

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ

Л.Н. ГУМИЛЕВ АТЫНДАҒЫ ЕУРАЗИЯ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ

ФИЗИКА-ТЕХНИКА ФАКУЛЬТЕТІ

**«ФИЗИКАДАҒЫ ЗАМАНАУИ ТЕНДЕНЦИЯЛАР: ҒЫЛЫМ МЕН БІЛІМ
ИНТЕГРАЦИЯСЫ»**

Халықаралық ғылыми конференциясының материалдары

**«СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В ФИЗИКЕ: ИНТЕГРАЦИЯ НАУКИ И
ОБРАЗОВАНИЯ»**

Материалы международной научной конференции

«MODERN TRENDS IN PHYSICS: INTEGRATION OF SCIENCE AND EDUCATION»

Materials of the international scientific conference

Астана, 2024 ж

ОӘЖ 53.(075)
Н90

Редакциялық кеңес:

Е.Б. Сыдықов, С.Б.Мақыш, Ж.М.Құрманғалиева, Д.Р.Айтмағамбетов,
Л.Т.Нуркатова, Н.Г.Айдарғалиева

Ә43 Физикадағы заманауи тенденциялар: ғылым мен білім интеграциясы:
Халықаралық ғылыми конференциясының материалдары (2024 жылдың 23 ақпаны, Астана, Қазақстан). – Астана: Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ баспасы, 2024. – 555 б.

ISBN 978-601-337-957-9

«ФИЗИКАДАҒЫ ЗАМАНАУИ ТЕНДЕНЦИЯЛАР: ҒЫЛЫМ МЕН БІЛІМ ИНТЕГРАЦИЯСЫ» атты Халықаралық ғылыми-теориялық конференция материалдар жинағына кәсіптік-техникалық білім беруді жетілдіруде «Космологияның қазіргі мәселелері», «Техниканың дамуындағы физиканың рөлі», «Ядролық физика, жаңа материалдар мен технологиялар», «Радиоэлектроника мен телекоммуникацияның қазіргі даму тенденциялары», «Ғарыштық техника мен технологияларды дамытудың озық бағыттары», жоғары оқу орындарындағы кәсіби педагогика проблемалары «Университетте физика және астрономия білімінің даму тенденциялары», «Орта мектепте физиканы оқытудың тиімді педагогикалық технологиялары», «Жаратылыстану пәндері бойынша мұғалімдерді даярлау жүйесіндегі инновациялар», «Қазіргі ақпараттық және коммуникациялық технологиялар» және оларды шешу әдістері мен жолдары қарастырылған мақалалар жарияланған.

ОӘЖ53.(075)

КБЖ 22.3я73

ISBN 978-601-337-957-9

© Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, 2024

ЖҚЗ деректері негізінде Цифрлық жер балансын зерттеу әдісін пайдалану Жер ресурстарын пайдаланудағы өзгерістерді дәлірек және тиімді бақылауға және орнықты даму мен жерді жоспарлау саласында шешімдер қабылдауды қолдауға мүмкіндік береді. ЖҚЗ қамтамасыз ететін үздіксіз мониторинг арқылы әртүрлі уақыттағы әртүрлі нәтижелерді алуға және нәтижелерді бір-бірімен салыстыруға болады. Бұл әдісбізге белгілі бір аймақтағы тәртіп бұзылушылықтарды немесе кез-келген басқада өзгерістерді бақылауға және алдын-алуға мүмкіндік береді.

Әдебиеттер:

1. Белорусцева Е. В. Мониторинг состояния сельскохозяйственных угодий Нечерноземной зоны Российской Федерации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – Т. 9, № 1. – С. 57–64
2. Манухов В. Ф., Варфоломеева Н. А., Варфоломеев А. Ф. Использование космической информации в процессе учебно-исследовательской деятельности студентов // Геодезия и картография. – 2009. – № 7. – С. 46–50.
3. Мозговой Д. К., Кравец О. В. Использование многоспектральных снимков для классификации посевов сельхозкультур // Экология и ноосфера. – 2009. – № 1-2. – С. 54–58.
4. Ивлиева Н. Г. Создание карт с использованием ГИС-технологий: учеб. пособие для студентов, обучающихся по специальности 020501 (013700) «Картография». –Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2005. – 124 с
5. Манухов В. Ф., Кислякова Н. А., Варфоломеев А. Ф. Информационные технологии в аэрокосмической подготовке выпускников географов-картографов // Педагогическая информатика. – 2013. – № 2. – С. 27–33.

