

УДК 538.935+546.282+661.687

## ЗАПОМИНАЮЩИЕ СВОЙСТВА МЕМРИСТОРОВ НА ОСНОВЕ ОКСИДА И НИТРИДА КРЕМНИЯ

© 2021 г. В. А. Гриценко<sup>1,2,3</sup>, А. А. Гисматулин<sup>1,\*</sup>, **О. М. Орлов**<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup> Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

<sup>4</sup> Научно-исследовательский институт молекулярной электроники, Москва, Россия

\*E-mail: aagismatulin@isp.nsc.ru

Поступила в редакцию 21.06.2021 г.

После доработки 12.07.2021 г.

Принята к публикации 12.07.2021 г.

Оксид и нитрид кремния являются двумя ключевыми диэлектриками в современных кремниевых приборах. Рассмотрены запоминающие свойства мемристоров на основе  $\text{SiN}_x$  и  $\text{SiO}_x$ , полученных плазмохимическим осаждением, методом пиролиза и высокочастотным реактивным распылением. Нитриды, полученные высокочастотным реактивным распылением, обладают наилучшими запоминающими свойствами: окно памяти  $10^2$ , количество циклов перепрограммирования до  $10^9$  при сохранении окна памяти, окно памяти не меняется за время хранения  $10^5$  с.

DOI: 10.1134/S1992722321060078

### ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение

1. Методы получения мемристоров

2. Результаты и их обсуждение

2.1. Запоминающие свойства мемристоров на основе пиролитического нитрида кремния

2.2. Запоминающие свойства мемристоров на основе плазмохимического и физически осажденного нитрида кремния

2.3. Запоминающие свойства мемристоров на основе плазмохимического оксида кремния

Заключение

### ВВЕДЕНИЕ

Развитие и реализация концепции искусственного интеллекта (ИИ) являются приоритетными направлениями научно-технического прогресса [1]. Одной из задач, на решение которых ориентирована разработка ИИ, является обработка больших массивов данных для облачных вычислений (Big Data) [2, 3]. Кроме того, ИИ и искусственные нейронные сети необходимы для машинного обучения и самообучения, компьютерного зрения и распознавания голоса [4]. Это задачи огромной трудности для современных компьютеров фон-неймановской архитектуры, где память и обработка информации физически

разделены, тогда как человеческий мозг решает их за доли секунды, причем с энергозатратами на 5–6 порядков меньше [4].

Развитие ИИ осуществляется в трех направлениях. Во-первых, разработка элементов памяти с многоуровневым (мультитбитным) переключением как искусственных аналогов синапсов в нейронных сетях [5, 6]. Во-вторых, разработка быстродействующей энергонезависимой, энергоэкономной флэш-памяти терабитного масштаба, сохраняющей информацию в течение 10 лет при  $85^\circ\text{C}$  [7, 8]. В-третьих, разработка универсальной памяти, сочетающей в себе высокое быстродействие и неограниченное число циклов перепрограммирования оперативной памяти, энергонезависимость флэш-памяти, высокую информационную емкость и низкую стоимость магнитных жестких дисков [9]. Компьютер с использованием универсальной памяти не надо будет “загружать”: сразу после включения он будет готов продолжить работу с того самого места, на котором она была прервана. Быстродействие и информационная емкость компьютеров на основе универсальной памяти будут гигантскими.

Многообещающим кандидатом на память, обладающей перечисленными характеристиками, является мемристорная, т.е. резистивная память (Resistive Random-Access Memory – **ReRAM**). Эта память основана на обратимом переходе тонкой

диэлектрической пленки между состояниями с различным сопротивлением при протекании импульса тока. Ключевой проблемой на пути разработки ReRAM большой емкости и мультитбитных мемристоров является понимание физики резистивного переключения тонких диэлектрических пленок, свойств различных резистивных состояний, а также поиск материалов, наиболее подходящих для разработки такой памяти [10, 11].

