ЖЭТФ/JETP, 2026, том 169, вып. 2, стр. 225–232

ТРАНСПОРТ ЗАРЯДА И ПРИРОДА ЛОВУШЕК В МЕМРИСТОРАХ НА ОСНОВЕ SiO_x, ПОЛУЧЕННЫХ ОБРАБОТКОЙ В ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЕ ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОГО РЕЗОНАНСА

Р. М. Х. Исхакзай [a*], ***В. А. Воронковский*** [a], ***Т. В. Перевалов*** [a], ***В. Ш. Алиев*** [a], ***В. А. Гриценко*** [a,b]

[a] *Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук 630090, Новосибирск, Россия*

[b] *Новосибирский государственный университет 630090, Новосибирск, Россия*

Поступила в редакцию 27 октября 2025 г.,
после переработки 15 декабря 2025 г.
Принята к публикации 5 января 2026 г.

Исследованы мемристоры со структурой p^{++}-Si/SiO_x/Ni, активный слой которых был получен путем обработки стехиометрического термического SiO_2 в водородной плазме электронно-циклотронного резонанса. Установлено, что при значении параметра $x = 1.72$ (отношение [O]/[Si]) мемристоры являются бесформовочными. Из анализа экспериментальных вольт-амперных характеристик мемристоров в высокоомном и низкоомном состояниях, измеренных в температурном диапазоне $250-400$ K, было получено, что транспорт заряда определяется механизмом тока, ограниченного пространственным зарядом с частично и полностью заполненными ловушками соответственно. Обнаружено, что энергия ионизации ловушек, играющих ключевую роль в проводимости высокоомного состояния мемристоров, находится в диапазоне $20-65$ мэВ. Методом *ab initio* квантово-химического моделирования установлено, что такими ловушками в SiO_x являются E'-центры (кремний с неспаренным электроном) и связи $\equiv$Si$-$Si$\equiv$.

Ключевые слова: мемристор, стехиометрический термический SiO_2, плазма электронно-циклотронного резонанса, механизм резистивного переключения, механизм ТОПЗ, природа ловушек, *ab initio* квантово-химическое моделирование

DOI: 10.7868/S3034641X26020099

1. ВВЕДЕНИЕ

Обедненные кислородом тонкие пленки оксида кремния SiO_x ($x < 2$) являются перспективным кандидатом на роль активной среды элементов резистивной памяти (мемристоров) [1, 2], принцип действия которой основан на обратимом переключении диэлектрического слоя в структуре металл–диэлектрик–металл (МДМ) или металл–диэлектрик–полупроводник (МДП) между состояниями с высоким и низким сопротивлением [3]. Считается, что переключение резистивных состояний в мемристорах на основе оксида кремния осуществляется за счет электродиффузии вакансий кислорода в диэлектрическом слое, приводящей к формированию/разрыву проводящего филамента [4]. Несомненным достоинством мемристоров на основе SiO_x является совместимость структуры со стандартными процессами современной микроэлектроники. На сегодняшний день известно множество технологических методов получения тонких пленок SiO_x ($x < 2$) [5]. Однако получение сплошных и конформных пленок SiO_x ($x < 2$) толщиной менее 10 нм с точным контролем параметра x (отношение [O]/[Si]) с использованием таких методов является сложной технологической задачей. Авторами данной работы ранее была продемонстрирована возможность полу-

* E-mail: ramin@isp.nsc.ru

чения таких тонких пленок путем обработки стехиометрического SiO_2, полученного методом сухого термического окисления, в водородной плазме электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР) [5–7]. За счет удаленного реактора и низкого давления горения ЭЦР-плазмы, а также возможности управления энергией падающих протонов в широком диапазоне от единиц электронвольт до килоэлектронвольт данный метод позволяет получать тонкие пленки SiO_x (толщиной около 10 нм) с высокой степенью обеднения кислородом с $x < 1.8$. Ранее нами было установлено, что диэлектрические пленки, полученные этим методом применимы в качестве активного слоя мемристоров [5, 7]. Однако транспорт заряда и механизм резистивного переключения мемристоров, активный слой которых получен обработкой в водородной ЭЦР-плазме, ранее не изучался. Пленки SiO_x, по сравнению с пленками SiO_2, содержат повышенную концентрацию дефектов, участвующих в переносе заряда [6]. Известно, что изменение параметра x $(0 < x < 2)$ позволяет варьировать ширину запрещенной зоны E_g диэлектрика в широком диапазоне: от 1.1 эВ (аморфный Si) до 8.0 эВ (аморфный SiO_2) [8, 9]. По аналогии с SiO_2 естественно предположить, что в качестве дефектов, участвующих в транспорте заряда в SiO_x, могут выступать E'-центры (кремний с неспаренным электроном) и ODC-I (oxygen-deficient center, одиночная вакансия кислорода $\equiv$Si$-$Si$\equiv$), а также их модификации [10]. Ранее нами изучались пленки SiO_x, полученные с помощью обработки в водородной ЭЦР-плазме методом низкотемпературной фотолюминесцентной спектроскопии с возбуждением синхротронным излучением в вакуумной ультрафиолетовой области. При исследовании таких пленок SiO_x обнаруживаются центры фотолюминисценции подобные пространственно-ограниченным экситонам в кремниевых квантовых точках. Показано, что такие точки различаются по спектральным характеристикам, формируются по-разному за счет трансформации и кластеризации точечных дефектов, таких как E'-центры, ODC-I и ODC-II [11]. Понимание электронной структуры дефектов в SiO_x различного состава необходимо для контроля свойств пленок на его основе и получения оптимальных параметров устройств резистивной памяти. Одним из методов изучения природы дефектов и их электронной структуры является *ab initio* моделирование.

