

А.В. Саенко, К.А. Козюменко, И.А. Шиховцов, Р.В. Томинов, В.А. Смирнов

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗИСТИВНОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ПРОЗРАЧНЫХ
МЕМРИСТИВНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ОКСИДА ЦИНКА
ДЛЯ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Развитие нейроморфных систем машинного зрения для робототехнических комплексов требует создания прозрачных мемристивных структур, сочетающих оптическую прозрачность, стабильное биполярное резистивное переключение и совместимость с технологией кроссбар-массивов. Ключевой проблемой является установление закономерностей влияния режимов осаждения тонких пленок ZnO на их структурные и электрофизические свойства, которые определяют характеристики мемристивных структур. Целью работы являлось определение оптимальной мощности ВЧ магнетронного распыления керамической мишени ZnO, обеспечивающей формирование прозрачных мемристивных структур ITO/ZnO/ITO со стабильным резистивным переключением, и создание на их основе кроссбар-массива. Тонкие пленки ZnO осаждались методом ВЧ магнетронного распыления при мощности от 25 до 100 Вт. Проведены структурные (РЭМ, АСМ) и электрофизические (эффект Холла) исследования полученных пленок ZnO. Изготовлены методами магнетронного распыления и литографии прозрачные мемристивные структуры ITO/ZnO/ITO и кроссбар-массив из 16 структур с размером ячеек 2000×2000 нм на стеклянных подложках, а также измерены их вольтамперные характеристики. Показано, что возрастание мощности магнетронного распыления от 25 до 100 Вт приводит к увеличению размера зерен от 12,8 до 35,7 нм и шероховатости поверхности пленок ZnO от 2,8 до 11,4 нм. Получено, что при мощности распыления 75 Вт концентрация носителей заряда в пленках ZnO имеет максимальное значение $2,7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, что необходимо для стабильного резистивного переключения структуры. Показано, что полученные мемристивные структуры ITO/ZnO/ITO проявляют стабильное биполярное переключение в течение 1000 циклов между состояниями $HRS = 537,4 \pm 26,7 \text{ Ом}$ и $LRS = 291,4 \pm 38,5 \text{ Ом}$ (отношение $HRS/LRS \sim 1,8$). Изготовленный прозрачный кроссбар-массив показал стабильное резистивное переключение в течение 20000 циклов ($LRS = 13,8 \pm 1,4 \text{ кОм}$, $HRS = 34,8 \pm 2,6 \text{ кОм}$, отношение $HRS/LRS \sim 2,5$). Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических процессов изготовления прозрачных мемристивных кроссбаров для нейроморфных структур машинного зрения робототехнических систем.

Наноматериалы; тонкие пленки ZnO; ВЧ магнетронное распыление; структурные свойства; нейроморфные системы; машинное зрение; прозрачный мемристор; резистивное переключение.

A.V. Saenko, K.A. Kozyumenko, I.A. Shikhovtsov, R.V. Tominov, V.A. Smirnov

**STUDY OF RESISTIVE SWITCHING OF TRANSPARENT ZINC OXIDE
MEMRISTIVE STRUCTURES FOR MACHINE VISION OF ROBOTIC SYSTEMS**

The development of neuromorphic machine vision systems for robotic systems requires the creation of transparent memristive structures that combine optical transparency, stable bipolar resistive switching, and compatibility with crossbar array technology. A key challenge is to establish patterns in the influence of ZnO thin film deposition modes on their structural and electrical properties, which determine the characteristics of memristive structures. The aim of this study was to determine the optimal RF magnetron sputtering power for a ZnO ceramic target, ensuring the formation of transparent ITO/ZnO/ITO memristive structures with stable resistive switching, and to create a crossbar array based on these structures. ZnO thin films were deposited using RF magnetron sputtering at powers ranging from 25 to 100 W. Structural (SEM, AFM) and electrical (Hall effect) studies of the resulting ZnO films were conducted. Transparent ITO/ZnO/ITO memristive structures and a crossbar array of 16 structures with a cell size of $2000 \times 2000 \text{ nm}$ were fabricated on glass substrates using magnetron sputtering and lithography, and their current-voltage characteristics were measured. Increasing the magnetron sputtering power from 25 to 100 W resulted in an increase in the grain size from 12,8 to 35,7 nm and in the surface roughness of the ZnO films from 2,8 to 11,4 nm. At a sputtering power of 75 W, the charge carrier concentration in the ZnO films reached a maximum value of $2,7 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, which is necessary for stable resistive switching of the structure. The obtained ITO/ZnO/ITO memristive structures were shown to exhibit stable bipolar switching for 1000 cycles between the states $HRS = 537,4 \pm 26,7 \text{ Ohm}$ and $LRS = 291,4 \pm 38,5 \text{ Ohm}$ (HRS/LRS ratio $\sim 1,8$). The fabricated transparent crossbar array showed stable resistive switching for 20000 cycles

($LRS = 13,8 \pm 1,4 \text{ k}\Omega$, $HRS = 34,8 \pm 2,6 \text{ k}\Omega$, HRS/LRS ratio $\sim 2,5$). The obtained results can be used in the development of technological processes for the fabrication of transparent memristor crossbars for neuromorphic structures of machine vision in robotic systems.

