

ОСТРОВКОВЫЕ ТОНКИЕ ПЛЕНКИ ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ АКТИВНОГО СЛОЯ МЕМРИСТОРА

Н.О. Юркин, С.В. Сидорова

АННОТАЦИЯ

В работе рассмотрены механизмы изменения проводимости активного слоя мемристора. Предложено внедрение островкового слоя в структуру мемристора для активации механизма проводимости. Приведены результаты отработки режимов формирования островковой пленки меди. Предложен и реализован маршрут формирования тестовой структуры мемристора подложка/W/ОТП/Al₂O₃/Cu. Геометрические параметры структуры оценены на сканирующем электронном микроскопе. Проведено исследование вольт-амперной характеристики разработанного устройства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

МЕМРИСТОР, ОСТРОВКОВЫЕ ТОНКИЕ ПЛЕНКИ, ВАКУУМ, ПРОВОДИМОСТЬ

ISLET THIN FILMS FOR MEMRISTOR ACTIVE LAYER MODIFICATION

N.O. Yurkin, S.V. Sidorova

ABSTRACT

The paper considers the mechanisms of changing the conductivity of the active layer of the memristor. The introduction of an island layer into the structure of a memristor to activate the conduction mechanism is proposed. The results of working out the modes of formation of an insular copper film are presented. The route of formation of the test structure of the memristor substrate/W/ITF/Al₂O₃/Cu is proposed and implemented. The geometric parameters of the structure were evaluated using a scanning electron microscope. A study of the volt-ampere characteristics of the developed device was carried out.

KEYWORDS

MEMRISTOR, ISLET THIN FILM, VACUUM, CONDUCTIVITY

ВВЕДЕНИЕ

Рост количества обрабатываемой информации в современном мире и достижение предела уменьшения технологического процесса современных вычислительных устройств привели к необходимости поиска новой электронной компонентной базы (ЭКБ). Перспективным устройством является мемристор, представляющий собой структуру металл-диэлектрик-металл и способный изменять свое сопротивление – кодировать информацию в зависимости от полярности приложенного на электроды напряжения. Мемристоры легко объединяются в cross-bar матрицы, совместимые с КМОП.

Мемристор является энергонезависимым устройством, состоящим из 3 основных компонентов: верхний электрод, нижний электрод и активный слой [1, 2]. Внешнее электрическое поле приводит к изменению проводимости активного слоя, а приложение электрического поля в обратном направлении приводит к возвращению проводимости в прежнее состояние. Существует 2 основных механизма изменения проводимости

активного слоя: механизм измененной валентности (VCM - valence change mechanism) и механизм электрохимической металлизации (ЕСМ - electrochemical metallization).

Основной проблемой, останавливающей применение мемристоров в качестве новой ЭКБ, является достижение воспроизводимости сопротивления ячейки. Данная задача может быть решена посредством модификации активного слоя – использование набора чередующихся слоев, легирование или же внедрение дополнительных структур. В качестве таких дополнительных структур могут выступать островковые тонкие пленки (ОТП), материал которых может влиять на механизм переключения.

Формирование тонких пленок предполагает несколько этапов роста: миграция и адсорбция атомов на поверхности, образование островков, их слияние (коалесценция), лабиринтная пленка и образование сплошной тонкой пленки. Этап появления островков из адсорбированных атомов называется островковой тонкой пленкой. ОТП имеют ряд важных параметров: латеральный размер островков и их высота. Этими параметрами возможно управлять методами осаждения и их режимами. Важной особенностью островковых пленок является их проводимость, обусловленная термоэмиссией и туннелированием между островками.

Использование островковых тонких пленок в активном слое мемристора может выполнять несколько функций. Использование островкового слоя позволяет локализовать электрическое поле вдоль островка, тем самым улучшая воспроизводимость переключения и его энергоэффективность [3]. Островковые пленки также могут быть использованы в качестве дополнительных центров образования ионов: использование Ti в качестве островкового слоя, из-за хорошего сродства с кислородом образует TiO_x и создает дополнительные ионы для дрейфа.

