

## **2.4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР МЕТАЛЛ/ОКСИД/МЕТАЛЛ, ОБЛАДАЮЩИЕ МЕМРИСТОРНЫМ ЭФФЕКТОМ**

Цель работы: измерения многослойных структур металл/оксид/металл, обладающих мемристорным эффектом, проведение электрофизических измерений, в результате которых дается оценка наличия эффекта памяти и переключение в образцах мемристоров из состояния с низким сопротивлением в состояние с высоким сопротивлением, проведение исследования по долговечности работы образцов для циклического режима работы, формулировка рекомендации по перспективным методам синтеза мемристивных структур и их применению.

### **Задание по лабораторной работе**

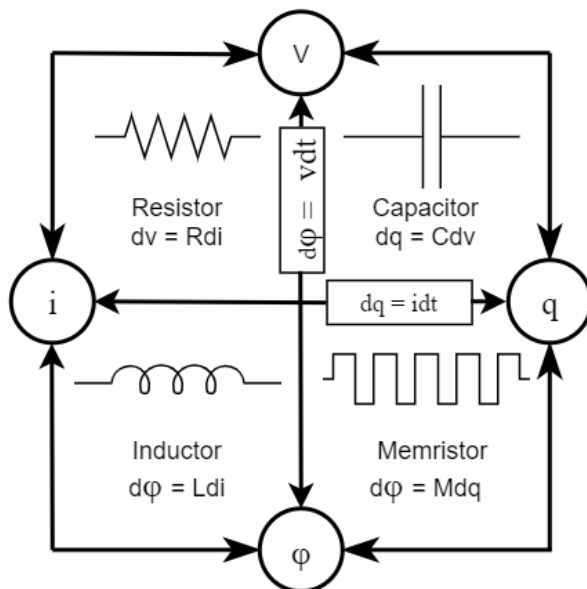
Оценить характеристики структуры типа  $Ag/Al_2O_3/TiO_2/Ag$  в части обладания мемристивным эффектом, провести измерения ВАХ такой структуры. установить, при какой толщине наблюдается мемристивный эффект ( $Al_2O_3$  порядка 10 нм и толщине слоя  $TiO_2$  порядка 50 - 60 нм), при увеличении толщины функционального слоя мемристивный эффект постепенно исчезает и при толщине слоя  $TiO_2$  более 300 нм мемристивный эффект такой структуры полностью отсутствует.

Провести исследования ВАХ мемристивных структур и исследовать структуры на долговечность работы при циклическом переключении. Изучить элементы библиотеки базовых логических элементов на основе мемристивных структур.

### **Теоретическая часть**

Мемристор имеет уникальные свойства, которые заключаются в том, что сопротивление можно запрограммировать (функция резистора) и затем сохранить (функция памяти). В отличие от других запоминающих устройств, существующих сегодня в современной электронике, мемристоры стабильны и запоминают свое состояние даже в том случае, если питание устройства отключено.

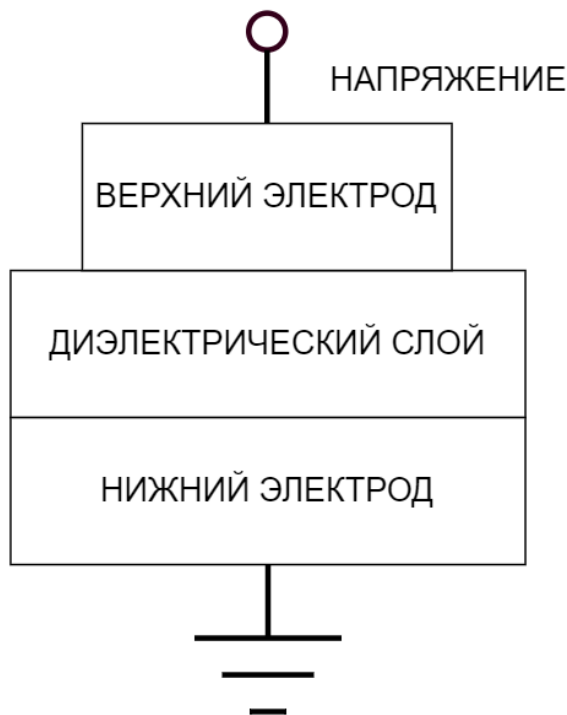
Сегодня большинство компьютеров используют оперативную память (ОЗУ), которая обладает большой скоростью передачи информации, но не сохраняет несохраненные данные при потере питания. Флэш-накопители, с другой стороны, хранят информацию, когда они не работают, но работают намного медленнее. Мемристоры смогли обеспечить память, которая объединяет в себе самое лучшее обоих миров: быстро и надежно.



**Рис. 2.3.6.** Четыре базовых пассивных элемента электрических цепей: резистор, конденсатор, индуктивность и мемристор

Мемристоры имеют несколько уникальных особенностей, которые делают их привлекательными: они требуют меньше энергии для работы и быстрее, чем современные технологии твердотельных накопителей, и они могут хранить, по крайней мере, в два раза больше данных в таком же объеме. Мемристоры практически невосприимчивы к излучению, которое может нарушить транзисторные технологии. Кроме того, мемристоры позволяют включать и выключать компьютеры, подобно обычному выключателю света без необходимости ожидания загрузки или сохранения данных.

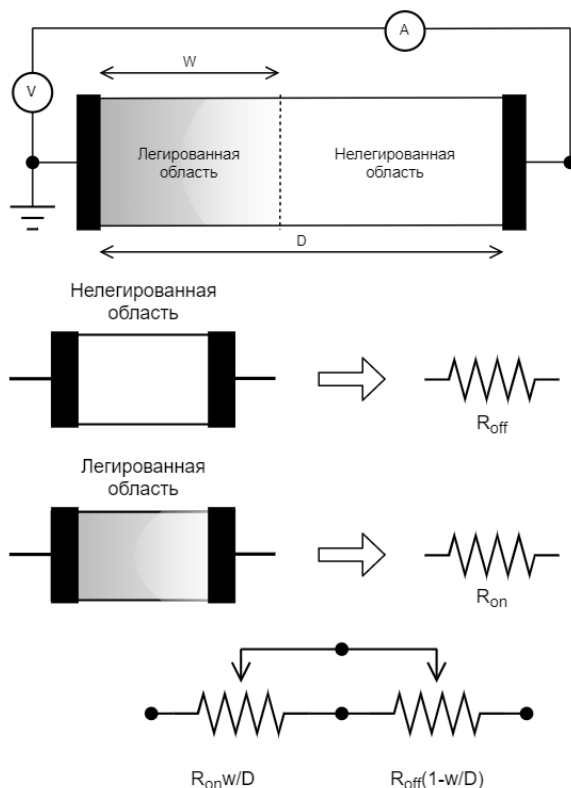
Обратимый эффект изменения проводимости мемристора называют эффектом резистивного переключения. В качестве мемристоров и других структур с эффектом резистивного переключения чаще всего используют структуры металл-диэлектрик-металл (МДМ) (рисунок 2.3.7). Эффект резистивного переключения МДМ-структуры заключается в изменении проводимости диэлектрика на величины до нескольких порядков под действием электрического поля, созданного в диэлектрике.