Nanomaterials; ZnO thin films; RF magnetron sputtering; structural properties; neuromorphic systems; machine vision; transparent memristor; resistive switching.

Введение. Мемристор является перспективным устройством энергонезависимой резистивной памяти благодаря таким достоинствам, как высокое быстродействие, длительное хранение данных, низкое энергопотребление и многоуровневое поведение [1–3]. Мемристор способен изменять свое сопротивление в зависимости от приложенного к нему напряжения и тем самым имитировать роль синапса в нервной системе, что открывает широкие возможности для разработки нейроморфных электронных устройств, таких как универсальные запоминающие устройства (ReRAM), вычислительные системы (нейрокомпьютеры), а также биосенсоры и нейроинтерфейсы для робототехники [4–6]. Развитие прозрачных мемристоров связано с их применением в оптоэлектронных нейроморфных устройствах, в частности системах искусственного машинного зрения, где наиболее важна оптическая прозрачность мемристора и его синаптическое поведение, поскольку мемристор напрямую реагирует на оптическое воздействие, а также обладает памятью и может быть использован в системах обработке сенсорных данных и визуальной информации в реальном времени [7, 8]. Прозрачные мемристоры могут быть также интегрированы в устройства прозрачной электроники, такие как тонкопленочные транзисторы и диоды. Кроме того, мемристоры с оптической бистабильностью могут найти широкое применение в создании функциональных элементов для оптоэлектроники (высокоскоростные оптические переключатели и модуляторы света) и дисплеев интегрированных, например, в окна и лобовые стекла автомобилей [9–11]. Для создания эффективных прозрачных мемристоров необходимы оптически прозрачные и электрически переключаемые оксидные материалы, а также прозрачные верхний и нижний электроды, такие как ИТО [3, 12].

В последнее время перспективным мемристоривным наноматериалом выступает оксид цинка (ZnO), который является не токсичным, обладает подходящей шириной запрещенной зоны ($\sim 3,4$ эВ) и уникальной комбинацией оптических и электрофизических свойств, которые во многом определяются концентрацией свободных носителей заряда, контролируемых кислородными вакансиями, а также проявляет синаптическое поведение, необходимое для создания прозрачных мемристоривных структур [13–15].

При осаждении тонких пленок ZnO широко используются такие методы, как магнетронное распыление на постоянном токе и в высокочастотном режиме (ВЧ), химическое осаждение из газовой фазы, импульсное лазерное осаждение и золь-гель метод (центрифугирование) [16–18]. Метод магнетронного распыления имеет такие преимущества, как возможность точного управления параметрами растущей пленки в процессе осаждения, высокая стабильность процесса во времени и отсутствие нагрева подложки до высоких температур [4]. Обычно выделяют два метода магнетронного распыления оксидов металлов, которые включают распыление металлической мишени в среде реактивного газа (кислород) или керамической мишени в атмосфере инертного газа (аргон). При этом распыление керамической мишени характеризуется высокой стабильностью процесса и высоким качеством получаемых пленок, в отличие от реактивного распыления (низкая стабильность процесса и сложность его контроля), что может быть перспективным для создания мемристоривных структур [12, 19].

Целью данной работы является исследование влияния мощности ВЧ магнетронного распыления керамической мишени при комнатной температуре в атмосфере аргона на структурные и электрофизические свойства пленок ZnO, формирование и исследование резистивного переключения прозрачных мемристоривных структур ИТО/ZnO/ИТО, а также кроссбар-массива на их основе.

Методика эксперимента. Прозрачные мемристинные структуры ITO/ZnO/ITO формировались в три этапа методом магнетронного распыления на установке VSE-PVD-DESK-PRO (ООО «АкадемВак»). На первом этапе пленки ITO толщиной 200 нм (нижний электрод) осаждались на стеклянные подложки методом импульсного магнетронного распыления на постоянном токе с частотой 100 кГц при комнатной температуре в атмосфере аргона, мощности распыления 200 Вт и рабочем давлении $2 \cdot 10^{-3}$ мбар [20–22]. На втором этапе тонкие пленки ZnO осаждались на стеклянные подложки с прозрачным проводящим слоем ITO методом ВЧ магнетронного распыления керамической мишени ZnO чистотой 99,99 % при комнатной температуре в атмосфере аргона [1, 15]. Мощность распыления изменялась от 25 до 100 Вт, а рабочее давление аргона устанавливалось на уровне $5 \cdot 10^3$ мбар. Время осаждения изменялось от 4 до 15 мин., при котором толщина полученных пленок ZnO составляла от 56 до 69 нм. На третьем этапе верхний ITO электрод толщиной 150 нм и диаметром 550 мкм осаждался на поверхность пленки ZnO также методом магнетронного распыления на постоянном токе с частотой 100 кГц при комнатной температуре в атмосфере аргона.

