

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Измерение и анализ электрофизических характеристик мемристорных структур

Учебно-методическое пособие

Предназначается для бакалавров, магистров и аспирантов, выполняющих научную работу и обучающихся по направлениям подготовки 11.03.04 – “Электроника и наноэлектроника”, 28.03.01 – “Нанотехнологии и микроэлектроника”, 11.04.04 – “Электроника и наноэлектроника” и 11.06.01 – “Электроника, радиотехника и системы связи”

Нижний Новгород
2015 г.

УДК 621.382(075.8)

ББК 32.85я73

И-37

Измерение и анализ электрофизических характеристик мемристорных структур: учебно-методическое пособие / О.Н. Горшков, С.В. Тихов, М.Н. Коряжкина, Е.В. Окулич, А.П. Касаткин, И.Н. Антонов. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2015. – 31 с.

Рецензент: д.ф.-м.н. В.Г. Шенгуров

Целью учебно-методического пособия является освоение методики измерения и анализа электрофизических характеристик современных приборных структур микроэлектроники и наноэлектроники – мемристорных структур металл-диэлектрик-металл.

Учебно-методическое пособие предназначено для бакалавров, магистров и аспирантов, выполняющих научную работу и обучающихся по направлениям подготовки 11.03.04 – “Электроника и наноэлектроника”, 28.03.01 – “Нанотехнологии и микроэлектроника”, 11.04.04 – “Электроника и наноэлектроника” и 11.06.01 – “Электроника, радиотехника и системы связи”.

.

Ответственный за выпуск:
председатель методической комиссии
физического факультета ННГУ, к.ф.-м.н., доцент Сдобняков В.В.

УДК 621.382(075.8)

ББК 32.85я73

© Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского, 2015

Содержание

Определения, обозначения и сокращения	4
Введение.....	5
1. Развитие представлений о мемристорных структурах.....	6
2. Резистивное переключение в мемристорных структурах.....	9
3. Температурные зависимости свойств мемристорных структур	14
4. Миграция ионов кислорода в мемристорных структурах	16
5. Резистивное переключение в мемристорных структурах с наночастицами золота.....	22
Заключение	28
Список используемой литературы	29

Определения, обозначения и сокращения

В настоящем учебно-методическом пособии применяют следующие термины с соответствующими определениями и сокращения:

ВЧ – высокочастотное;

ВАХ – вольт-амперная характеристика;

СДЦ – стабилизированный диоксид циркония;

НЧ – наночастицы;

МДМ – металл-диэлектрик-металл;

ИС – исходное состояние;

СНС – состояние с низким сопротивлением;

СВС – состояние с высоким сопротивлением;

РП – резистивное переключение;

МДП – металл-диэлектрик-полупроводник;

ВФХ – вольт-фарадная характеристика.

Введение

Стандартные курсы лекций и лабораторных работ для бакалавров, магистров и аспирантов, выполняющих научную работу и обучающихся по направлениям подготовки 11.03.04 – “Электроника и наноэлектроника”, 28.03.01 – “Нанотехнологии и микроэлектроника”, 11.04.04 – “Электроника и наноэлектроника” и 11.06.01 – “Электроника, радиотехника и системы связи”, связаны с измерением и анализом электрофизических характеристик важнейших приборных структур микроэлектроники и наноэлектроники на основе р-п-перехода, барьера Шоттки и структур металл-диэлектрик-полупроводник.

Вместе с этим происходит дальнейшее развитие микроэлектроники и наноэлектроники. Одно из новых направлений этого развития связано с созданием устройств энергонезависимой памяти нового поколения. На сегодняшний день наибольший интерес вызывают устройства резистивной памяти с произвольным доступом (англ.: Resistive Random Access Memory – RRAM), элементами которых являются так называемые мемристорные структуры (англ.: memory+resistor=memristor), наряду с устройствами сегнетоэлектрической (англ.: Ferroelectric) и магниторезистивной (англ.: Magnetic) памяти с произвольным доступом (FRAM и MRAM, соответственно), а также устройства памяти с изменением фазового состояния вещества (англ.: Phase Change Memory – PCM) [1-8].

Поэтому бакалавры, магистры и аспиранты, выполняющие научную работу и обучающиеся по направлениям подготовки 11.03.04 – “Электроника и наноэлектроника”, 28.03.01 – “Нанотехнологии и микроэлектроника”, 11.04.04 – “Электроника и наноэлектроника” и 11.06.01 – “Электроника, радиотехника и системы связи”, наряду с изучением стандартных приборных структур микроэлектроники и наноэлектроники должны иметь представление и о новых направлениях развития в рассматриваемых областях. В связи с этим данное учебно-методическое пособие посвящено измерению и анализу электрофизических характеристик мемристорных структур.

В разделе 1 рассмотрено развитие представлений о мемристорных структурах.

В разделе 2 рассмотрены особенности эффекта многократного биполярного резистивного переключения в сформированных с помощью метода магнетронного осаждения структурах Au/Zr/СДЦ/TiN, где СДЦ – стабилизированный диоксид циркония (12 мол. % Y_2O_3).

В разделе 3 приведены зависимости свойств мемристорных структур, рассмотренных в разделе 2, от температуры в интервале 77 ÷ 490 К.

В разделе 4 показан анализ вольтамперных характеристик мемристорных структур на основе СДЦ, проявляющих резистивное переключение. Показано, что в процессе измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) исходных структур в плёнках СДЦ возникали заряды,

поле которых влияло на вид ВАХ и которые связывались с диффузией ионов (вакансий) кислорода. На основе анализа ВАХ выполнена оценка коэффициента диффузии этих вакансий.

В разделе 5 показано, что мемристорные структуры на основе СДЦ с наночастицами золота проявляют нелинейные свойства: адмиттанс таких структур оказывается зависящим от амплитуды управляющего напряжения, частоты тестирующего сигнала и температуры. Нелинейность обусловлена явлениями захвата электронов ловушками, образованными в процессе формирования наночастиц. Установлена возможность определения параметров ловушек путём измерения адмиттанса структур.

1. Развитие представлений о мемристорных структурах

Мемристорные структуры проявляют ВАХ с отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС) N-типа (рис. 1).

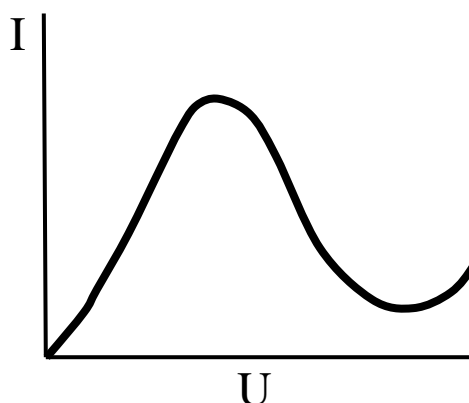


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика с отрицательным дифференциальным сопротивлением N-типа

ВАХ такого типа проявляют структуры металл-диэлектрик-металл (МДМ) после так называемого процесса формовки. В МДМ-структуре можно вызвать радикальные и практически постоянные изменения электрических свойств, если приложить напряжение больше некоторого минимального напряжения U_{ϕ} . Этот процесс и называется формовкой, а U_{ϕ} — напряжением формовки.

На рис. 2 изображены две ВАХ МДМ-структуры на основе SiO: до и после формовки [9].

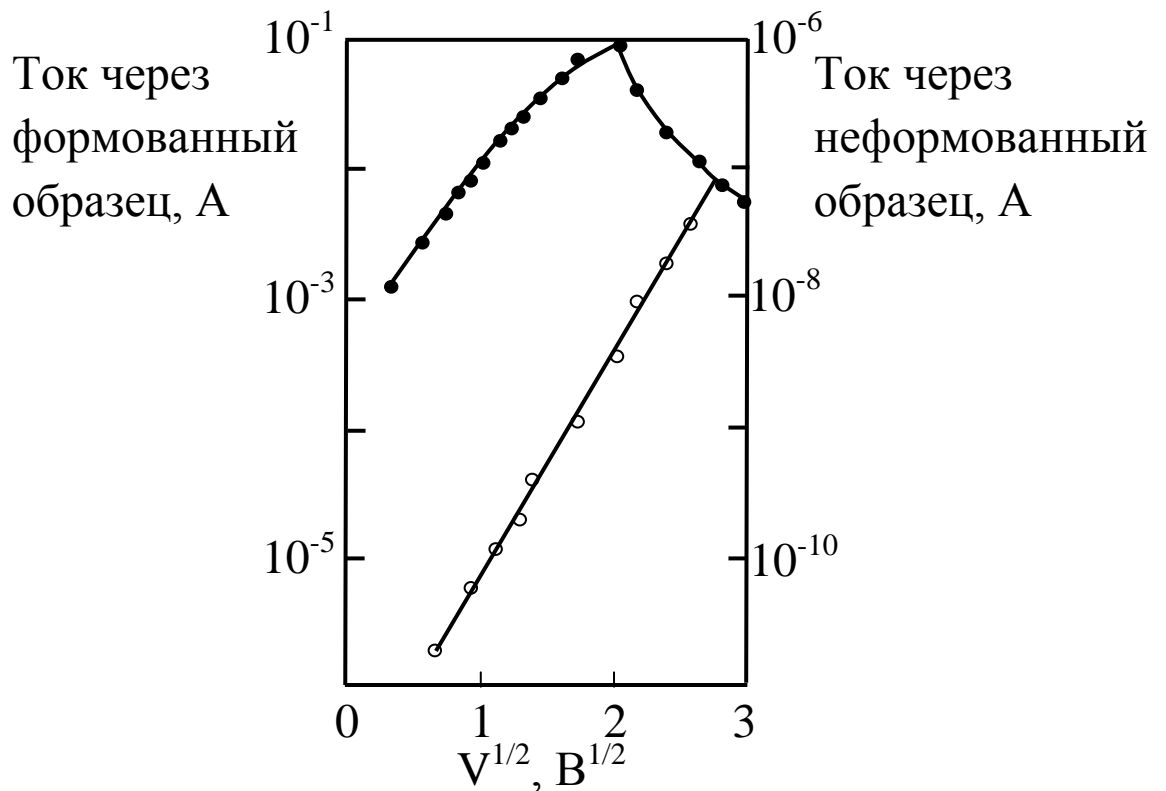


Рис. 2. Зависимость тока от корня напряжения для неформованной (\circ) и формованной (\bullet) МДМ-структуры на основе SiO толщиной 40 нм

