

СРАВНЕНИЕ МЕМРИСТОРНЫХ ЭФФЕКТОВ В СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ АНОДНЫХ ОКСИДОВ ТИТАНА И НИОБИЯ

Иванюта С.М., Шеверденко А.В., Артюшкевич Г.Д., Дудич В.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Лазарук С.К. – доктор физ.-мат. наук

В работе исследованы механизмы резистивного переключения в МДМ-структурах на основе диоксида титана (TiO_2) и пентаоксида ниобия (Nb_2O_5), полученных методом электрохимического анодирования. Исследовано влияние морфологии полученных оксидных слоёв и материала верхнего электрода на электрофизические характеристики мемристорных ячеек. Экспериментально подтверждено, что комбинация электродов с высокой работой выхода (никель) и пористой структуры оксида обеспечивает коэффициент переключения до 50 и снижает напряжение переключения до 2 В.

Современное развитие вычислительной техники связано с поиском новых подходов к хранению и обработке данных. Традиционные технологии памяти сталкиваются с физическими ограничениями при масштабировании и с проблемой высокого энергопотребления. В связи с этим мемристор, теоретически предсказанный Леоном Чуа в 1971 году и впервые экспериментально реализованный в 2008 году, рассматривается в качестве базового элемента резистивной памяти нового поколения [1].

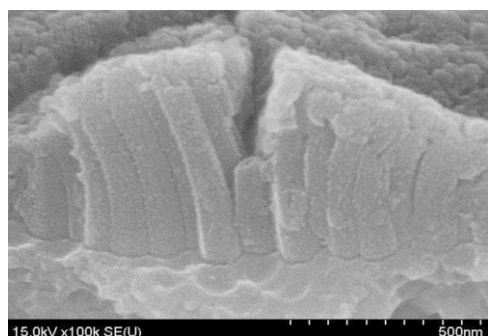
Оксиды вентильных металлов широко применяются при создании различных компонентов интегральных микросхем [2] и полупроводниковых приборов. Особый интерес к пленкам на основе этих материалов проявляется при изготовлении мемристорных структур, способных изменять своё сопротивление в зависимости от величины прошедшего через них электрического заряда.

Мемристорные свойства диоксида титана (TiO_2) и пентаоксида ниобия (Nb_2O_5) обусловлены их способностью менять проводимость под действием внешнего электрического поля за счёт перераспределения кислородных вакансий. Несмотря на большое количество исследований, актуальной задачей остаётся подбор оптимальных сочетаний морфологии оксидов и материалов электродов для снижения напряжений формовки и повышения стабильности характеристик. Сравнительный анализ двух оксидов в одинаковых условиях формирования верхнего электрода даёт возможность выявить преимущества каждого материала в производстве энергонезависимой памяти.

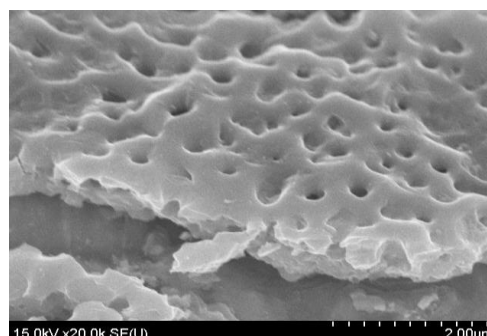
В качестве подложек для синтеза использовались титановая фольга марки ВТ1-00 (чистота 99,9%) толщиной 50 мкм и ниобиевая фольга марки НБ1 толщиной 100 мкм. Формирование оксидных слоёв проводилось методом электрохимического анодирования, т.к. он является наиболее эффективным и экономически доступным методом получения высокоупорядоченных наноструктурированных пленок. В отличие от методов магнетронного распыления или золь-гель технологии, анодирование позволяет прецизионно контролировать морфологию (пористость, диаметр пор, толщину барьерного слоя) за счет варьирования параметров электролиза.

Плётки оксида титана синтезировались в электролите на основе этиленгликоля с добавлением 0,3% фторида аммония при плотности анодного тока 10 mA/cm^2 . Для предотвращения химического травления стенок пор процесс проводили в «ледяной бане» при температуре около 2°C. РЭМ-анализ подтвердил формирование упорядоченных ячеек диаметром примерно 300 нм. Фотографии плёнок представлены на рисунке 1а.

Плётки оксида ниобия синтезировались в 1% растворе хлорида натрия при плотности анодного тока 50 mA/cm^2 , что приводило к формированию пористой структуры с расстоянием между соседними порами от 0,5 до 1,0 мкм и диаметром пор от 50 до 300 нм. Фотографии плёнок представлены на рисунке 1б [3].



а



б

Рисунок 1 – РЭМ изображения поверхности: а) пористого оксида титана; б) пористого оксида ниобия [3].

Исследования методом растровой электронной микроскопии показали, что температурный режим анодирования критически влияет на качество оксида. При комнатной температуре во

фторсодержащих электролитах наблюдается интенсивное вытравливание верхнего слоя, что ухудшает мемристорный эффект. Охлаждение электролита до $-5^{\circ}\text{C} - 2^{\circ}\text{C}$ позволяет сохранить «сотовую» структуру на поверхности, что способствует более стабильному формированию филаментов.