Изготовление прозрачного кроссбара 4×4 мемристинных структур проводилось также в три этапа. На первом этапе на стеклянные подложки наносилась прозрачная пленка ITO методом магнетронного распыления в импульсном режиме, на поверхности которой затем проводилась фотолитография и формировались нижние электроды. На втором этапе методом центрифугирования наносилась пленка фоторезиста ФП-383, которая была экспонирована через фотошаблон с массивом ячеек мемристинных структур и проявлена в 5% растворе КОН. Далее на полученную структуру наносилась пленка ZnO методом ВЧ магнетронного распыления при мощности 75 Вт. Затем после взрывной литографии пленки ZnO были получены ячейки мемристинных структур. На третьем этапе формировались верхние ITO контакты методами магнетронного распыления на постоянном токе с частотой 100 кГц и взрывной литографии. Для обеспечения возможности проведения зондовых электрических измерений каждый электрод был изготовлен с контактной площадкой.

Морфология поверхности пленок ZnO исследовалась с помощью растрового электронного микроскопа Nova Nanolab 600 (FEI Company) и атомно-силового микроскопа (АСМ) в полуконтактном режиме на сканирующем зондовом микроскопе NTEGRA (НТ-МДТ). Электрофизические параметры пленок ZnO измерялись на установке Eсорia HMS-3000 (Eсорia Co.). Коэффициент пропускания мемристинных структур в ультрафиолетовом и видимом спектральном диапазоне (350–900 нм) определялся с помощью спектрофотометра UV-VIS Evolution-300 (Thermo). Измерения вольтамперных характеристик мемристинных структур проводилось при комнатной температуре на воздухе с использованием системы измерений параметров полупроводников Keithley 4200-SCS и установки субмикронного зондирования ЭМ-6070А с вольфрамовыми зондами. Напряжение подавалось на верхний электрод мемристинной структуры, а нижний электрод был заземлен [10, 11]. Для исследования электрических параметров изготовленного кроссбара, для каждой из 16 структур были измерены 1000 вольтамперных характеристик в режиме биполярной развертки от -3 В до 3 В. Также было проведено исследование зависимости сопротивлений HRS и LRS от количества цикла переключения. Для этого на каждую структуру подавалось 20000 циклов переключения при напряжении чтения 0,4 В. Существует несколько способов минимизировать влияние токов утечки в пассивных кроссбарах [23, 24]: путем подачи напряжений равных $U/2$ В и $U/3$ В на неиспользуемые электроды и путем заземления неиспользуемых электродов. В данном исследовании для минимизации влияния токов утечки все неиспользуемые электроды были заземлены во время электрических измерений. Кроме того, следует отметить, что низкое отношение HRS/LRS приводит к уменьшению влияния токов утечки в пассивных кроссбарах.

Результаты и обсуждение. На рис. 1 представлены РЭМ-изображения поверхности пленок ZnO, полученных при мощности ВЧ магнетронного распыления от 25 до 100 Вт, и их поперечный скол толщиной 60 нм. Анализ РЭМ-изображений показал, что пленки

ZnO, полученные при мощности ВЧ магнетронного распыления от 25 до 75 Вт, имеют однородную зернистую морфологию поверхности без существенных дефектов со средним размером зерен от 12,8 до 28,6 нм (рис. 1,а-в). При этом пленки ZnO, полученные при мощности распыления 100 Вт, имеют существенные неоднородности, связанные с изменяющимся размером зерен от 14,3 до 53,5 нм и средний размер зерен 35,7 нм (рис. 1,г). На поперечном срезе всех пленок ZnO видна столбчатая структура с направлением перпендикулярным к плоскости подложки, которая часто наблюдается при низкотемпературном осаждении пленок оксидов и является следствием малой подвижности осаждаемых частиц на поверхности подложки [17–19].

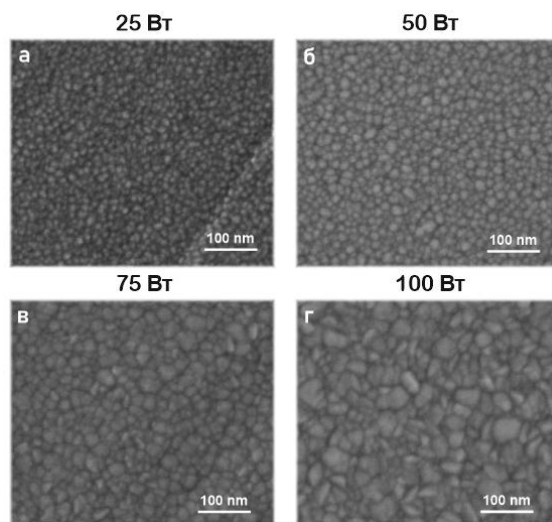


Рис. 1. РЭМ-изображения поверхности пленок ZnO, полученных при мощности ВЧ магнетронного распыления от 25 до 100 Вт