Можно достичь различных состояний памяти в структуре, если приложить напряжение $U > U_{\max}$ (U_{\max} – напряжение, при котором верхняя кривая на рис. 2 имеет максимум) и затем быстро его снять. В случае SiO это необходимо сделать за время меньше 10^{-4} с. Тогда проводимость структуры определяется напряжением перед его выключением. Сказанное иллюстрируется рис. 3. Новая ВАХ практически неизменна и является свойством изолятора, если только напряжение не превышает $U_{\text{пор}}$, которое значительно ниже, чем U_{\max} . Верхняя кривая на этом рисунке соответствует состоянию с низким сопротивлением (СНС), а нижняя – состоянию с высоким сопротивлением (СВС). Переход из одного состояния в другое называется эффектом резистивного переключения (РП), а состояния СНС и СВС – двумя состояниями резистивной памяти МДМ-структуры. Поскольку переключение из одного состояния в другое осуществляется при одной и той же полярности напряжения, такое переключение называется униполярным. Если переключение из СНС в СВС и обратно осуществляется при напряжениях разной полярности, то такое РП называется биполярным.

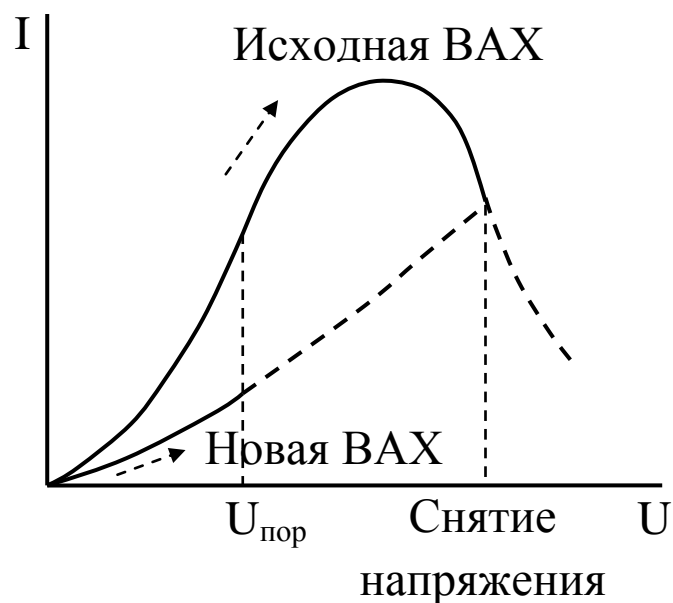


Рис. 3. Состояние с низким сопротивлением и состояние с высоким сопротивлением, которые могут существовать до порогового напряжения $U_{\text{пор}}$ в формованной мемристорной структуре. Пунктирными стрелками показано направление развёртки по напряжению

Первые работы по наблюдению мемристивных эффектов в МДМ-структурах выполнены в СССР в 1960 г [10]. В этой работе изучалась проводимость структуры $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ag}$. Наблюдались ВАХ с максимумом. Такие характеристики более детально были исследованы в работе [11], а результаты, полученные в этом направлении за первое десятилетие, опубликованы в обзоре [9].

В последнее время эффекты РП и памяти в диэлектрических материалах интенсивно изучаются в связи как с происходящими в этих материалах фундаментальными явлениями, так и с ожидаемыми практическими применениями этих эффектов, в том числе для создания устройств энергонезависимой памяти нового поколения – резистивной памяти с произвольным доступом (англ.: Resistive Random Access Memory – RRAM) [6-8]. При этом наиболее перспективным с точки зрения технологического потенциала считается выбор в качестве материала диэлектрика оксидов переходных металлов, проявляющих биполярное РП в результате формирования и разрыва проводящих шнуров в процессе редокс-реакций – реакций восстановления-окисления (англ.: reduction+oxidation= redox). Таким наиболее активно изучаемым оксидом, совместимым с технологией интегральных схем на основе комплементарных структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП), наряду с HfO_x и TaO_x [6], является также ZrO_x [7, 8]. В работе [12] приведены данные по биполярному РП в сформированных методом магнетронного осаждения МДМ-структурах на основе двухслойного диэлектрика, состоящего из слоя СДЦ и слоя GeO_x . Преимущества использования в таких структурах СДЦ вместо ZrO_x связаны с тем, что в плёнке СДЦ содержание стабилизирующего оксида определяет

концентрацию вакансий кислорода, ионную проводимость и скорость процессов восстановления-окисления в ней, которые являются ответственными за распределение электрического поля в плёнке и её электронную проводимость. Последние, в свою очередь, определяют характеристики РП.

Настоящее учебно-методическое пособие посвящено измерениям и анализу электрофизических характеристик мемристорных структур на основе СДЦ.

2. Резистивное переключение в мемристорных структурах

В настоящем разделе рассмотрены особенности эффекта многократного биполярного РП в сформированных с помощью метода магнетронного осаждения структурах Au/Zr/СДЦ/TiN.

Формирование структур Au/Zr/СДЦ/TiN методом магнетронного осаждения было выполнено, используя подложки SiO₂/Si с базовым электродом TiN/Ti. На этот электрод осаждался слой СДЦ методом высокочастотного (ВЧ) магнетронного распыления при температуре 300 °С. На поверхность слоя оксида осаждались верхние электроды из Au площадью $S=8.2 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ (с подслоем из Zr для улучшения адгезии на границе раздела верхний электрод-оксид и с целью понижения работы выхода верхнего электрода) методом магнетронного распыления на постоянном токе. Толщины слоёв составляли: 25 нм (Ti), 25 нм (TiN), 40 нм (СДЦ), в интервале 3 ÷ 5 нм (Zr) и 40 нм (Au). Проводились тестовые испытания на деградацию параметров резистивного переключения при многократных переключениях и измерялись электрофизические характеристики, в том числе, ВАХ, зависимости дифференциальной ёмкости $C_{p(s)}$ и проводимости $G_{p(s)}$ структур (при нулевом напряжении смещения) от частоты f , из которых были получены аналогичные зависимости сопротивления $R_{p(s)}=G_{p(s)}^{-1}$, в параллельной (индекс p) и последовательной (индекс s) эквивалентных схемах замещения конденсатора [13] в интервале частот $f=10^3 \div 10^6$ Гц, в автоматическом режиме с помощью анализатора параметров полупроводниковых приборов Agilent B1500A. Напряжение на структуре соответствовало потенциалу верхнего электрода относительно потенциала базового электрода. Измерения проводились в воздушной атмосфере, если иное не оговорено специально.

Полученное методом просвечивающей электронной микроскопии изображение поперечного сечения одной из структур показывает, что плёнка является поликристаллической [14]. Шероховатость плёнки СДЦ на границе с верхним электродом является более значительной в отличие от таковой на противоположной стороне оксидной плёнки, что обусловлено поликристаллическостью этой плёнки. Использование в подобных структурах таких плёнок в отличие от аморфных плёнок ZrO₂-Y₂O₃ [15] представляется более целесообразным в связи с тем, что в аморфных плёнках в отличие от поликристаллических плёнок (со стабилизированными в кубической фазе

кристаллитами) возможно протекание фазовых переходов в процессе РП, которые могут привести к нестабильным характеристикам мемристорных структур на основе таких плёнок.

На рис. 4 приведены полученные при комнатной температуре ВАХ исследуемых структур, которые описывают процессы формовки (кривая 1) и биполярное РП структуры из СНС в СВС (кривая 2) и из СВС в СНС (кривая 3).

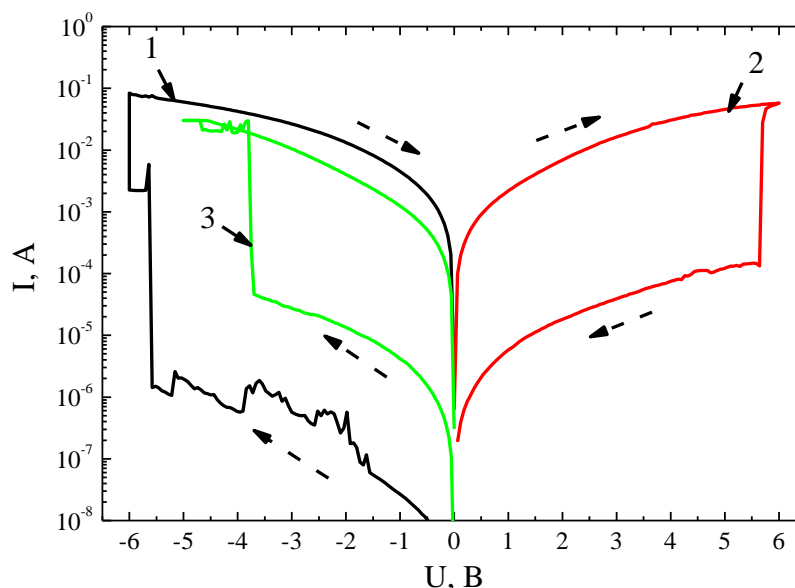


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики структуры Au/Zr/СДЦ/TiN, описывающие процессы формовки (кривая 1) и биполярное резистивное переключение структуры из СНС в СВС (кривая 2) и из СВС в СНС (кривая 3), полученные при комнатной температуре и скорости развёртки по напряжению $u=1.4$ В/с. Пунктирными стрелками показано направление развёртки по напряжению

Работа выхода электрона из Zr равна 4.05 эВ, из Au – 5.1 эВ [16] и из TiN – 4.5 эВ [17]. Поэтому наличие подслоя Zr в структуре существенно снижает работу выхода электрона из верхнего электрода. Поскольку работа выхода электрона из Zr меньше работы выхода из TiN, то инжекция электрона из верхнего электрода в оксид должна происходить существенно интенсивнее по сравнению с таковой из базового электрода при одном и том же напряжении. В связи с этим формовка (без ограничения тока) была проведена в процессе приложения к структурам отрицательного напряжения. В результате формовки структуры переходят в СНС. Последующее приложение к структурам положительного напряжения переводит их из СНС в СВС (reset процесс, происходящий при U_{reset}) (кривая 2 на рис. 4). Обратный переход из СВС в СНС происходит при возрастании величины напряжения при $U < 0$ (set процесс, происходящий при U_{set}) (кривая 3 на рис. 4). Таким образом, изучаемое биполярное РП относится к типу, обозначенному в [18] как а “counter-figure of-eight”.

