

АЛЕКСАНДР ЛИОНОВИЧ ПЕРГАМЕНТ

доктор физико-математических наук, профессор кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет  
*aperg@psu.karelia.ru*

ПАВЕЛ АНАТОЛЬЕВИЧ БОЛДИН

аспирант кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет  
*arctus@sampo.ru*

ВЛАДИМИР ВЛАДИМИРОВИЧ КОЛЧИГИН

аспирант кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет  
*tukva45@yandex.ru*

ТАТЬЯНА ГЕНРИХОВНА СТЕФАНОВИЧ

аспирант кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет  
*gstef@yandex.ru*

## БИСТАБИЛЬНОЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ И ЭФФЕКТЫ ПАМЯТИ В ОКСИДАХ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

В работе рассматриваются актуальные вопросы оксидной электроники. Представлены результаты исследования электрофизическими свойств и эффектов переключения в тонкопленочных структурах на основе оксидов переходных металлов. Показано, что структуры на основе оксидов V и Nb перспективны для разработки новых элементов памяти.

Ключевые слова: переключение, элементы памяти, оксиды переходных металлов

В научной литературе по микроэлектронной тематике давно говорится об ограничениях кремниевой технологии при решении ряда задач, возникающих под давлением растущего рынка электронных устройств. Однако до последнего времени эти проблемы снимались дальнейшим развитием и совершенствованием технологических приемов изготовления кремниевых приборов и разработкой новых компонентов на основе эпитаксиальных слоев Si. Ситуация коренным образом изменилась при переходе к производству высокointегрированных микросхем с нанометровым масштабом отдельных элементов. Особенno это заметно в производстве микросхем компьютерной памяти. Развитие мобильной электроники требует разработки новой памяти, сочетающей в себе высокий объем хранимой информации (до нескольких терабайт, как у винчестеров) с быстрым временем доступа – единицы наносекунд (как у DRAM – dynamic random access memory, динамическая память с произвольной выборкой). Кроме того, эта память не должна содержать в своем составе механических устройств – в идеале это должна быть твердотельная микросхема [5].

Тонкие пленки оксидов переходных металлов, демонстрирующие эффект энергонезависимого резистивного переключения, были недавно предложены [6], [11] в качестве эффективных ма-

териалов для так называемой storage-class памяти (памяти с длительным временем хранения информации). По виду ВАХ бистабильное переключение с памятью можно разделить на два типа: униполярная (неполярная) и биполярная память (рис. 1). При униполярном переключении скачок сопротивления зависит от амплитуды прикладываемого напряжения, при этом полярность напряжения роли не играет. При биполярном переключении изменение сопротивления структуры зависит от полярности прикладываемого напряжения.

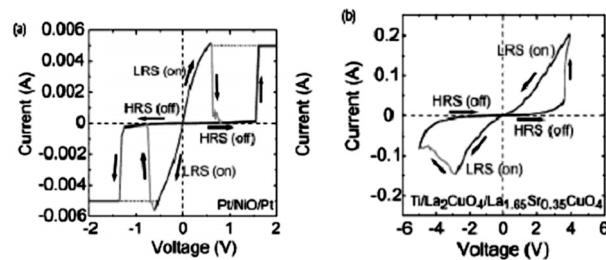


Рис. 1. Примеры (а) униполярного и (б) биполярного переключения с памятью в оксидных структурах [11]

Ячейку памяти на основе резистивного переключения можно классифицировать как сэндвич-структур, в которой активный оксидный слой расположен между двумя металлическими электродами.

Такая простая конструкция ячейки памяти на основе МОМ-структуре позволяет легко реализовать масштабируемую, так называемую «cross-point» (рис. 2) архитектуру ReRAM (Re – резистивная) с нанометровыми размерами. Поскольку существуют низкотемпературные методы осаждения пленок оксидов с резистивным переключением (золь-гель [1], анодное окисление [2], [3], вакуумное испарение на холодные подложки [4]), это дает возможность формирования 3D интегрированной терабитной памяти с многослойной структурой (рис. 2) [8].