Целью данной работы является исследование процесса формирования методами вакуумного нанесения покрытий проводящего островкового слоя и его внедрение в мемристорную структуру

МЕХАНИЗМЫ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ

Механизм измененной валентности (рис. 1) состоит из 2-ух основных компонентов: эмиссия электронов из электрода и их движение по диэлектрику [4–6]. Эмиссия электронов в слой диэлектрика происходит из-за эмиссии Шоттки, автоэмиссии, термоэмиссии, прямого туннелирования из металла в диэлектрик. Управление этими процессами возможно благодаря изменению внешнего электрического поля, которое влияет на тип эмиссии и материал, который определяет работу выхода электронов.

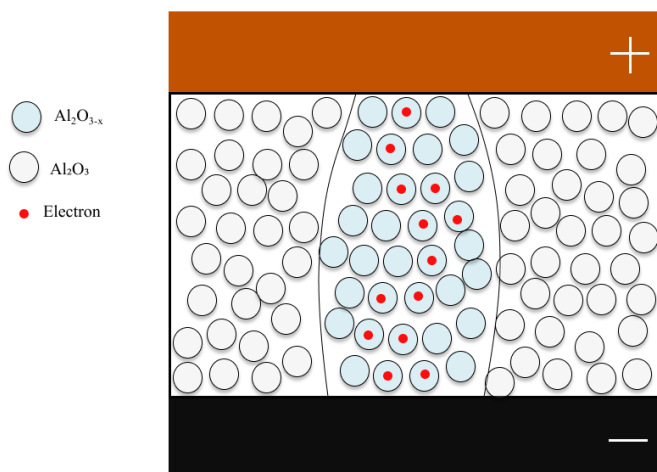


Рис. 1. Модель VCM механизма

Движение электронов внутри диэлектрика обусловлено попаданием электронов из одной потенциальной ямы в другую. В качестве потенциальных ям выступают ионы активного слоя, которые подразумевают под собой обедненный активный слой. Для описания данного механизма используется дрейфово-диффузионная модель, предполагающая под собой дрейф и диффузию ионов в диэлектрике. Рассматривается взаимодействие иона с пространственно распределенной системой потенциальных барьеров и ям (распределение считается изотропным) (рис. 2).

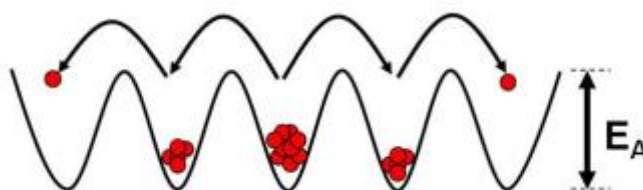


Рис. 2. Схематичное изображение пространственно распределенной системы потенциальных барьеров и ям

В отсутствии внешнего электрического поля движение ионов определяется градиентом распределения концентрации ионов в слое диэлектрика:

$$J_{\text{диф}} = -D\nabla N,$$

$J_{\text{диф}}$ – плотность диффузионного потока ионов, D – коэффициент диффузии ионов, N – концентрация ионов. Коэффициент диффузии зависит от температуры и подчиняется закону Аррениуса: $D = D_0 \exp\left(-\frac{E_A}{kT}\right)$, где D_0 – предэкспоненциальный множитель, E_A – энергия активации, k – постоянная Больцмана, T – температура.

Наличие внешнего электрического поля приводит к снижению потенциальных барьеров в направлении линий электрического поля (рис. 3), что обусловлено эффектом Пула-Френкеля [7, 8].