Целью данной работы является комплексное исследование механизма переноса заряда в мемристорах на основе пленок SiO_x различного состава, полученных путем обработки стехиометрического оксида в водородной ЭЦР-плазме, и установление природы дефектов, ответственных за транспорт заряда в таких мемристорах. Данное исследование является необходимым для разработки научно обоснованного подхода к оптимизации технологии синтеза мемристоров с наилучшими приборными характеристиками.

2. ПОДГОТОВКА ОБРАЗЦОВ И МЕТОДЫ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ

Образцы для исследований изготавливались следующим образом. На подложках p^{++}-Si(100) методом термического окисления выращивались слои SiO_2 толщиной 20 нм. Затем подложки раскалывались на образцы размером 8×18 мм^2 для дальнейшей обработки в установке ЭЦР-плазмы, устройство которой подробно описано ранее [5]. Процесс обработки контролировался путем изменения следующих параметров: длительности t, мощности P ЭЦР-источника и потенциала ϕ электрического смещения на держателе образца. Температура образцов в процессе обработки не варьировалась и в ходе одного процесса обработки находилась в диапазоне 530$-$550 K. После обработки каждый из образцов раскалывался на две части: одна часть использовалась для определения химического состава методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) и толщины пленок методом спектральной эллипсометрии, а вторая часть после нанесения электродов — для исследований электрофизических свойств мемристоров. Методы получения и обработки данных РФЭС и спектральной эллипсометрии описаны в наших предыдущих работах [6, 12]. Электроды из Ni толщиной 50 нм наносились методом электронно-лучевого испарения через металлическую маску с набором отверстий, в результате чего на образце формировался массив мемристоров со структурой p^{++}-Si/SiO_x/Ni. Размер контактных площадок верхнего электрода составляет 300×300, 200×200, 100×100 мкм^2.

Ab initio моделирование электронной структуры дефектов в SiO_x осуществлялось в рамках теории функционала плотности в программном пакете Quantum ESPRESSO [13]. Использовался обменно-корреляционный функционал PBE0, энергия отсечки 1020 эВ для плосковолнового базиса и оптимизированные сохраняющие норму псевдопотенциалы Вандербильта. Моделировались два типа дефектов в SiO_x как наиболее вероятные: связь $\equiv$Si$-$Si$\equiv$ (ODC-I) и $\equiv$Si$\bullet$ (E'-центр, когда один из атомов