В настоящее время мемристорная память разрабатывается на основе широкого класса материалов. Это диэлектрики с высокой диэлектрической проницаемостью, такие как  $\text{TaO}_x$  [12],  $\text{HfO}_x$  [13],  $\text{ZrO}_x$  [14],  $\text{TiO}_x$  [15, 16],  $\text{AlO}_x$  [17],  $\text{NbO}_x$  [18],  $\text{SiO}_x$  [19],  $\text{SiN}_x$  [20, 21],  $\text{GeO}_x$  [22], перовскиты [23, 24], органические пленки [25].

С точки зрения механизма переключения мемристора между высокоомным и низкоомным состояниями в настоящее время доминирует филаментарная модель. Согласно этой модели переход из высокоомного (high resistive state – **HRS**) в низкоомное (low resistive state – **LRS**) состояние осуществляется за счет образования проводящего металлического или полупроводникового мостика. Диаметр филамента лежит в диапазоне 1–10 нм.

Аморфные оксид (стехиометрический  $\text{SiO}_2$ , нестехиометрический  $\text{SiO}_x$ ) и нитрид кремния (стехиометрический  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , нестехиометрический  $\text{SiN}_x$ ) являются двумя ключевыми диэлектриками в современных кремниевых приборах. Термический оксид кремния  $\text{SiO}_2$  не содержит ловушек и обеспечивает качественную границу с кремнием. Нитрид кремния, наоборот, имеет высокую концентрацию ( $10^{19}$ – $10^{21}$  см<sup>-3</sup>) электронных и дырочных ловушек [26].

Нитрид кремния обладает эффектом памяти, способностью локализовать инжектированные в него электроны и дырки с гигантским временем жизни локализованных электронов, 10 лет при 85°C. Эффект памяти в нитриде кремния используется в приборах современной флэш-памяти терабитного масштаба [27].

Преимуществом мемристорной памяти на основе оксида и нитрида кремния является то, что технология этих материалов детально разработана в современных кремниевых приборах. Цель настоящей работы – краткий обзор запоминающих свойств мемристоров на основе оксида и нитрида кремния.

## 1. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ МЕМРИСТОРОВ

Существует несколько основных технологий синтеза оксидных и нитридных пленок для кремниевых приборов. Ключевой технологией синтеза стехиометрического оксида кремния  $\text{SiO}_2$  является термическое окисление кремния в кислороде. Од-

нако такие пленки непригодны в качестве активной среды мемристора, так как активная среда мемристора должна содержать вакансии кислорода, которые выступают в качестве прекурсоров филамента. В мемристорах на основе оксидных диэлектриков активная диэлектрическая среда должна быть нестехиометрической, содержать высокую концентрацию вакансий кислорода [28].

В [29] показано, что обработка термического  $\text{SiO}_2$  в водородной плазме приводит к обогащению оксида избыточным кремнием, благодаря чему он может демонстрировать мемристивные свойства.

Другим способом получения нестехиометрического оксида кремния, обогащенного кремнием  $\text{SiO}_x$ , является плазмохимическое осаждение (**ПХО**) путем окисления силана в плазме.

Почти стехиометрический нитрид кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$  с высокой концентрацией Si–Si-связей [30] получают методом пиролиза в реакторе пониженного давления при температурах в диапазоне 700–800°C смеси дихлорсилана  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$  и аммиака  $\text{NH}_3$ .