С целью характеристики механизмов проводимости в СВС и СНС ВАХ, приведённые на рис. 4, представлены на рис. 5 в двойном

логарифмическом масштабе. Эти зависимости демонстрируют значения тангенса угла наклона, совпадающие при $U < 0$ и $U > 0$ и равные 1.0 в СВС и СНС в области низких величин U и 1.9 в СВС и 2.1 в СНС в области высоких величин U . Переход от области низких величин U к области высоких значений U происходит практически при одних и тех же величинах U при $U < 0$ и $U > 0$ (~0.7 В в СВС и ~1.1 В в СНС). Таким образом, как для $U > 0$, так и для $U < 0$ при возрастании величины напряжения на структуре эти характеристики вначале имеют характер, близкий к омическому, а при дальнейшем росте величины напряжения наблюдается зависимость $I \sim U^n$ с $n \sim 2$, связываемая с механизмом токов, ограниченных пространственным зарядом (ТОПЗ).

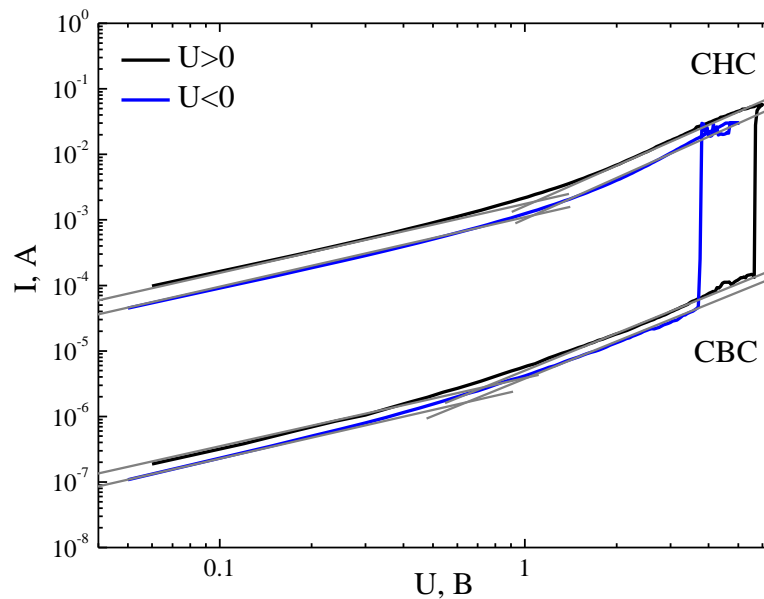


Рис. 5. Зависимость тока в СВС и СНС от напряжения в двойных логарифмических координатах

Малосигнальные измерения адмиттанса [13, 19] при нулевом напряжении смещения на структуре были использованы для определения значений диэлектрической проницаемости (ϵ_1, ϵ_2) (определяемых по величине ёмкости, измеряемой в параллельной схеме замещения конденсатора), тангенса угла диэлектрических потерь ($tg\delta_1, tg\delta_2$) и сопротивлений ($R_{p1}, R_{p2}, R_{s1}, R_{s1s}$), где индекс 1 относится к частоте 1 кГц, а индекс 2 – к частоте 100 кГц. Параметры, относящиеся к параллельной схеме замещения, определяются процессами в оксиде, а параметры, относящиеся к последовательной схеме замещения, определяются сопротивлением металла обкладок и переходной области между оксидом и обкладками. В таблице 1 приведены указанные параметры для исследуемых структур, находящихся в исходном состоянии (ИС), СНС и СВС при комнатной температуре.

Таблица 1 – Характеристики исследуемых структур в ИС, СНС и СВС, полученные по малосигнальным измерениям адмиттанса в параллельной и последовательной схемах замещения конденсатора.

Состояние структуры	ε_1	ε_2	$tg\delta_1$	$tg\delta_2$	R_{p1} , Ом	R_{p2} , Ом	R_{s1} , Ом	R_{s2} , Ом
ИС	23	22	$2.64 \cdot 10^{-2}$	$8.87 \cdot 10^{-2}$	$1.46 \cdot 10^6$	$4.58 \cdot 10^3$	$1.02 \cdot 10^3$	35.8
СНС	21	19	70.0	$8.21 \cdot 10^{-1}$	611	552	611	222
СВС	22	21	$3.47 \cdot 10^{-1}$	$9.09 \cdot 10^{-2}$	$1.13 \cdot 10^5$	$4.53 \cdot 10^3$	$1.21 \cdot 10^4$	37.1

Приведённые в таблице данные показывают, что значения диэлектрической проницаемости СДЦ соответствуют известным литературным данным для этого материала [20]. Это означает, что сопротивление электродов в исследуемых структурах является достаточно низким. Отметим, что значение диэлектрической проницаемости плёнок СДЦ практически не изменяется при переходе из ИС в СНС, что свидетельствует о формировании проводящих шнуров в этих плёнках в процессе формовки, которые определяют высокие диэлектрические потери. Уменьшение диэлектрических потерь в СНС почти на два порядка при изменении частоты от 1 кГц к 100 кГц может быть связано с прыжковым характером проводимости в проводящих шнурах.

На рис. 6 приведена зависимость тока через структуры Au/Zr/СДЦ/TiN в СВС и СНС при комнатной температуре от числа циклов импульсных переключений, из которой следует, что структуры проявляют высокую устойчивость к деградации резистивного переключения при многократных переключениях. Из ВАХ структур следует, что время переключения как в set-процессе, так и в reset-процессе меньше времени между двумя последовательными измерениями значений тока (3.7 мс). Таким образом, отношение сопротивлений в СВС и СНС в процессе циклических резистивных переключений существенно не меняется при числе переключений $\sim 10^3$ даже при таких достаточно высоких значениях длительности импульсов (120 мс) и энергии, затрачиваемой на переключения в одном цикле (~ 0.8 мДж).

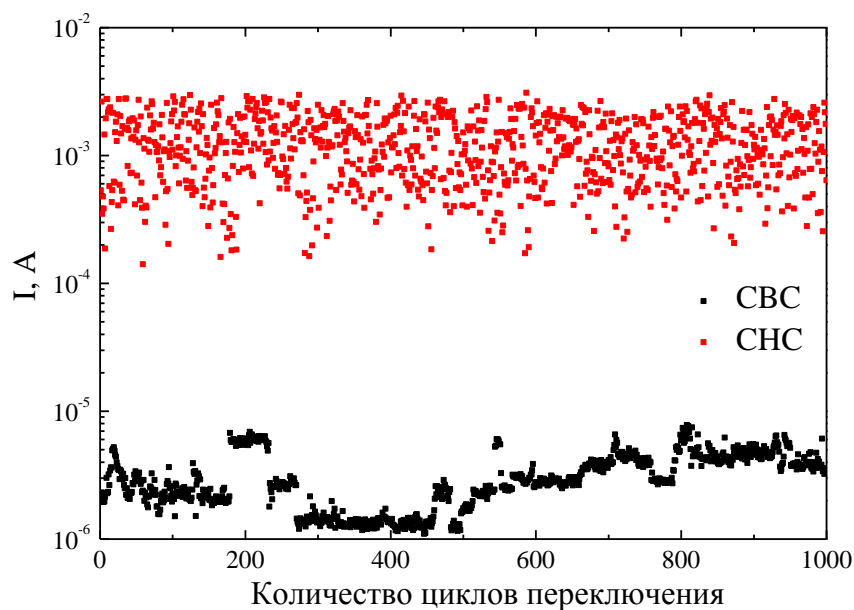


Рис. 6. Зависимость тока через структуры Au/Zr/СДЦ/TiN в CBC и CHC при комнатной температуре от числа циклов импульсных переключений (амплитуда импульсов переключения ± 5 В, длительность импульсов переключения 120 мс, амплитуда импульсов считывания 0.5 В)

Следует отметить, что изучаемые структуры Au/Zr/СДЦ/TiN в отличие от аналогичных структур на основе SiO_x [21] проявляли эффект резистивного переключения в вакууме (рис. 7), причём напряжения переключения уменьшились с +4.5 В на воздухе до +3.5 В в вакууме при одинаковой амплитуде развертки ± 5 В.