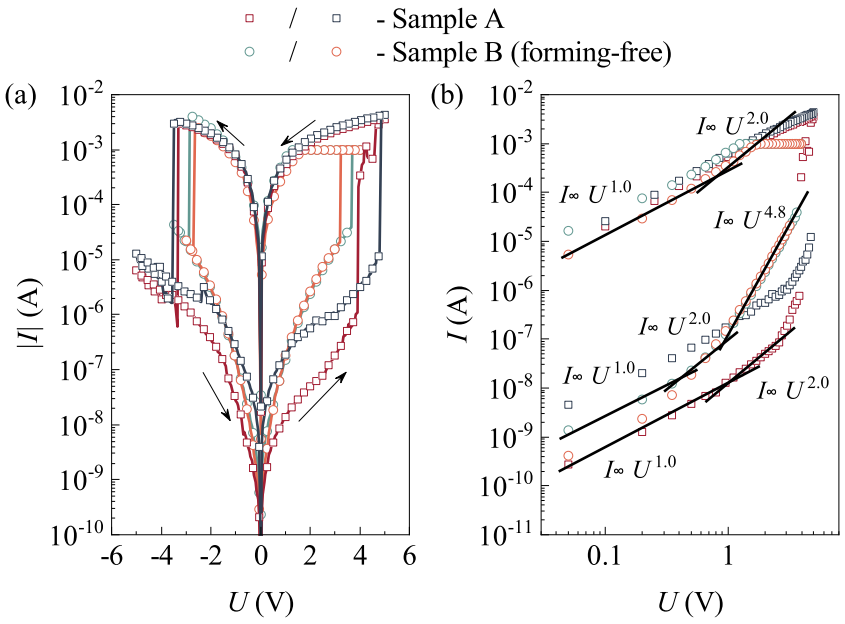

Рис. 1. Экспериментальные ВАХ мемристоров p^{++}-Si/SiO_x/Ni с $x = 1.9$ (образец A), 1.72 (образец B) при комнатной температуре в логарифмическом (*a*) и двойном логарифмическом (*b*) масштабах

связи ≡Si−Si≡ насыщается водородом). Дефекты создавались в суперячейках SiO_x различного размера (от 48 до 72 атомов), полученных трансляцией 2×2×1 модельных элементарных ячеек, созданных и апробированных нами ранее [9]. Связь ≡Si−Si≡ создавалась удалением атома O, а дефект ≡Si• — добавлением атома H вместо O с последующей полной структурной релаксацией. При этом каждый дефект рассчитывался во всех возможных позициях суперячейки, и выбирались такие положения, которые обеспечивали наименьшие значения полной энергии суперячейки. Структурная релаксация и электронная структура рассчитывались в рамках спин-поляризованной теории функционала плотности в трех зарядовых состояниях дефекта: $q = 0, -1, +1$. Рассчитывались составы с $x = 2.0$, 1.83, 1.67, 1.5, 1.33, 1.17, 1.0. Энергия ловушки оценивалась как выигрыш в энергии при локализации добавленного в суперячейку электрона (W_e) или дырки (W_h) по формуле

$$W_{e(h)} = \left[E_{perf}^{-1(+1)} + E_{def}^{+1(-1)}\right] - \left[E_{perf}^{0} + E_{def}^{0}\right], \quad (1)$$

где E_{perf} и E_{def} — полные энергии бездефектной и дефектной суперячеек соответственно, а верхние индексы отражают полный заряд системы q.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) мемристоров измерялись с шагом 50 K в температурном диапазоне 250–400 K с использованием столика нагрева Linkam LTS420E и электрометра Keithley 2400. При измерениях температура изменялась со скоростью не выше 10 K/мин и, при достижении необходимой отметки, оставалась постоянной не менее 5 мин. Полученные экспериментальные ВАХ аппроксимировались в рамках известных моделей проводимости диэлектриков, среди которых эмиссия Шоттки [14], эффект Френкеля [15], прыжковая проводимость [16] и ток, ограниченный пространственным зарядом (ТОПЗ) [17, 18].

3. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Как было установлено ранее [7], за счет увеличения интенсивности обработки слоев оксида кремния в водородной ЭЦР-плазме содержание кислорода в них уменьшается, причем наибольшее влияние на процесс обеднения пленок кислородом оказывает мощность ЭЦР-источника. В настоящей работе за счет интенсивной обработки при $P = 228$ Вт, $t = 10$ мин, $T = 547$ K и $\phi = -300$ В удалось достигнуть значения $x = 1.72$, при этом толщина пленки уменьшилась до $d = 11.38$ нм. Мемристоры, изготовленные на основе такой пленки, являются бесформовочными — напряжение формовки (первого переключения мемристора) практически не отличается