**Рис. 2.3.6.** Мемристорная МДМ-структура

Существует несколько общепринятых механизмов резистивного переключения и, соответственно, типов мемристоров. Самым распространенным типом мемристора является мемристор с резистивным эффектом, который обусловлен реакцией восстановления/окисления (reduction/oxidation) оксида, используемого в качестве диэлектрика МДМ-структуры мемристора. С одной стороны диэлектрического слоя находится легирующая примесь (положительные ионы) – в области ширины  $w$  (рисунок 2.3.7).

Свойства такого мемристора можно продемонстрировать на основе простой модели. Полное сопротивление рассматриваемого устройства можно представить как сумму сопротивлений двух переменных резисторов, соединенных последовательно (рисунок 2.3.7). Один из резисторов (легирующая область) имеет низкое сопротивление  $R_{ON}$ , другой – намного более высокое сопротивление  $R_{OFF}$ .



**Рис. 2.3.7.** Структура и эквивалентная цепь мемристора

Когда к металлическим контактам прикладывается напряжение, то в диэлектрическом слое происходит реакция восстановления/окисления, в результате которой заряженные ионы кислорода и, соответственно, вакансии кислорода начинают дрейфовать по глубине диэлектрического оксидного слоя. Вакансии кислорода являются ловушками для электронов, по которым происходит перенос заряда от одного металлического электрода к другому, что ведет к смещению границы между двумя областями. Таким образом, в зависимости от концентрации вакансий кислорода и их распределения в оксиде МДМ-структура может находиться в высокоомном (high resistance state – HRS) или низкоомном состоянии (low resistance state – LRS). В рассматриваемой модели зависимость между током и напряжением определяется выражением:

$$v(t) = \left( R_{ON} \frac{\omega(t)}{D} + R_{OFF} \frac{\omega(t)}{D} \right) \cdot i(t)$$

При этом граница смещается по закону:

$$\frac{dw(t)}{dt} = \mu_v \cdot \left(\frac{R_{ON}}{D}\right) \cdot i(t)$$

где  $\mu_v$  – средняя подвижность ионов, а  $D$  – толщина оксидного слоя. Интегрирование дает формулу для  $w$ :

$$w(t) = \mu_v \cdot \left(\frac{R_{ON}}{D}\right) \cdot q(t)$$

Подставляя первое выражение во второе и учитывая, что  $R_{ON} < R_{OFF}$ , получаем выражение для мемристивности:

$$M(q) = R_{OFF} \cdot \left[1 - \left(\mu_v \cdot \frac{R_{ON}}{D^2}\right) \cdot q(t)\right]$$

Во-первых, как и предполагалось в модели Леона Чуа, сопротивление мемристора является функцией заряда  $q$ , т.е. зависит от суммарного заряда, прошедшего через мемристор. Во-вторых, мемристивность резко увеличивается с уменьшением  $D$ . Для любого материала в наномасштабах значение слагаемого, содержащего  $D$ , на порядки выше, чем в микромасштабах.

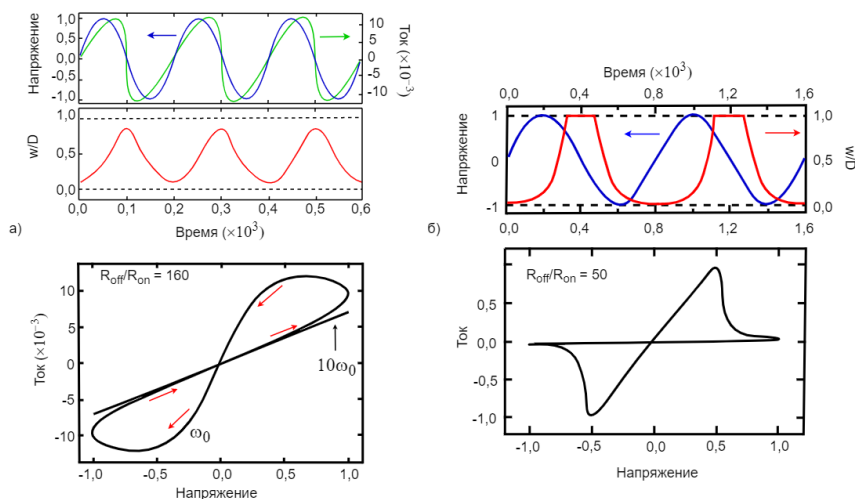
Таким образом, мемристивность становится наиболее важной для понимания характеристик рассматриваемого типа электронных устройств по мере того, как их размеры уменьшаются до нанометровых масштабов, а для достижения стабильного эффекта резистивного переключения необходимо уметь контролировать концентрацию вакансий кислорода в оксидном слое.

Если к мемристору приложено переменное синусоидальное напряжение определенной частоты, его вольт-амперная характеристика принимает вид, напоминающий фигуру Лиссажу с центром в начале координат (рисунок 2.3.8). То есть мемристор, в отличие от резистора, обладает гистерезисом.

С увеличением частоты напряжения гистерезисная кривая вырождается в прямую линию (рисунок 2.3.8а). В реальных системах за счет сильных электрических полей, присутствующих в наномасштабах, проявляются сильные нелинейные эффекты в транспорте ионов, и вид вольт-амперной характеристики изменяется. Например, если умножить правую часть выражения а оконную функцию  $w(1-w)/D^2$ , учитывающую эффекты нелинейности, то на вольт-амперной характеристике мемристора появляются достаточно резкие фронты, соответствующие переходу от состояния с низкой проводимостью к состоянию с высокой проводимостью и обратно (рисунок 2.3.8б).