На рис. 2 представлены АСМ-изображения поверхности пленок ZnO, полученных при мощности ВЧ магнетронного распыления от 25 до 100 Вт. Анализ АСМ-изображений показал, что пленки ZnO имеют относительно гладкую поверхность при мощности магнетронного распыления от 25 до 75 Вт. Так при мощности распыления 25 Вт шероховатость поверхности пленки составляет 2,8 нм, при мощности распыления 50 Вт – 5,1 нм, а при мощности распыления 75 Вт – порядка 6,3 нм (рис. 2, а-в). При мощности распыления 100 Вт наблюдается увеличение шероховатости поверхности до 11,4 нм за счет присутствия в пленке зерен большого размера (40-60 нм) (рис. 2, г). Возрастание мощности ВЧ магнетронного распыления придает осаждаемым атомам необходимую кинетическую энергию для роста зерен большего размера, что приводит к возрастанию шероховатости поверхности и может приводить к снижению стабильности резистивного переключения [2, 4].

Кроме того, при низкой мощности (25 Вт) величина шероховатости определяется аморфноподобной структурой полученных образцов: образование более мелких полостей или каналов способствует формированию гладкой поверхности с меньшей шероховатостью. Увеличение мощности до 100 Вт приводит к изменению структуры пленок, образованию более глубоких каналов и увеличению шероховатости [23]. Таким образом, зависимость шероховатости от мощности распыления тесно связана с особенностями кристаллической структуры, размером зерна и распределением дефектов на границах зерен. Следует отметить, что температура подложки и поток газа также могут быть изменены для управления шероховатостью поверхности. Ожидается, что увеличение температуры подложки во время магнетронного распыления приведет к формированию более мелкозернистых пленок, однако этот подход может быть использован в ограниченной степени в рамках данной работы, поскольку нагрев подложки во время осаждения пленки ZnO может ухудшить параметры прозрачного проводящего слоя ИТО.

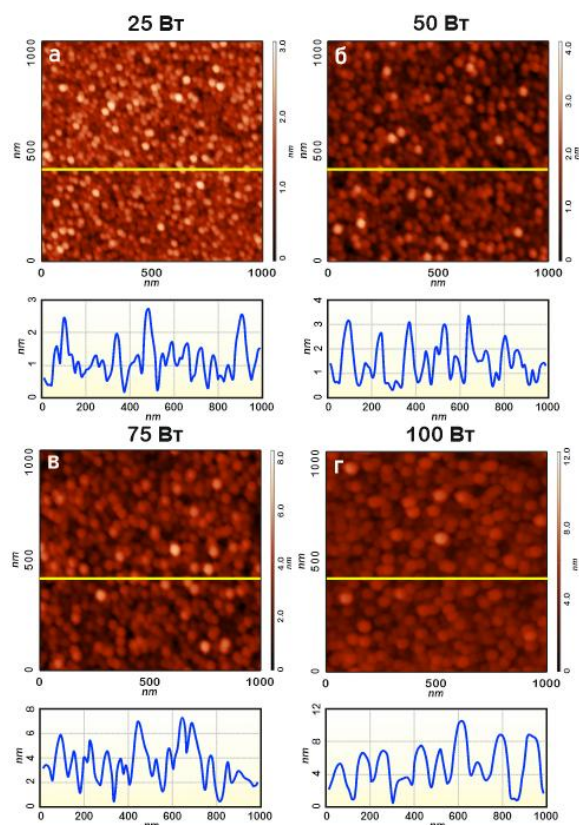


Рис. 2. АСМ-изображения поверхности пленок ZnO, полученных при мощности ВЧ магнетронного распыления от 25 до 100 Вт

На рис. 3 представлены зависимости концентрации и подвижности носителей заряда в пленках ZnO от мощности ВЧ магнетронного распыления.

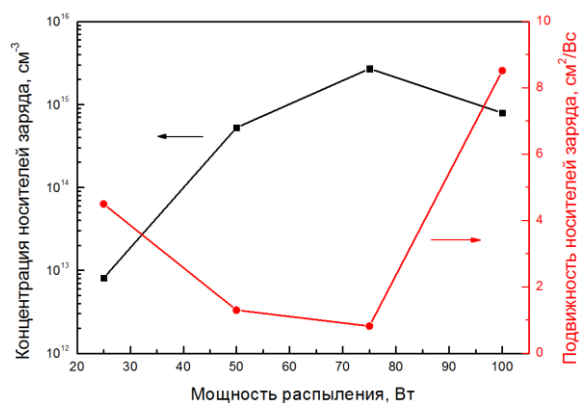


Рис. 3. Электрофизические свойства пленок ZnO, полученных при мощности ВЧ магнетронного распыления от 25 до 100 Вт

