

05.2;06.1;13.1

Формирование наноразмерных ферромагнитных филаментов Ni в пленках $ZrO_2(Y)$

© Д.А. Антонов, А.С. Новиков, Д.О. Филатов, А.В. Круглов, И.Н. Антонов,
А.В. Здоровейщев, О.Н. Горшков

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия
E-mail: antonov@phys.unn.ru

Поступило в Редакцию 21 декабря 2020 г.
В окончательной редакции 7 марта 2021 г.
Принято к публикации 9 марта 2021 г.

В тонких пленках $ZrO_2(Y)/Ni$ с помощью зонда атомно-силового микроскопа сформированы проводящие ферромагнитные филаменты нанометровых размеров, состоящие из атомов Ni. Контакт зонда к таким пленкам (виртуальное составное мемристорное устройство) демонстрировал резистивное переключение биполярного типа, связанное с разрушением и восстановлением Ni-филаментов в пленке $ZrO_2(Y)$. Область выхода проводящего филамента на поверхность пленки $ZrO_2(Y)$ проявлялась на магнитно-силовом изображении как однодоменная ферромагнитная частица.

Ключевые слова: мемристор, резистивное переключение, атомно-силовая микроскопия, ферромагнитные филаменты.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.11.51004.18665

В последние годы появился повышенный интерес к возможности управления резистивным переключением (РП) в мемристорах путем совместного воздействия электрического и магнитного полей [1,2]. Данный подход обеспечивает повышенную функциональность мемристоров, позволяя за счет приложения внешнего магнитного поля изменять электросопротивление проводящего филамента в функциональном диэлектрическом слое мемристорной структуры (эффект магнетосопротивления) [3,4]. Другой подход заключается в формировании в функциональном диэлектрике филаментов, состоящих из атомов ферромагнитного материала (Fe, Co и др.) [5]. Данный подход позволяет управлять магнитными свойствами мемристора за счет приложения к структуре как магнитного, так и электрического поля. Один из способов его реализации — формирование по крайней мере одного из электродов мемристорной структуры из ферромагнитного металла [6]. В этом случае возможно формирование катионов металла (ферромагнитного материала) за счет электрохимической реакции анодного окисления на границе раздела ферромагнитного электрода с диэлектрической прослойкой с последующим формированием филаментов из катионов ферромагнитного материала в электрическом поле между электродами мемристорной структуры [7].

Цель настоящей работы — формирование отдельных ферромагнитных филаментов мемристорных структур на основе функциональных слоев $ZrO_2(Y)/Ni$.

Филаменты с нанометровыми латеральными размерами, содержащие атомы Ni, формировались в пленке $ZrO_2(Y)$ при помощи зонда атомно-силового микроскопа (АСМ), выполняющего функцию точечного подвижного прижимного верхнего электрода [8]. Пленки $ZrO_2(Y)$

(~ 12 mol. % Y_2O_3) толщиной ~ 10 nm получались методом высокочастотного магнетронного осаждения на стандартных подложках $TiN(25\text{ nm})/Ti(25\text{ nm})/SiO_2(500\text{ nm})/Si(001)$ с предварительно осажденным на них слоем Ni толщиной ~ 10 nm. Формирование Ni-филаментов, а также исследование их электрических свойств проводилось при помощи АСМ NT-MDT Solver Pro в контактном режиме с использованием АСМ-зондов NT-MDT HA_HR_DCP с электропроводящим алмазоподобным покрытием (рис. 1). Исследование микромагнитных