Подобное поведение мемристора позволяет использовать его в качестве биполярного переключателя: при подаче напряжения противоположной полярности мемристор замыкает или размыкает

проходящую через него цепь. Если же рассматривать ситуацию с точки зрения цифровой электроники, то можно сказать, что мемристор переходит из состояния "0" в состояние "1" и наоборот. Причем это состояние мемристор "запоминает" и может хранить практически неограниченно долго – и для этого ему не требуется источник напряжения.



**Рис. 2.3.8.** Результаты моделирования поведения мемристора: а – на основе модели, описываемой уравнениями (1)–(4); б – при умножении правой части уравнения (2) на оконную функцию  $w(1-w)/D^2$

На сегодняшний день количество диэлектрических материалов, пригодных для создания многослойных структур, проявляющих эффект мемристоривного переключения достаточно разнообразно. В основном, используются такие оксиды переходных материалов, как  $TiO_2$ ,  $HfO_2$ ,  $ZrO_2$ , а также сложные соединения, такие как:  $Ti_aZr_bHf_cO_2(Ti_dZr_eHf_f)_nO_{2n-1}$ ,  $VO_2-V_nO_{2n-1}$ ,  $VaNb_bTa_cO_2-(V_dNb_eTa_f)_nO_{2n-1}$ ,  $Nb_2O_5NbO_2$  и другие, легко интегрируемые в кремниевую технологию. Одним из подходов для улучшения функциональных свойств мемристорив на основе оксидов переходных металлов ( $TiO_2$ ,  $HfO_2$ ,  $ZrO_2$ ) является легирование оксидов трехвалентной примесью, например, Al.

На третьем этапе исследований создана структура, которая переключается при напряжении не более 1,6В и при этом максимальный ток, протекающий через структуру составляет 0,8 мкА, время переключения из состояния  $R_{on}$  в  $R_{off}$  и обратно составляет 10нс. Разработанный стенд для исследований ВАХ мемристоривных структур позволил исследовать структуры на долговечность работы при циклическом переключении. Установлено, что данная мемристоривная структура выдерживает число переключений до  $10^6$  раз без существенного изменения вида ВАХ (площадь петли гистерезиса

колеблется в пределах 10%). Затем площадь петли гистерезиса начинает постепенно уменьшаться таким образом, что к моменту достижения числа переключений  $10^9$  площадь петли гистерезиса уменьшается более чем на 80%, что свидетельствует о постепенной деградации мемристорной структуры. На основе проведенных исследований были предложены методы повышения надежности и долговечности работы мемристорных структур, один из которых защищен патентом. Проведены сравнительные исследования различных мемристорных структур. Результаты представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Сравнительные характеристики некоторых мемристоров

Тип мемристора	Отношение сопротивления $R_{on}/R_{off}$	Время переключения, нс	Максимальное количество циклов переключения
На основе окислов металлов	2000	10	$10^9$
Полимерные	100	25	$10^8$
Сегнетоэлектрические	300	10	$10^{14}$
Спинтронные	5	10	$10^{16}$
Халькогенидные	>1000	50	$10^8$

Как видно из таблицы 2.1 по параметру  $R_{on}/R_{off}$  наиболее высокие показатели у мемристоров на основе окислов металлов, что делает их весьма привлекательными для создания устройств памяти, имеющих не только два состояния «0» и «1», а несколько. То есть теоретически одна мемристорная ячейка памяти может хранить в разы больше информации на той же площади, что и современные ячейки памяти. Мемристоры на основе окислов металлов также имеют наименьшее время переключения из состояния высокого сопротивления в низкое. Однако такие мемристоры выдерживают не более  $10^9$  циклов переключения, что не достаточно. Поэтому необходимо проводить исследования по подбору материалов и архитектуры таких мемристоров.

Полимерные мемристоры на сегодняшний день показывают не самые лучшие характеристики и тут требуется еще много исследований.

Сегнетоэлектрические мемристоры показывают хорошие характеристики и являются хорошими кандидатами для создания ячеек памяти.

Спинтронные мемристоры на сегодняшний день обладают одними из лучших характеристик и также являются хорошими кандидатами для создания ячеек памяти.

Халькогенидные мемристоры обладают не очень высоким быстродействием, тем не менее, они также являются хорошими кандидатами для создания ячеек памяти, не требующих высокого быстродействия.

Поскольку мемристоры на основе оксидов обладают наиболее высокими показателями по ряду параметров, а технология их изготовления достаточно хорошо отработана, проанализируем материалы для их изготовления.

В зависимости от материала, свойства мемристоров могут отличаться. К основным свойствам мемристоров относят рабочие токи и напряжения, размеры устройств, термостабильность, величина шума, свойство изменения фазы и другие. В связи с тем, что эти свойства отличаются, область применения мемристоров может быть различна. В таблице 2.2 представлены рабочие параметры некоторых мемристоров на основе оксидов.

Как видно из таблицы 2.2 наиболее энергоэффективными являются мемристоры на основе диоксида кремния, оксида никеля и оксида железа. Из них, мемристоры на основе оксида железа больше подходят для изготовления аналоговых устройств из-за довольно плавного изменения сопротивления. А мемристоры на основе оксида никеля и диоксида титана больше подходят для цифровых устройств.



Таблица 2.2 – Рабочие параметры некоторых мемристоров на основе оксидов

Тип резистивного слоя	Рабочее напряжение, В	Рабочий ток, мА	Мощность, мкВт	Особенности свойств
Диоксид титана (TiO <sub>2</sub> )	2	0.2	400	Высокое быстродействие, низкий уровень шума. Отношение Ron/Roff ~2000
Диоксид кремния (SiO <sub>2</sub> )	2	0.00025	0,5	Отношение Ron/Roff ~10 <sup>5</sup>
Оксид железа (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1.8	10	18	<ul style="list-style-type: none"> <li>Характерно плавное изменение сопротивления. Больше подходит для аналоговых устройств.</li> </ul>
Оксид никеля (NiO)	1.5	5	7.5	Больше подходит для цифровых устройств из-за особенностей переключения
Оксид ванадия(VO <sub>2</sub> ).	50	6	300	Ron/Roff ~10 <sup>4</sup> Подходит для устройств с многоуровневой логикой
Оксид графита (графена) CO	6	100	600	Высокая термостабильность

В результате исследований отработаны модели неорганических мемристорных структуры с учетом минимизации времени переключения из одного состояния в другое, уменьшения деградации, повышения стабильности и надежности. Это позволило перейти к созданию библиотеки базовых логических элементов на основе мемристивных структур.