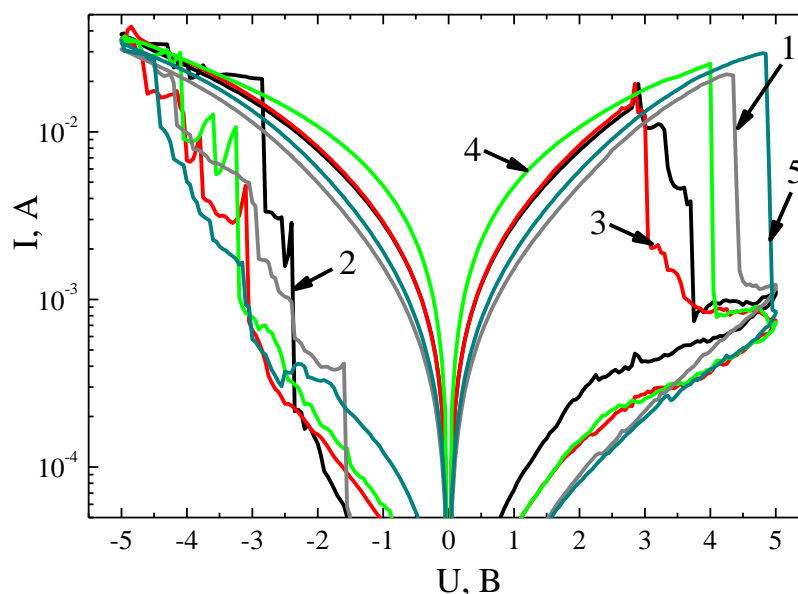


Рис. 7. Вольт-амперные характеристики структуры Au/Zr/СДЦ/TiN, измеренные при комнатной температуре и скорости развёртки по напряжению $u=0.41$ В/с на воздухе (кривая 1), в вакууме с давлением Р, торр: $3.6 \cdot 10^{-2}$ (кривая 2), $4.0 \cdot 10^{-2}$ (кривая 3), $4.5 \cdot 10^{-2}$ (кривая 4) и после напуска воздуха (кривая 5)

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы об эффекте биполярного резистивного переключения в структурах Au/Zr/СДЦ/TiN. Данные ПЭМ свидетельствуют о том, что шероховатость плёнки СДЦ на границе с верхним электродом является значительной. Поэтому на границе раздела верхний электрод-плёнка СДЦ формируются концентраторы электрического поля в виде пирамид, наличие которых способствует возникновению проводящих шнуров в процессе формовки при отрицательном напряжении на структуре, так как в этом случае такие шнуры возникают именно на этой границе раздела. Формированию таких шнуров на этой границе раздела способствует достаточно низкая работа выхода электрона из Zr (4.05 эВ). Кроме того, следует учитывать тот факт, что сродство к электрону в СДЦ составляет 2.65 эВ [14]. Поэтому α -зона, находящаяся ниже дна зоны проводимости YSZ на 1.5 эВ [22], отстоит от уровня вакуума на 4.15 эВ, то есть находится ниже уровня Ферми в Zr. Это означает, что при термодинамическом равновесии в структуре электроны из Zr будут инжектированы в α -зону YSZ, что также должно облегчать формирование проводящих шнуров при отрицательном напряжении на структуре. Формирование таких шнуров при переходе из ИС в СНС экспериментально подтверждается тем, что значение диэлектрической проницаемости плёнок YSZ практически не изменяется при резком возрастании тока и диэлектрических потерь. Следует отметить, что, наряду с облегчённой формовкой при отрицательном напряжении на структуре, set процесс, происходящий тоже при таких же напряжениях, также является облегчённым по сравнению с reset процессом (см. рис. 4). Уменьшение диэлектрических потерь в СНС при увеличении частоты, может быть связано с прыжковым характером проводимости электронов в α -зоне в проводящих шнурах при достаточно низкой концентрации электронов. Поскольку проводящие шнуры начинают формироваться в процессе формовки на границе раздела верхний электрод-плёнка СДЦ, то поведение сформированных шнуров при положительном напряжении должно быть различным вблизи этой границы раздела и у базового электрода: по-видимому, следует считать, что наиболее подверженной разрыву в reset-процессе будут слабо сформированные части шнуров, находящиеся у базового электрода.

3. Температурные зависимости свойств мемристорных структур

В настоящем разделе исследованы структуры Au/Zr/СДЦ/TiN, рассмотренные в разделе 2. Приведены результаты измерений электрофизических характеристик мемристорных структур в интервале температур 77 ÷ 490 К. Обнаружено снижение эффективности резистивного переключения структур при повышенных температурах.

Измерялись ВАХ в интервале температур $T=77 \div 490$ К с помощью анализатора параметров полупроводниковых приборов Agilent B1500A.

Напряжение на структуре соответствовало потенциалу верхнего электрода относительно потенциала базового электрода. Измерения проводились в воздушной атмосфере.

Стойкость параметров резистивного переключения к пониженным и повышенным температурам была изучена по результатам измерения ВАХ в интервале температур $T=77 \div 490$ К. На рис. 8 приведены ВАХ исследуемых структур, полученные при разных температурах.

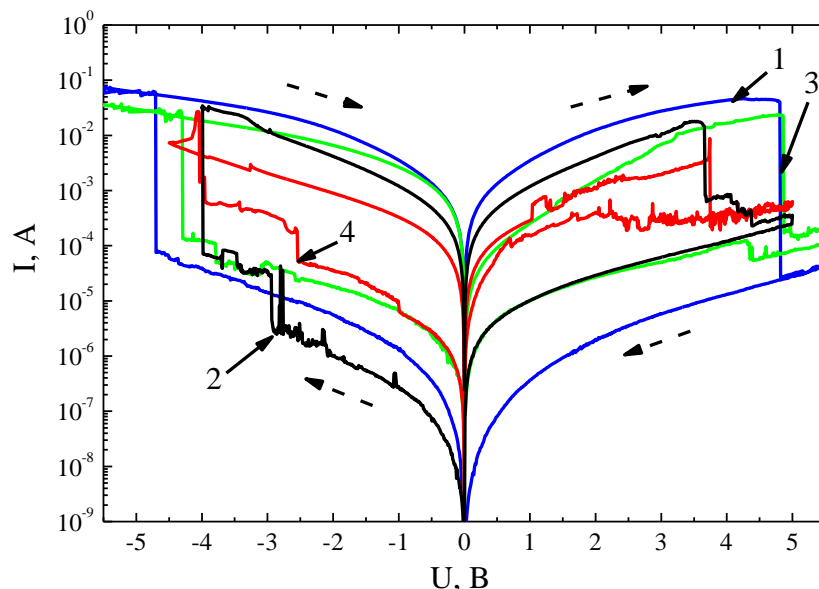


Рис. 8. Вольт-амперные характеристики структуры Au/Zr/СДЦ/TiN, измеренные при скорости развёртки по напряжению $u=3.0$ В/с при температуре T , К: 77 (1); 300 (2); 375 (3); 490 (4). Пунктирными стрелками показано направление развёртки по напряжению

Напряжения переключения U_{set} и U_{reset} для исследуемых структур зависят от приложенной температуры и лежат в интервалах $-0.8 \div -5.3$ В и $3.7 \div 6.0$ В, соответственно (см. рис. 8). При повышении температуры, начиная с некоторого её значения T_c , происходит резкое снижение эффективности переключения, которое характеризуется тем, что величины тока в СВС и СНС сближаются, то есть отношение сопротивлений $R_{\text{СВС}}/R_{\text{СНС}}$ уменьшается при всех рассматриваемых напряжениях на структуре. Важным фактором, определяющим уменьшение отношения сопротивлений $R_{\text{СВС}}/R_{\text{СНС}}$ с повышением температуры является активационный характер роста тока в СВС. Соответствующее значение энергии активации при $T > T_c = 313$ К, полученное из зависимостей логарифма тока при $U=0.5$ В от обратной температуры, составляет 80 мэВ.

Погрешность определения отношения $R_{\text{СВС}}/R_{\text{СНС}}$ определялась разбросом экспериментальных значений, полученных из зависимости токов в СНС и СВС при комнатной температуре от числа циклов импульсных переключений в области, в которой отношение $R_{\text{СВС}}/R_{\text{СНС}}$ стабилизируется. Указанный разброс определяется стохастической природой образования и

разрушения проводящих шнуров в оксидных материалах и составляет порядка 10% от среднего значения.

Механизм обнаруженного снижения эффективности биполярного резистивного переключения структур Au/Zr/СДЦ/TiN при повышенных температурах является в настоящее время неясным и требует отдельного изучения.

Таким образом, показано, что изготовленные методом магнетронного распыления МДМ-структуры на основе оксида с высокой анионной проводимостью, каким является СДЦ, проявляют многократные биполярные резистивные переключения не только в области комнатных температур, но и в широкой температурной области.

4. Миграция ионов кислорода в мемристорных структурах

В настоящем разделе показан анализ вольтамперных характеристик МДМ-структур на основе СДЦ, проявляющих резистивное переключение. Показано, что в процессе измерения ВАХ исходных структур в плёнках СДЦ возникали заряды, поле которых влияло на вид ВАХ и которые связывались с диффузией ионов (вакансий) кислорода. На основе анализа ВАХ выполнена оценка коэффициента диффузии этих вакансий.

Формирование структур Au/СДЦ/Cr методом магнетронного осаждения было выполнено, используя подложки SiO₂/Si с базовым электродом Cr [23]. На этот электрод осаждался слой СДЦ методом ВЧ-магнетронного распыления при температуре 300 °С. На поверхность слоя оксида методом магнетронного распыления на постоянном токе осаждались верхние электроды из Au, которые покрывались SiO₂. Площадь полученных структур $S=3.24 \cdot 10^{-3}$ см². Толщины слоёв составляли: 50 нм (Cr), 40 нм (СДЦ) и 40 нм (Au). Измерялись ВАХ с помощью анализатора параметров полупроводниковых приборов Agilent B1500A. Напряжение на структуре соответствовало потенциалу верхнего электрода относительно потенциала базового электрода. Измерения проводились в воздушной атмосфере.