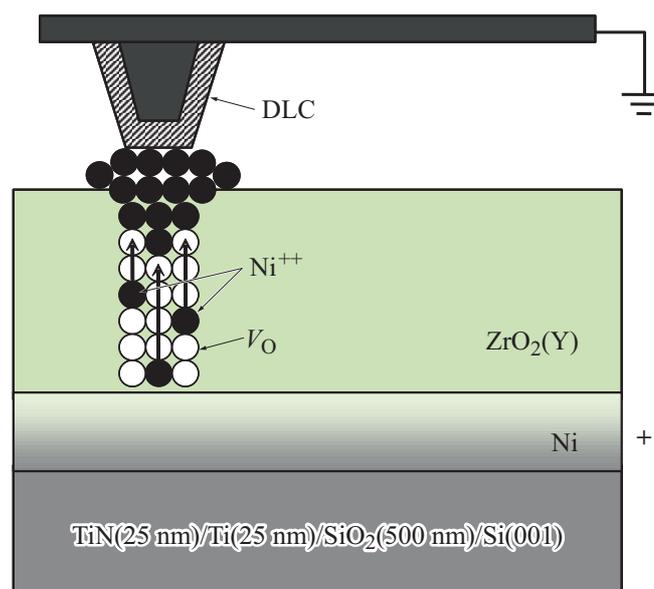


Рис. 1. Схема формирования Ni-филамента в пленке $ZrO_2(Y)$ при помощи АСМ-зонда при положительном напряжении на слое Ni относительно АСМ-зонда (V_g). DLC — электропроводящее алмазоподобное покрытие.

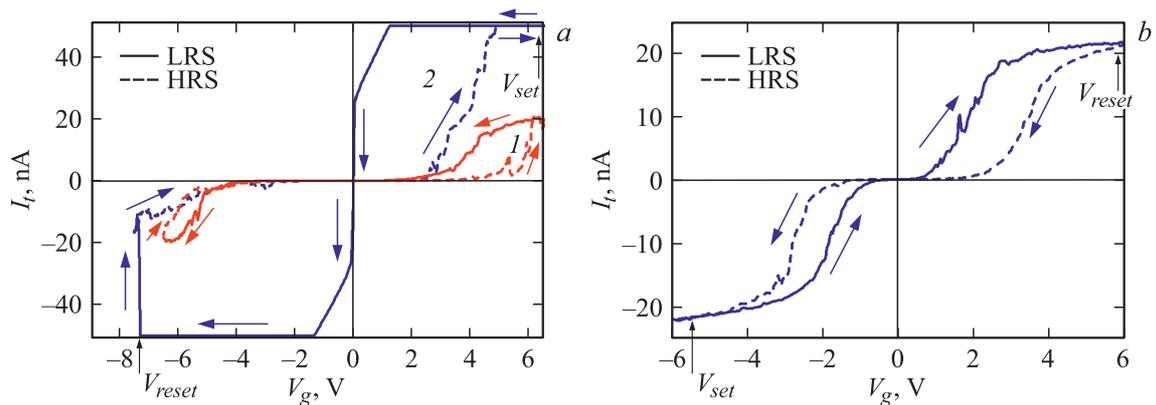


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики контактов АСМ-зонда к поверхности структуры ZrO₂(Y)/Ni/TiN/Ti/SiO₂/Si (a) и структуры ZrO₂(Y)/TiN/Ti/SiO₂/Si (b), формирующих виртуальный мемристор. HRS — состояние с высоким сопротивлением, LRS — состояние с низким сопротивлением; шкала по току до 10 нА — линейная, по току 10–50 нА — логарифмическая; ограничение тока выше 50 нА связано с током насыщения усилителя.