### Порядок выполнения практической части

Снятия вольт-амперных характеристик мемристора сложный и трудоемкий процесс. Для его автоматизации предложена конструкция аппаратно-программного комплекса экспериментальных исследований мемристорных структур, функциональная схема которого представлена на рисунке 2.3.9.

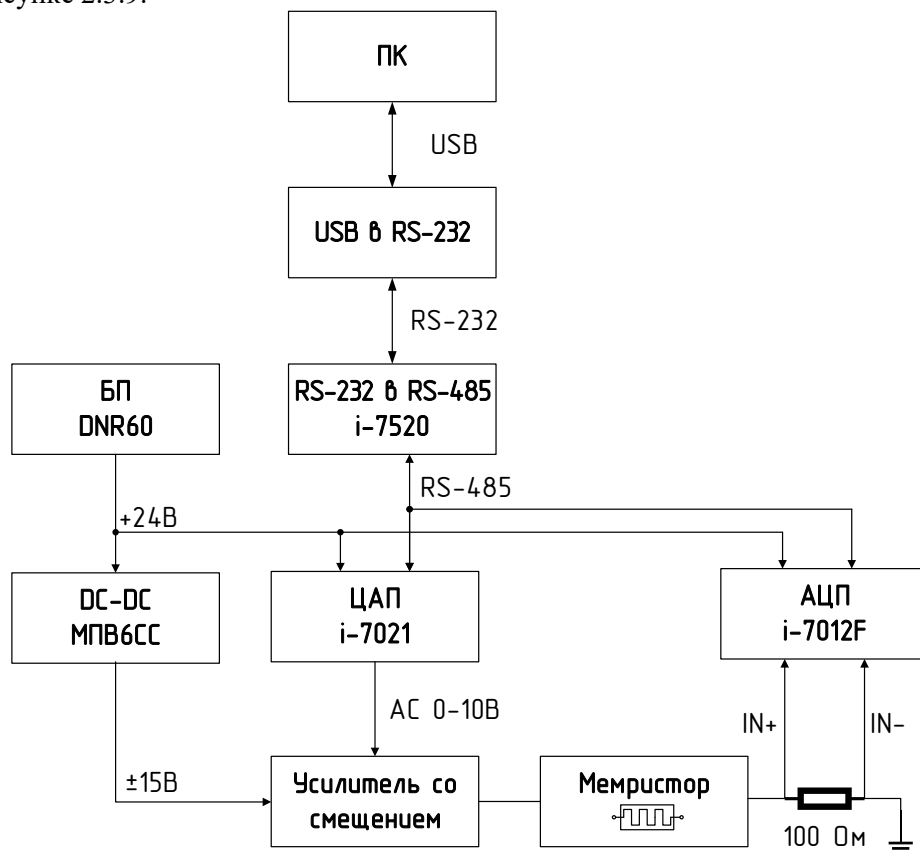


Рис. 2.3.9. Функциональная схема измерительного комплекса

В состав входит: персональный компьютер, интерфейсный кабель USB – RS232, блок питания, конвертер интерфейса RS232 в RS485, ЦАП, АЦП, DC-DC преобразователь, усилитель со смещением, резистор, мемристор.

На персональном компьютере с использованием разработанного программного обеспечения задаются необходимые параметры. К одному из COM-портов ПК подключается интерфейсный кабель, который преобразует интерфейс USB в RS232. Далее установлен преобразователь интерфейса RS232 в RS485 для общения модулей АЦП и ЦАП. Блок питания обеспечивает работу ЦАП и АЦП, также подаёт напряжения на DC-DC

преобразователь, который выдает биполярное питание  $\pm 15\text{В}$ . ЦАП задает сигнал (форму сигнала выбирает пользователь) с амплитудой 0-10 В. Биполярное питание с DC-DC преобразователя и сигнал с ЦАПа попадает на усилитель со смещением, который опускает сигнал в биполярную область. Выходной сигнал попадает непосредственно на мемристор. АЦП преобразует полученную ВАХ мемристора в цифровой сигнал, который через преобразователи интерфейсов попадает на персональный компьютер.

Для подключения блоков ЦАП и АЦП необходим интерфейсный кабель с преобразованием интерфейса USB в RS-232. Исходя из необходимых характеристик, был выбран наиболее подходящий по параметрам цены/качества кабель Orient USB 2.0 – COM(RS-232).

Благодаря микросхеме WCH CH340, использованной в данном кабеле-переходнике, происходит синхронизация между двумя соединенными при помощи этого аксессуара устройствами. Переходник не нуждается в дополнительном источнике питания, так как контроллер получает энергию от USB-порта. Провода кабеля защищены от повреждений и внешних воздействий прозрачной полимерной изоляцией, предотвращающей их перегибы, истирание, контакт с влагой.

Для дальнейшего подключения персонального компьютера необходим преобразователь интерфейсов RS-232 RS-485. Выбран конвертер интерфейсов фирмы ICP DAC модель I-7520.

Большинство промышленных компьютерных систем имеют стандартные последовательные порты RS-232. Несмотря на широкое распространение, RS-232 имеет ограниченную скорость передачи, диапазон и сетевые возможности. Стандарт RS-485 преодолевает эти ограничения за счет использования линий дифференциального напряжения для сигналов данных и управления.

Данный конвертер преобразует сигналы RS-232 в изолированный сигнал RS-485 без необходимости изменения какого-либо оборудования или программного обеспечения.

Для преобразования цифрового сигнала с персонального компьютера в аналоговый сигнал для подачи на мемристор необходим цифро-аналоговый преобразователь. Для этих целей выбран ЦАП фирмы ICP DAC модель I-7021.

Модуль I-7021 – это одноканальный модуль аналогового вывода с 12-битным ЦАП и возможностью выполнения обратного считывания данных. Отличительными особенностями данного модуля являются:

- аналоговые выходы с гальванической развязкой 3000В понятного тока;
- программируемое значение по включении питания для аналогового выхода;
- программируемая скорость изменения выходного сигнала ;
- программная калибровка.