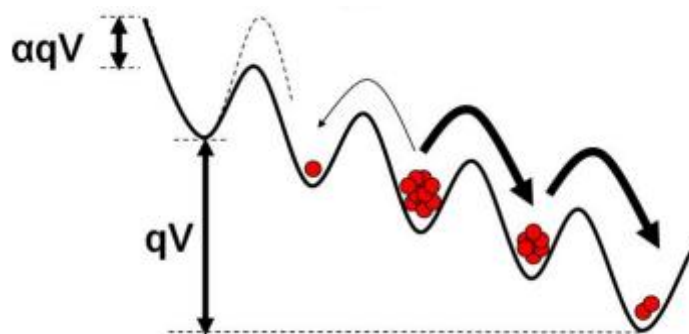


Рис. 3. Схема снижения потенциальных барьеров, обусловленное эффектом Пула-Френкеля

Снижение потенциального барьера: $E = E_A - \alpha qV$, где α - коэффициент понижения потенциального барьера, q - элементарный заряд, V - приложенное напряжение. Дрейф ионов определяется пространственным распределением электрического потенциала:

$$j_{\text{дрейф}} = \mu FN,$$

$$F = -\nabla\varphi,$$

$j_{\text{дрейф}}$ – плотность дрейфового потока, μ – подвижность ионов, F – электрическое поле, φ – электрический потенциал, N – концентрация ионов.

Плотность потока ионов внутри диэлектрика при наличии внешнего электрического поля:

$$j_D = J_{\text{диф}} + j_{\text{дрейф}} = -D\nabla N + \mu FN.$$

Комбинации данного соотношения с уравнением непрерывности описывает пространственно-временное распределение концентрации ионов в слое диэлектрика:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -\nabla(-D\nabla N + \mu FN).$$

Механизм электрохимической металлизации (рис. 4) предполагает наличие химически активного электрода, такого как Cu или Ag , способного диссоциировать под действием электрического поля и инертного металла [9]. При наличии внешнего электрического поля происходит диссоциация и образующиеся катионы начинают мигрировать сквозь активный слой к второму электроду, на котором происходит их восстановление. Образовавшуюся структуру называют проводящим филламентом.

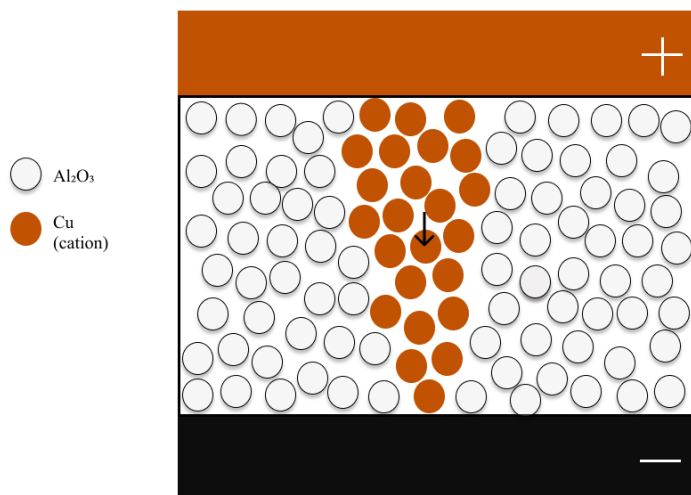


Рис. 4. Модель ЕСМ механизма

При изменении направления электрического поля происходит разрыв филамента, что возвращает проводимость мемристора в высокоомное состояние. Данный механизм накладывает ограничение на материалы электрода, а также требует уменьшение ширины активного слоя.

ПОСТАНОВКА И ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для исследования интеграции островкового слоя в мемристор была проведена отработка режимов осаждения тонкой островковой пленки Cu методом термического испарения в вакууме. Процесс проводился на базе установки МВТУ11-1МС, расположенной на кафедре «Электронные технологии в машиностроении», МГТУ им. Н.Э. Баумана. Особенности проводимости ОТП позволяют косвенно оценивать этап роста ОТП.