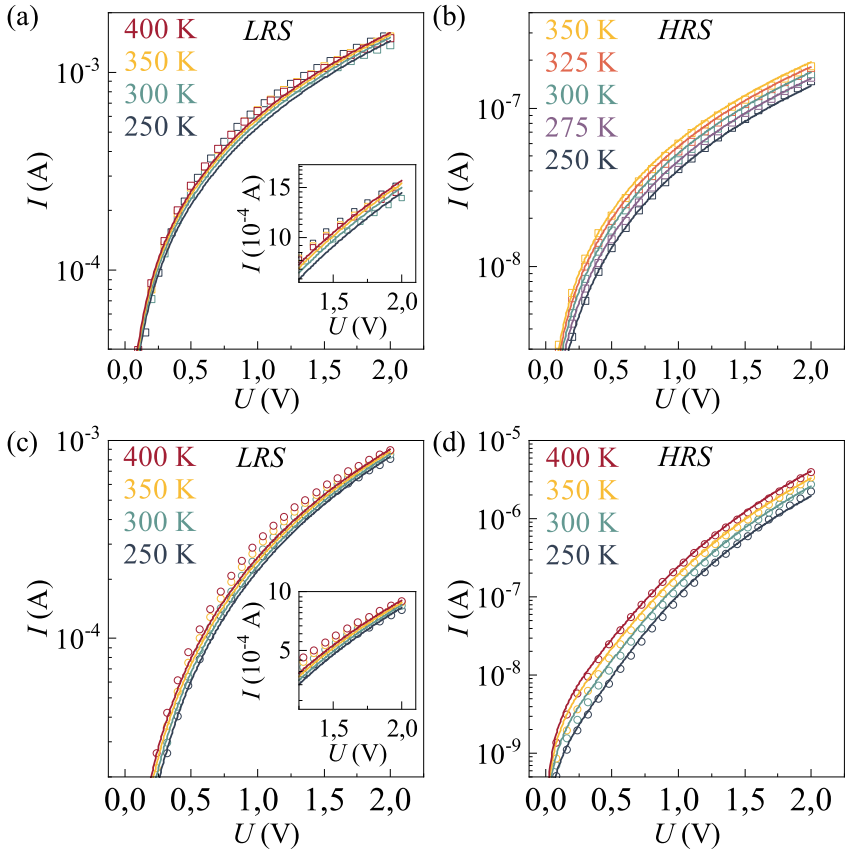

Рис. 2. ВАХ мемристоров p^{++}-Si/SiO$_x$/Ni с $x = 1.9$ (*a* и *b*, образец A), 1.72 (*c* и *d*, образец B) при различных температурах в низкоомном (LRS) и высокоомном (HRS) состояниях

от напряжений резистивного переключения, а ВАХ в исходном (до формовки) и высокоомном состояниях совпадают. Для сравнения, напряжение формовки мемристоров для образца с $x = 1.9$ ($P = 76$ Вт, $t = 6$ мин, $T = 538$ K, $\phi = -300$ В и $d = 17.56$ нм) в среднем составляет 15 В. Подробно исследован транспорт заряда у этих образцов — далее для простоты образцы с $x = 1.9$ и $x = 1.72$ обозначаются как A и B соответственно. ВАХ резистивного переключения таких мемристоров представлены на рис. 1.

При низких напряжениях ВАХ в обоих состояниях имеют линейный вид, при этом в этой области ВАХ описывается в рамках механизма термической генерации носителей заряда:

$$j_{ohm} = qn\mu\frac{U}{d}, \tag{2}$$

где

$$n = \frac{2N_d}{1+\sqrt{1+\frac{2N_d}{N_c}\exp\left(\frac{W_d}{kT}\right)}},\ N_c = 2\left(\frac{2\pi m^* kT}{h^2}\right)^{3/2},$$

q — заряд электрона, n — концентрация свободных электронов в оксиде, μ — подвижность электронов, m^* — эффективная масса электрона, d — толщина диэлектрика, N_c — эффективная плотность состояний электронов в зоне проводимости, k — постоянная Больцмана, h — постоянная Планка, N_d — концентрация донороподобных дефектов, W_d — энергия ионизации донороподобных дефектов.

Как можно видеть на рис. 1 *b*, в обоих резистивных состояниях ВАХ при напряжениях около 1.0 В и выше имеют квадратичный вид в логарифмическом масштабе, что является характерным для механизма ТОПЗ. Наблюдаемый постепенный переход ВАХ от линейного вида к квадратичному по мере увеличения напряжения является типичным для ТОПЗ в полупроводнике.

Как можно видеть на рис. 2 *a,c*, в низкоомном состоянии (НС) на ВАХ обоих образцов в температурном диапазоне 250–400 K наблюдается слабое увеличение тока по мере роста температуры, причем по мере роста напряжения эта зависимость ослабевает. Следовательно, образующийся в иссле-

дуемых мемристорах филамент имеет неметаллическую природу. В высокоомном состоянии (ВС) на ВАХ обоих образцов ток растет с ростом температуры быстрее относительно ВАХ для НС (рис. 2 *b,d*) — на 20–100% в зависимости от конкретного мемристора на образце. Наилучшее согласие между экспериментальными и расчетными ВАХ для обоих состояний при физической осмысленности сразу всех параметров модели получено только для комбинации механизмов термической генерации носителей заряда и ТОПЗ. Зависимость плотности тока от напряжения, которое использовалось для аппроксимации экспериментальных ВАХ, выглядит следующим образом:

$$j = j_{ohm} + j_{SCLC}, \tag{3}$$

где

$$j_{SCLC} = \frac{9}{8}\varepsilon\varepsilon_0\theta\mu\frac{U^2}{d^3}, \quad \theta = \frac{N_c}{N_t}\exp\left(-\frac{W_t}{kT}\right),$$

ε — диэлектрическая проницаемость оксидного слоя, ε_0 — электрическая постоянная, θ — доля свободных электронов от всех инжектированных электронов (свободных и захваченных), N_t — концентрация ловушек для носителей заряда, W_t — глубина ловушек.