На рис. 9 представлены ВАХ одной из исследуемых структур, демонстрирующие процесс формовки и биполярное РП [24].

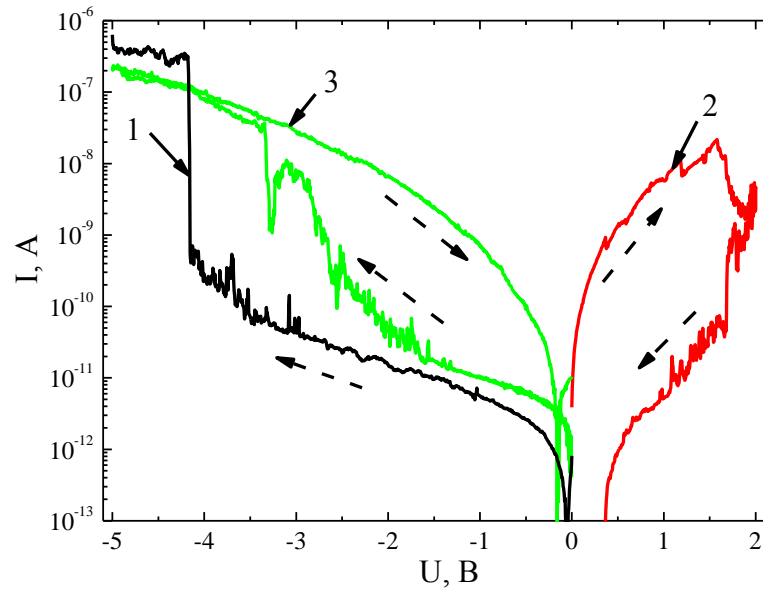


Рис. 9. Вольт-амперные характеристики структуры Au/СДЦ/Сr, демонстрирующие процесс формовки (кривая 1) (при ограничении тока 1 мкА) и биполярное резистивное переключение структуры из СНС в СВС (кривая 2), а также обратный процесс переключения – из СВС в СНС (кривая 3). Пунктирными стрелками показано направление развёртки по напряжению

На рис. 10 приведены ВАХ одной из исходных структур, измеряемые последовательно одна за другой при напряжениях, не превышающих напряжения формовки, со скоростью развёртки по напряжению 31 мВ/с. Время измерения каждой из кривых 1-4 составляет 96 с. Интервалом времени между измерениями ВАХ можно было пренебречь.

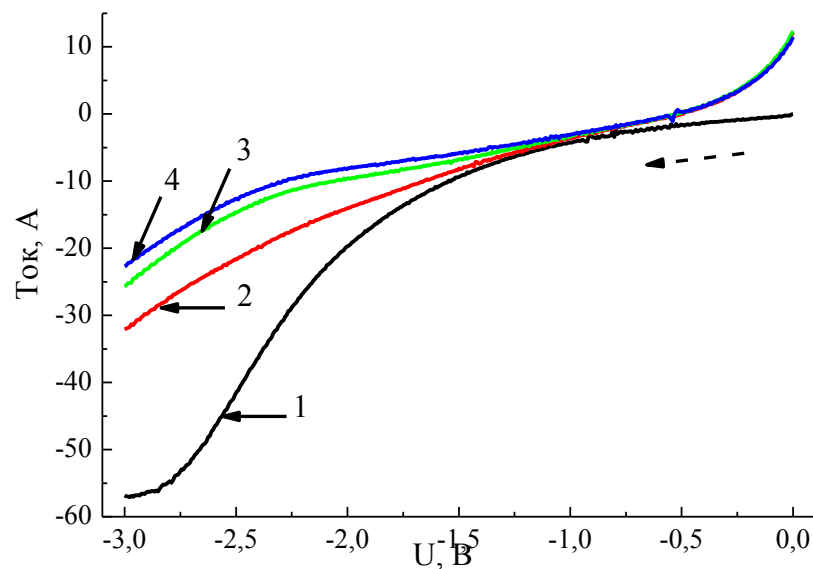


Рис. 10. Вольт-амперные характеристики структуры Au/СДЦ/Сr, измеряемые последовательно одна за другой до формовки со скоростью развёртки 31 мВ/с. Пунктирной стрелкой показано направление развёртки по напряжению

Эти вольт-амперные характеристики имели следующие особенности. Кривые 2-4 (рис. 10) при напряжении, близком к 0 В, описывают ток, направление которого не соответствует знаку приложенного напряжения. Кроме того, величина токов для кривых 2, 3, 4 при напряжении ~ -3 В убывает с ростом номера кривых. Оба эти эффекта свидетельствуют о возникновении зарядов в диэлектрике в процессе проведения измерений. Однако каждый из этих эффектов соответствует возникновению зарядов разного типа. Действительно, первый эффект является более быстрым и одинаково проявляется на кривых 2, 3, 4. Второй же эффект на этих кривых при $U \sim -3$ В проявляет тенденцию к насыщению при формировании заряда.

Первый эффект может быть связан с захватом электронов на ловушки в диэлектрике (в частности, на дефекты, связанные с вакансиями и дивакансиями кислорода [25, 26]) или на границах раздела. Оценка показывает, что концентрация этих ловушек N_t в диэлектрике составляет $7.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Второй эффект мы связываем с диффузией ионов кислорода к границе раздела СДЦ/Сг (вакансий кислорода к границе раздела Au/СДЦ). Наблюдаемый эффект насыщения может быть объяснён следующим образом. Кривая 1 на рис. 10, которая в рассматриваемой области напряжений практически совпадает с кривой 1 на рис. 9, описывалась классической диодной теорией, учитывающей термоэлектронную эмиссию и снижение барьера под действием сил изображения (эффект Шоттки) (величина барьера ~ 1 эВ). В процессе измерения кривой 1 (рис. 10) электрическое воздействие на структуру привело к увеличению концентрации вакансий кислорода вблизи верхнего электрода и её уменьшению вблизи нижнего электрода. Поэтому при измерении кривой 2 (рис. 10) электронный ток уменьшился. Дополнительное электрическое воздействие на структуру при измерении этой кривой привело к дальнейшему уменьшению электронного тока при измерении кривой 3 на рис. 10, обусловленному той же причиной. Однако при измерении кривых 3 и 4 электронные токи совпадали практически при всех напряжениях. Это означает, что при измерении этих кривых распределение ионов (вакансий) кислорода не менялось, то есть диффузионный поток этих ионов (вакансий) становился равным по величине их потоку, обусловленному электрическим полем. Это условие было использовано при оценке значения коэффициента диффузии вакансий кислорода.

В выражении для ионного тока (далее считаем, что ионный ток обусловлен вакансиями кислорода) слагаемые, пропорциональные градиенту энергии ионов в узлах решётки и градиенту температуры, считались пренебрежимо малыми. В одномерном случае учитывались лишь слагаемые, пропорциональные градиенту концентрации вакансий кислорода (диффузионная компонента (j_d) тока вдоль оси x) и градиенту потенциала

(дрейфовая компонента (j_f) тока вдоль оси x) [25]. В этом приближении плотность ионного тока:

$$j = j_f + j_d, \quad (1)$$

где:

$$j_d = -q \cdot D \cdot \frac{dN}{dx} \quad (2)$$

(D – коэффициент диффузии вакансий, $q = 2|e|$ – заряд вакансий (e – заряд электрона), N – концентрация вакансий кислорода) и:

$$j_f = \sigma \cdot E, \quad (3)$$

$\sigma = q \cdot \mu \cdot N$ – удельная проводимость (μ – подвижность вакансий), $E = -\frac{d\varphi}{dx}$ – x -компонента напряженности электрического поля (φ – потенциал).

Используем также соотношение Нернста - Эйнштейна:

$$\frac{D}{kT} = \frac{\mu}{q}, \quad (4)$$

уравнение непрерывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial j}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

и уравнение Пуассона:

$$\frac{d^2 \varphi}{dx^2} = -\frac{4\pi}{\varepsilon} \rho, \quad (6)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость СДЦ, $\rho = \rho_i + \rho_e$, причём плотность заряда ионов $\rho_i = q \cdot \Delta N$, $\Delta N = N - N_0$ (N_0 – равновесное значение N), ρ_e – плотность заряда электронов. Вклад в ρ_e обусловлен как ловушками электронов (далее считаем, что имеются однородно распределенные по объёму ловушки с приведённой выше концентрацией), так и подвижными электронами. Полагаем, что электронная проводимость YSZ обусловлена электронами в α -зоне с подвижностью $\sim 1 \text{ см}^2 \cdot (\text{В} \cdot \text{с})^{-1}$ [27]. Поэтому при наблюдаемой плотности тока $\sim 10^{-6} \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$ концентрация электронов проводимости составляет $\sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$, то есть является пренебрежимо малой по сравнению с концентрацией ловушек, и в плотности заряда не учитывается.

Из условия равенства диффузионного потока вакансий и их потока, обусловленного электрическим полем, получим, что распределение вакансий является равновесным и зависит от времени лишь через напряжение на структуре. Из приведенных уравнений после линеаризации для заданного значения напряжения следует уравнение:

$$\frac{d^2 \Delta N}{dx^2} - \frac{q \cdot N_0}{kT} \cdot \left(\frac{4\pi \rho_i}{\varepsilon} - \frac{4\pi \rho_e}{2\varepsilon} \right). \quad (7)$$

Уравнение (7) решалось при следующих условиях. Во-первых, использовалось условие равенства нулю полного заряда вакансий, которое справедливо, если не учитывать перезарядку ионов кислорода вблизи границ раздела оксид-электрод. При этом условии:

$$N(x) = N_0 + \Delta N(x) = N_0 \left(1 + A \cdot e^{\alpha \cdot \left(\frac{x}{d} - 1 \right)} + \left(-\frac{N_e}{2N_0} \cdot \frac{\alpha}{1 - e^{-\alpha}} - A \right) \cdot e^{-\alpha \cdot \frac{x}{d}} + \frac{N_e}{2N_0} \right), \quad (8)$$

где d – толщина плёнки СДЦ, $\alpha = \sqrt{\frac{4\pi q^2 \cdot N_0 \cdot d^2}{\varepsilon \cdot k \cdot T}}$. Константа A определялась напряжением на структуре.