Верхние электроды наносились методом электронно-лучевого напыления в вакууме через теневую маску. Использовался никель с работой выхода 5,1–5,4 эВ. Диаметр контактов составлял 300 мкм, толщина - до 500 нм.

Полученные мемристорные структуры с размером мемристорной ячейки около $\square 300$ мкм исследовались с помощью измерителя характеристик полупроводниковых приборов Л2-56. Этот прибор позволяет визуально наблюдать и измерять статические свойства полупроводниковых приборов, отображая вольт-амперные характеристики одновременно для двух- и трёхэлектродных структур на экране встроенной осциллографической трубки. Вольт-амперные характеристики МДМ-структур $\text{Ni/TiO}_2/\text{Ti}$ и $\text{Ni/Nb}_2\text{O}_5/\text{Nb}$ представлены на рисунке 2.

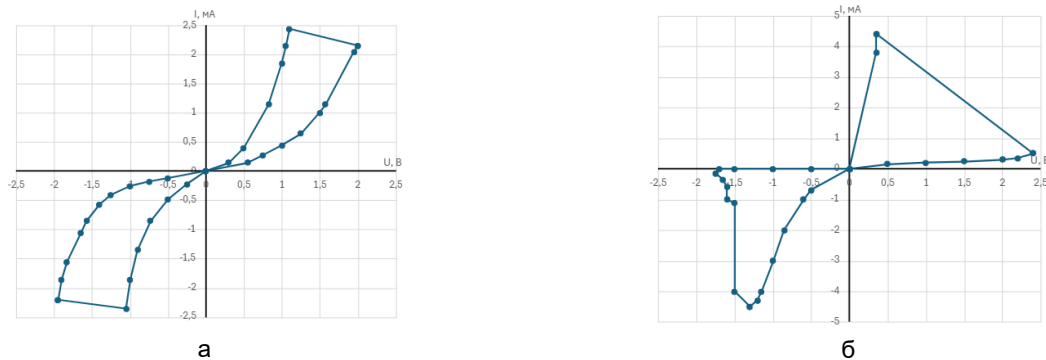


Рисунок 2 – Вольт-амперные характеристики МДМ-структур: а) $\text{Ni/TiO}_2/\text{Ti}$; б) $\text{Ni/Nb}_2\text{O}_5/\text{Nb}$.

Как видно из рисунка 2 для обеих МДМ-структур наблюдается ярко выраженное биполярное резистивное переключение с гистерезисом. Характеристики имеют петлеобразный вид, причем направление переключения (с высокоомного состояния (HRS) в низкоомное (LRS)) происходит против часовой стрелки, что типично для оксидных мемристоров с кислородными вакансиями. Это означает, что переход из высокоомного состояния в низкоомное происходит при положительном смещении, что связано с дрейфом положительно заряженных кислородных вакансий под действием электрического поля к катоду и формированием токопроводящего филамента. Также можно сделать вывод что оба материала пригодны для создания мемристорных ячеек энергонезависимой памяти. При этом TiO_2 обеспечивает более высокий коэффициент переключения и более низкое напряжение формовки. Как видно из рисунка 2, ВАХ МДМ-структуры $\text{Ni/TiO}_2/\text{Ti}$ более симметричен относительно нуля. Это говорит о более сбалансированном процессе формирования/разрушения проводящего канала (филамента) в обеих полярностях.

Также на рисунке 2 виден, переход из высокоомного состояния в низкоомное для оксида титана происходит при 2 В, тогда как аналогичный параметр для оксида ниобия составляет 2,4 В. Этот результат можно объяснить тем, что оксид титана имеет более развитую поверхность по сравнению с оксидом ниобия, что заметно на рисунке 1. Более высокое значение удельной поверхности оксида титана обеспечивает большую плотность поверхностных переходов, благодаря чему переход из высокоомного состояния в низкоомное происходит при более низком смещающем напряжении. Коэффициент переключения при переходе из высокоомного состояния в низкоомное достигает 50.

Исследованные мемристорные структуры представляют интерес для использования при разработке микросистем энергонезависимой памяти в интегральной электронике. При этом важно отметить, что оксид титана и оксид ниобия уже применяются при изготовлении различных элементов интегральных микросхем [3,4].

Список использованных источников:

1. Chua, L.O. Memristor – The Missing Circuit Element / L.O. Chua [et. al] // *IEEE Transactions on Circuit Theory*. – 1971. – Vol. 18, – P. 507-519.
2. Stewart, R. A hybrid nanomemristor/transistor logic circuit capable of self-programming / Stewart R., Borghetti, J. Zhiyong Li, Straznicky J. // *PNAS*. – 2009. – Vol. 106 (6). – P. 1699-1703.
3. Иванюта, С.М. Особенности формирования пористых пленок оксида ниобия электрохимическим анодированием в хлорсодержащих электролитах / С.М. Иванюта, А.В. Шевченко, Г.Д. Артюшкевич [и др.] // *Радиотехника и электроника : сборник материалов 61-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 22–23 апреля 2025*. – Минск, 2025. – С. 270–271.3
4. Lazarouk, S. Anodic Nanoporous Titania for Electro-optical Devices / S. Lazarouk, Z. Xie, V. Chigrinov, H.S. Kwok // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 2007. – Vol. 46 (7A). – P. 4390-4394.