Для обратного преобразования аналогового сигнала в цифровой необходим АЦП. В качестве АЦП выбран модуль фирмы ICP DAC модель I-7012F.

I-7012 - это одноканальный модуль аналогового ввода с функцией оповещения высокого / низкого уровня. Эти модули могут дистанционно управляться набором команд. Общие черты модулей аналогового ввода представлены следующим образом:

- изолированный аналоговый вход;
- 24-битный сигма-дельта АЦП для обеспечения превосходной точности;
- программная калибровка.

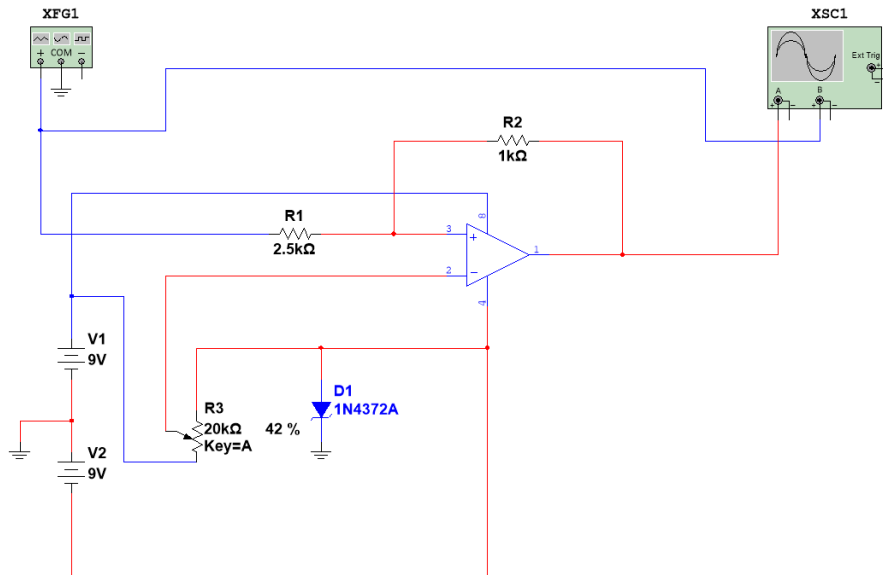
Для обеспечения работоспособности ЦАП и АЦП, а также подачи напряжения для снятия ВАХ мемристора необходим блок питания. Выбран блок питания фирмы XPPower DNR60.

Блоки питания данной фирмы давно зарекомендовали себя на рынке за счет надежности и соотношения цены/качества.

Для задания биполярного питания необходим DC-DC преобразователь с выходом  $\pm 15\text{В}$ . Выбран отечественный преобразователь фирмы ИРБИС модель МПВ6СС.

Данный модуль предназначен для питания напряжением постоянного тока радиоэлектронной аппаратуры. Модуль имеет защиту от перегрузки по току и к. з. по выходу. После снятия перегрузки или к. з. модуль автоматически восстанавливает выходные параметры. Время к. з. не ограничено. Дистанционное выключение внешним сигналом. Конструктивно выполнен в металлическом корпусе, залитым компаундом.

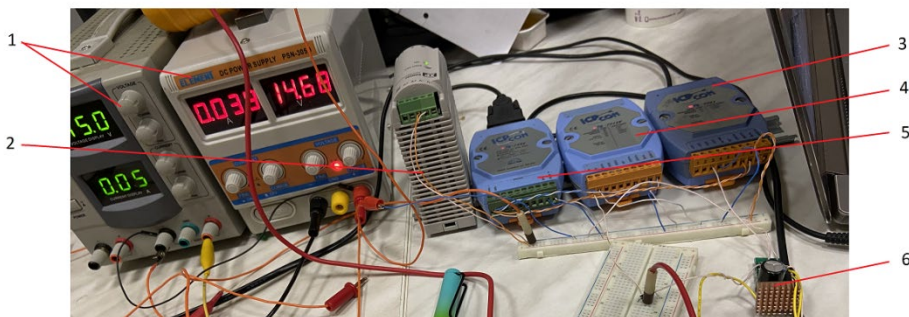
Для снятия ВАХ мемристора необходим биполярный сигнал. Полученный биполярный сигнал с DC-DC преобразователя имеет нижнюю точку амплитуды 0В. Для снятия показания необходимо сместить сигнал в отрицательную область по напряжению. Для этого спроектирован и изготовлен модуль усилителя тока со смещением. Принципиальная схема модуля представлена на рисунке 2.3.10.



**Рис. 2.3.10.** Принципиальная схема усилителя со смещением

В качестве усилителя используется операционный усилитель L272M, имеющий максимальное входное напряжения  $\pm 14\text{В}$  и выход на канал 700 мА. Для задания смещения сигнала по напряжению используется операционный усилитель.

Для снятия вольт-амперных характеристик мемристора собран макет измерительного стенда на основе выбранных компонентов. В качестве биполярного DC-DC преобразователя используется система из двух лабораторных однополярных источников питания. Собранный макет стенда показан на рисунке 2.3.11.



**Рис. 2.3.11.** Структура измерительного стенда

Обозначения:

- 1 – лабораторный однополярный блок питания
- 2 – блок питания
- 3 – аналого-цифровой преобразователь
- 4 – цифро-аналоговый преобразователь
- 5 – преобразователь RS-232 в RS-485
- 6 – усилитель со смещением

Для подключения собранного стенда к контактным площадкам использовалась зондовая станция Signatone s-1160 (рис. 2.3.12), для наилучшего отображения иглы и контактных площадок мемристоры выбрано двукратное увеличение.

