

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 621.389

Дудич
Владислав Валерьевич

Мемристорный эффект в оксидах вентильных металлов

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук
по специальности 1-41 80 03 «Нанотехнологии и наноматериалы в электро-
нике»

Научный руководитель
Лазарук Сергей Константинович
д.ф.-м.н, профессор

Минск 2019

Работа выполнена на кафедре микро- и наноэлектроники учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель:

Лазарук Сергей Константинович,
Доктор физико-математических наук, профессор, заведующий НИЛ 4.12 учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Рецензент:

Алексеев Виктор Федорович,
Кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Защита диссертации состоится «25» июня 2019 г. года в 9.00 часов на заседании Государственной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г.Минск, ул. П.Бровки, 6, 1 уч. корп., ауд. 114, тел.: 293-89-26, e-mail: kafme@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современной электроники, требует постоянного совершенствования и улучшения технологий производства и разработки микро- и нанoeлектронных устройств. Существующая сегодня и хорошо отлаженная «кремниевая» технология исчерпывает свои возможности в области дальнейшей миниатюризации и создании более энергоэффективных элементов памяти и вычислительных чипов. В связи с этим уже давно ведутся поиски и проводится большое количество исследований по разработке наноструктурированных материалов, для создания быстродействующих, масштабируемых и энергоэффективных устройств. Самым перспективным направлением в этой области, являются запоминающие устройства, проявляющие эффект резистивного переключения.

Данные устройства именуется как мемристоры. Мемристор – это энергонезависимая память, основанная на изменении сопротивления в зависимости от протекающего через нее заряда, и является прототипом нового резистивного запоминающего устройства RRAM (resistive random-access memory). При организации мемристоров в 3D-crossbar структуры и комбинации их с CMOS-чипами, 1 ТБ данных может быть реализован в 2-х см² данной архитектуры, что есть очень большой степенью интеграции, а также данный тип памяти обладает в 10 раз большим сроком службы в сравнении с NAND-памятью. Одним из плюсов мемристоров есть то, что на мемристорах можно реализовать логику с непосредственным обучением напоминающую работу синапсов мозга человека.

Наибольшая трудность при производстве мемристорных структур, представляет собой выбор материала оксидного слоя и электродов. В связи с малым количеством исследований в данной области, такие структуры не спеша внедряются в повседневную электронику.

Таким образом, синтез и исследование мемристорных структур с различными материалами электродов и оксидных слоев, для получения качественных ячеек памяти с большим коэффициентом переключения, является одной из наиболее важных задач электроники сегодня.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Современная микро- и нанoeлектроника сталкивается с проблемой дальнейшей миниатюризации и увеличением вычислительных мощностей. Еще в середине XX века предложен мемристор, в качестве ячейки памяти, однако первый экспериментальный образец был синтезирован в 2008 году. За это

время было написано малое количество статей и проведено исследований. В связи с этим, данное устройство считается новым, и не имеет такой же базы исследований и отлаженного процесса производства, как кремниевая технология.

Наибольшую трудность при производстве мемристоров, представляет собой выбор материалов. Перед технологами стоит вопрос, какой материал использовать в качестве рабочих электродов, или рабочего диэлектрика. Какой толщины использовать диэлектрический слой. Какая морфология должна быть у диэлектрика. А также совместимы ли будут электроды и рабочий диэлектрик, дадут ли они максимальную энергоэффективность. Сам факт непрерывного появления все новых и новых исследований, включающих в себя исследование самых различных материалов при производстве и проектировании резистивной памяти, говорит об отсутствии у исследователей удовлетворенных качеством результатов.

В связи с этим, необходимость разработки качественных элементов резистивной памяти, включающей в себя низкое напряжение переключения, а также высокий коэффициент переключения, позволяющие использовать такой тип памяти в современной электронике, делает представленную тему диссертации актуальной.

Степень разработанности проблемы

Исследование в области синтеза мемристорных структур на основе анодного диоксида титана и их исследование, осуществлялось на основе работ Л. Чуа, Т. Хикмота и других авторов.

Среди большого числа исследований по этой теме необходимо отметить работы Л. Чуа, Д. Струкова, К. Лихарева.

Одним из недостатков синтезирующей резистивной памяти является недостаточно высокий коэффициент переключения, а также большое напряжение переключения, что делает такой тип памяти энергозатратной. Данное исследование направлено на устранение этих недостатков на основе изменения материалов электродов и использования материала диэлектрической области с различной морфологией.