Нестехиометрический нитрид кремния  $\text{SiN}_x$ , обогащенный избыточным кремнием, получают ПХО из смеси силана  $\text{SiH}_4$  и аммиака  $\text{NH}_3$  при температурах в диапазоне 200–400°C. В отличие от пиролитического нитрида кремния плазмохимический нитрид содержит высокую концентрацию водородных Si–H- и N–H-связей. В настоящей работе рассмотрены запоминающие свойства мемристоров на основе  $\text{SiN}_x$  и  $\text{SiO}_x$ , полученных по разным технологиям.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### 2.1. Запоминающие свойства мемристоров на основе пиролитического нитрида кремния

Запоминающие свойства мемристоров на основе пиролитического нитрида кремния изучались в [31–35]. На рис. 1 представлена петля гистерезиса металл–нитрид–оксид–полупроводник (**МНОП**) мемристора структуры  $\text{Si/SiO}_2(2 \text{ нм})/\text{Si}_3\text{N}_4(5 \text{ нм})/\text{Ni}$  с тонким подслоем  $\text{SiO}_2$  после нескольких циклов переключения при комнатной температуре [31]. Окно памяти такого мемристора около трех порядков.

На рис. 2 представлена зависимость окна мемристора от числа циклов перепрограммирования при комнатной температуре, на рис. 3 – зависимость окна памяти мемристора  $\text{Si/SiO}_2(2 \text{ нм})/\text{Si}_3\text{N}_4(5 \text{ нм})/\text{Ni}$  от времени при 85°C. Окно памяти не уменьшается со временем.

Был изучен механизм транспорта заряда мемристора  $\text{Si/SiO}_2(2 \text{ нм})/\text{Si}_3\text{N}_4(5 \text{ нм})/\text{Ni}$  при трех температурах в HRS- и LRS-состояниях. Количественный анализ показал, что эффект Френ-

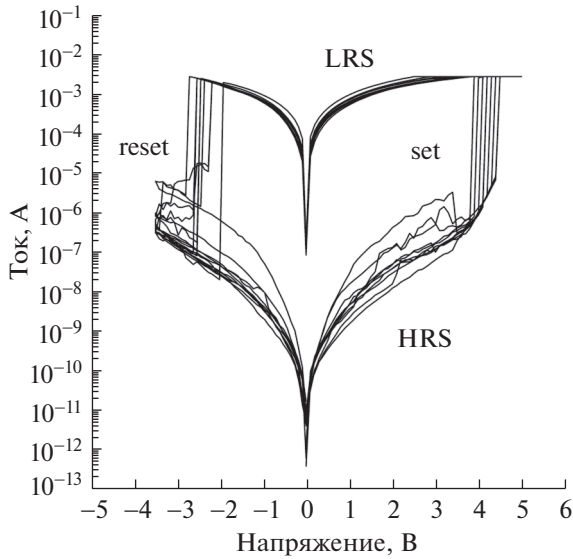


Рис. 1. Петля переключений HRS–LRS с десятью циклами для ReRAM на основе Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> [31, 32].

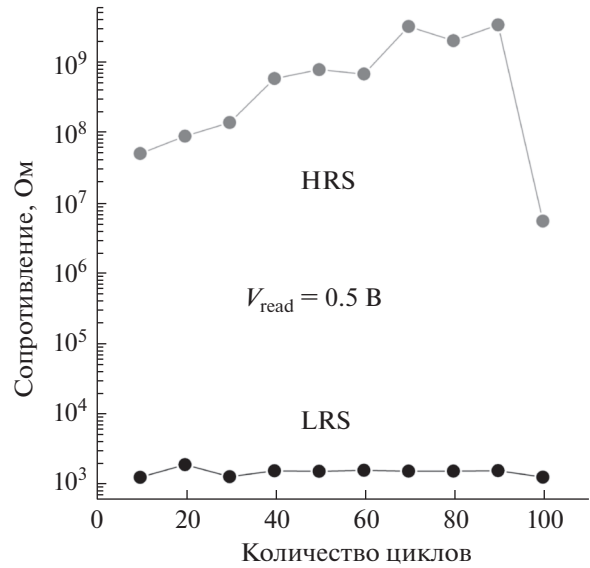


Рис. 2. Циклирование в МНОП-мемристоре при комнатной температуре. Длительность импульса 50 мс, напряжение включения  $V_{set} = 4.5$  В, напряжение выключения  $V_{reset} = -3.5$  В, напряжение чтения  $V_{read} = 0.5$  В [31, 32].