Учитывая слабую зависимость тока от температуры в квадратичной области ВАХ для обоих образцов с мемристорами в НС, мы аппроксимировали ВАХ в рамках механизма ТОПЗ в режиме без ловушек ($\theta = 1$). В линейной области ВАХ, в которой наблюдается более существенный температурный сдвиг, аппроксимация проводилась в рамках механизма тепловой генерации носителей заряда (2). Предполагалось, что полупроводниковый филамент с диэлектрической проницаемостью ε содержит большое количество дефектов, часть которых является донороподобными (см. таблицу). Для полупроводников с большим количеством дефектов типичным является слабая температурная зависимость подвижности μ, поэтому при аппроксимации ВАХ она не учитывалась. С учетом того, что в активном слое мемристора в области образования проводящего филамента имеется высокая концентрация кислорододефицитных дефектов (при этом параметр x в области филамента может быть гораздо меньше объемного значения, определенного из данных РФЭС), было выбрано значение диэлектрической проницаемости $\varepsilon = 5$ [19] и подвижности $\mu \approx 1.0$ см^2/В·с (типичная подвижность электронов в аморфном кремнии) [20]. Полученные расчетные ВАХ для НС обоих образцов показаны на рис. 2 *a* и 2 *c*. Поскольку для ВС обоих образцов температурный сдвиг ВАХ является существенным и в квадратичной области, аппроксимация осуществлялась в рамках механизма ТОПЗ в режиме частично заполненных ловушек с энергией ионизации W_t и их концентрации N_t (см. таблицу). Стоит отметить, что у мемристоров образца B вклад в проводимость ВС помимо филамента дает и окружающий его объем диэлектрика, проявляющий себя при напряжениях около 1.5 В и выше. В данной области ВАХ описывается механизмом ТОПЗ с экспоненциальным распределением по энергии ловушек:

$$j_{SCLC} = \mu N_c q^{1-l}\left(\frac{\varepsilon\varepsilon_0}{N_0}\frac{l}{l+1}\right)^l\left(\frac{2l+1}{l+1}\right)^{l+1}\frac{U^{l+1}}{d^{2l+1}}, \tag{4}$$

где $l = T_t/T$, T_t — температура, характеризующая распределение ловушек по энергиям, $N_t' = N_0 k T_t$ — концентрация ловушек в объеме оксида, N_0 — концентрация ловушек с энергией ионизации, лежащей в зоне проводимости [18]. Для данного механизма характерно наличие области ВАХ с зависимостью плотности тока от напряжения со степенью больше 2 (см. рис. 1 *b*). Расчетные ВАХ для ВС-мемристоров исследуемых образцов A и B показаны на рис. 2 *b* и 2 *d*, а параметры моделирования представлены в таблице.

Таблица. Параметры модели ТОПЗ, использованные при аппроксимации ВАХ

Параметр	Образец			
	A(НС)	A(ВС)	B(НС)	B(ВС)
D, нм	366.7	5.6	270.8	7.9
N_d, 10^{18}см$^{-3}$	2.7	1.8	1.6	0.5
W_d, мэВ	10	100	90	120
m^*/m_0	0.4	0.4	0.4	0.4
μ, см^2/В · с	2.0	2.0	1.0	1.0
N_t, 10^{18}см$^{-3}$	—	1.0	—	4.0
W_t, мэВ	—	20	—	65
N_t', 10^{20}см$^{-3}$	—	—	—	2.7
ε	5.0	5.0	5.0	5.0

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что механизм переключения всех исследованных мемристоров из высокоомного состояния в низкоомное осуществляется за счет заполнения ловушек с концентрацией N_t в области филамента носителями заряда, значительного увеличения диаметра филамента D и концентрации в нем донороподобных дефектов N_d, при этом энергия ионизации W_d донороподобных дефектов умень-