Полученные пленки ZnO имеют n-тип проводимости и относительно высокое удельное сопротивление, которое составляло порядка 10^3 - 10^4 Ом·см. Концентрация носителей заряда в пленках ZnO существенно изменяется от $8,1 \cdot 10^{12}$ см⁻³ до $2,7 \cdot 10^{15}$ см⁻³ при увеличении мощности ВЧ магнетронного распыления от 25 до 75 Вт. Данные изменения концентрации носителей заряда можно связать с кристалличностью пленок ZnO, в

частности размером зерен, а также рассеянием на границах зерен и дефектах [6, 17]. Подвижность носителей заряда изменяется не так значительно и имеет противоположный характер. Таким образом, при мощности распыления 75 Вт в пленке ZnO наблюдается наибольшая концентрация носителей заряда, которая определяется низкими энергиями образования внутренних дефектов нестехиометрии – анионными (кислородными) вакансиями, что необходимо для стабильного резистивного переключения мемристивных структур на основе филаментарного механизма.

Средний коэффициент пропускания в видимом спектре (длина волны 400-800 нм) составил около 86 %, что соответствует высокой оптической прозрачности в сочетании с перспективной резистивной памятью для нейроморфных структур машинного зрения, робототехники и систем искусственного интеллекта.

Для исследования резистивного переключения мемристивных структур ITO/ZnO/ITO проведено измерение их электрических характеристик. На рис. 4 представлены экспериментальная вольтамперная характеристика, показывающая поведение биполярного резистивного переключения, зависимость сопротивления от количества циклов переключения и кумулятивная вероятность для мемристивной структуры, в которой пленка ZnO осаждалась при мощности распыления 75 Вт.

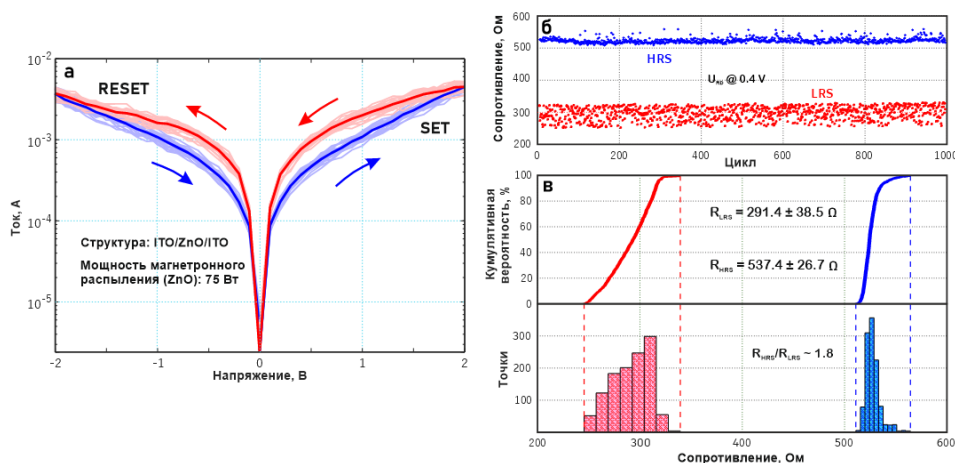


Рис. 4. Экспериментальные исследования резистивного переключения прозрачной мемристивной структуры ITO/ZnO/ITO

♦ Измерение вольтамперной характеристики мемристивной структуры осуществлялось при изменении приложенного к верхнему электроду напряжения в последовательности $0 \text{ В} \rightarrow 2 \text{ В} \rightarrow 0 \text{ В} \rightarrow -2 \text{ В} \rightarrow 0 \text{ В}$, что показано в виде стрелок на рис. 4,а [13, 23]. На рис. 4,б представлена зависимость высокого (HRS) и низкого (LRS) сопротивлений пленки ZnO от количества циклов переключения. При увеличении приложенного напряжения от 0 В до 2 В мемристивная структура ITO/ZnO/ITO постепенно переходит из состояния HRS в LRS и процесс установки завершается при 2 В (VSET). В дальнейшем мемристивная структура будет сохранять состояние LRS до тех пор, пока приложенное напряжение не снизится до -2 В (VRESET). Следовательно, при VRESET происходит процесс сброса и мемристор переходит из состояния LRS в HRS, реализуя биполярное резистивное переключение. Таким образом, показано изменение сопротивления из состояния HRS в LRS, которое происходит при $2 \pm 0,1 \text{ В}$, а из LRS в HRS при $-2 \pm 0,1 \text{ В}$, при этом ток переключения составляет порядка 5 мА. Получено, что за 1000 циклов переключения HRS и LRS составляют $537,4 \pm 26,7 \text{ Ом}$ и $291,4 \pm 38,5 \text{ Ом}$, соответственно. При этом отношение сопротивлений в состояниях HRS/LRS составляет $\sim 1,8$ при напряжении чтения 0,4 В (рис. 4,в). В целом пленка ZnO является диэлектриком, и для того, чтобы она начала проявлять эффект резистивного переключения, необходимо создать в ее объеме определенное количество кислородных вакансий. Этого можно до-

биться несколькими способами: электроформовкой, подбором режимов распыления для создания пленок с определенной стехиометрией, а также применением отжига после напыления [17, 21]. В данной работе с помощью магнетронного распыления найдены значения давления в камере и параметров мощности распыления, при которых пленки ZnO начинают проявлять резистивное переключение. Таким образом, наличие резистивного переключения в полученных пленках ZnO связано с условиями распыления.