кея не описывает перенос заряда мемристора в HRS- и LRS-состояниях. В связи с этим был проанализирован механизм токов, ограниченных пространственным зарядом (ТОПЗ). Теория ТОПЗ между плоскими параллельными электродами представлена в [36].

Основные уравнения модели ТОПЗ:

$$I = I_{Ом} + I_{ТОПЗ} = Se\mu n \frac{U}{d} + S \frac{9}{8} \mu \epsilon \epsilon_0 \theta \frac{U^2}{d^3}, \quad (1)$$

$$n = \frac{2N_d}{1 + \sqrt{1 + \frac{4gN_d}{N_c} \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right)}}, \quad N_c = 2 \left( \frac{2\pi m^* kT}{h^2} \right)^{3/2}, \quad (2)$$

$$\theta = \frac{1}{1 + \frac{N_t}{N_c} \exp\left(\frac{W_t}{kT}\right)},$$

где  $S$  – площадь, вовлеченная в перенос заряда,  $\mu$  – подвижность электронов,  $n$  – концентрация свободных электронов в диэлектрике,  $\epsilon$  – статическая диэлектрическая проницаемость,  $\theta$  – степень заполнения ловушек,  $N_d$  – концентрация доноров,  $g$  – коэффициент вырождения,  $N_c$  – эффективная плотность состояний,  $E_a$  – энергия активации донора,  $N_t$  – концентрация ловушки,  $W_t$  – энергия ловушки,  $m^*$  – эффективная масса электрона,  $h$  – постоянная Планка

На рис. 4 представлены экспериментальные вольт-амперные характеристики (ВАХ) в HRS-состоянии при трех температурах и соответствующие расчеты по модели ТОПЗ. Наблюдается хорошее согласие эксперимента и теории при величинах параметров, указанных на рисунке.

На рис. 5 представлены эксперимент и расчет для транспорта заряда мемристора в LRS-состоянии.

Модель ТОПЗ имеет много параметров. Чтобы уменьшить количество переменных параметров, некоторые параметры взяты из опубликованных данных. Значения эффективной массы ( $m^* = 0.5 m_e$ ) и статической диэлектрической прони-

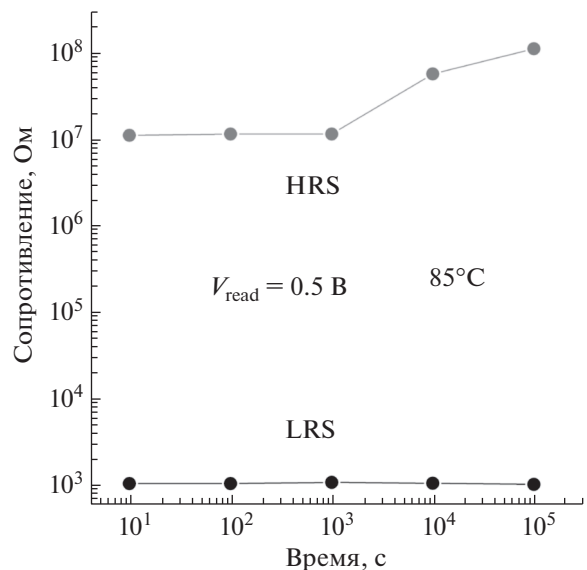


Рис. 3. Хранение заряда в МНОП-мемристоре при 85°C в состояниях HRS и LRS [31, 32].

