Элементы будущих нейроморфных систем на основе адаптивных оксидов металлов

А. Батурин[1], А. Заблоцкий[1], А. Маркеев[1], Ю. Матвеев[2], К. Егоров[1], Ю. Лебединский[1,2], А. Зенкевич[3]
[1]Московский физико-технический институт
[2]НИЯУ «Московский инженерно-физический институт»
[3]НИЦ «Курчатовский институт», НБИКС-центр

Развитие наукоёмких технологий в таких отраслях промышленности, как микроэлектроника и средства коммуникаций под общим названием «информационные технологии» (information technologies, IT) во многом определяло темпы роста экономики развитых стран в течение последних 30 лет, и на сегодняшний день быстро растущий рынок IT оценивается более чем в триллион долларов в год. При этом, последовательное улучшение характеристик и уменьшение стоимости приборов микроэлектроники достигалось, в первую очередь, путем уменьшения линейных размеров («масштабирования») элементов логики и памяти в микросхемах, в соответствии с т.н. «законом Мура». Степень миниатюризации в полупроводниковых приборах уже в 2000 году перешла микронный рубеж, и на сегодняшний день прогресс в области IT является одним из главных стимулов развития нанотехнологий. В настоящее время цифровые микропроцессоры на основе КМОП-технологий (КМОП=комплементарные структуры металл-оксид-полупроводник) на кремнии уже имеют характерный размер (канала транзистора) 22 нм, и уже объявлены планы по строительству фабрики по производству микросхем памяти Флэш с технологической нормой 14 нм. В конце 2010 г. ведущие мировые производители чипов Intel, Samsung и Toshiba объявили об объединении усилий для разработки технологического процесса с характерным размером 10 нм. Отчёт о перспективах КМОП-технологий на кремнии, подготовленный по заказу DARPA, прогнозирует продолжение масштабирования элементов вплоть до второй половины этого десятилетия- с соответствующим уменьшением энергозатрат на одну логическую операцию до 5-10 пДж [[1]].

Вместе с тем, общеизвестно, что при сохранении темпов развития КМОП-технологий на кремнии, в силу различных *фундаментальных* физических ограничений перестают работать принципы, положенные в основу действия как логических, так и запоминающих устройств. Согласно перспективным прогнозам, при сохранении нынешних темпов технико-экономического развития к 2020–2025 годам должна произойти новая научно-техническая и технологическая революция, основой которой станут разработки, обеспечивающие *высокую информационную ёмкость* (вплоть до нескольких атомов на один бит информации) и резкое *снижение энергопотребления* устройств для обработки и хранения информации.

Для смены парадигмы развития аппаратной базы информационных технологий и их возможной синергии с деятельностью человеческого мозга необходим поиск и исследование принципиально новых эффектов, в том числе, в синтезированных на основе новых материалов наноразмерных структурах. Разработка на основе такого рода структур новых синтетических многофункциональных логических и запоминающих устройств может явиться альтернативным подходом к созданию *аналоговых* либо *гибридных* вычислительных систем и информационных технологий принципиально иного типа, которые превосходят по своей эффективности используемые в настоящее время цифровые технологии и архитектуру вычислений.

Одно из таких радикально новых направлений в развитии информационных технологий заключается в создании искусственных нейронных сетей на основе принципиально иной *аппаратной* базы, моделирующей деятельность биологических нейронных сетей, т.е. сетей нервных клеток живого организма [2]. Хотя современные цифровые компьютеры уже обладают достаточной производительностью, чтобы соперничать с функциональностью биологического мозга таких животных, как паук, мышь и кошка, но при этом тепловыделение в процессоре экспоненциально растёт по мере усложнения иерархии мозга [3,4]. В частности, для того, чтобы просимулировать активность мозга кошки, хотя бы в 100 раз меньшей скоростью, необходимо было использование суперкомпьютера Blue Gene/P (IBM) с 147456 параллельными процессорами и 144 ТБ памяти. Это связано с тем, что мозг животных организован принципиально иначе по сравнению с цифровой архитектурой вычислений фон Неймана. Предполагается, что ключевой особенностью, определяющей высокую эффективность мозга биологических систем и возможность параллельной обработки входящей информации, является исключительно высокая степень взаимных связей между нейронами (~10^4 в коре головного мозга млекопитающих), которые меняют свои функциональные свойства в процессе прохождения входящих сигналов от органов чувств в различных областях коры головного мозга. Этот процесс можно называть “обучением”, и информация, полученная в процессе такого обучения, сохраняется путем изменения синаптических связей между нейронами. В настоящее время, существует большое количество моделей “обучения” в биологических нейронных сетях, в частности, ассоциативное обучение по Хеббу (Hebbian correlational learning) [5], консолидация, гомеостазис, синаптическая «пластичность» (spike time-dependent plasticity) [6], и другие.