Оценка коэффициента диффузии вакансий проводилась следующим образом. Учитывалось, что до напряжения 0.50 В идёт компенсация тока, вызванного электрическим полем ловушек, после чего начинал возникать избыток вакансий вблизи верхнего электрода и их недостаток вблизи нижнего электрода. Поэтому усреднение действия поля на вакансии при изменении напряжения от -0.50 до -3 В проводилось посредством выбора среднего значения напряжения ($\bar{U}=1.75$ В). Поскольку на рис. 10 кривые 3 и 4 практически совпадают, то полагаем, что равенство диффузионного потока вакансий и их потока, обусловленного электрическим полем происходит после измерения кривой 2. Поэтому полное время действия поля $\Delta t=192$ с.

С помощью соотношения (8) можно показать, что величина заряда вакансий на единицу поверхности вблизи электродов равна $A \cdot d/\alpha$. Поэтому отсюда можно определить подвижность вакансий, а затем из соотношения (4) – значение коэффициента диффузии, которое оказалось равным $1.3 \cdot 10^{-19}$ см²/с. Следует отметить, что значение ионного тока, соответствующее этой величине коэффициента диффузии, является малым по сравнению с наблюдаемыми величинами тока. Это означает, что, как и предполагалось, измеряемые ВАХ обусловлены в основном электронным током.

Сравним значения коэффициента диффузии вакансий кислорода в плёнках и в объёмных монокристаллах СДЦ. Коэффициент диффузии вакансий кислорода в объёмных монокристаллах СДЦ определяют, как правило, из импедансных измерений [25]. На рис. 11 приведены полученные из таких измерений зависимости удельного сопротивления объёмных монокристаллов СДЦ, обусловленного вакансиями кислорода, от обратной абсолютной температуры.

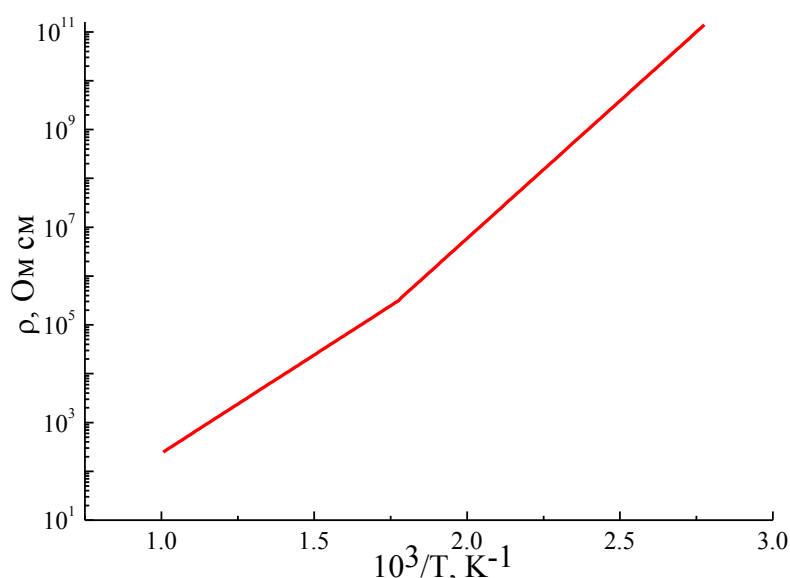


Рис. 11. Зависимость удельного сопротивления объёмных монокристаллов YSZ, обусловленного вакансиями кислорода, от обратной абсолютной температуры

Зависимость описывает данные полученные для объёмных монокристаллов СДЦ, изготовленных методом прямого высокочастотного плавления в холодном тигле в Институте общей физики РАН [26]. Энергия активации подвижности вакансий кислорода по этим данным равна 1.1 эВ. Вопросы диффузии ионов кислорода в таких монокристаллах обсуждаются также в [28]. Аппроксимация этих данных к комнатной температуре приводит к коэффициенту диффузии вакансий, равному $5.1 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. Таким образом, полученная выше оценка коэффициента диффузии вакансий кислорода в плёнках СДЦ даёт значение, близкое к величине коэффициента диффузии этих вакансий в объёмных монокристаллах СДЦ.

Полученные данные о коэффициенте диффузии позволяют:

1. Описать миграцию ионов кислорода в сильных электрических полях в МДМ-структурах на основе плёнок СДЦ.
2. Оценить такие параметры как максвелловское время релаксации этих ионов, определяющее частотные характеристики структур и изменение распределения этих ионов при воздействии на структуры электрических импульсов.
3. Выяснить влияние диффузии ионов кислорода на наблюдаемое в таких структурах явление формовки.

Отметим, что предложенная методика определения коэффициента диффузии вакансий кислорода в плёнках справедлива, когда электроды химически не взаимодействуют с ионами кислорода или приложенные напряжения и скорости развёртки по напряжению достаточно малы, чтобы можно было не учитывать перезарядку ионов кислорода вблизи границ раздела оксид-электрод.

5. Резистивное переключение в мемристорных структурах с наночастицами золота

В настоящем разделе показано, что мемристоры на основе стабилизированного диоксида циркония с наночастицами золота проявляют нелинейные свойства: адмиттанс таких структур оказывается зависящим от амплитуды управляющего напряжения, частоты тестирующего сигнала и температуры. Нелинейность обусловлена явлениями захвата электронов ловушками, образованными в процессе формирования наночастиц. Установлена возможность определения параметров ловушек путём измерения адмиттанса структур.

Формирование структур Au/Zr/СДЦ с НЧ Au/TiN методом магнетронного осаждения было выполнено, с использованием подложек SiO₂/Si с базовым электродом TiN/Ti [14]. На этот электрод осаждался слой СДЦ методом ВЧ-магнетронного распыления при температуре 300 °С. Создавались два типа структур: с прослойкой НЧ Au в СДЦ и без неё. В первом случае с помощью метода ВЧ-магнетронного распыления посередине слоёв СДЦ встраивалась металлическая прослойка Au с эффективной толщиной в 1 нм при температуре подложки 200 °С, а далее для формирования НЧ Au вся структура отжигалась при температуре 450 °С в течение 2 минут в атмосфере Ar. Структуры без прослойки Au использовались как контрольные. На поверхность слоя оксида осаждались верхние электроды из Au площадью $S=1.2 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ (с подслоем из Zr для улучшения адгезии на границе раздела верхний электрод-оксид и с целью понижения работы выхода верхнего электрода) методом магнетронного распыления на постоянном токе при температуре подложки 200 °С. Толщины слоёв составляли: 25 нм (Ti), 25 нм (TiN), 40 нм (СДЦ), 5 нм (Zr) и 40 нм (Au). Структурные исследования были выполнены с помощью метода высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии (ВР ПЭМ) на установке JEM-2100F (Jeol). Для исследуемых структур измерялись электрофизические характеристики, в том числе, ВАХ, зависимости дифференциальной ёмкости C_p и проводимости G_p структур от напряжения U в параллельной эквивалентной схеме замещения конденсатора [13] в интервале частот $f=10^3 \div 10^6$ Гц и температур $T=300 \div 500$ К в автоматическом режиме со скоростью развёртки управляющего напряжения 77 мВ/с с помощью анализатора параметров полупроводниковых приборов Agilent B1500A. Напряжение на структуре соответствовало потенциалу верхнего электрода относительно потенциала базового электрода. Измерения проводились в воздушной атмосфере.

Структурные исследования образцов с прослойкой Au показало наличие в СДЦ наночастиц Au диаметром ~3 нм на расстоянии ~6 нм между их центрами (рис. 12). Это соответствует среднему значению поверхностной плотности НЧ Au $\sim 2.8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Слои СДЦ в структурах с прослойкой НЧ Au и без неё являлись поликристаллическими. Размер кристаллитов был ~ 40 нм

по толщине и ~ 20 нм в латеральном направлении. Таким образом, поверхностная плотность кристаллитов составляла $\sim 2.5 \cdot 10^{11}$ см $^{-2}$.