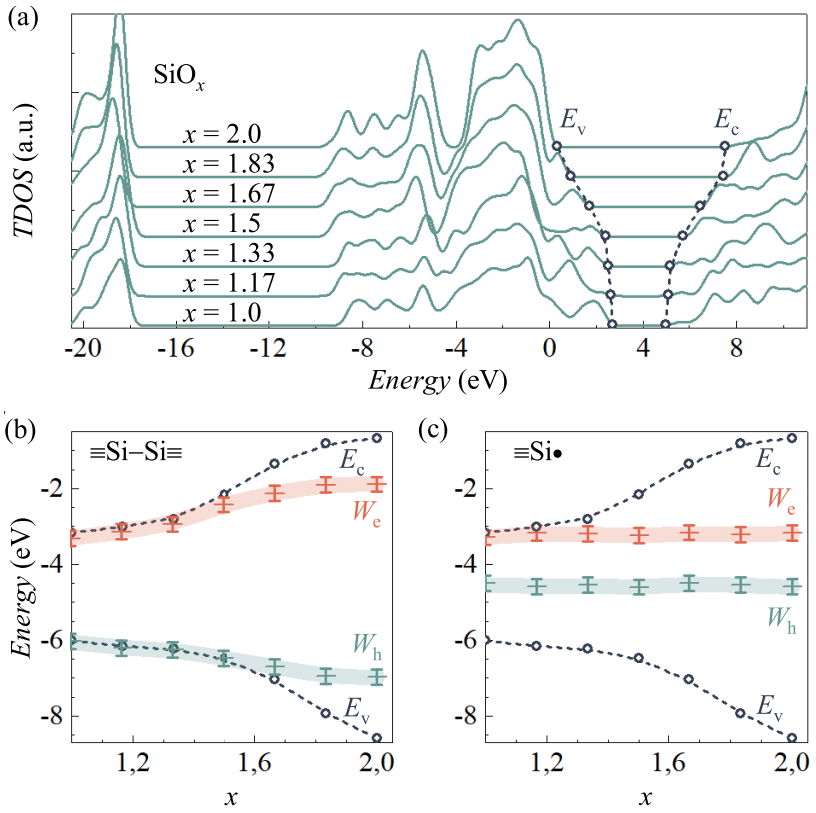

Рис. 3. *a* — Спектры полной плотности состояний (TDOS) SiO_x, совмещенные по максимуму уровня O2s. Кружками обозначены положения E_v и E_c в SiO_x. *b*, *c* — Энергетическая диаграмма SiO_x: положения E_v и E_c для SiO_x относительно уровня вакуума, а также уровни электронной W_e и дырочной W_h ловушек от дефекта ≡Si–Si≡ (*b*) и E'-центра (*c*)

шается при переключении. Стоит отметить, что энергия ионизации ловушек у мемристоров образца A уменьшается сильнее в сравнении с бесформовочными мемристорами образца B. Такие изменения предположительно происходят за счет окислительно-восстановительных реакций (изменения параметра x) в области филамента при резистивном переключении.

4. *AB INITIO* МОДЕЛИРОВАНИЕ

Из данных таблицы можно видеть, что, согласно механизму ТОПЗ, в филаменте должны присутствовать дефекты с энергией ионизации от 20 и до 65 мэВ. В некоторых работах [19, 21, 22], использующих механизм ТОПЗ для аппроксимации экспериментальных ВАХ мемристорных структур, природа таких дефектных уровней в области филамента не раскрыта. Для установления природы таких дефектов проведены расчеты электронной структуры наиболее вероятных собственных дефектов в SiO_x.

Расчетные значения энергии ловушки $W_{e(h)}$ отражают положение соответствующих дефектных уровней на энергетической диаграмме, так что $W_{e(h)} > 0$ соответствуют уровню в запрещенной зоне. Положения дефектных уровней (т. е. значения W_e, отложенные от дна зоны проводимости E_c, и W_h, — от потолка валентной зоны E_v) на расчетной энергетической диаграмме SiO_x, где $1 < x < 2$, представлены на рис. 3. Отметим, что расчетные значения $E_g(x)$ хорошо согласуются с теоретической кривой $E_g(x)$, полученной ранее в рамках метода сильной связи с использованием модели обобщенных решеток Бете [8], а также экспериментальной кривой [9]. Поскольку величины $W_{e(h)}$ различаются для различных положений дефекта в структуре в пределах ±0.2 эВ, на энергетической диаграмме SiO_x нанесены уровни, отвечающие усредненным значениям $W_{e(h)}$. Энергетическая диаграмма построена с помощью совмещения расчетных спектров полной плотности электронных состояний (TDOS) для SiO_x по уровню O2s (рис. 3 *a*) и с учетом известного положения относительно уровня вакуума для $E_v(SiO_2)$ [9].

Можно видеть монотонный и практически симметричный сдвиг E_c и E_v в запрещенную зону

