленочных мемристивных наноструктур и устройств, созданных на их основе [10].

Мемристивное устройство («мемристор») представляет собой физическую модель мемристора – элемента компьютерной памяти, способного менять свое сопротивление (резистивное состояние) в зависимости от величины электрического поля и/или протекшего заряда [4]. В случае неорганического твердотельного мемристивного устройства изменение сопротивления происходит за счет обратимой перестройки атомной структуры в нанометровой области пленки диэлектрика, расположенной между двумя проводящими электродами. При отключении питания заданное резистивное состояние хранится длительное время, что позволяет использовать такие структуры при создании устройств энергонезависимой резистивной памяти (RRAM – Resistive Random Access Memory) [11] и логических устройств [15]. Мемристивные наноструктуры конденсаторного типа «металл-оксид-металл» (так называемые металл-оксидные наноструктуры) формируются на стандартной кремниевой пластине, совместимы с КМОП (комплиментарная структура металл-оксид-полупроводник) -технологией создания современных аналоговых и цифровых электронных микросхем, а локальность процессов, отвечающих за резистивное переключение, обеспечивает высокую степень миниатюризации (единицы нанометров), быстроедействие (десятки наносекунд) и низкое энергопотребление (доли пикоджоулей). Способность мемристивной структуры изменять проводимость под воздействием электрических сигналов делает ее электронным аналогом синапса – соединения между нейронами, задающего силу их связи [6, 7, 14].

К настоящему времени достигнут значительный прогресс в использовании мемристоров для моделирования свойств и функций биологического синапса. Несмотря на это, работы по аппаратной реализации «мозгоподобных» электронных устройств на основе мемристивных структур еще находятся на начальной стадии развития. Широкое внедрение памяти типа RRAM сдерживается тем обстоятельством, что, наряду с большими достоинствами данного типа памяти, он обладает существенным недостатком – большим разбросом параметров и низкой воспроизводимостью. Это обусловлено особенностями структуры и функционирования мемристоров. Дело в том, что мемристивная система металл–оксид–металл обычно приобретает необходимое свойство переключаться из высокоомного в низкоомное состояние и обратно только после так называемой формовки, когда под действием внешнего напряжения определенной величины и полярности внутри диэлектрического слоя формируются тонкие проводящие пути, называемые филаментами. Этот процесс носит случайный (стохастический) характер: филаменты образуются из зародышей, возникающих в местах локализации сильных электрических полей, как правило, на границе раздела диэлектрика и электрода. При этом большую роль играют неоднородности рельефа границы, зёрнистая структура пленки и флуктуации ее состава и пр. В результате количество, форма и состав филаментов сильно зависят от ряда случайных факторов. Более того, в процессе работы мемристора, требующей многочисленных переключений (циклирования), могут изменяться структура и набор функционирующих филаментов, что приводит к изменению и даже полной деградации вольтамперных характеристик.

Идея данной работы состоит в управлении процессом создания филаментов с помощью облучения поверхности диэлектрика (которая после нанесения металлического слоя служит границей раздела металл–диэлектрик) ускоренными ионами (метод ионной имплантации). Ускоренный ион при своем движении в твердом теле смещает атомы из узлов решетки и тем самым создает «облако» дефектов – вакансий и междоузельных атомов – так называемый каскад смещения [2]. Благодаря высокой концентрации дефектов, каскады смещения, расположенные в диэлектрике вблизи контакта с электродом, обладают высокой проводимостью (являются практически эквипотенциальными), и следует ожидать, что, по крайней мере, часть из них будут служить концентраторами электрического поля в процессе формовки.

Метод ионной имплантации позволяет контролировать концентрацию дефектов в каскадах смещения, их среднюю протяженность в направлении ионного пучка и в поперечном направлении, а также средние расстояния между каскадами. Это достигается путем выбора типа ионов, их энергии и дозы. В этом случае роль указанных выше неконтролируемых факторов, определяющих результат электроформовки, образование филаментов уменьшится, и, как следствие, повысится воспроизводимость параметров переключения.

В настоящей работе эта идея реализована для мемристивных структур Au/SiO₂/TiN, в которых тонкая пленка SiO₂ служит диэлектриком, а в качестве верхнего и нижнего контактов – слои золота и нитрида титана, соответственно. Следует отметить [9], что выбор SiO₂ в качестве диэлектрика в наибольшей степени отвечает условию совместимости технологии создания мемристоров с существующей кремниевой технологией микроэлектроники, в которой SiO₂ является стандартным компонентом приборов типа МДП транзисторов.

