

УДК 539.143.4

РОЛЬ ЗЕРНИСТОСТИ И МЕЖСЛОЙНЫХ ГРАНИЦ В ПЕРЕКЛЮЧЕНИИ RRAM-ЭЛЕМЕНТОВ

Д. А. Подрябинкин, В. Т. Фам

Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники, г. Минск

В статье рассмотрено функционирование резистивной памяти на основе оксидов различных металлов, в том числе переходных с акцентом на влияние микроструктуры наноразмерных пленок на электрофизические характеристики устройств (RRAM). Представлен анализ механизма резистивного переключения, основанного на формировании проводящих филаментов диаметром 20–60 нм.

Функционирование интегрированных в кремний наноструктур резистивной памяти на основе оксидов металлов представляет собой сложное взаимодействие различных эффектов, обусловленных микроструктурными особенностями оксидных пленок и механизмами токопереноса в них. Это перспективное направление в разработке энергоэффективных, высокопроизводительных и компактных запоминающих устройств. Понимание и контроль микроструктуры оксидных пленок являются важными аспектами при разработке высокопроизводительных RRAM-устройств.

Наноструктура RRAM на основе оксидов различных металлов с произвольным доступом, обычно состоит из двух металлических электродов, разделенных наноразмерной пленкой из оксида металла, сопротивление которой зависит от полярности, продолжительности времени и величины приложенного напряжения, т. е. является функцией тока, который прошел через пленку. После отключения напряжения

элемент не изменяет своего состояния и запоминает последнее значение сопротивления. Элемент функционирует как обратимое резистивное переключение под действием импульсов электрического тока. Изменение сопротивления является энергонезависимым и состояние сопротивления может сохраняться в течение длительного времени после отключения внешнего электрического смещения.

Скорость переключения между состояниями высокого (HRS, High Resistance State) и низкого (LRS, Low Resistance State) сопротивления является одним из ключевых параметров, определяющих применимость устройств резистивной памяти в высокопроизводительных вычислительных и энергоэффективных системах. Экспериментальные исследования показали, что в ряде материалов, таких как TaO_x , HfO_2 , TiO_2 и NiO , время переключения может составлять менее нескольких наносекунд [1, 2].

Механизм резистивного переключения состоит в изменении последовательного сопротивления за счет диффузии кислорода с образованием проводящих филаментов (токовых нитей) с характерным диаметром 20–60 нм, в которых происходит захват заряда на ловушечные состояния. Механизм переключения посредством проводящих филаментов обусловлен захватом и последующей генерацией электронов метастабильными ловушечными состояниями, стимулированными шумом [3].

Пленки оксидов металлов обладают сложной микроструктурой: они могут быть многослойными и зернистыми. В зависимости от метода осаждения и последующей термообработки такие пленки могут состоять из областей с различной стехиометрией (например, $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{TaO}_x$ или $\text{HfO}_2/\text{HfO}_x$) или содержать аморфные и поликристаллические фазы одновременно. Поликристаллическая структура оксидов, особенно характерная для таких материалов, как TiO_2 и HfO_2 , предполагает наличие границ зерен, которые играют

ключевую роль в миграции кислородных вакансий и формировании проводящих филаментов. Эти дефекты структуры часто становятся предпочтительными путями для тока и локализуют процессы резистивного переключения. Кроме того, преднамеренное создание слоистых оксидных структур позволяет улучшить параметры устройств, например, снизить ток RESET и повысить стабильность состояний с высоким и низким сопротивлением.

Количество слоёв плёнки и плотность зерен в каждом из них оказывают существенное влияние на электрофизические характеристики устройства. Экспериментально установлено, что при увеличении числа слоёв и росте количества зерен в отдельном слое наблюдается постепенная трансформация типичной петлеобразной вольт-амперной характеристики (рис. 1), свойственной мемристорам, в близкую к линейной омическую зависимость тока от приложенного напряжения [4]. Это свидетельствует о снижении выраженности эффекта резистивного переключения и указывает на необходимость оптимизации структуры пленки с точки зрения количества слоёв и зернистости для обеспечения стабильных и воспроизводимых характеристик переключения.

Для анализа влияния структурных параметров многослойной оксидной пленки на электрические характеристики мемристорного устройства было проведено численное моделирование с варьированием количества слоёв и числа зерен в каждом слое. Моделирование учитывало, как локализованные проводящие филаменты внутри отдельных зерен, так и межслойные барьеры, формирующие последовательную цепь сопротивлений. В результате расчётов было установлено, что изменение числа слоёв и плотности зерен приводит к монотонному поведению ключевых параметров – максимального тока $I_{\max}$ и отношения сопротивлений $R_{\max}/R_{\min}$. Эти данные легли в основу дальнейшего анализа конкуренции между параллельными и последовательными каналами проводимости.