с уменьшением x в SiO_x. При этом уменьшаются и значения W_e (W_h) для обоих исследуемых типов дефекта, причем такое уменьшение происходит главным образом за счет сдвига E_c (E_v) в запрещенную зону. Для дефекта $\equiv$Si$-$Si$\equiv$ в SiO_x уровни электронной ловушки практически совпадают с E_c в пределах точности метода при $x < 1.3$, а для дырочной ловушки — с E_v при $x < 1.5$. E'-центр является более глубокой ловушкой, чем дефект $\equiv$Si$-$Si$\equiv$, однако при значениях $1.0 \lesssim x \lesssim 1.2$ это — мелкая ловушка (глубиной около 0.1 эВ) для электронов. Таким образом, и дефекты $\equiv$Si$-$Si$\equiv$, и E'-центры в SiO_x при определенных значениях x могут выступать в роли мелких ловушек для электронов и дырок. Расчеты позволяют оценить стехиометрию проводящего филамента, однако эти оценки грубы из-за систематических ошибок метода расчета, возникающих главным образом из-за использования модельных кристаллических структур SiO_x с заданными дефектами. Так, при $x \lesssim 1$ электронная проводимость осуществляется по E'-центрам, при $1 \lesssim x \lesssim 1.2$ — по дефектам $\equiv$Si$-$Si$\equiv$, а при $1.2 \lesssim x \lesssim 1.5$ имеет место дырочная проводимость по дефектам $\equiv$Si$-$Si$\equiv$.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе показано, что транспорт заряда мемристоров со структурой p^{++}-Si/SiO_x/Ni, активный слой которой был получен путем обработки в водородной ЭЦР-плазме, описывается по механизму тока, ограниченного пространственным зарядом. Проводимость мемристора в низкоомном и высокоомном состояниях осуществляется по проводящему каналу. Согласно общепринятым представлениям, проводящий канал формируется при подаче определенного смещения на электроды МДП-структуры, в ходе которого происходят электродиффузия ионов кислорода с формированием кислородных вакансий и восстановительные реакции [4, 23]. С учетом того, что в активном слое мемристора в области образования проводящего филамента имеется высокая концентрация кислорододефицитных дефектов, параметр x в области филамента может быть гораздо меньше объемного значения, определенного из данных РФЭС. Значения параметра $x = 1.9$ и $x = 1.72$, определенные методом РФЭС для образцов A и B соответственно, не характеризуют значение x в области проводящего филамента, а лишь показывают, что объем диэлектрика при обработке в водородной ЭЦР-плазме был восстановлен до определенного значения x (отношение [O]/[Si]). Из анализа экспериментальных ВАХ установлено, что, согласно механизму ТОПЗ, в филаменте должны присутствовать ловушки с энергией ионизации от 20 до 65 мэВ, что более чем на порядок меньше известных из литературы значений энергий ионизации для наиболее вероятных собственных дефектов в SiO_2. Для установления природы ловушек, участвующих в механизме транспорта заряда мемристоров, проведены расчеты электронной структуры таких дефектов, как связь $\equiv$Si$-$Si$\equiv$ и E'-центр в SiO_x. Методом *ab initio* моделирования было установлено, что при изменении параметра x уменьшаются и значения W_e (W_h) для обоих исследуемых типов дефектов, причем такое уменьшение происходит главным образом за счет сдвига E_c (E_v) в запрещенную зону. Таким образом, и дефект $\equiv$Si$-$Si$\equiv$, и E'-центр в SiO_x при определенных значениях x могут выступать в роли мелких ловушек для электронов и дырок. Так, согласно расчетным данным можно предположить, что при $x \lesssim 1$ в области филамента электронная проводимость осуществляется по E'-центрам, при $1.0 \lesssim x \lesssim 1.2$ — по дефектам $\equiv$Si$-$Si$\equiv$, а при $1.2 \lesssim x \lesssim 1.5$ имеет место дырочная проводимость по дефектам $\equiv$Si$-$Si$\equiv$.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Ю. А. Живодкову за помощь в проведении измерений в ЦКП «Наноструктуры» ИФП СО РАН, а также ЦКП «ВТАН» НГУ за предоставление ресурсов измерительного оборудования. *Ab initio* моделирование осуществлялось на ресурсах ИВЦ НГУ.

Финансирование Работа выполнена в рамках государственного задания ИФП СО РАН.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Вклад авторов равноценен.

ЛИТЕРАТУРА

1. D. B. Strukov, G. S. Snider, D R. Stewart, and R. S. Williams, Nature **453**, 80 (2008).
2. A. Mehonic, A. L. Shluger, D. Gao et al., Adv. Mater. **30**, 1801187 (2018).
3. F. Zhou, L. Guckert, Y. F. Chang et al., Appl. Phys. Lett. **107**, 183501 (2015).
4. C. Papakonstantinopoulos, P. Bousoulas, M. Tsigkourakos et al., ACS Appl. Electron. Mater. **3**, 2729 (2021).
5. T. V. Perevalov, R. M. Kh. Iskhakzai, V. Sh. Aliev et al., JETP **131**, 940 (2020) [Т. В. Перевалов, Р. М. Х. Исхакзай, В. Ш. Алиев и др., ЖЭТФ **158**, 1083 (2020)].