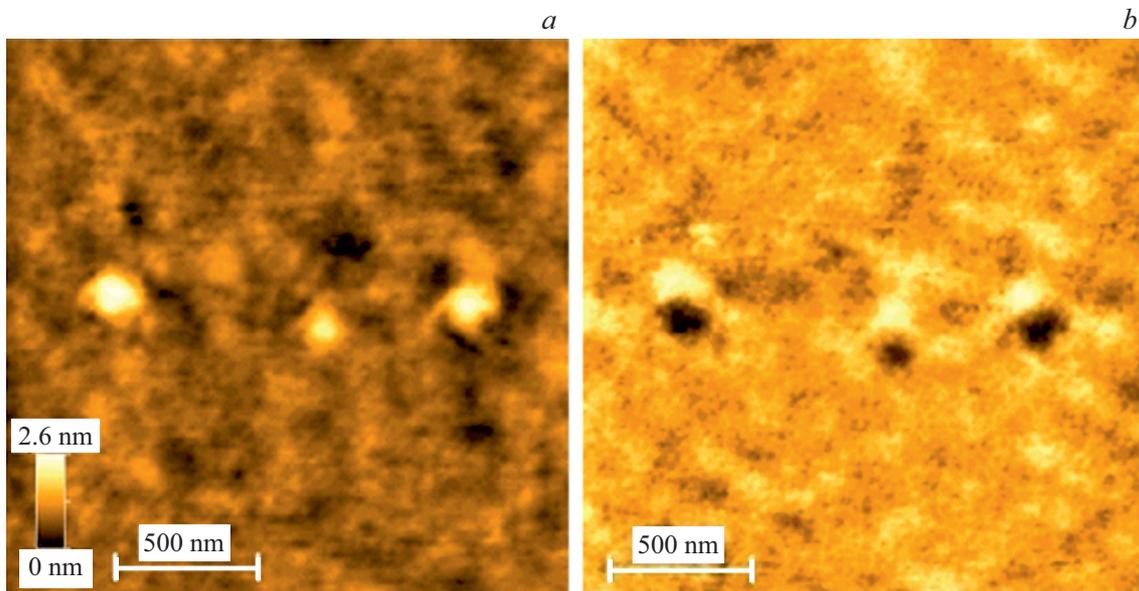


Рис. 3. Морфология (a) и МСМ-контраст (b) поверхности структуры ZrO₂(Y)/Ni/TiN/Ti/SiO₂/Si после формирования трех проводящих филаментов из атомов Ni.

свойств сформированных филаментов проводилось методом магнитно-силовой микроскопии (МСМ), использовались зонды марки NT-MDT HA_FM_CoFe. Под „ферромагнитным филаментом“ понимается проводящая нить, состоящая из атомов ферромагнитного материала (Ni), замыкающая Ni-слой и проводящий зонд АСМ-микроскопа (рис. 1). Формирование Ni-филаментов проводилось путем подачи пилообразных импульсов электрического напряжения между АСМ-зондом и слоем Ni (V_g) амплитудой ~ 8 В и длительностью 6 с. При этом контролировалась сила тока, протекающего через АСМ-зонд, пленку ZrO₂(Y) и подслой Ni (I_t).

На рис. 2, a приведены типичные циклические вольт-амперные характеристики (ВАХ) контакта АСМ-зонда к поверхности пленки ZrO₂(Y)/Ni, в которых

наблюдался гистерезис, характерный для биполярного РП. При этом после формовки наблюдались нелинейные ВАХ (рис. 2, a, циклическая ВАХ, замкнутая кривая 1). Такой вид ВАХ обусловлен формированием проводящих филаментов, преимущественно состоящих из вакансий кислорода в ZrO₂(Y), электронная проводимость по которым осуществляется по прыжковому механизму [9]. После нескольких циклов РП характер проводимости менялся: ВАХ мемристорной структуры в состоянии с низким сопротивлением (LRS) вблизи $V_g = 0$ приобрела омический характер (рис. 2, a, циклическая ВАХ, замкнутая кривая 2, сплошная линия). Подобный вид ВАХ характерен для прижимного контакта АСМ-зонда к металлам и типичен для мемристоров типа „проводящий мостик“ (англ. conducting bridge) [10]. Резистивное пере-

ключение подобных устройств основано на разрушении и восстановлении проводимости филаментов, состоящих из атомов (катионов) металлов, в диэлектрической пленке в результате окислительно-восстановительных реакций (преимущественно в области интерфейсов металл/диэлектрик) под действием электрического поля [7]. При этом филаменты из вакансий кислорода в $ZrO_2(Y)$ могут облегчать дрейф ионов Ni от слоя Ni, где они образуются за счет электрохимической реакции окисления, к АСМ-зонду (рис. 1) и таким образом способствовать формированию Ni-филаментов. Мы полагаем, что латеральные размеры формирующихся Ni-филаментов по порядку величины соответствуют размерам области контакта острия АСМ-зонда с поверхностью образца (латеральный размер < 10 nm [9]). Следует отметить, что на образце-спутнике $ZrO_2(Y)/TiN/Ti/SiO_2/Si$ (без подслоя Ni) наблюдались только нелинейные циклические ВАХ (рис. 2, b), соответствующие формированию и разрушению филаментов из вакансий кислорода в $ZrO_2(Y)$ (так называемые окислительно-восстановительные или RedOx-процессы, от англ. reduction-oxidation).