Цель и задачи исследования

Целью диссертации является синтез и исследование электрофизических параметров мемристорных структур на основе тонких пленок диоксида титана.

Для выполнения поставленной цели в работе были сформулированы следующие задачи:

— проанализировать отечественную и зарубежную литературу по проблеме синтеза и исследования мемристорных МДМ-структур, в том числе структур на тонких пленках диоксида титана;

— провести анализ анодных пленок диоксида титана с различной морфологией поверхности, с помощью растровой электронной микроскопии;

— синтезировать мемристорные структуры, с использованием пленок диоксида титана с различной морфологией, а также различными материалами электродов;

— измерить вольт-амперные характеристики и рассчитать коэффициенты переключения полученных структур, сделать выводы.

Объектом исследования являются мемристорные структуры на основе тонких пленок диоксида титана.

Предметом работы выступают вольт-амперные характеристики мемристорных структур.

Область исследования. Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-41 80 03 «Нанотехнологии и наноматериалы в электронике».

Теоретическая и методологическая основа исследования

В основу диссертации легли результаты известных исследований российских и зарубежных авторов в области синтеза и исследования структур с резистивной памятью.

Для синтеза мемристорных структур применялись методики электрохимического оксидирования и электронно-лучевого напыления металлов. Аттестация полученных тонких пленок проводилась методом растровой электронной микроскопии. Получение экспериментальных данных проводилось при помощи лабораторного оборудования и измерителя характеристик полупроводниковых приборов Л2-56.

Оценка влияния материала электродов мемристорных структур проводилась путем анализа вольт-амперных характеристик, а также расчета коэффициента переключения из полученных экспериментальных данных с использованием MSExcel.

Информационная база исследования коэффициента переключения мемристорных структур сформирована на основе экспериментальных данных.

Научная новизна диссертационной работы заключается в экспериментальном подтверждении, что мемристорные структуры с использованием материалов контактов с выпрямляющими свойствами, работа выхода которых больше работы выхода из полупроводникового анодного диоксида титана, имеют коэффициент переключения в разы больше в сравнении с омическими контактами.

Основное положение, выносимое на защиту

Синтезированы мемристорные структуры на основе анодных пленок диоксида титана с различной морфологией и никелевыми электродами, обладают коэффициентом переключения от 10 до 50, что выше показателя

известных отечественных аналогов и достаточно для изготовления резистивных элементов памяти.

Теоретическая значимость диссертации заключается в том, что в ней исследованы мемристорные структуры с использованием диоксида титана различной морфологии, а также различных материалов электродов. Рассчитаны коэффициенты переключения структур, демонстрирующие качество синтезирующих мемристоров.

Практическая значимость диссертации состоит в том, что на основе анализа экспериментальных данных, определены коэффициенты переключения мемристорных структур, диапазон которых составляет от 10 до 50, что делает возможным использование данных структур в качестве ячеек памяти.

Апробация и внедрение результатов исследования

Результаты исследования были неоднократно представлены на XVII Международной научно-технической конференции «Современные методы и технологии обработки материалов», XI Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Новые направления в развитии приборостроения», XVI Белорусско-российской научно-технической конференции «Технические средства защиты информации», Международной конференции по физике, химии и применению наноструктур «Nanomeeting - 2019». Исследования проводились при выполнении гранта Министерства образования ГБЦ 18-3086 «Исследование параметров мемристорных структур на основе анодных окислов вентильных металлов» и гранта Министерства образования ГБЦ 19-3140 «Исследование стабильности переключающих свойств мемристорных структур на основе анодных оксидов вентильных металлов».

Публикации. Основные положения работы и результаты диссертации изложены в семи опубликованных работах общим объемом 21,0 п.л. (авторский объем 9,0 п.л.), в том числе одна в журнале, входящих в перечень ведущих периодических изданий ВАК, авторским объемом 2,1 п.л.

Структура и объем работы. Структура диссертационной работы обусловлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка. Общий объем диссертации – 55 страниц. Работа содержит 41 рисунок, 5 формул, 1 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрено современное состояние проблемы синтеза мемристорных структур с высоким коэффициентом переключения, определены основные направления исследований, а также дается обоснование актуальности темы диссертационной работы.

В **общей характеристике работы** сформулированы ее цель и задачи, показана связь с научными программами и проектами, даны сведения об объекте исследования и обоснован его выбор, представлены положения, выносимые на защиту, приведены сведения о личном вкладе соискателя, апробации

результатов диссертации и их опубликованность, а также, структура и объем диссертации.