Материалы и методы исследования. Матрицы мемристивных структур Au/SiO₂/TiN создавались на термически окисленных пластинах кремния с нижним проводящим слоем TiN. Пленки диоксида кремния толщиной 40 нм наносились методом магнетронного распыления кварца. Ионное облучение проводилось после нанесения слоя SiO₂, а после этого путем напыления через маску осаждались контакты Au с площадями $1.2 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$.

Ионное облучение проводилось с использованием установки ИЛУ-200. Для облучения были выбраны ионы Xe⁺. Выбор данного типа ионов обусловлен тем, что их большая масса позволяет создавать каскады смещений с высокой плотностью точечных дефектов [2]. Это необходимо для обеспечения высокой проводимости дефектных «облаков», чтобы они в наибольшей степени могли выполнять функции зародышей филаментов. Кроме того, ионы Xe⁺ не обладают химической активностью, которая могла бы оказывать дополнительное влияние на результаты облучения.

Одно из требований к выбору условий облучения, вытекающих из указанной выше идеи, состоит в том, что пробег ионов должен быть существенно меньше толщины пленки, иначе каскады, являющиеся областями с высокой проводимостью, будут закорачивать диэлектрик. Еще одно требование состоит в том, что каскады не должны перекрываться между собой: это накладывает ограничение на дозу облучения.

В связи с указанными требованиями энергия ионов Xe⁺ была выбрана равной 5 кэВ (облучение с энергиями меньше 5 кэВ на ИЛУ-200 затруднительно технически). Для выбора оптимального интервала доз были выполнены расчеты пространственного распределения вакансий в каскадах атомных смещений с использованием программы SRIM [12]. Эти расчеты позволили определить дозы облучения, при которых создаются каскады, в среднем отстоящие друг от друга на заданные расстояния. Установлено, что максимальный латеральный радиус каскада в SiO₂, соответствующий уменьшению средней концентрации кислородных вакансий внутри него в 100 раз, равен 4,6 нм. Максимальная допустимая доза рассчитывалась из условия, что среднее расстояние между каскадами равно латеральному диаметру каскада. Она равна $9 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. При указанной энергии ионы генерируют каскады смещения в приповерхностном слое SiO₂ глубиной до 9 нм. На рис.1. приведена схема, иллюстрирующая положение каскадов смещения в пленке SiO₂ мемристивной структуры.

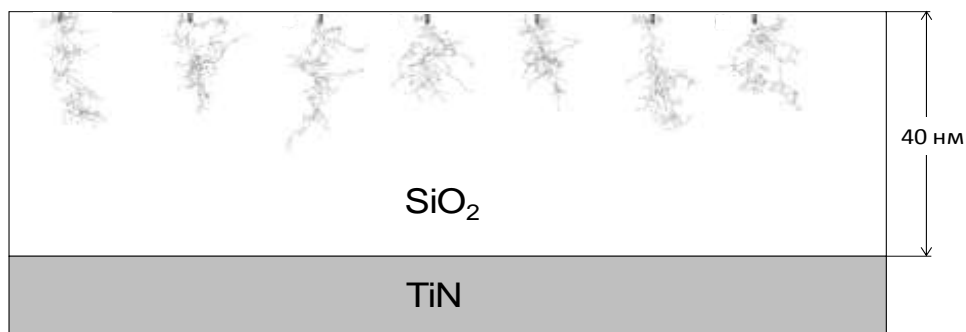


Рис.1. Схематическое изображение части мемристивной структуры с диэлектриком SiO₂ и созданными в ней каскадами смещения при облучении ионами Xe⁺ с энергией 5 кэВ. Формы каскадов рассчитаны по программе SRIM.

Методика измерений вольтамперных характеристик структур была следующей. Использовался анализатор параметров полупроводниковых приборов Agilent B1500A. На структуру подавались циклически повторяющееся знакопеременное напряжение («развертка») с заданной амплитудой. Формовка происходила в первом цикле измерений, когда напряжение менялось от нулевого до некоторого отрицательного (значения ~ 5 В), в результате чего структура переходит в состояние с низким сопротивлением (СНС). При последующей подаче положительного напряжения, когда его величина достигала определенной величины, происходило переключение – повышение сопротивления и уменьшение тока: структура переходит в состояние с высоким сопротивлением (СВС), которое сохраняется при обратном ходе положительного напряжения. Затем при подаче отрицательного напряжения происходит возврат (переключение) в СНС. Эти переключения циклически повторяются. Нас интересовали в первую очередь разбросы напряжений, необходимых для формовки, а также отношения сопротивлений в СВС и СНС.

Результаты исследования и их обсуждение. На рис. 2 представлены ВАХ (вольтамперная характеристика) структур, подвергнутых и не подвергнутых облучению, для нескольких циклов измерения, проведенных после формовки. Вид ВАХ типичен для мемристивных структур [10, 11]. Видно, что от цикла к циклу ВАХ несколько изменяются, что обусловлено стохастической природой процессов, описанной выше.