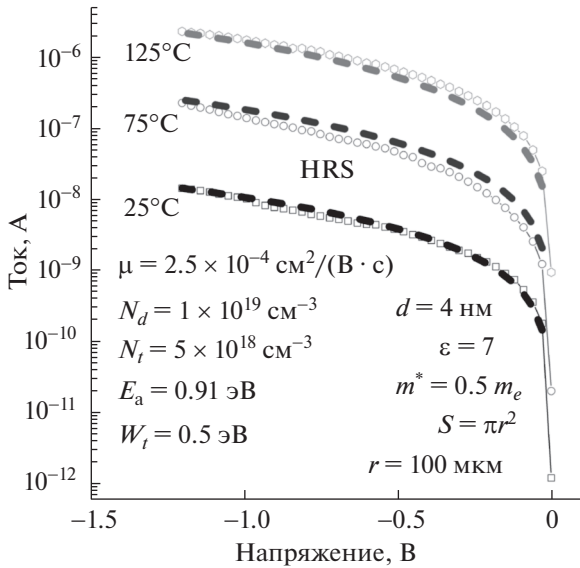


Рис. 4. Вольтамперные характеристики ReRAM Si/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Ni в HRS-состоянии и кривые моделирования на основе модели ТОПЗ [31, 32].

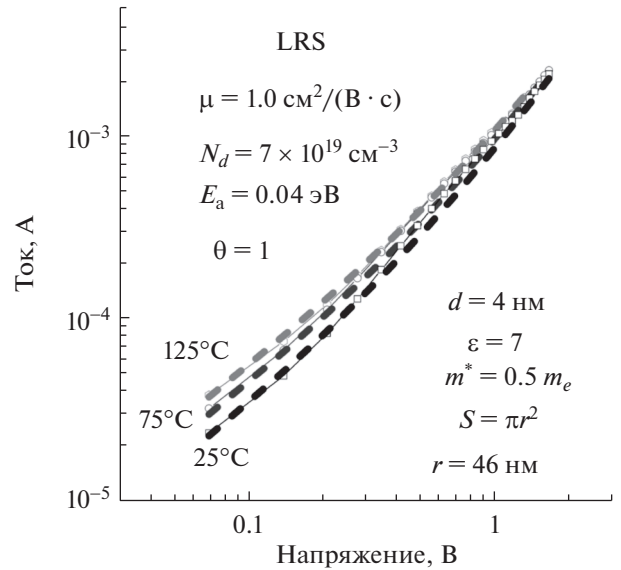


Рис. 5. Вольтамперные характеристики ReRAM Si/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Ni в LRS-состоянии и кривые моделирования на основе модели ТОПЗ [31, 32].

цаемости ( $\epsilon = 7$ ) взяты из типичных значений для Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> [37–39]. Поскольку эксперимент показал, что МНОП-мемристор без формовки, в состоянии HRS принимаем параметр  $S$  в качестве всего контакта ( $r = 100$  мкм). Предполагаем модель проводимости филамента в структуре МНОП в LRS, где филамент представляет собой аморфный кремний. Поэтому для случая LRS взяли подвижность, равную подвижности в аморфном кремнии ( $\mu = 1$  см<sup>2</sup>/(В с)). Концентрация доноров определяет теоретический наклон кривой в модели ТОПЗ при низких напряжениях, а концентрация ловушек – наклон при высоких напряжениях. Вольтамперные характеристики мемристора МНОП в HRS хорошо описываются моделью ТОПЗ с концентрацией доноров  $N_d = 1 \times 10^{19}$  см<sup>-3</sup>, энергией активации  $E_a = 0.91$  эВ, концентрацией ловушек  $N_l = 5 \times 10^{18}$  см<sup>-3</sup> и энергией ловушки  $W_l = 0.5$  эВ (рис. 6). Перенос заряда проходит через всю площадь контакта, и подвижность, полученная из модели ТОПЗ, равна  $\mu = 2.5 \times 10^{-4}$  см<sup>2</sup>/(В с). Похожее значение подвижности получено в [40].