**К.М. Маханов к.ф.-м.н.¹, Н.А. Бурамбаева к.т.н. ², А.М. Асильбекова³,
А.А. Құттыбек⁴, А. А. Серікова⁵, А.М. Бекешева⁶.**

¹*Старший преподаватель кафедры «Радиотехника, электроника и телекоммуникации»
ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан*

²*Доцент кафедры «Радиотехника, электроника и телекоммуникации»
ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан*

³*Преподаватель кафедры «Радиотехника, электроника и телекоммуникации»
ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан*

⁴*Преподаватель кафедры «Радиотехника, электроника и телекоммуникации»
ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан*

⁵*Магистрант 2 курса кафедры «Радиотехника, электроника и телекоммуникации»
ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан*

⁶*Студент 4 курса кафедры «Радиотехника, электроника и телекоммуникации»
ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан*

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ МАРШРУТ ПО ФОРМИРОВАНИЮ ЭЛЕКТРОДНЫХ ПРОВОДНИКОВ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МЕТАЛЛОВ ДЛЯ МЕМРИСТОРНЫХ ЯЧЕЕК

Аннотация: В статье представлен обзор актуальных вопросов в области электронных технологий, обусловленных увеличением объема данных и приближением традиционных транзисторных технологий к своим физическим пределам. Отражена необходимость разработки новых, более эффективных вычислительных систем, способных соответствовать требованиям в будущем.

Объектом исследования является технология создания мемристоров на основе оксида никеля. Представлены результаты, посвященные разработке технологического маршрута для получения мемристоров с использованием имеющегося в наличии оборудования. В частности,

были отработаны методика и технология изготовления электродов на основе меди (Cu/NiO_x/Cu), серебра (Ag/NiO_x/Ag) осаждением в вакууме.

Представлены результаты проектирования и расчета геометрических параметров масок для термического напыления электродов. Установлены результаты по определению параметров (давление, ток накала испарителя, время накала) вакуумного поста. На основании расчета и дополнительных экспериментов получены оптимальные параметры (расстояние, угол наклона, масса напыляемого вещества) для взаимного расположения подложки относительно испарителя.

Ключевые слова: мемристоры, отжиг, оксид никеля, вакуумный пост, тонкие пленки, вакуумное осаждение, электропроводность.

Введение. В современном электронном мире, где объем данных стремительно нарастает, и традиционные транзисторные технологии приближаются к своим физическим пределам, исследователи и инженеры сталкиваются с вызовами создания новых, более эффективных вычислительных систем. Уменьшение размеров устройств требует разработки инновационных технологий для обеспечения функциональности будущих поколений. В контексте этих вызовов, мемристоры — элементы, основанные на фундаментальной идее мемристорной технологии, представляют собой потенциальное решение, перспективное для ряда электронных приложений [1,2].

Идея мемристоров была впервые предложена Леоном Чуа в 1971 году, который, основываясь на аргументах симметрии, вывел необходимость существования четвертого фундаментального электрического элемента [3,4]. С тех пор мемристоры привлекают внимание исследователей своим потенциалом для создания энергонезависимых запоминающих устройств высокой плотности. Их привлекательные свойства, такие как высокая долговечность, работа без гальваноластики и совместимость с технологиями комплементарными металл – оксид полупроводниковыми процессами, делают их перспективными для интеграции в различные приложения, включая цифровую логику, нейронные сети и реконфигурируемые вычисления [5-7].

В настоящее время мемристорные технологии привлекают особое внимание не только в области электроники и вычислений, но и в биомедицинской сфере, где передовые материалы открывают новые перспективы для создания имплантируемых устройств и лабораторных устройств на чипе [8,9].