6. V. A. Voronkovskii, T. V. Perevalov, R. M. H. Iskhakzay et al., J. Non-Cryst. Solids **546**, 120256 (2020).

7. R. Iskhakzay, V. Voronkovskii, V. Aliev, and V. Gritsenko, in *Proceedings of IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials* (EDM–2021), p. 67.

8. A. A. Karpushin and V. A. Gritsenko, JETP Lett. **108**, 127 (2018) [А. А. Карпушин, В. А. Гриценко, Письма в ЖЭТФ **108**, 114 (2018)].

9. T. V. Perevalov, V. A. Volodin, Y. N. Novikov et al., Phys. Solid State **61**, 2560 (2019) [Т. В. Перевалов, В. А. Володин, Ю. Н. Новиков и др., ФТТ **61**, 2528 (2019)].

10. L. Skuja, J. Non-Cryst. Solids **239**, 16 (1998).

11. V. A. Pustovarov, A. F. Zatsepin, D. Yu. Biryukov et al., J. Non-Cryst. Solids **602**, 122077 (2023).

12. V. N. Kruchinin, T. V. Perevalov, V. S. Aliev et al., Opt. Spectrosc. **128**, 1577 (2020) [В. Н. Кручинин, Т. В. Перевалов, В. Ш. Алиев и др., Опт. и спектр. **128**, 1467 (2020)].

13. P. Giannozzi, O. Andreussi, T. Brumme et al., J. Phys. Condens. Matter **29**, 465901 (2017).

14. E. L. Murphy and R. H. Good Jr, Phys. Rev. **102**, 464 (1956).

15. J. Frenkel, Phys. Rev. **54**, 647 (1938).

16. R. Fang, W. Chen, L. Gao et al., IEEE Electron. Device Lett. **36**, 567 (2015).

17. P. Mark and W. Helfrich, J. Appl. Phys. **33**, 205 (1962).

18. M. A. Lampert, Rep. Progr. Phys. **27**, 329 (1964).

19. A. A. Gismatulin, V. A. Voronkovskii, G. N. Kamaev et al., Nanotechnology **31**, 505704 (2020).

20. R. Hattori and J. Shirafuji, Appl. Phys. Lett. **54**, 1118 (1989).

21. A. A. Gismatulin, O. M. Orlov, V. A. Gritsenko et al., Appl. Phys. Lett. **116**, 203502 (2020).

22. V. A. Voronkovskii, V. S. Aliev, A. K. Gerasimova et al., Nanotechnology **32**, 185205 (2021).

23. J.-Y. Chen, C.-L. Hsin, C.-W. Huang et al., Nano Lett. **13**, 3671 (2013).

Charge Transport and Traps Origin in SiO_x-Based Memristors Obtained by the Treatment in Hydrogen Electron Cyclotron Resonance Plasma

R. M. Kh. Iskhakzai [a], ***V. A. Voronkovskii*** [a], ***T. V. Perevalov*** [a], ***V. Sh. Aliev*** [a], ***V. A. Gritsenko*** [a,b]

[a] Rzhanov Institute of Semiconductor Physics Siberian Branch, Russian Academy of Sciences
630090, Novosibirsk, Russia

[b] Novosibirsk State University
630090, Novosibirsk, Russia

Abstract

In this work, p^{++}-Si/SiO_x/Ni memristors with varying oxygen depletion levels are investigated. It was found that at coefficient $x = 1.72$ ([O]/[Si] ratio) these memristors are forming-free. The SiO_x layers were obtained by treating stoichiometric thermal SiO_2 films in electron cyclotron resonance hydrogen plasma. By analyzing the experimental current-voltage curves of the memristors in low- and high-resistance states in the temperature range from 250 to 400 K, it was revealed that the charge transport in these states is governed by the trap-free and trap-mediated space-charge-limited current, respectively. The ionization energy of traps, which play a key role in the memristors high-resistance state conductivity, was found to be in the range of 20–65 meV. The origin of such shallow traps has been established. *Ab initio* quantum chemical simulations revealed that such traps in SiO_x are E'-centers and ≡Si−Si≡ bonds.

Keywords: Memristor, stoichiometric thermal SiO_2, electron cyclotron resonance hydrogen plasma, resistive switching mechanism, SCLC mechanism, trap nature, *ab initio* quantum-chemical simulations

Acknowledgements. The authors thank Yu. A. Zhivodkov for assistance in conducting measurements at the «Nanostructures» Shared Use Center of the ISP, SB RAS, and the «High Technologies and Analytics of Nanosystems» Shared Use Center of NSU for providing measuring equipment resources. *Ab initio* modeling was carried out using the resources of the NSU Data Center.

Funding. The work was carried out within the framework of a state assignment of the ISP, SB RAS.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Author's contributions. The contribution of the authors is equivalent.