Важной проблемой cross-point памяти является взаимная интерференция ячеек памяти: ячейка, находящаяся в LRS (включенном) состоянии (рис. 1), может влиять на соседние ячейки в HRS-состоянии в процессе считывания информации. Для предотвращения этого паразитного явления необходимо включение в состав ячейки памяти дополнительного элемента – транзистора или диода. Использование транзистора (1T-1R memory) ухудшает масштабный фактор прибора, тогда как использование диода (1D-1R memory), подавляя интерференцию ячеек, способствует дальнейшему повышению интеграции приборов. Основными требованиями, предъявляемыми к таким интерфейсным элементам, являются соизмерность их масштабов и совместимость технологии изготовления с элементами памяти.

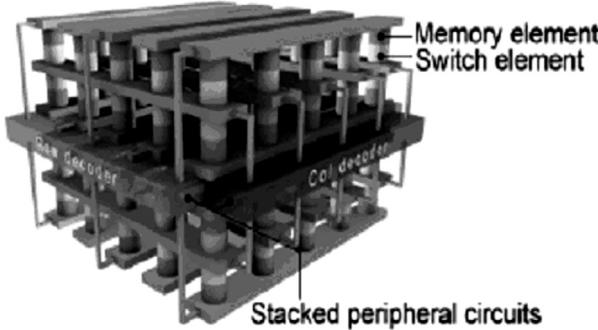


Рис. 2. Концептуальная схема многослойной (или наращиваемой – stackable) структуры памяти, которая включает периферийную управляющую схему [8]

В данной работе мы рассматриваем эффекты бистабильного резистивного переключения в МОМ- и МОП-структурах на основе оксидов переходных металлов. Оксидные пленки были изготовлены электрохимическим окислением V и Nb [2], [3], а также вакуумным испарением пятиокиси ванадия на подложки Si-SiO<sub>2</sub> [4] и анодно-катодной поляризацией ванадия в электролите [3]. Экспериментальные результаты для структур на основе ванадия представлены на рис. 3. В случае анодного оксида Nb наблюдается однополярное переключение с ВАХ, аналогичной той, что изображена на рис. 1а (рис. 4). Переключения с отрицательным дифференциальным сопротивлением N-типа в сэндвич-структуратах «V / гидратированный аморфный оксид

ванадия / Au» (рис. 3а), описываются в терминах H<sup>+</sup> ионного переноса [3]. Для объяснения эффектов памяти в структурах «Si / оксид ванадия / металл» [4] (рис. 3б) и «Nb / оксид ниобия / металл» (рис. 4) [2] предлагаются различные механизмы, в том числе на основе перехода Мотта, индуцированного изменением состава или образованием шнуря высокопроводящей фазы.

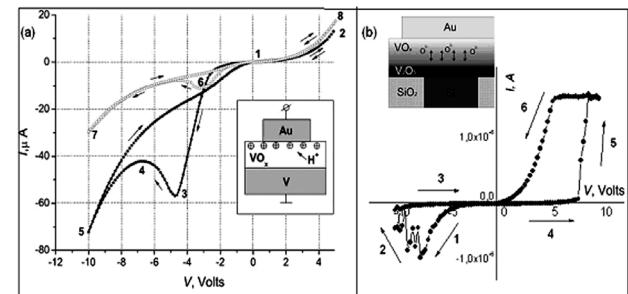


Рис. 3. ВАХ структур на основе (а) гидратированного оксида ванадия, полученного методом анодно-катодной поляризации в электролите [3], (б) оксида ванадия, полученного термическим осаждением в вакууме на холодные (T = 300 K) подложки Si-SiO<sub>2</sub> [4]

Потенциальные прикладные возможности представленных в данной работе систем по сравнению, в частности, с теми, которые основаны на физических явлениях в оксидных гетероструктурах [8] или на явлении перехода металла – иэлектрик в VO<sub>2</sub> [7], связаны прежде всего с простотой их изготовления и более высокой надежностью в работе.