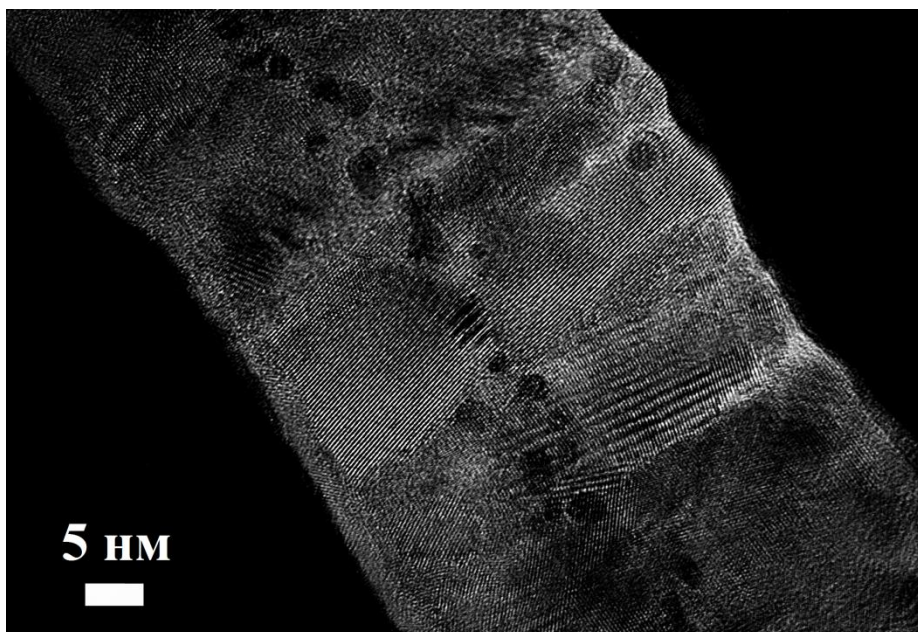


Рис. 12. Изображение поперечного сечения плёнки СДЦ с наночастицами Au, полученное методом высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии

Наличие НЧ Au привело к нелинейному поведению структур, которое оказалось возможным изучать методом измерения адмиттанса. На рис. 13 показаны зависимости C и G/ω ($\omega=2\pi f$) от напряжения U на структуре, содержащей НЧ Au, при разных температурах на частоте 1 кГц.

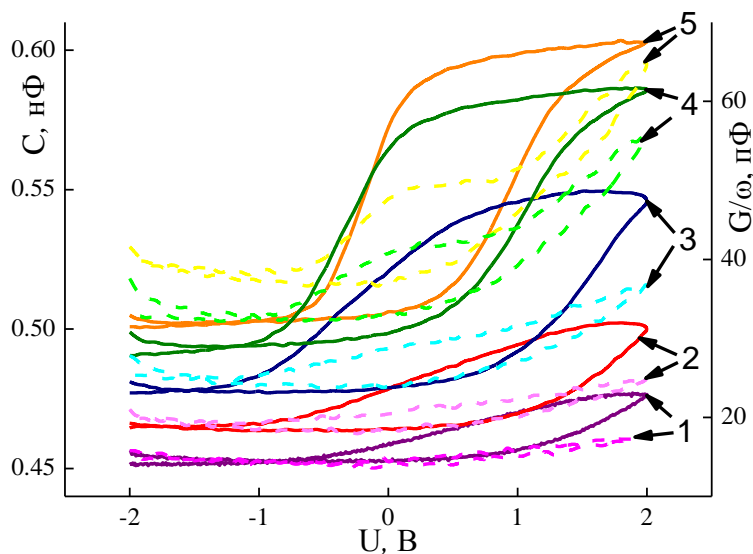


Рис. 13. Зависимости C (сплошная линия) и G/ω (пунктирная линия) от напряжения для структуры с наночастицами Au на частоте 1 кГц, полученные при температуре T , К: 380 (1); 422 (2); 455 (3); 482 (4); 502 (5)

Из рисунка видно, что наблюдаемые зависимости ёмкости и проводимости структуры от напряжения характерны для нелинейной ёмкости. Заметим, что для контрольной структуры без НЧ Au ёмкость и проводимость не зависели от напряжения. Вольт-фарадные характеристики (ВФХ) структур с НЧ Au имели вид ступенек, аналогичный ВФХ МДП-структур на высокой частоте. Однако их отличие заключается в росте отношения максимальной и минимальной ёмкостей с ростом температуры (сплошные линии под номером 1-5, рис. 13). Гистерезис CU -кривых также растёт с ростом температуры и имеет аномальный характер, который проявляется в том, что приложенное положительное напряжение смещает CU -кривую по оси напряжений в сторону меньших значений. Так как зарядка происходит только при подаче положительного напряжения на верхний электрод, то такой характер зависимостей можно объяснить зарядкой создаваемых формированием НЧ Au ловушек электронами, поступающими из TiN. Действительно, если бы вместо электронов захватывались ионы, то рост ёмкости и проводимости наблюдался бы при обеих полярностях управляющего напряжения. Рост ёмкости и проводимости с увеличением температуры можно связать с активационным захватом электронов ловушками, который сопровождается преодолением кулоновского барьера. Так как $C \gg G/\omega$, то плотность ловушек можно оценить по площади гистерезиса ВФХ. Концентрация ловушек достигает насыщения при высоких температурах (480-502 К) и оказывается равной $\sim 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Эта величина лежит между полученными выше значениями поверхностной плотности кристаллитов ($2.5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$) и поверхностной плотности НЧ Au ($2.8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$). Так как кристаллиты в образцах с наночастицами и без них существенно не отличались, то ловушки следует связывать с формированием НЧ Au. Тот факт, что значения концентраций ловушек и наночастиц являются близкими, позволяет считать, что ловушки связаны либо с самими наночастицам, либо с центрами, расположенными вблизи наночастиц.

С целью оценки других параметров электронных ловушек был выполнен анализ температурной и частотной зависимостей разности $\Delta C = C(2 \text{ В}) - C(-2 \text{ В})$ между значениями ёмкости при наличии и отсутствии захвата электронов ловушками (при напряжениях 2 В и -2 В соответственно (см. рис. 13)). Были проанализированы также подобные зависимости разности $\Delta G/\omega$. Соответствующие кривые приведены на рис. 14.

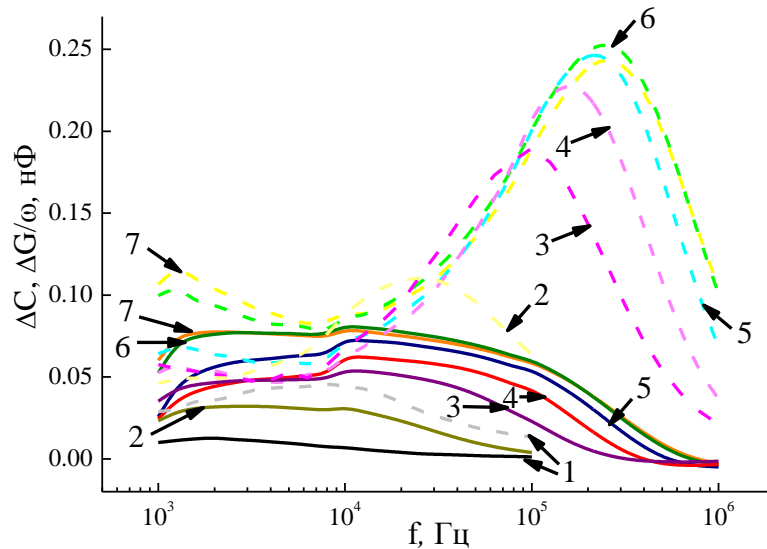


Рис. 14. Частотные зависимости ΔC (сплошная линия) и $\Delta G/\omega$ (пунктирная линия) для образца с наночастицами Au, полученные при температуре T , К: 315 (1), 350 (2), 392 (3), 422 (4), 450 (5), 485 (6), 495 (7)

На кривых 1-7 (рис. 14) отчетливо видны области частотной дисперсии в виде ступенек для ΔC и пиков для $\Delta G/\omega$, причём частота в пике совпадает с частотой в точке перегиба ступеньки. Такой вид зависимостей характерен как для установления поляризации в диэлектрике [19], так и в случае захвата ловушками в полупроводнике [29]. С ростом температуры область частотной дисперсии смещается в сторону более высоких частот, что свидетельствует об активационном характере процесса. В контрольном образце без НЧ Au наряду с отсутствием зависимостей C и G/ω от напряжения в измеренном частотном интервале также не наблюдалось заметной частотной дисперсии этих величин. В связи с этим приведённые на рис. 14 зависимости можно объяснить влиянием ловушек, образующихся при формировании НЧ Au. Известно, что перезарядка ловушек в приборных полупроводниковых структурах с нелинейной ёмкостью, как правило, увеличивает их общую ёмкость и проводимость [29, 30]. Очевидно, в таких структурах также могут наблюдаться подобные эффекты.

Теоретический анализ частотных зависимостей, представленных на рис. 14, также, как и в случае МДП-структур с ловушками [29], позволяет установить тип уровней ловушек (дискретный или непрерывный), найти время релаксации, сечение захвата, концентрацию ловушек и их энергетическое распределение. Ниже приведены некоторые оценки в предположении захвата электронов на дискретный уровень ловушки. Тогда время релаксации τ можно определить по частоте f_m , соответствующей пику проводимости, следующим образом:

$$\tau = 1/2\pi f_m. \quad (9)$$

Плотность перезаряжающихся ловушек N_t можно найти по максимальному значению G_m/ω с использованием следующего выражения:

$$N_t = 0.4 G_m / q^2 \omega S. \quad (10)$$

На рис. 15 показаны зависимости времени релаксации τ и плотности ловушек N_t , определённые с помощью выражений (9), (10) и приведённых на рис. 14 данных, от обратной температуры.

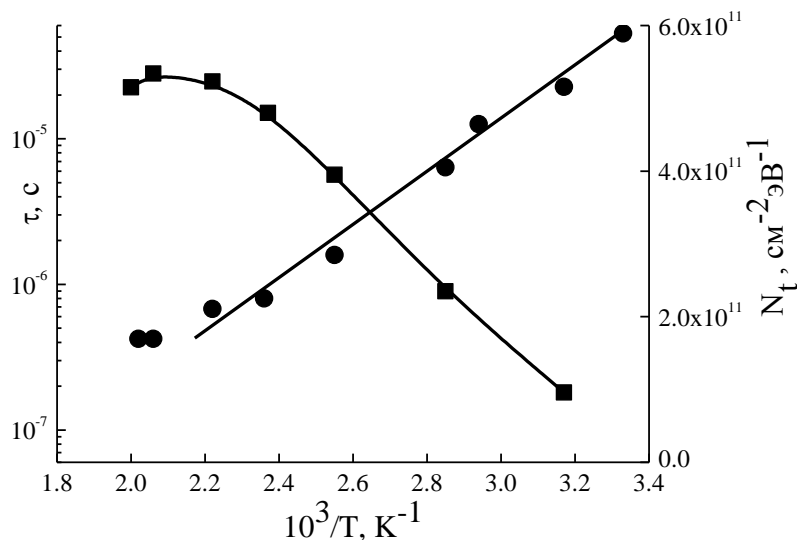


Рис. 15. Зависимости времени релаксации τ (●) и плотности ловушек N_t (■) от $10^3/T$ для структуры с наночастицами Au

Видно, что зависимость τ спрямляется в координатах Аррениуса вплоть до значения $10^3/T=2.2$ (~ 460 К). Это даёт возможность определить величину энергии активации процесса захвата ловушками [30]. Значение этой энергии составило ~ 0.35 эВ.