Многочисленные металлические оксиды, такие как TiO_x, NiO_x, HfO_x, TaO_x, WO_x и AlO_x [10-14], были заявлены как проявляющие явление резистивного переключения.

В данной статье представлены результаты разработки методики и технологий по созданию стабильных электродных контактных дорожек для мемристорных ячеек.

Целью работы является разработка методики, обеспечивающей повторяемость результатов, стабильность получаемых контактных электродов и изготовление опытных образцов.

Объекты и методы исследования.

Объектом исследования в работе являются двухслойные тонкопленочные материалы, полученные методом термического осаждения в вакууме. Первый слой в виде контактных дорожек, осаждался через специальную маску, второй слой, пленка оксида никеля, наносимая поверх контактных дорожек.

В работе применялись следующие методы исследования:

- 1) Компьютерное моделирование в среде КОМПАС-3D;
- 2) Использование возможностей 3D принтера PICASO, для распечатки масок по формированию электродных дорожек;
- 3) Термическое осаждение в вакууме;
- 4) Отжиг в цилиндрической печи при температуре 300⁰C (в кислородной струе).

Для изготовления тонкопленочных металлических слоев использовали вакуумный пост модели JEE-420.

Результаты исследования и их обсуждение.

Для создания технологического маршрута и конструкции элементов мемристора были разработаны следующие технологические процессы:

- расчет оптимальных параметров (расстояние, угол) для сборки конструкции «испаритель - подложка»;
- проектирование и расчет геометрических параметров масок для термического осаждения электродов;

Определение оптимального угла и высоты крепления подложки осуществлялось эмпирическим методом с помощью выражения:

$$T = M \sin \Theta / \rho A \pi R^2 \quad (1)$$

где M – масса вещества, $\sin \Theta$ - угол, ρ - плотность вещества, R - расстояние.

Для упрощения расчетов, массу используемого вещества приняли за $m=1$ грамм, а угол наклона подложки относительно плоскости рабочего объема поста $\theta=0^0$. Установлено, что для качественного осаждения металлических электродов наиболее эффективным расстоянием между испарителем и подложкой является 2,8 см. Также, расчет показал, что при массе испаряемого вещества равной $m=1$ грамм, толщина осаждаемого слоя составляет порядка $d=100$ нм.

В самом простом представлений, структура мемристора состоит из двух электродов (нижний и верхний) и активного слоя между ними [7]. На начальном этапе изготовления формируется нижний слой. Количество активных ячеек мемристора на единицу поверхности используемой подложки зависит от числа электродных дорожек. В качестве подложки мы использовали тонкие (0.17 мм) покровные стекла (18*18 мм). Были заготовлены маски для формирования различного количества электродов. Для формирования того или иного количества электродных дорожек проводился простой расчет, учитывающий оптимальное соотношение ширины электродов и расстояние между ними. В соответствии с данными расчетов, в среде КОМПАС-3D были разработаны модели масок. Готовые модели распечатывались с использованием 3D принтера (PICASO). Внешний вид масок представлен на рисунке 1.



Рисунок – 1
Маски для напыления электродов

Контактные электродные дорожки формировались путем термического осаждения различных материалов в вакууме. В качестве материалов для формирования контактных электродов были отобраны алюминий, серебро, бронза и медь. Первые три металла предварительно заготавливались в виде мелких частиц путем физического измельчения. Для изготовления медных контактов использовали медную проволоку диаметром 0,5 мм.

Фотографии изготовленных образцов с электродами из различных материалов представлены на рисунке 2.



Рисунок – 2
Изготовленные образцы с электродами

Во всех случаях, вакуумное осаждение электродов осуществлялось при давлении в рабочем объеме вакуумного поста не выше $4 \cdot 10^{-5}$ Pa. Скорость нагрева испарителя регистрировалась по секундомеру и путем фиксирования показаний манометров. В момент начала испарения давление резко подсакивало, в этот момент запускался секундомер. В таблице 1 представлены параметры, при которых были получены стабильные электродные дорожки из алюминия, меди, серебра и бронзы. Также в таблице представлены технические параметры для осаждения тонких пленок никеля, который был выбран в качестве активного рабочего элемента.