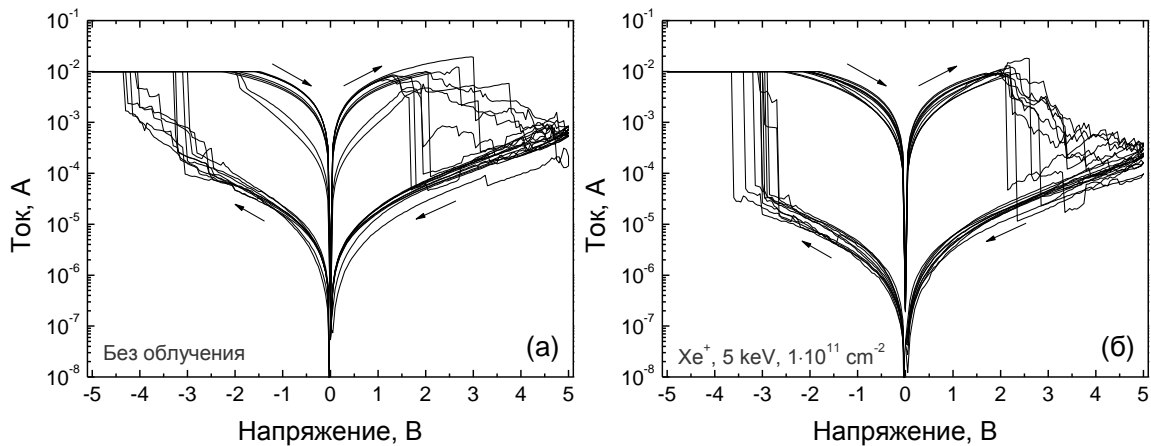


Рис. 2. Типичные ВАХ мемристивных структур на основе пленок SiO_2 , необлученных (а) и облученных ионами Xe^+ с дозой $1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ (б).

Усредненные по четырем структурам каждого вида значения минимальных напряжений, необходимых для осуществления формовки, и их разбросы приведены в таблице 1. Из таблицы видно, что разброс напряжений формовки, как и ожидалось, в облученных структурах меньше, чем в необлученных. Как было сказано выше, предполагается, что этот результат является следствием уменьшения степени случайности при формовке филаментов: вместо того, чтобы формироваться на случайных неоднородностях границы раздела металла с SiO_2 , в облученных структурах филаменты формируются преимущественно в местах расположения каскадов смещения, концентрация которых определяется дозой.

Таблица 1 – Минимальное напряжение, необходимое для формовки не облученных и облученных Xe^+ структур $\text{Au/SiO}_2/\text{TiN}$.

Доза, см^{-2}	Напряжение, В	
	Без облучения	С облучением
$1 \cdot 10^{11}$	– (3.0 ± 1.6)	– (2.9 ± 0.3)
$1 \cdot 10^{12}$	– (3.4 ± 1.3)	– (3.7 ± 0.8)
$1 \cdot 10^{13}$	– (4.2 ± 0.2)	– (3.4 ± 0.1)

Данные, представленные на рисунке 2, свидетельствуют о том, что степень вариации ВАХ от цикла к циклу в облученных структурах тоже несколько ниже. Но наиболее выраженным отличием ВАХ облученных структур от ВАХ структур, не подвергнутых облучению, является разница отношений токов в двух состояниях – СНС и СВС: в облученных структурах это отношение существенно больше, что является положительным фактором, влияющим на функционирование мемристоров как элементов памяти. Увеличение данного отношения объясняется тем, что филаменты, формирующиеся после облучения, зарождаются преимущественно на каскадах смещения, по-видимому, имеют меньшую толщину. Благодаря этому, облегчается процесс окисления участка филамента, прилегающего к электроду при подаче положительного напряжения (такое окисление является причиной переключения из СНС в СВС [10]), в результате чего сопротивление в высокоомном состоянии возрастает. Таким образом, ионное облучение оказывает влияние как на зарождение филаментов, так и на рабочие параметры исследуемых мемристивных структур.

Выводы

Установлено, что ионное облучение Xe^+ диэлектрика SiO_2 в мемристивной структуре $\text{Au/SiO}_2/\text{TiN}$ приводит к снижению разброса напряжения формовки, а также к росту отношения токов в высокоомном и низкоомном состояниях. Это указывает на перспективность метода ионной имплантации, но требует проведения дальнейших исследований в данном направлении.

Литература

1. Национальная научно-технологическая политика «быстрого реагирования»: рекомендации для России: аналитический доклад / Н. Г. Куракова [и др.]. – М.: Издательский дом «Дело» РАНХиГС, 2014. – 160 с.
2. Риссел, Х. Ионная имплантация / Х. Риссел, И. Руге. – М.: Наука, 1983. – 359 с.