С этой точки зрения, исключительный интерес представляют исследования эффектов в *неорганических* и *органических* наноструктурах, которые функционально воспроизводят действие синапсов биологических систем. В 2008 г. ученые из компании

Hewlett-Packard обнаружили новые свойства в так называемых *мемристорах* (memristor = memory + resistor) на основе бислоёв Ti_2O_5/TiO_{2-x} наноразмерных толщин, заключенных между 2-мя металлическими электродами [7], которые, так же как и синапсы мозга, представляют собой двухполюсные устройства, и, с точки зрения электрической функциональности, могут рассматриваться как весьма близкий аналог. В мемристорах возможно *непрерывно* и обратимо менять электрическое сопротивление, и описанное явление “скрученного” гистерезиса в вольт-амперных характеристиках вызвало в последние несколько лет взрывной рост интереса со стороны как физиков-материаловедов, так и инженеров-схемотехников в микроэлектронике, прежде всего, потому, что потенциально позволяет создать на их основе сверхплотную сеть наноразмерных *аналоговых* элементов быстрой энергонезависимой памяти для компьютеров. Вместе с тем, свойства мемристоров функционально воспроизводят действие синапсов в нейронах биологической нейронной сети (мозга), и это породило ожидания, что на их основе могут быть созданы искусственные нейронные сети с наноразмерными электронными «синапсами», на которых возможна принципиально новая архитектура вычислений и, в конечном счете, реализация искусственного интеллекта.

Стратегической задачей нашего проекта является создание искусственных нейронных сетей на основе нейроморфных и нейрогибридных систем с конечной целью реализации искусственного интеллекта. Под искусственным интеллектом понимается воспроизведение некоторых из функций, которые обычно присущи живым организмам, включая, конечную, и наиболее желанную, цель- воспроизведение функций человеческого мозга. Тем не менее, даже оставляя в стороне эту конечную и крайне амбициозную цель, есть множество задач, которые живые организмы выполняют с легкостью, и если бы удалось воспроизвести эти функции в электронных устройствах, это позволило бы решить многие сложные и крайне насущные проблемы. Таким образом, основная идея “вдохновленного” природой подхода к созданию новой электроники заключается в заимствовании обнаруженных в биологических организмах подходах к взаимодействию с окружающей средой, и использовании их для воспроизведения в различных технологических областях. К таковым относятся, например, адаптация к изменяющимся внешним условиям, аналоговое решение проблем оптимизации, ассоциативная память, бинарная и нечеткая логика, и др. Для того, чтобы созданные электронные устройства в принципе позволяли решать одну из этих задач, элементы этих устройств должны удовлетворять, по крайней мере, 2-м требованиям, именно, 1) обладать памятью, т.е. сохранять информацию о “предыстории”, и 2) иметь динамический отклик, т.е. их состояние должно меняться со временем в зависимости от входящих сигналов,

преимущественно нелинейным образом. Выполнение последнего требования позволяет создавать широкий спектр устройств с требуемыми функциональными характеристиками. Очевидно, что вышеупомянутым требованиям удовлетворяют известные комбинации таких активных элементов, как транзистор, однако, при этом они требуют очень больших энергозатрат, имеют сравнительно низкую плотность размещения, а также сложны и дороги в изготовлении. Поэтому, крайне заманчиво было бы совместить вышеупомянутые требования в одном пассивном элементе нанометрового размера, сравнимого, или меньше, чем характерный размер биологических логических и запоминающих элементов, таких как, нейрон и синапс, соответственно. В качестве такого пассивного элемента в настоящее время может рассматриваться мемристор (см. выше), а также его производные- “мемконденсатор” (memcapacitor) и “меминдуктор” (meminductor): состояния которых зависят от предистории входящих сигналов (приложенных напряжений, протекающих токов/зарядов).