Таблица 1. Экспериментально установленные параметры для осаждения электродных дорожек из: алюминия, меди, серебра и латуни.

Металл	Агрегатное состояние	Давление в рабочем объеме, Pa.	Ток накала, А.	Режим и время нагрева, минут.
Медь	Твердое. Тонкий провод.	$4 \cdot 10^{-5}$ - $6 \cdot 10^{-5}$	4	Плавно, 7
Серебро	Твердое. Мелкие частицы.	$5 \cdot 10^{-5}$	6	Плавно, 6
Латунь	Твердое. Мелкие частицы.	$4 \cdot 10^{-5}$ - $8 \cdot 10^{-5}$	4	Плавно, 5
Никель	Твердое. Мелкие частицы.	$3 \cdot 10^{-5}$	6	Плавно, 8

Согласно [15] в качестве активного элемента в мемристорной технике могут быть использованы оксиды различных металлов. Несмотря на наличие большого количества публикации, поиск новых материалов продолжается и в настоящее время [16,17]. Основным критерием является поиск материала, обеспечивающего максимальную скорость переключения состояний в мемристорной ячейке.

Выбор в качестве активного элемента оксида никеля обусловлен несколькими факторами. Это наличие данного материала в виде измельченного порошка, низкая температура отжига при оксидировании, и наконец, немаловажную роль сыграло то, что данный материал достаточно хорошо исследован [11, 18-21].

После формирования пленки никеля на поверхности электродов в вакуумной установке, следующий этап экспериментов был посвящен формированию оксида никеля. Для этого, нами была использована самодельная круглая печь (рисунок 3) с встроенной кварцевой трубкой, длиной 25 см и внутренним диаметром 3.8 см. Отжиг осуществлялся при температуре 280°C - 300°C . Контроль за температурой в области крепления образца осуществляли с помощью хромель-алюмелевой термопары (тип К), посредством милливольтметра. Подача кислорода осуществлялась через специально отведенный ввод. Давление газа регулировалось с помощью кислородного манометра и соответствовало значению $P = 0.5$ Pa.

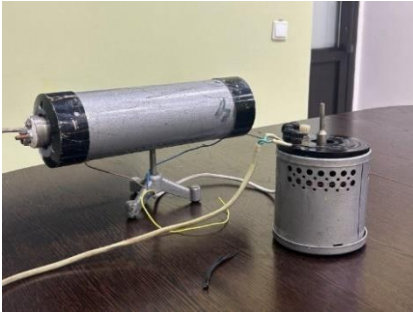


Рисунок – 3

Самодельная круглая печь для отжига пленки никеля и формирования оксида никеля в вакуумной установке

На завершающем этапе экспериментальных работ, была проведена контрольная проверка электропроводности контактных электродов. Измерения проводились с помощью мультиметра DT9205A. Установлено, что сопротивление контактных электродов не превышает 1 КОм, а между электродами отсутствует короткое замыкание. Таким образом, мы получили подтверждение того, что пленки на поверхности подложек электропроводны. Что свидетельствовало о равномерности нанесения на поверхности и отсутствий физических разрывов. На рисунке 4 представлены этапы измерений проводимости электродов с помощью мультиметра.



Рисунок – 4

Измерение электропроводности электродов

Заключение

В ходе исследования был разработан технологический маршрут по созданию мемристоров, включающий в себя этапы проектирования конструкции маски, ее 3D-модели, формирования электродов с использованием методов термического осаждения, отжиг и оксидирования в атмосфере кислорода.

Полученные электроды из металлов были подвергнуты измерениям электропроводности, и проверены на наличие электрического контакта. Повторяемость полученных результатов и стабильность формируемых пленок подтверждает успешность выполнения этапов технологического процесса.