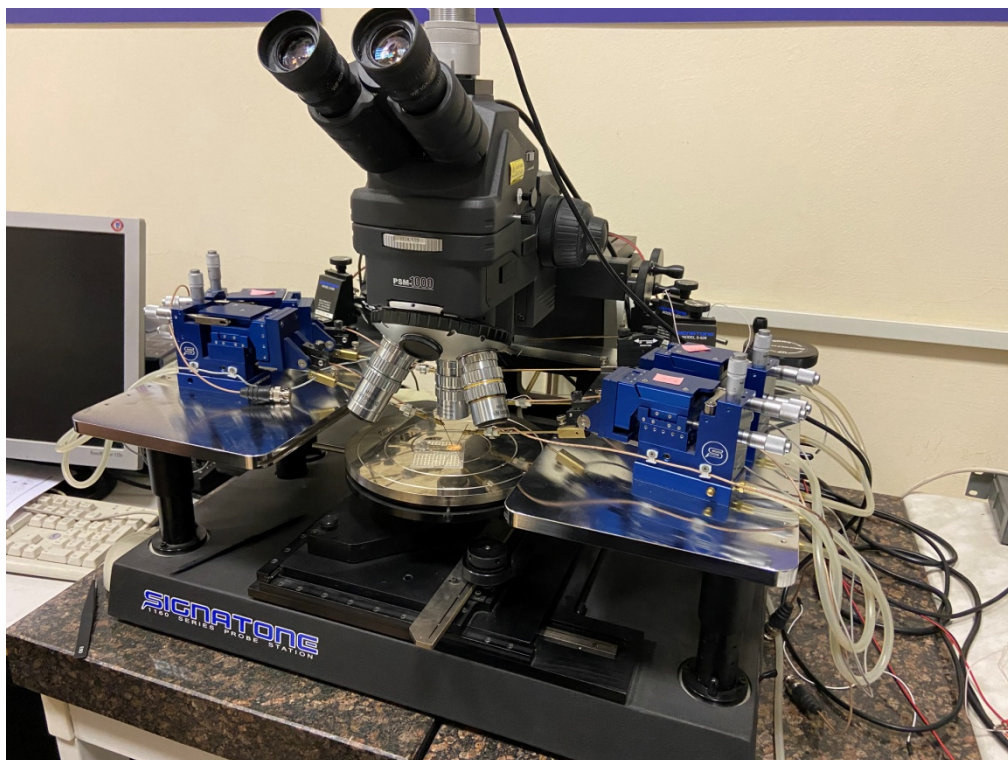
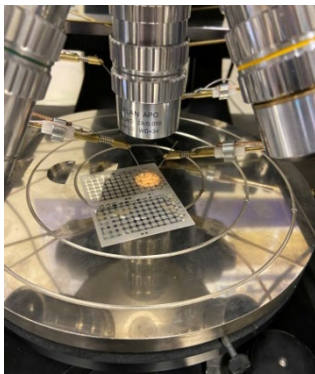


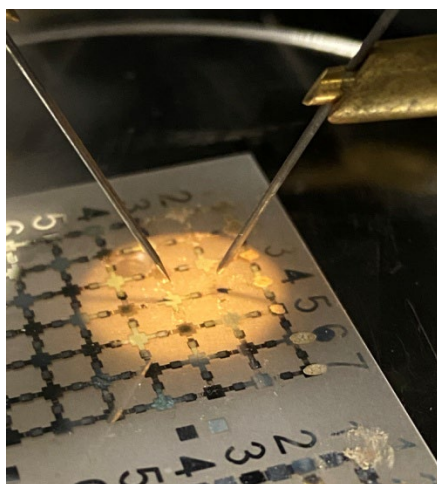
Рис. 2.3.12. Зондовая станция Signatone S-1160

Данная зондовая станция имеет функцию вакуумного прижатия пластин к рабочему столу станции, что облегчает работу с расположенными под микроскопом объектами. Расположение пластины с мемристорами на рабочем столе станции показано на рисунке 2.3.13.



**Рис. 2.3.13.** Расположения пластины с мемристорами на рабочем столе зондовой станции Signatone S-1160

Зондовая станция Signatone S-1160 имеет игольчатые зонды с возможностью ручной подачи зонда. Данная функция облегчает процесс подачи зондов к контактным площадкам мемристора. Так же точная регулировка расстояния зонда по осям сводит к минимуму возможность нарушения целостности контактной площадки. Момент подачи зондов к контактным площадкам показан на рисунке 2.3.14.



**Рис. 2.3.14.** Подача зондов к контактным площадкам мемристора

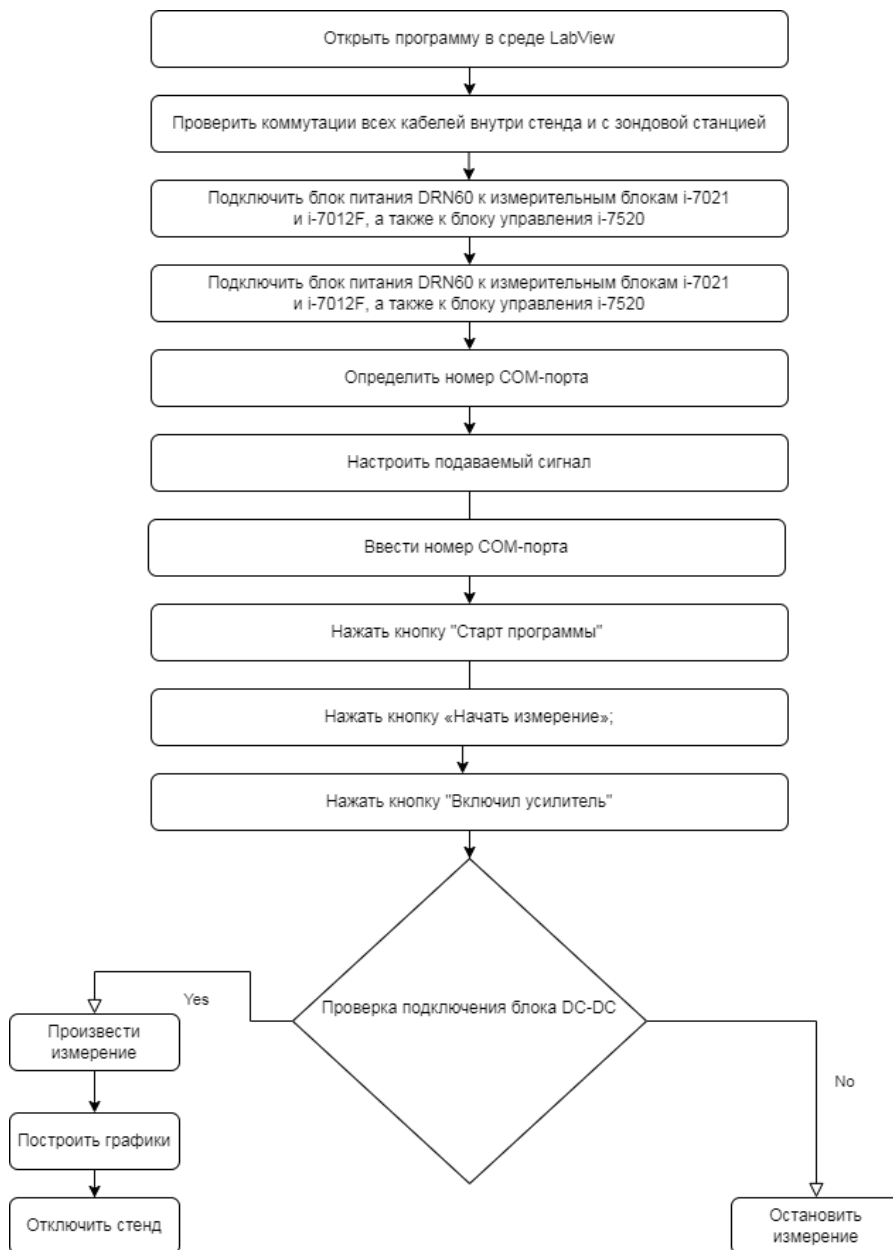
Собранный макет измерительного стенда для снятия вольт-амперных характеристик мемристоров выполняет функции заложенные в нем для получения поставленных задач.