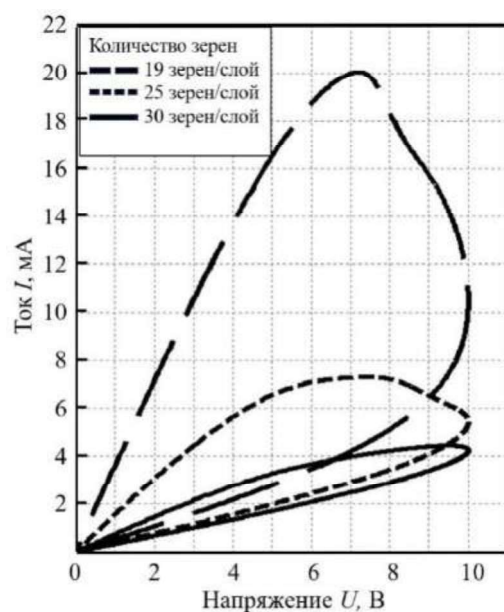


Рис. 1. Продольные вольт-амперные характеристики семислойных пленочных структур с мемристормым переключением сопротивления и на межзеренных, и на межслойных границах в зависимости от количества кристаллических зерен в каждом слое

Наблюдаемый немонотонный характер зависимостей максимального тока $I_{\max}$ и отношения сопротивлений $R_{\max}/R_{\min}$ от числа слоёв и зерен в слое объясняется конкуренцией между последовательными и параллельными каналами проводимости в многослойной структуре. Увеличение количества слоёв способствует росту числа параллельно соединённых мемристормых каналов, что приводит к увеличению максимального тока, особенно при меньшем числе зерен в каждом слое. Однако, начиная с определённого числа слоёв (в наших расчётах 7–9), доминирующую роль начинают играть последовательно соединённые межслойные сопротивления, что вызывает снижение как $I_{\max}$, так и $R_{\max}/R_{\min}$. Несмотря на это уменьшение, данные

параметры не достигают асимптотического значения, сохраняя динамичное поведение, что указывает на важность учёта взаимодействия различных типов проводящих путей при проектировании устройств.

Анализ также показывает, что влияние межслойных границ наиболее выражено при малом количестве зерен (15–19 на слой), когда доминирует мемристорное переключение на межслойных границах. При увеличении числа зерен всё большее влияние оказывают межзеренные барьеры, что меняет характер ВАХ и может привести к омической зависимости тока от напряжения. При количестве зерен 30 и более петля практически отсутствует ($R_{\max}/R_{\min} \sim 1$) при любом количестве слоев. Таким образом, для обеспечения чётко выраженного резистивного переключения и высоких значений $R_{\max}/R_{\min}$ необходимо точное согласование количества слоёв и плотности зерен в каждом из них, с учётом электронных свойств как межслойных, так и межзеренных границ.

Заключение. В работе рассмотрены особенности функционирования наноструктур резистивной памяти на основе оксидов различных, в том числе переходных, металлов, включая механизмы резистивного переключения, влияние микроструктуры пленок и результаты численного моделирования. Показано, что эффективность работы мемристорных устройств напрямую зависит от микроструктурных параметров – количества слоёв и плотности зерен. Увеличение числа слоёв и зерен в слое приводит к переходу от нелинейного мемристорного поведения к омической проводимости, что ограничивает возможность применения таких структур в качестве энергонезависимой памяти.

Результаты моделирования позволили установить оптимальные соотношения между числом слоёв и плотностью зерен, при которых достигается максимальная выраженность резистивного переключения и стабильность характеристик. Полученные данные открывают перспективы для дальней-

шей оптимизации многослойных мемристивных структур, в том числе в контексте их интеграции в спинтронные и нейроморфные системы.

Литература

1. Yang Y. Nanoscale resistive memory devices: Performance and modeling [Текст] / Y. Yang [et al.] // *Advanced Electronic Materials*. – 2017. – Vol. 3, No. 2. – P. 1600420. – DOI: 10.1002/aelm.201600420.
2. Son J. Y. High-speed operation of resistive switching memory devices based on NiO thin films [Текст] / J.Y. Son, Y. H. Shin // *Applied Physics Letters*. – 2008. – Vol. 93, No. 11. – P. 113502. – DOI: 10.1063/1.2993344.
3. Antonova I. V. Resistive Switching in HfO₂: From Point Defects to Bulk Behavior [Текст] / I. V. Antonova [et al.] // *Materials Science in Semiconductor Processing*. – 2020. – Vol. 115. – P. 105097. – DOI: 10.1016/j.mssp.2020.105097.
4. Kim Y. Layer-by-layer engineering of TiO₂-based RRAM for improved switching uniformity [Текст] / Y. Kim [et al.] // *Adv. Electron. Mater.* – 2016. – Vol. 2, No. 3. – P. 1500431. – DOI: 10.1002/aelm.201500431.