В первой главе рассматриваются общие характеристики мемристоров и их актуальность в современной электронике.

Во второй главе приведен анализ современного состояния теорий резистивного переключения в мемристорных структурах, излагается роль химических и физических процессов на резистивные переключения, а также роль механизмов переноса заряда в МДМ-структурах.

В третьей главе приведена технология изготовления мемристорных структур, методом электрохимического оксидирования и электронно-лучевого напыления.

В четвертой главе представлены результаты экспериментального исследования вольт-амперных характеристик мемристорных структур.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведены исследования мемристорных структур с использованием анодных пленок диоксида титана с различной морфологией, установлено, что в плотных, пористых и пленках «зернистого» типа наблюдаются эффекты резистивного переключения.

2. По результатам проведения расчетов коэффициентов переключения, установлено, что коэффициент резистивного переключения зависит от материалов используемых при производстве электродов, а также морфологии мемристора.

3. По результатам проведения исследования было выявлено, что скорость переключения мемристорной структуры зависит от геометрических параметров электродов и может варьироваться от 10 до 10^{-12} с, а также при уменьшении геометрических параметров электродов приходится жертвовать множеством состояний между «0» и «1».

4. Сформулированы рекомендации, для увеличения коэффициента переключения. При производстве мемристорных структур следует использовать материалы электродов с работой выхода больше работы выхода из оксидного слоя. Экспериментальная часть показала, что при использовании Ni (5,1 - 5,4 eV), коэффициент переключения увеличился в 16 раза по отношению с Ti (3,9 eV) электродами для TiO_2 (4,7 eV) и составил 50, что является достаточным показателем для внедрения таких структур в ОЗУ, ПЗУ и нейроморфные вычисления. Рекомендуется использовать электроды из Pt (5,1 - 5,9 eV), Au (5,1 - 5,5 eV) или Pd (5,2 - 5,6 eV).

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

[1] Дудич, В.В. Исследование Джоулева разогрева оксида алюминия в процессе электрохимического анодирования / В.В. Дудич, С.К. Лазарук, Д.Н. Завальный и др. // Доклады БГУИР (2016). – Минск: БГУИР, 2016. – №6 (100). – С. 5-10.

[2] Дудич, В.В. Исследование мемристорного эффекта в структурах на основе наноструктурированного оксида алюминия / В.В. Дудич, С.К. Лазарук, Г.Г. Рабатуев и др. // Материалы 10-й Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Новые направления развития приборостроения» / – №1. – Минск: БНТУ, 2017. – С. 277.

[3] Дудич, В.В. Исследование коэффициента теплоотдачи от анодного оксида алюминия в электролит в процессе электрохимического анодирования / В.В. Дудич, С.К. Лазарук, Г.Г. Рабатуев и др. // Сборник научных трудов XII Международной научно-технической конференции «Современные методы и технологии обработки материалов» / – Минск: БГУИР, 2017. – С. 238-244.

[4] Дудич, В.В. Деградация состояния мемристоров на основе анодного оксида алюминия / В.В. Дудич, С.К. Лазарук, Г.Г. Рабатуев и др. // Материалы 11-й Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Новые направления развития приборостроения», Минск, 18-20 апр. 2018 г. / –Минск: БНТУ, 2018. – С. 219.

[5] Дудич, В.В. Исследование зарядовых свойств анодных пленок, используемых в мемристорных структурах / В.В. Дудич, С.К. Лазарук, В.В. Филковский и др. // Технические средства защиты информации: тезисы докладов XVI Белорусско-российской науч.-тех. конф., Минск, 5 июня. 2018 г. / – Минск : БГУИР, 2018. – С. 56.

[6] Dudich, V.V. The changes of surface potential and built-in charge in alumina films after the anodization process / V.V. Dudich, A.S. Lazarouk, G.G. Rabatuev, Le Dinh Vi, A.V. Korotkevich // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures, ed. by V.E. Borisenko, D.B. Migas, V.S. Gurin, C.H. Kam. – World Scientific Publishing Co. / Singapore – Vol. 18. – 2019. – P. 1940058-3.

[7] Dudich, V.V. Extreme heating of alumina barrier layer during high electric field anodization of aluminum / V.V. Dudich, A.S. Lazarouk, G.G. Rabatuev, O.V. Kupreeva, T. Orehovskaia // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures, ed. by V.E. Borisenko, D.B. Migas, V.S. Gurin, C.H. Kam. – World Scientific Publishing Co. / Singapore – Vol. 18. – 2019. – P. 1940063-3.