**Порядок проведения эксперимента с использованием автоматизированного стенда**

Для снятия временной диаграммы и построения ВАХ мемристора необходимо проводить измерения через равные отрезки времени. Данное ограничение не позволяет производить снятие в ручном режиме. Решить данную проблему позволяет стенд автоматизированного снятия ВАХ. Работа с которым выполняется по следующим этапам:

- 1) Выполняется открытие программы в среде LabView;
- 2) Производится проверки коммутации всех кабелей внутри стенда и с зондовой станцией;
- 3) Выполняется подключение блока питания DRN60 к измерительным блокам i-7021 и i-7012F, а также к блоку управления i-7520;
- 4) Производится подключение стенда к компьютеру;
- 5) В диспетчере устройств в разделе «Порты (COM и LPT)» необходимо узнать номер COM-порта
- 6) Производится настройка подаваемого сигнала, а именно задается частота (рекомендуется 0,001 Гц), амплитуда сигнала (рекомендуется 2-8 В.), постоянный сигнал (в связи с постоянной подставкой усилителя необходимо выставить 5 В.), количество пародов (рекомендуется 1-3). Выбирается вид сигнала ползунком. Также необходимо ввести номер COM-порта, полученного на предыдущем шаге, цифрой и имя файла, в который будут сохранены результаты измерений (например «C:\Users\Kirill\Desktop\Test.txt»);
- 7) Выполняется старт программы в верхней док-панели;
- 8) Нажимается кнопка «Начать измерение»;
- 9) Производится подключение DC-DC преобразователя к блоку питания;
- 10) Производится подтверждение подключения блока DC-DC кнопкой «Включил усилитель» после чего в окнах «Измерение» и «Номер отчета» можно контролировать производимое измерение. В случае явной ошибки в измерениях существует возможность экстренной остановки измерений кнопкой «Остановить измерения»;
- 11) По окончании измерения в окнах «ВАХ» и «Измеренный сигнал» появятся графики с данными, полученными в ходе эксперимента;
- 12) После проведения эксперимента следует отключить блок DC-DC преобразователя от блока питания, затем отключить измерительные блоки от блока питания. В конце осуществить отключение стенда от компьютера и блока питания от сети.





**Рис. 2.3.15.** Алгоритм измерения характеристик мемристора с использованием автоматизированного стенда

В случае необходимости повторного измерения следует выполнять пункты 6 – 11 за исключением пункта 7. На рисунке 2.3.16 представлен результат измерения мемристора.

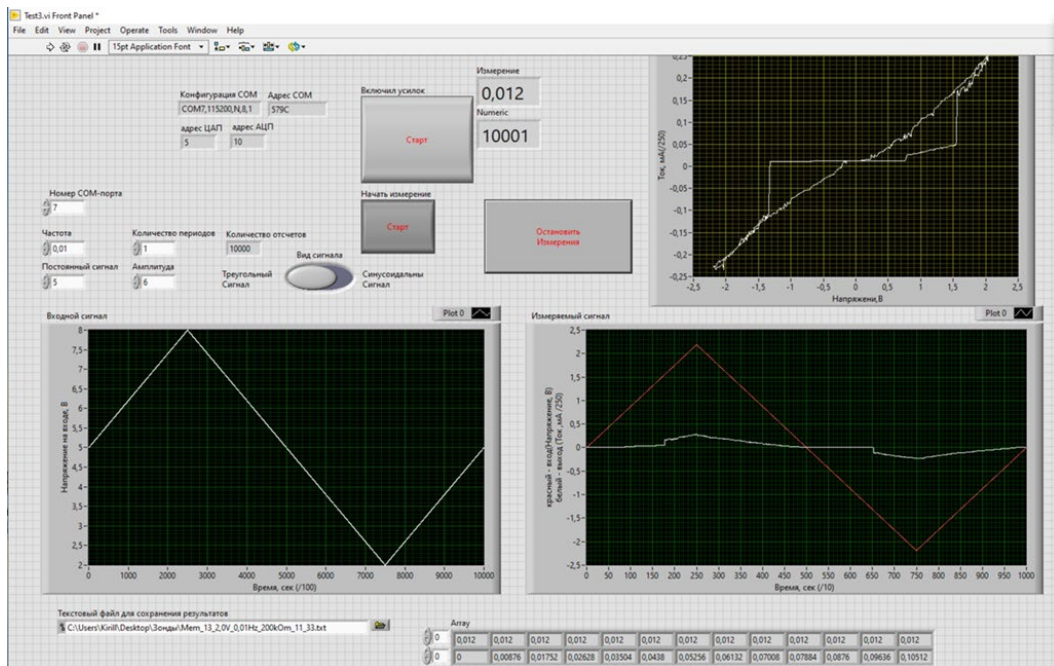


Рис. 2.3.16. Результаты работы программы комплекса

Следует отметить, что полученные графики являются представлением сырых данных и подходят только для оценки корректности измерений. Для получения более точных данных требуется дополнительная обработка значений из файла измерения в сторонних программах.