Литература:

1. Кулакова А. А., Лукьяненко Е. Б. Мемристорная логика в цифровой схемотехнике //Известия высших учебных заведений. Электроника, 2020. – Т. 25. – №. 4. – С. 330-338.
2. Tzouvadaki I. et al. Interfacing Biology and Electronics with Memristive Materials //Advanced Materials, 2023. – С. 2210035.
3. Chua L. Memristor-the missing circuit element //IEEE Transactions on circuit theory, 1971. – Т. 18. – №. 5. – С. 507-519.

4. Chua L. O., Kang S. M. Memristive devices and systems //Proceedings of the IEEE, 1976. – T. 64. – №. 2. – С. 209-223.
5. Dmitri B. Strukov, Gregory S. Snider, Duncan R. Stewart & R. Stanley Williams. The missing memristor found // Nature, 2008. – С. 80-83.
6. Torrezan A. C., Strachan J. P., Medeiros-Ribeiro G., & Williams R. S. Sub-nanosecond switching of a tantalum oxide memristor // Nanotechnology, 2011. – Т. 22. – С. 485203.
7. Sun K., Chen J., Yan X. The future of memristors: Materials engineering and neural networks //Advanced Functional Materials, 2021. – Т. 31. – №. 8. – С. 2006773.
8. Danial L., Sharma K., Dwivedi S., & Kvatinsky S. Logarithmic neural network data converters using memristors for biomedical applications //2019 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS). – IEEE, 2019. – С. 1-4.
9. Zhang J. et al. Memristor based electronic devices towards biomedical applications //Journal of Materials Chemistry C, 2023. – Т. 12. – №. 1. – С. 50-59.
10. Lee M.H., Kim K.M., Kim G.H., Seok J.Y., Song S.J., Yoon J.H., & Hwang C.S. Study on the electrical conduction mechanism of bipolar resistive switching TiO₂ thin films using impedance spectroscopy //Applied Physics Letters, 2010. – Т. 96. – №. 15.
11. Kannan V., Senthilkumar V., Rhee J. K. Multi-level conduction in NiO resistive memory device prepared by solution route //Journal of Physics D: Applied Physics, 2013. – Т. 46. – №. 9. – С. 095301.
12. Wang Z., Yu H., Tran X.A., Fang Z., Wang J., & Su H. Transport properties of HfO_{2-x} based resistive-switching memories //Physical review B, 2012. – Т. 85. – №. 19. – С. 195322.
13. Hur J. H. et al. Modeling for multilevel switching in oxide-based bipolar resistive memory //Nanotechnology, 2012. – Т. 23. – №. 22. – С. 225702.
14. Hickmott T. W. Temperature-dependent Fowler–Nordheim tunneling and a compensation effect in anodized Al-Al₂O₃-Au diodes //Journal of applied physics, 2005. – Т. 97. – №. 10.
15. Гудков А. и др. Мемристоры – новый тип элементов резистивной памяти для наноэлектроники //Электроника: Наука, технология, бизнес, 2014. – №. 5. – С. 156-162.
16. Zhang Y. et al. High-Performance Memristors Based on Bi₂Te₃ //Journal of Electronic Materials, 2023. – Т. 52. – №. 2. – С. 1242-1249.
17. Wang T. et al. Mechanically durable memristor arrays based on a discrete structure design //Advanced Materials, 2022. – Т. 34. – №. 4. – С. 2106212.
18. Li Y. et al. NiO-based memristor with three resistive switching modes //Semiconductor Science and Technology, 2020. – Т. 35. – №. 5. – С. 055004.
19. Li Y. et al. Coexistence of analog memristive and memcapacitive effects in a Pt/NiO_x/NiO/Pt structure //Semiconductor Science and Technology, 2022. – Т. 37. – №. 5. – С. 055007.
20. Kwon D. H. et al. Observation of the Ni₂O₃ phase in a NiO thin-film resistive switching system //physica status solidi (RRL)–Rapid Research Letters, 2017. – Т. 11. – №. 5. – С. 1700048.
21. Swathi S. P., Angappane S. Digital and analog resistive switching in NiO-based memristor by electrode engineering //Japanese Journal of Applied Physics, 2022. – Т. 61. – №. SM. – С. SM1009.