В связи этим, одним из перспективных подходов представляется использование мемристоров в качестве элементов альтернативной аналоговой вычислительной парадигмы, которая ведет к концепции нейроморфных систем. Действительно, мемристорная технология имеет потенциал революцинизировать процесс вычислений, и с нею связывают сегодня очень большие ожидания. Однако, как часто бывало при открытии принципиально новых явлений, без детального понимания физических механизмов наблюдаемых мемристорных эффектов в различных материалах, их преимуществ и недостатков в зависимости от области применения, а также разработки детальных инженерных принципов их работы в качестве элементов аналоговых либо- альтернативно-цифровых вычислительных систем, их применение останется лишь мечтой. Следовательно, прежде чем эти элементы смогут быть использованы, необходимо, следуя принципам пионерской работы L. Chua [8], разработать систематические теоретические основы схемотехники, которая будет использовать аналоговые элементы такого рода. Со времени первоначального открытия мемристорного эффекта в структурах металл/изолятор/металл на основе $Pt/Ti_2O_5/TiO_{2-x}/Pt$ обнаружено большое количество других комбинаций материалов и физических механизмов, приводящих к мемристорному эффекту. На сегодняшний день показано, что такой эффект можно наблюдать в любых (как неоргнических, так и органических) структурах с обратимым переключением проводимости (resistive switching). В связи с этим, на настоящем этапе приоритетной задачей является поиск новых комбинаций материалов и физических механизмов, вызывающих мемристорный эффект, и демонстрация функциональности таких структур как элементов будущих нейроморфных систем путём проведения электрических тестов на

синаптическую пластичность (spike time-dependent plasticity, STDP), флуктуации при парных импульсах (paired pulses fluctuation, PPF) и др.

В настоящей работе рассматриваются материалы из класса бинарных и тройных ***адаптивных оксидов*** переходных металлов, синтезированных в сверхтонких (1-10 нм) слоях в многослойных структурах металл-изолятор-металл, в которых реализуются физические эффекты, предлагаемые для реализации мемристорных устройств. Наличие второго металла, как было продемонстрировано ранее, способствует формированию вакансий кислорода, участвующих в резистивном переключении. Однако, физические механизмы переключения проводимости в таких материалах до сих пор детально не выяснены. Полученные к настоящему времени результаты электрофизических измерений позволяют построить реалистичную модель переключения проводимости, что открывает возможность их использования как в стандартных запоминающих устройствах, так и для разработки более сложных устройств, сочетающих логические и запоминающие функции.

Альтернативная и конкурирующая концепция энергонезависимой памяти (а также основана на чисто электростатических/электронных эффектах в сверхтонких изолирующих слоях сегнетоэлектриков (например, $BaTiO_3$ [9]), на основе которых в структурах металл/сегнетоэлектрик/металл возможно создание т.н. сегнетоэлектрических туннельных переходов (по аналогии с магнитными туннельными переходами). «Резистивное» переключение (управление туннельным током) достигается путём изменения направления поляризации сегнетоэлектрика внешним электрическим полем, и, как следствие, изменением потенциального барьера. Недавно в сегнетоэлектрических туннельных переходах был продемонстрирован мемристорный эффект [10].

Наконец, исключительно большие ожидания сейчас связаны с использованием наблюдаемых магнитоэлектрических эффектов в композитных структурах, сочетающих сверхтонкие слои сегнетоэлектрических и ферромагнитных материалов [11] для создания комбинированных устройств памяти, реализующих запись/считывание информации как с помощью электрического, так и магнитного поля. В работе рассматривается синтез такого рода композитных мультиферроиков (в частности, на основе $Fe/BaTiO_3$, $Fe_3O_4/BaTiO_3$) и приводятся результаты исследования их функциональных свойств.

---

[1] P. Kogge, The tops in flops. IEEE Spectr 48 49-55 (2011).
[2] Smith, L. S. Handbook of Nature-Inspired and Innovative Computing: Integrating Classical Models with Emerging Technologies; Springer: New York, 2006; pp 433-475.
[3] Izhikevich, E. M.; Edelman, G. M. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 2008, 105, 3593–3598.
[4] Indiveri, G.; Chicca, E.; Douglas, R. IEEE Trans. Neural Networks 2006, 17, 211–221.
[5] Дж. Николс, А.Р. Мартин, Б. Дж. Валлас, П.А. Фукс, В кн. «От нейрона к мозгу», гл. «Синаптическая пластичность». УРСС. Москва, 2003.
[6] Hebb, D. The organization of behavior: A neuropsychological theory; John Wiley and Sons, Inc.: New York, 1949.
[7] Strukov, D. B.; Snider, G. S.; Stewart, D. R.; Williams, R. S. Nature 2008, 453, 80.

[8] L. O. Chua. Memristor - the missing circuit element. IEEE Trans. on Circuits and Systems, 18(5):507–519, 1971.
[9] A. Gruverman et al., Nano Lett. 9, 2529 (2009).
[10] A. Chanthbouala et al. Nat. Mater. 11 860 (2012); D. J. Kim et al., Nano Lett. 12 5697 (2012)
[11] V. Garcia et al, "Ferroelectric Control of Spin Polarization", Science 327, 1106 (2010).