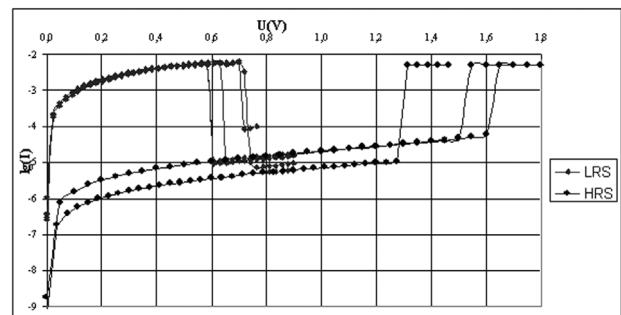


Рис. 4. Вольт-амперные зависимости структур Nb / Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> / Al после электроформовки. Толщина оксида d = 130 нм [2]

В заключение отметим, что электронные устройства, работа которых основана на физико-химических явлениях в оксидных материалах (это направление получило название «оксидная электроника» [5], [10]), являются одним из перспективных направлений альтернативной (не кремниевой) электроники, к числу которых относятся, например, молекулярная электроника, спин-транзисторы и сверхпроводящая электроника [9]. С другой стороны, структуры типа Si-VO<sub>x</sub> (рис. 3б) могут служить примером гибридных устройств, основанных как на традиционной кремниевой технологии, так и на новых технологиях создания элементов памяти.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России (2009–2013)», ГК № 14.740.11.0137, № П1156,

№ П1220, № 02.740.11.5179, № 02.740.11.039 и АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2011)», проект № 12871. Авторы благодарят Г. Б. Стефановича и А. А. Величко за обсуждение и полезные замечания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Березина О. Я., Казакова Е. Л., Пергамент А. Л., Сергеева О. В. Модификация электрических и оптических свойств тонких слоев гидратированного оксида ванадия при легировании водородом и вольфрамом // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2010. № 6(111). С. 77–85.
2. Кундозерова Т. В. Эффект резистивного переключения в оксиде ниobia // ВНКСФ-2010: Тез. докл. Волгоград, 2010. С. 456.
3. Путролайнен В. В., Борисков П. П., Величко А. А., Кулдин Н. А., Пергамент А. Л. Эффект электрического переключения с памятью в гидратированном аморфном диоксиде ванадия // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 2. С. 88–91.
4. Путролайнен В. В., Величко А. А., Кулдин Н. А., Стефанович Г. Б. Биполярное резистивное переключение в структуре Si-SiO<sub>2</sub>-V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Au // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2009. Т. 5. № 11. С. 99–102.
5. Стефанович Г. Б., Величко А. А., Пергамент А. Л., Стефанович Т. Г. Оксидная электроника: физические явления, материалы и компоненты // Материалы Междунар. науч.-техн. конф. «Нанотехнологии-2010». Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. Ч. 2. С. 124–126.
6. Burr G. W., Kurdi B. N., Scott J. C., Lam C. H., Gopalakrishnan K., Shenoy R. S. Overview of candidate device technologies for storage-class memory // IBM Journal of Research and Development. 2010. Vol. 52. P. 449–464.
7. Driscoll T., Kim H.-T., Chae B.-G., Di Ventra M., Basov D. N. Phase-transition driven memristive system // Applied Physics Letters. 2009. Vol. 95.
8. Lee M.-J., Kim S. I., Lee C. B., Yin H., Ahn S.-E., Kang B. S., Kim K. H., Park J. C., Kim C. J., Song I., Kim S. W., Stefanovich G., Lee J. H., Chung S. J., Kim Y. H., Park Y. Low-Temperature-Grown Transition Metal Oxide Based Storage Materials and Oxide Transistors for High-Density Non-volatile Memory // Advanced Functional Materials. 2009. Vol. 19. P. 1587–1593.
9. Luryi S., Xu J. M., Zaslavsky A. Future Trends in Microelectronics: the Nano Millennium (Part II: The Future Beyond Silicon). N. Y.: Wiley, 2002.
10. Ramirez A. P. Oxide Electronics Emerge // Science. 2007. Vol. 315. P. 1377–1378.
11. Sawa A. Resistive switching in transition metal oxides // Materials Today. 2008. Vol. 11. Issue 6. P. 28–36.