После получения данных измерений была произведена последующая обработка результатов в программе Excel. Был произведен пересчет снятого падения напряжения в ток, протекающий через образец мемристора. Результаты обработки представлены на рисунке 2.3.17-2.3.18.

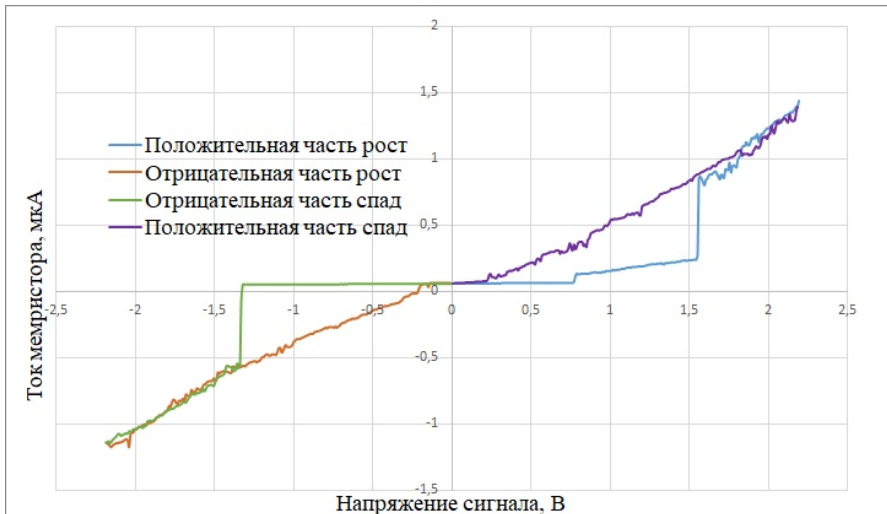


Рис. 2.3.17. График ВАХ мемристора

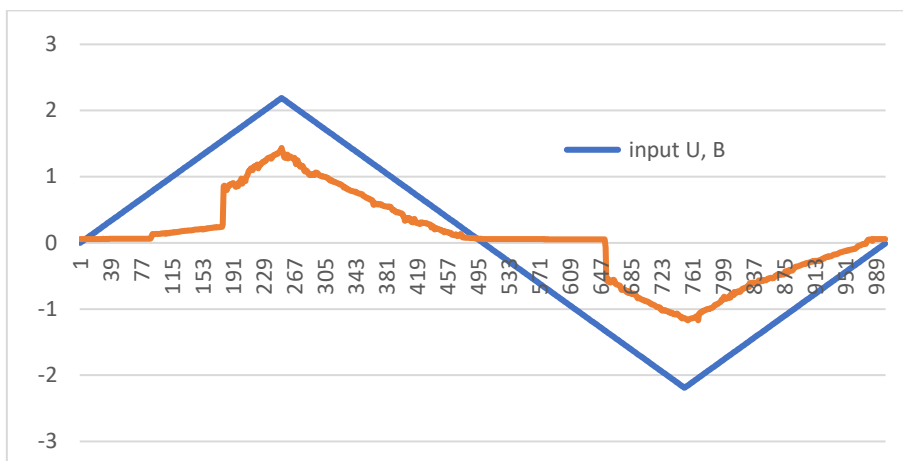


Рис. 2.3.18. График изменения тока во временной области

Как видно из полученных графиков измеряемый образец имеет четкий гистерезис, что позволяет судить о присутствии мемристивных свойств. Следует отметить, что измеряемые мемристоры имеют униполярное переключение и разрушение мемристивного канала происходит при снижении напряжения ниже порогового. При подаче отрицательного напряжения происходит формирование канала во встречном направлении.

Проведенные измерения позволяют судить о присутствии мемристивных свойств у измеряемых образцов. Как видно из графика ВАХ на рис. 2.3.18 при подаче положительного напряжения до величины 0,75В ток через мемристор составляет 0,06 мкА и мемристор находится в высокоомном состоянии. При достижении напряжения 0,75В происходит скачок тока до величины 0,11

мкА, что обусловлено пробоем тонкого функционального слоя  $Al_2O_3$ . В диапазоне напряжений от 0,75В до 1,6В мемристор ведет себя как обычный резистор, что подтверждается линейным видом ВАХ на этом участке и ток через мемристор постепенно увеличивается до 0,4 мкА. Переключение мемристора происходит при напряжении 1,6 В при этом ток, проходящий через мемристорную структуру резко увеличивается с 0,4 мкА до 0,8 мкА, что является следствием переключения мемристора в низкоомное состояние. При дальнейшем увеличении напряжения на мемристоре его сопротивление не меняется, т.к. вид графика представляет на этом участке практически линейную функцию, такую же как и у обычного резистора. При уменьшении прямого напряжения до нуля сопротивление мемристора также практически не меняется. При смене полярности подключения мемристора, то есть при обратном напряжении, сопротивление мемристора не меняется до достижения напряжения  $-1,3$  В. А при напряжении  $-1,3$  В происходит очень быстрое переключение мемристора в состояние высокого сопротивления и ток, проходящий через мемристор резко уменьшается до 0,06 мкА. Таким образом, переключение мемристора в низкоомное состояние происходит при положительном напряжении 1,6В, а переключение обратно в высокоомное состояние происходит при напряжении 1,3В. Несимметричность переключения, по-видимому, связана с несимметричностью самой архитектуры мемристора.

Для того, чтобы подробно исследовать изменение тока во времени через мемристор, на него подавалось двуполярное пилообразное напряжение и снималось значение тока, проходящего через мемристор рис. 2.16. Величины изменения тока на рис.2.16 соответствуют величинам токов при переключении мемристора из высокоомного состояния и обратно на рис.2.15. Таким образом, экспериментально установлены рабочие напряжения для переключения мемристора - это 1,6 В для переключения в низкоомное состояние и  $-1,3$  В для переключения в высокоомное состояние. Ток, проходящий через мемристор в высокоомном состоянии составляет 0,06 мкА, в низкоомном состоянии 0,8 мкА.

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Структура измерительного стенда.
3. Графики ВАХ образцов.
4. Анализ результатов измерений.

**Контрольные вопросы**

1. В чем заключается мемристивный эффект?
2. Охарактеризуйте ВАХ мемристора?
3. Охарактеризуйте области применения мемристора?
4. Как оценить долговечность мемристора?