Для практического применения исследуемых в данной работе прозрачных мемристоров, в частности для эмуляции на их основе биологических синапсов в нейроморфных системах машинного зрения, необходимо разработать и изготовить массивы элементов, которые будут электрически соединены между собой. Считается, что для физической реализации биологических синапсов наиболее подходящими являются мемристоривные структуры, изготовленные по архитектуре кроссбара, так как они способны эмулировать вычислительные примитивы клеток нейронов [23]. Исходя из вышесказанного, был разработан и изготовлен прозрачный кроссбар из 16 мемристоривных структур ITO/ZnO/ITO с размером 2000×2000 нм каждая (рис. 5).

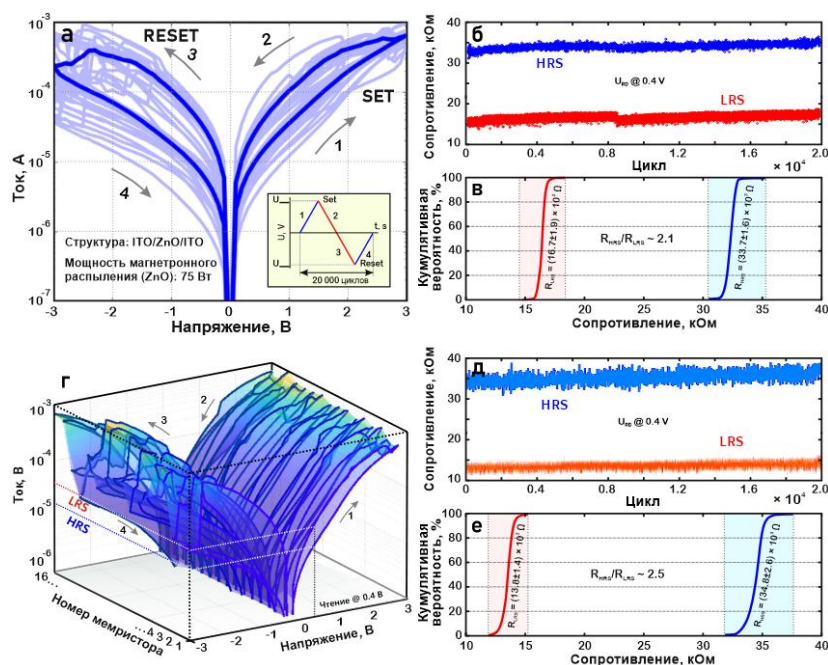


Рис. 5. Исследование резистивного переключения кроссбар массива из 16 прозрачных мемристоривных структур

Анализ полученных вольтамперных характеристик показал, что изготовленные мемристоривные структуры обладают стабильным резистивным переключением (рис. 5,а). Ток в состоянии HRS составляет около 15 мкА при напряжении 0,4 В, а в состоянии низкого сопротивления LRS 32 мкА. Аналогичные результаты были получены для остальных мемристоривных структур кроссбара (рис. 5,г). Испытание на выносливость показало, что за 20000 циклов переключения мемристоривные структуры переключаются между $LRS = 16,7 \pm 1,9$ кОм и $HRS = 33,7 \pm 1,6$ кОм для одного устройства (рис. 5,б), а также между $LRS = 13,8 \pm 1,4$ кОм и $HRS = 34,8 \pm 2,6$ кОм для всех устройств (рис. 5,д), в то время как отношение сопротивлений HRS/LRS составляет $\sim 2,1$ и $2,5$ соответственно (рис. 5,в,е). Данное различие может быть объяснено влиянием поверхностного рельефа при одной и той же шероховатости и толщине пленки ZnO на эффект резистивного переключения, что приводит к флуктуациям концентрации и профиля распределения дефектов в объеме пленки ZnO для каждой мемристоривной структуры ITO/ZnO/ITO. Изготов-

ленный кроссбар мемристивных структур на основе ITO/ZnO/ITO может быть использован в перспективных приложениях для робототехники и систем искусственного интеллекта, в частности в зрительных системах, а также в системах для распознавания образов.