Морфология поверхности пленки $ZrO_2(Y)/Ni$ (рис. 3, a) в местах формирования проводящих филаментов демонстрирует образование плоских островков с высотами 1–1.5 nm и латеральными размерами 100–150 nm, что предположительно связано с выходом ионов Ni на поверхность пленки $ZrO_2(Y)/Ni$ в процессе формирования филамента. Исследование микромагнитных свойств таких филаментов методом МСМ показало, что область выхода проводящего филамента на поверхность пленки $ZrO_2(Y)$ проявляется на МСМ-изображении (рис. 3, b) как однодоменная ферромагнитная частица [11]. Следует отметить, что на МСМ-изображениях образцов-спутников $ZrO_2(Y)/TiN/Ti/SiO_2/Si$ без подслоя Ni магнитного контраста от сформированных проводящих филаментов не наблюдалось.

Таким образом, в работе экспериментально продемонстрирована возможность формирования при помощи АСМ-зонда виртуального мемристора типа „проводящий мостик“ на основе слоя функционального диэлектрика $ZrO_2(Y)/Ni$. Сформированные Ni-филаменты обладают ферромагнитными свойствами и проявляются на МСМ-изображениях как однодоменные частицы.

Благодарности

АСМ- и МСМ-исследования выполнены с использованием оборудования центра коллективного пользования — Научно-образовательного центра „Физика твердых наноструктур“ Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. Авторы благодарят А.А. Фраермана и И.Ю. Пашенькина (Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород) за полезную дискуссию.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 20-02-00830.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] H.-J. Jang, O.A. Kirillov, O.D. Jurchescu, C.A. Richter, *Appl. Phys. Lett.*, **100** (4), 43510 (2012). DOI: 10.1063/1.3679114
- [2] F. Wang, L. Li, L. Shi, H. Wu, L. Chua, *J. Appl. Phys.*, **125** (5), 54504 (2019). DOI: 10.1063/1.5042281
- [3] L. Li, Y. Liu, J. Teng, S. Long, Q. Guo, M. Zhang, Y. Wu, G. Yu, Q. Liu, H. Lv, M. Liu, *Nanoscale Res. Lett.*, **12**, 210 (2017). DOI: 10.1186/s11671-017-1983-2
- [4] S. Otsuka, Y. Hamada, D. Ito, T. Shimizu, S. Shingubara, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **54** (5S), 05ED02 (2015). DOI: 10.7567/JJAP.54.05ED02
- [5] Z. Yang, Q. Zhan, X. Zhu, Y. Liu, H. Yang, B. Hu, J. Shang, L. Pan, B. Chen, R.-W. Li, *Europhys. Lett.*, **108** (5), 58004 (2014). DOI: 10.1209/0295-5075/108/58004
- [6] S. Otsuka, Y. Hamada, T. Shimizu, S. Shingubara, *Appl. Phys. A*, **118** (2), 613 (2015). DOI: 10.1007/s00339-014-8769-5
- [7] M. Lübben, I. Valov, *Adv. Electron. Mater.*, **5** (9), 1800933 (2019). DOI: 10.1002/aelm.201800933
- [8] M. Lanza, *Conductive atomic force microscopy: applications in nanomaterials* (Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2017).
- [9] D.O. Filatov, D.A. Antonov, I.N. Antonov, A.P. Kasatkin, O.N. Gorshkov, *J. Mater. Sci. Chem. Eng.*, **5** (1), 8 (2017). DOI: 10.4236/msce.2017.51002
- [10] S.H. Lee, X. Zhu, W.D. Lu, *Nano Res.*, **13** (5), 1228 (2020). DOI: 10.1007/s12274-020-2616-0
- [11] D.V. Ovchinnikov, A.A. Bukharaev, *AIP Conf. Proc.*, **696**, 634 (2003). DOI: 10.1063/1.1639762