3. Akopyan, F. TrueNorth: Design and Tool Flow of a 65mW 1 Million Neuron Programmable Neurosynaptic Chip / F. Akopyan, J. Sawada, A. Cassidy // IEEE Trans. Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. – 2015. – Vol. 34. – № 10. – P.1537-1557.
4. Chua, L. Memristor – the missing circuit element / L. Chua // IEEE Trans. Circuit Theory. – 1971. – Vol. 18. – P. 507-519.
5. Gupta, I. Real-time encoding and compression of neuronal spikes by metal-oxide memristors / I. Gupta, A. Serb, A. Khiat // Nature Commun. – 2016. – Vol.7. – P.12805.
6. Ha, S. D. Adaptive oxide electronics: a review / S. D. Ha, S. Ramanathan // J. Appl. Phys. – 2011. – Vol.110. – P.071101.
7. Kuzum, D. Synaptic electronics: materials, devices and applications / D. Kuzum, S. Yu, H. S. Philip Wong // Nanotechnology. – 2013. – Vol. 24. – P.382001.
8. Mead, C. Neuromorphic electronic systems / C. Mead // Proceedings IEEE. – 1990. – Vol.78. – No. 10. – P.1629-1636.
9. Mehonic, A. Nanoscale Transformations in Metastable, Amorphous, Silicon-Rich Silica / A. Mehonic, M. Buckwell, L. Montesi // Adv. Mat. – 2016. – Vol. 28. – P. 7486-7493.
10. Memristor Networks / A. Adamatzky, L. Chua. – Switzerland: Springer International Publishing, 2014. – 720 p.
11. Resistive Switching: From Fundamentals of Nanoionic Redox Processes to Memristive Device Applications / D. Ielmini, R. Waser (Eds.). – WILEY-VCH, 2016. – 784 p.
12. Siegler, J. TRIM and SRIM / J. Siegler // Interactions of ions with matter. – 2018. – URL: <http://www.srim.org> (Accessed: 15.03.2018).
13. Spaanenburg, L. Networked Neural Systems / L. Spaanenburg, W. J. Jansen // In: Chips 2020. – Vol. 2. – Switzerland: Springer International Publishing, 2016. – P. 231-242.
14. Thomas, A. Memristor-based neural networks / A. Thomas // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2013. – Vol. 46. – P.093001.
15. Vourkas, I. Emerging Memristor-Based Logic Circuit Design Approaches: a Review / I. Vourkas, G. Ch. Sirakoulis // IEEE Circ. Sys. Mag. – 2016. – Vol.16. – P. 15-30.
16. Werner, T. Spiking Neural Networks Based on OxRAM Synapses for Real-Time Unsupervised Spike Sorting / T. Werner, E. Vianello, O. Bichler // Frontiers in Neuroscience. – 2016. – Vol.10. – P. 474.

Сведения об авторах

1. **Степанов Антон Викторович** – кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры математики, физики и информационных технологий, Чувашская государственная сельскохозяйственная академия, 428003, Чебоксары, Российская Федерация, e-mail:for.antonstep@gmail.com, тел. +79050284331.
2. **Белов Алексей Иванович** – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории физики и технологии тонких пленок, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603950, Нижний Новгород, Российская Федерация, пр. Гагарина, д.23/3, e-mail: belov@nifti.unn.ru, тел. +7-831-462-31-88.
3. **Окулич Евгения Викторовна** – аспирант, инженер лаборатории физики и технологии тонких пленок, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603950, Нижний Новгород, Российская Федерация, пр. Гагарина, д.23/3, e-mail:eokulich@nifti.unn.ru, тел. +7-831-462-31-88.
4. **Шуйский Руслан Андреевич** – магистр, инженер лаборатории физики и технологии тонких пленок, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603950, Нижний Новгород, Российская Федерация, пр. Гагарина, д.23/3, e-mail: ryslanshuyiski@mail.ru, тел. +7-831-462-31-88.
5. **Королев Дмитрий Сергеевич** – младший научный сотрудник лаборатории физики и технологии тонких пленок, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603950, Нижний Новгород, Российская Федерация, пр. Гагарина, д.23/3, e-mail: dmkorolev@phys.unn.ru, тел. +7-831-462-31-88.
6. **Михайлов Алексей Николаевич** – кандидат физико-математических наук, зав. лаборатории физики и технологии тонких пленок, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603950, Нижний Новгород, Российская Федерация, пр. Гагарина, д.23/3, e-mail: mian@nifti.unn.ru, тел. +7-831-462-31-88.