Заключение. В результате проведенных исследований установлены закономерности влияния мощности ВЧ магнетронного распыления керамической мишени ZnO при комнатной температуре в атмосфере аргона на структурные и электрофизические свойства тонких пленок ZnO. Показано, что увеличение мощности распыления от 25 до 100 Вт приводит к росту размера зерен от 12,8 до 35,7 нм и повышению шероховатости поверхности от 2,8 до 11,4 нм. Определена оптимальная мощность магнетронного распыления (75 Вт), при которой пленки ZnO имеет однородную нанокристаллическую структуру со средним размером зерен 28,6 нм, шероховатостью поверхности 6,3 нм и наибольшей концентрацией носителей заряда $2,7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, что необходимо для стабильного резистивного переключения мемристивной структуры на основе филаментарного механизма. Показана возможность создания прозрачных мемристивных структур ITO/ZnO/ITO и кроссбар-массив из 16 структур с размером ячеек 2000×2000 нм на стеклянных подложках. Получено, что при мощности осаждения пленок ZnO 75 Вт мемристивные структуры показывают стабильное биполярное резистивное переключение в течение 1000 циклов между сопротивлениями $HRS = 537,4 \pm 26,7$ Ом и $LRS = 291,4 \pm 38,5$ Ом при отношении $HRS/LRS \sim 1,8$. Установлено, что все структуры кроссбар-массива также показывают стабильное резистивное переключение в течение 20000 циклов между $LRS = 13,8 \pm 1,4$ кОм и $HRS = 34,8 \pm 2,6$ кОм при отношении $HRS/LRS \sim 2,5$. Получено, что коэффициент оптического пропускания мемристивных структур в видимом спектре составляет $\sim 86\%$, что подтверждает их высокую прозрачность. Представленные результаты могут быть использованы при разработке технологических процессов создания прозрачных мемристивных кроссбаров для нейроморфных систем машинного зрения, энергонезависимой резистивной памяти и оптоэлектронных структур робототехнических комплексов.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 25-19-00809, <https://rscf.ru/project/25-19-00809/> в Южном федеральном университете.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Jing Yang, Lingxiang Hu, Liufeng Shen, Jingrui Wang, Peihong Cheng, Huanming Lu, Fei Zhuge, Zhizhen Ye.* Optically driven intelligent computing with ZnO memristor, *Fundamental Research*, 2024, Vol. 4, pp. 158-166.
2. *Usman Bature Isyaku, Mohd Haris Bin Md Khir, I. Md Nawi, M.A. Zakariya, Furqan Zahoor.* ZnO Based Resistive Random Access Memory Device: A Prospective Multifunctional Next-Generation Memory, *IEEE Access*, 2021, Vol. 9, pp. 105012.
3. *P. Praveen, T. Priya Rose, K.J. Saji.* Top electrode dependent resistive switching in M/ZnO/ITO memristors, M = Al, ITO, Cu, and Au, *Microelectronics Journal*, 2022, Vol. 121, pp. 105388.
4. *Saenko A.V., Tominov R.V., Jityaev I.L., Vakulov Z.E., Avilov V.I., Polupanov N.V., Smirnov V.A.* Transparent Zinc Oxide Memristor Structures: Magnetron Sputtering of Thin Films, Resistive Switching Investigation, and Crossbar Array Fabrication, *Nanomaterials*, 2024, Vol. 14, pp. 1901.
5. *Cristian L. Teran, Jorge A. Calderon, Heiddy P. Quiroz, A. Dussan.* Optical properties and bipolar resistive switching of ZnO thin films deposited via DC magnetron sputtering, *Chinese Journal of Physics*, 2021, Vol. 74, pp. 1-8.
6. *Chander Prakash, Lovi Raj Gupta, Amrinder Mehta, Hitesh Vasudev, Roman Tominov, Ekaterina Korman, Alexander Fedotov, Vladimir Smirnov, Kavindra Kumar Kesari.* Computing of neuromorphic materials: an emerging approach for bioengineering solutions, *Materials Advances*, 2023, Vol. 4, pp. 5882-5919.
7. *Yuxin Shi, Yanna Zhang, Guoqiang Li.* Recent progress in transparent memristors, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2023, Vol. 56, pp. 313001.
8. *Huiling Zhang, Ruping Liu, Huiqing Zhao, Zhicheng Sun, Zilong Liu, Liang He, Ye Li.* Research Progress of Biomimetic Memristor Flexible Synapse, *Coatings*, 2022, Vol. 12, pp. 21.
9. *Ping-Xing Chen, Debashis Panda, Tseung-Yuen Tseng.* All oxide based flexible multi-folded invisible synapse as vision photoreceptor, *Scientific Reports*, 2023, Vol. 13, pp. 1454.