При температурах, больших 480 К (рис. 15), происходит насыщение τ ($4 \cdot 10^{-7}$ с) и плотности захваченного заряда. В этих условиях захваченный заряд определяет объёмную концентрацию ловушек $N_{t0} \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в предположении локализации ловушек в слое толщиной 3 нм. Поэтому можно оценить сечение захвата электронов S_n ловушками по формуле

$$S_n = 1/\tau u N_{t0}, \quad (11)$$

где u – средняя тепловая скорость электронов в твёрдом теле.

Такая оценка привела к значению $S_n \approx 3.3 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$, характерному для центров с низким значением кулоновского барьера [30].

На рис. 16 представлены ВАХ структур на основе СДЦ с наночастицами Au, демонстрирующие процесс формовки и биполярное РП.

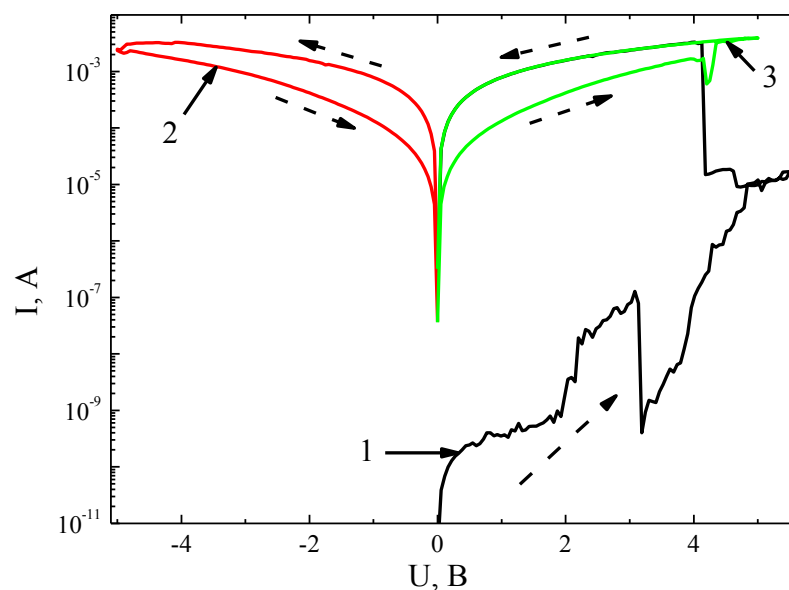


Рис. 16. Вольт-амперные характеристики мемристорной структуры на основе СДЦ с наночастицами Au, демонстрирующие процесс формовки (кривая 1) и биполярное резистивное переключение структуры из СНС в СВС (кривая 2), а также обратный процесс переключения – из СВС в СНС (кривая 3). Пунктирными стрелками показано направление развёртки по напряжению

Таким образом, полученные результаты показывают, что элементы с нелинейной ёмкостью могут быть изготовлены путём наноструктурирования диэлектриков в пассивных элементах цепей – конденсаторах. Показано, что для контроля таких элементов с нелинейной ёмкостью могут быть применены методы измерения адмиттанса. Обнаруженные особенности поведения наноструктурированного диэлектрика (стабилизированного диоксида циркония с наночастицами Au) требуют дальнейшего развития теории и физики этих новых структур.

Заключение

Данное учебно-методическое пособие посвящено измерению и анализу электрофизических характеристик мемристорных структур, что дает представление об одном из новых направлений развития микроэлектроники и наноэлектроники и представляет интерес для бакалавров, магистров и аспирантов, выполняющих научную работу и обучающихся по направлениям подготовки 11.03.04 – “Электроника и наноэлектроника”, 28.03.01 – “Нанотехнологии и микроэлектроника”, 11.04.04 – “Электроника и наноэлектроника” и 11.06.01 – “Электроника, радиотехника и системы связи”.

Работа поддержана Министерством образования и науки России в рамках государственного задания №2014/134 (код проекта 2591).

Список используемой литературы

- [1] T.V. Kundozerova, G.B. Stefanovich, A.M. Grishin. // *Phys. Status Solidi C*. 2012. V. 9 (7). pp. 1699 – 1701.
- [2] L. Chua // *IEEE Trans. Circuit Theory*. 1971. V. 18. pp. 507 – 519.
- [3] D. Kuzum, S. Yu, H-S Philip Wong // *Nanotechnology*. 2013. V.24 (38). P. 382001.
- [4] В.К. Смолин // *Нано- и микросистемная техника*. 2012. №10. С. 27 – 30.
- [5] X. Sun, G. Li, X. Zhang et al. // *J. Appl. Phys.* 2011. V. 44 (12). pp. 1 – 5.
- [6] P. R. Mickel, A. J. Lohn, M. J. Marinella // *Mod. Phys. Lett. B*. 2014. V. 28 (No. 10). pp. 1430003-1 – 1430003-25.
- [7] D. Panda, T.-Y. Tseng // *Thin Solid Films*. 2014. V. 531. pp. 1 – 20.
- [8] I. Karkkanen, A. Shkabko, M. Heikkila et al. // *Phys. Status Solidi A*. 2015. V. 212. pp. 1 – 16.
- [9] Дж. Дирнлей, А. Стоунхэм, Д. Морган // *УФН*. 1974. Т.112 (1). С.83 – 128.
- [10] Крейнина Г.С., Селиванов Л.Н., Шумская Т.И. // *Радиотехника и электроника*. 1960. Т. С. 1338 – 1341.
- [11] Hickmott T.W. // *J. Appl. Phys.* 1962. V. 33 (9). pp. 2669 – 2682.
- [12] Горшков О.Н., Антонов И.Н., Белов А.И. и др. // *Письма в ЖТФ*. 2014. Т. 40 (3). С. 12 – 19.
- [13] С.Л. Эпштейн. Измерение характеристик конденсаторов – М.; Л.: Энергия, 1965. – 235 с.
- [14] Тихов С.В., Горшков О.Н., Павлов Д.А. и др. // *Письма в ЖТФ*. 2014. Т. 40 (9). С. 9 – 16.
- [15] Pan F. Experimental and Simulation Study of Resistive Switches for Memory Applications. PhD dissertation. University of California, Berkeley, 2012.
- [16] H. B. Michaelson // *J. of Appl. Phys.* 1977. V. 48. pp. 4729 – 4733, 1977.
- [17] J. Westlinder, G. Sjoblom, J. Olsson // *Microelectronic Engineering*. 2004. V. 75. pp. 389 – 396.
- [18] J.S. Lee, S. Lee, T.W. Noh // *Appl. Phys. Rev.* 2015. V. 2. pp. 031303-1 – 031303-57.
- [19] П.Т. Орешкин. Физика полупроводников и диэлектриков – М.: Высшая школа, 1977. – 448 с.
- [20] G. D. Wilk, R. M. Wallace, J. M. Anthony // *J. Appl. Phys.* 2001. V. 89 (10). pp. 5243 – 5275.
- [21] A.N. Mikhaylov, A.I. Belov, D.V. Guseinov et al. // *Materials Science and Engineering B*. 2015. V. 195. pp. 48 – 54.
- [22] Orera V.M., Merino R.I., Chen Y. et al. // *Phys. Rev. B*. 1990. V. 42 (16). pp. 9782 – 9789.
- [23] Горшков О.Н., Антонов И.Н., Белов А.И. и др. // *Вестник ННГУ*. 2013. Т. 5 (1). С. 51 – 54.

- [24] Горшков О.Н., Касаткин А.П., Антонов Д.А. и др. // Труды XVII Международного симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника» (11-15 марта 2013 г., Нижний Новгород). Т.2. С. 412 – 413.
- [25] Чеботин В.Н., Перфильев М.В. Электрохимия твердых электролитов. М.: Химия, 1978. 312 с.
- [26] Кузьминов Ю.С., Ломонова Е.Е., Осико В.В. Тугоплавкие материалы из холодного тигля. М.: Наука. 2004. 369 с.
- [27] Горшков О.Н., Грачева Т.А., Касаткин А.П. и др. // Высокочистые вещества. 1995. Т. 2. С. 85 – 93.
- [28] Алексеев Е.В., Горшков О.Н., Чупрунов Е.В. и др. // Кристаллография. 2006. Т. 51 (4). С. 672 – 675.
- [29] Овсяк В.Н. Электронные процессы в полупроводниках с областями пространственного заряда. Новосибирск: Наука (Сибирское отделение), 1984. 252 с.
- [30] Берман Л.С., Лебедев А.А. Ёмкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках. Л.: Наука, 1981. 173 с.

ИЗМЕРЕНИЕ И АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕМРИСТОРНЫХ СТРУКТУР

Учебно-методическое пособие

Авторы:

Олег Николаевич Горшков
Станислав Викторович Тихов
Мария Николаевна Коряжкина
Евгения Викторовна Окулич
Александр Петрович Касаткин
Иван Николаевич Антонов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»
603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.