С помощью пикоамперметра, подключенного по схеме на рис. 5, были исследованы зависимости тока от времени осаждения для разных значений тока, подаваемых на электроды. Для интегрирования ОТП в мемристор был использован режим с током в 3А (рис. 6), обеспечивающий наиболее равномерный процесс роста медной тонкой пленки.

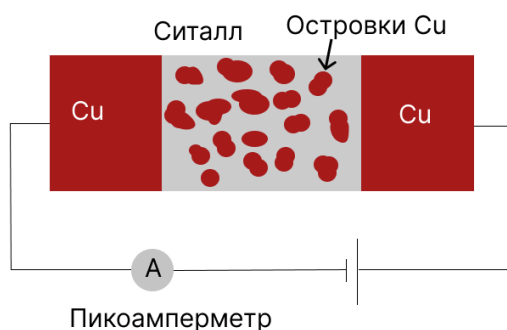


Рис. 5. Схема измерения

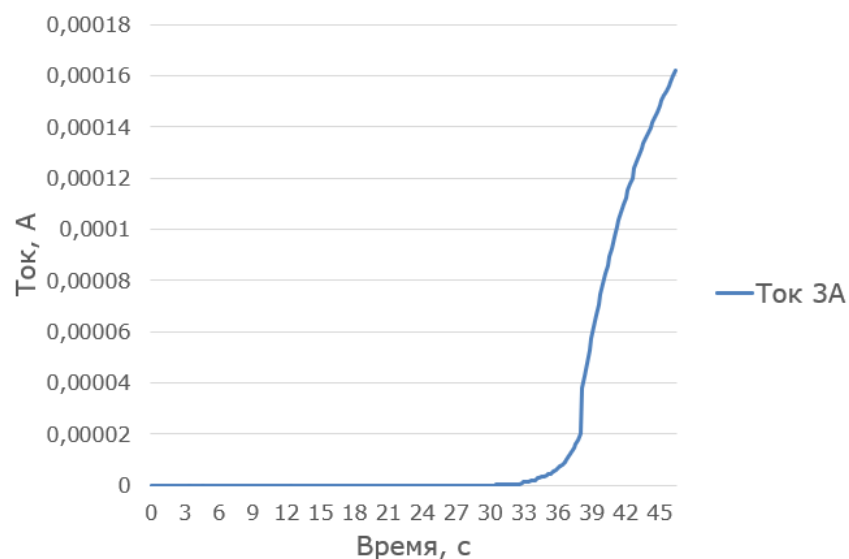


Рис. 6. Зависимость тока от времени нанесения ОТП меди

После осаждения ОТП были исследованы латеральные размеры островков с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) (рис.7) и их высота – с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) (рис.8).