10. Raveendra Kiran M., Hidayath Ulla, Satyanarayan M.N., Umesh G. Effects of annealing temperature on the resistance switching behaviour of solution-processed ZnO thin films, *Superlattices and Microstructures*, 2020, Vol. 148, 106718.
11. Asutosh Patnaik, Srikant Kumar Mohanty, Narayan Sahoo, Debashis Panda. Effect of oxygen concentration in ZnO-based transparent flexible memristor synapse, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2023, Vol. 34, pp. 1406.
12. Hongxia Li, Wei Dong, Xin Wu, Junhua Xi, Zhenguo Ji. Resistive switching characteristics of ZnO/a-TiO₂ bilayer film fabricated on PET/ITO transparent and flexible substrates, *Materials Research Bulletin*, 2016, Vol. 84, pp. 449-454.
13. Tominov R.V., Vakulov Z.E., Avilov V.I., Shikhovtsov I.A., Varganov V.I., Kazantsev V.B., Lovi Raj Gupta, Chander Prakash, Smirnov V.A. Approaches for Memristive Structures Using Scratching Probe Nanolithography: Towards Neuromorphic Applications, *Nanomaterials*, 2023, Vol. 13, pp. 1583.
14. Abduev A.Kh., Akhmedov A.K., Asvarov A.Sh., Muslimov A.E., Kanevsky V.M. ZnO-based transparent conductive layers obtained by the magnetron sputtering of a composite cermet ZnO:Ga–Zn target: part 2, *Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2021, Vol. 15, pp. 121-127.
15. Sobia Ali Khan, Geun Ho Lee, Chandreswar Mahata, Muhammad Ismail, Hyungjin Kim, Sungjun Kim. Bipolar and Complementary Resistive Switching Characteristics and Neuromorphic System Simulation in a Pt/ZnO/TiN Synaptic Device, *Nanomaterials*, 2021, Vol. 11, pp. 315.
16. Kavindra Kandpal, Jitendra Singh, Navneet Gupta, Chandra Shekhar. Effect of thickness on the properties of ZnO thin films prepared by reactive RF sputtering, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2018, Vol. 29, pp. 14501-14507.
17. Zhiqiang Yu, Jinhao Jia, Xinru Qu, Qingcheng Wang, Wenbo Kang, Baosheng Liu, Qingquan Xiao, Tinghong Gao, Quan Xie. Tunable Resistive Switching Behaviors and Mechanism of the W/ZnO/ITO Memory Cell // *Molecules*. – 2023. – Vol. 28. – P. 5313.
18. Paulina Kaim, Krzysztof Lukaszewicz, Marek Szindler, Magdalena M. Szindler, Marcin Basiaga, Barbara Hajduk. The influence of magnetron sputtering process temperature on ZnO thin-film properties, *Coatings*, 2021, Vol. 11, pp. 1507.
19. Ziyu Lv, Yan Wang, Jingrui Chen, Junjie Wang, Ye Zhou, Su-Ting Han. Semiconductor Quantum Dots for Memories and Neuromorphic Computing Systems, *Chemical Reviews Journal*, 2020, Vol. 120, pp. 3941-4006.
20. Ziyu Lv, Shirui Zhu, Yan Wang, Yanyun Ren, Mingtao Luo, Hanning Wang, Guohua Zhang, Yongbiao Zhai, Shilong Zhao, Ye Zhou, Minghao Jiang, Yan-Bing Leng, Su-Ting Han. Development of Bio-Voltage Operated Humidity-Sensory Neurons Comprising Self-Assembled Peptide Memristors, *Advanced Materials*, 2024, Vol. 36, pp. 2405145.
21. Tominov R.V., Vakulov Z. E., Polupanov N.V., Saenko A.V., Avilov V.I., Ageev O.A., Smirnov V.A. Nanoscale-resistive switching in forming-free zinc oxide memristive structures, *Nanomaterials*, 2022, Vol. 12, pp. 455.
22. Saenko A.V., Vakulov Z.E., Klimin V.S., Bilyk G.E., Malyukov S.P. Effect of Magnetron Sputtering Power on ITO Film Deposition at Room Temperature, *Russian Microelectronics*, 2023, Vol. 23, pp. 297-302.
23. Serb A., Bill J., Khiat A., Berdan R., Legenstein R., Prodromakis T. Unsupervised learning in probabilistic neural networks with multi-state metal-oxide memristive synapses, *Nature communications*, 2016, Vol. 7, pp. 12611.

Саенко Александр Викторович – Южный федеральный университет; e-mail: avsaenko@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел. +78634371767; к.т.н.; доцент.

Козюменко Константин Алексеевич – Южный федеральный университет; e-mail: koziyumenko@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел. +78634371767; лаборант-исследователь.

Шиховцов Иван Андреевич – Южный федеральный университет; e-mail: shihovcov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371767; аспирант.

Томинов Роман Викторович – Южный федеральный университет; e-mail: tominov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371767; к.т.н.; доцент.

Смирнов Владимир Александрович – Южный федеральный университет; e-mail: vasmirnov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел. +78634371767; к.т.н.; зав. кафедрой.

Saenko Aleksandr Viktorovich – Southern Federal University; e-mail: avsaenko@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371767; cand. of eng. sc., associate professor.

Kozyumenko Konstantin Alekseevich – Southern Federal University; e-mail: koziumenko@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371767; research lab assistant.

Shikhovtsov Ivan Andreevich – Southern Federal University; e-mail: shihovcov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371767; postgraduate student.

Tominov Roman Viktorovich – Southern Federal University; e-mail: tominov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371767; cand. of eng. sc., associate professor.

Smirnov Vladimir Aleksandrovich – Southern Federal University; e-mail: vasmirnov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371767; cand. of eng. sc.; head of department.