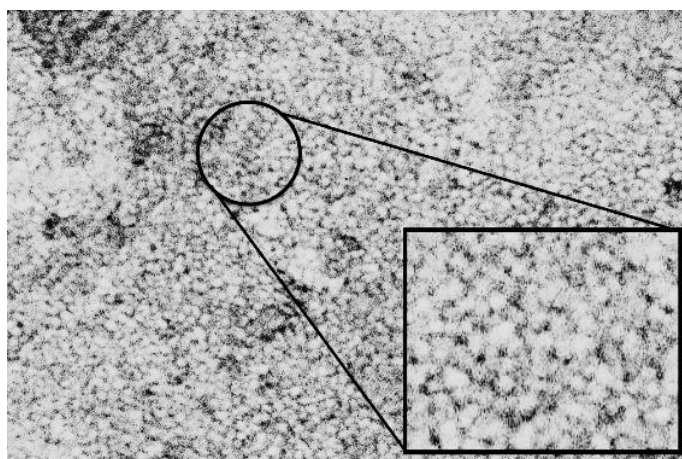


Рис. 7. СЭМ изображение ОТП меди

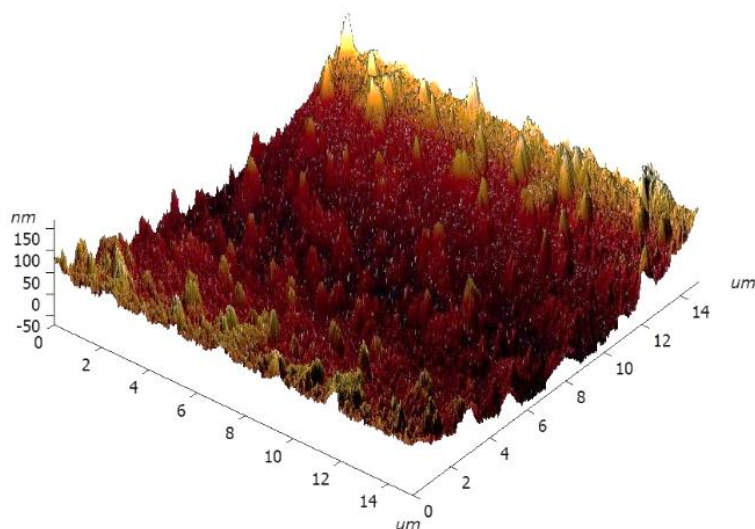


Рис. 8. АСМ изображение ОТП меди

Результаты оценки геометрических параметров легли в основу определения режимов формирования многослойной структуры мемристора. Для дальнейших исследований был сформирован макет мемристора, имеющий следующую структуру: подложка/W/ОТП/Al₂O₃/Cu. Нижний электрод из W и слой Al₂O₃ были сформированы методом магнетронного распыления в вакууме. Для получения медных ОТП и верхнего электрода использовался метод термического испарения в вакууме. Также для лучшей адгезии применялась активация поверхности ионным источником.

Сформированный образец был исследован с помощью СЭМ. Полученный образец имеет следующие толщины слоев: W (80нм), Al₂O₃ (60 нм), Cu (60 нм). ВАХ данной структуры была исследована (рис. 9).

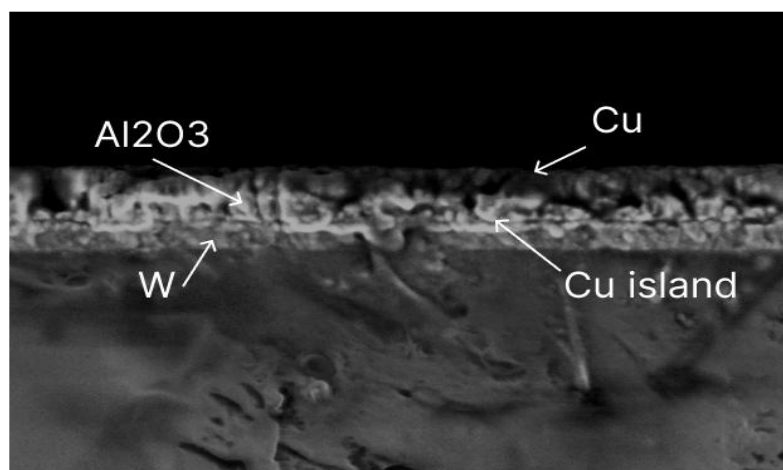


Рис. 5. СЭМ изображение макета мемристора

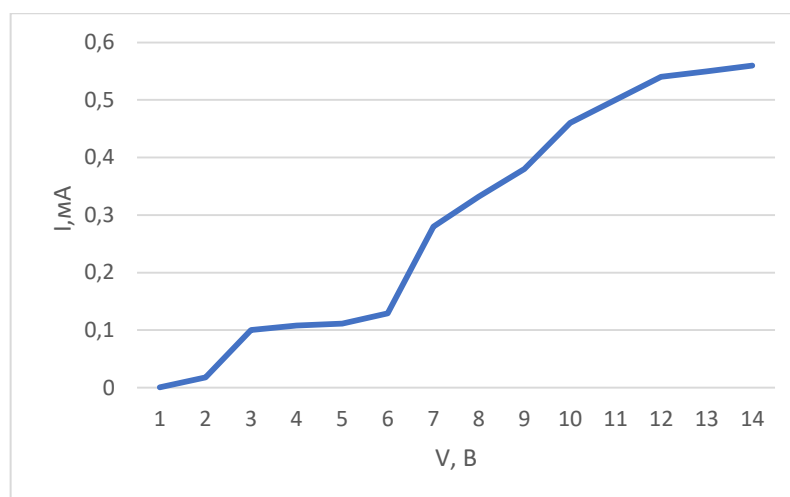


Рис. 6. ВАХ макета мемристора

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Для формирования островкового слоя меди рекомендуется подавать на электроды термического модуля 3А от источника питания, а нанесение проводить в течение 15 секунд. В этом случае будет сформирована ОТП меди с размерами структур до 30 нм.

Формирование слоя оксида алюминия толщиной 60 нм рекомендуется проводить методом магнетронного распыления в течение 28,6 мин при мощности 50 Вт.

Формирование всей структуры необходимо проводить в одном вакуумном цикле или же с применением ионной обработки между слоями.

Тестирование ВАХ полученной мемристивной структуры проведено на разработанном стенде. Показано, полученная структура реагирует на изменение напряжения, но не возвращает значение сопротивления при переключении полярности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы были отработаны режимы нанесения островковой тонкой пленки меди для применения в мемристивных структурах. Сформирован макет мемристора на основе Cu/Al₂O₃/Cu-island/W и исследована ВАХ созданного устройства.

В дальнейшем планируется исследование воспроизводимости данного результата и исследование использования другого материала в качестве островкового слоя, в частности Ti.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mohammad B. et al. State of the art of metal oxide memristor devices //Nanotechnology Reviews. – 2016. – Т. 5. – №. 3. – С. 311-329.
2. Wang R. et al. Recent advances of volatile memristors: Devices, mechanisms, and applications //Advanced Intelligent Systems. – 2020. – Т. 2. – №. 9. – С. 2000055.
3. Qu Z. et al. A novel WO_x-based memristor with a Ti nano-island array //Electrochimica Acta. – 2021. – Т. 377. – С. 138123.
4. Lekshmi Jagath A. et al. Insight into physics-based RRAM models—review //The Journal of Engineering. – 2019. – Т. 2019. – №. 7. – С. 4644-4652.
5. Larentis S. et al. Resistive switching by voltage-driven ion migration in bipolar RRAM—Part II: Modeling //IEEE Transactions on Electron Devices. – 2012. – Т. 59. – №. 9. – С. 2468-2475.

6. Ielmini D. Modeling the universal set/reset characteristics of bipolar RRAM by field-and temperature-driven filament growth //IEEE Transactions on Electron Devices. – 2011. – Т. 58. – №. 12. – С. 4309-4317.
7. U. Russo, D. Kalamanathan, D. Ielmini, A. L. Lacaita, and M. Kozicki, “Study of multilevel programming in programmable metallization cell (PMC) memory,” IEEE Trans. Electron Devices, vol. 56, no. 5, pp. 1040– 1047, May 2009.
8. Simmons J. G. Poole-Frenkel effect and Schottky effect in metal-insulator-metal systems //Physical Review. – 1967. – Т. 155. – №. 3. – С. 657.
9. Waser R. et al. Redox-based resistive switching memories–nanoionic mechanisms, prospects, and challenges //Advanced materials. – 2009. – Т. 21. – №. 25-26. – С. 2632-2663.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Юркин Никита Олегович – студент 4 курса. Московский государственных технический университет им. Баумана, e-mail: yurkin.nik18@mail.ru

Сидорова Светлана Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры (ORCID: 0000-0002-3002-1246). МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, e-mail: sidorova_bmstu@mail.ru