Энергия активации доноров из модели ТОПЗ довольно велика. Все это указывает на то, что перенос заряда происходит через нитрид кремния. Вольт-амперные характеристики МНОП мемристора в состоянии LRS слабо зависят от температуры, поэтому степень заполнения ловушек  $\theta = 1$  (рис. 5), хотя с ростом температуры ток на омическом участке ВАХ увеличивается, это указывает на то, что природа филамента ближе к полупроводнику, чем к металлу. При сравнении с экспе-

риментом модель ТОПЗ дает следующие параметры: концентрация доноров  $N_d = 1 \times 10^{20}$  см<sup>-3</sup> и энергия активации  $E_a = 0.06$  эВ. Если взять параметр подвижности как для аморфного кремния, то эффективный радиус такого филамента, согласно модели ТОПЗ, будет  $r = 50$  нм. Механизм переноса заряда и свойства накопления заряда в мемристоре сильно зависят от технологии изготовления активного слоя мемристора. Толщина

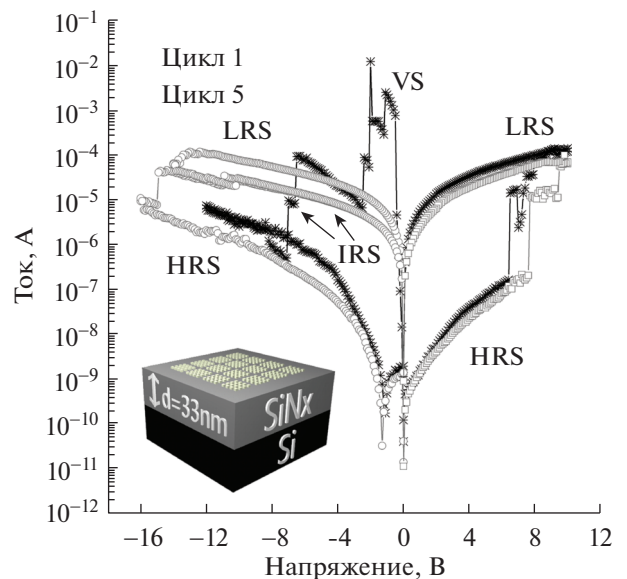


Рис. 6. ВАХ мемристора  $p^{++}$ -Si/SiN<sub>x</sub>(3.3 нм)/Ni на основе плазмохимического SiN<sub>x</sub> [45].

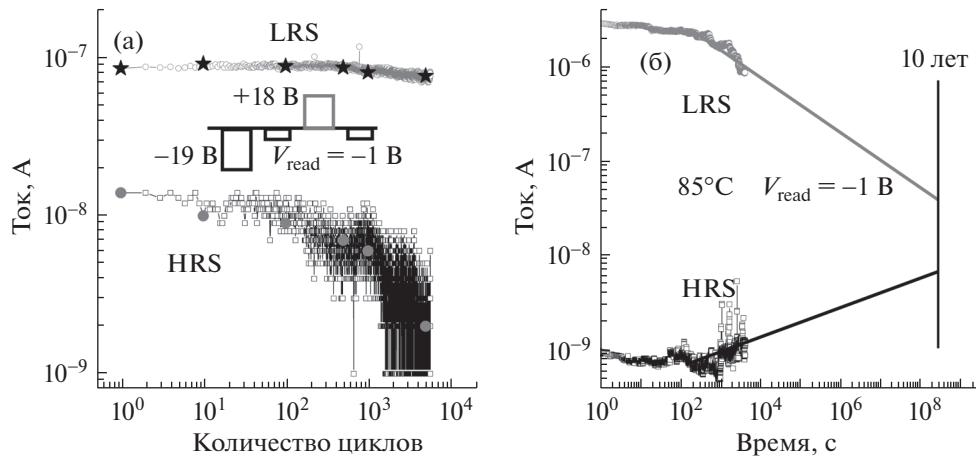


Рис. 7. Циклирование (а) и хранение информации при 85°C мемристора на основе плазмохимического нитрида кремния  $p^{++}$ -Si/SiN<sub>x</sub>(3.3 нм)/Ni [45].

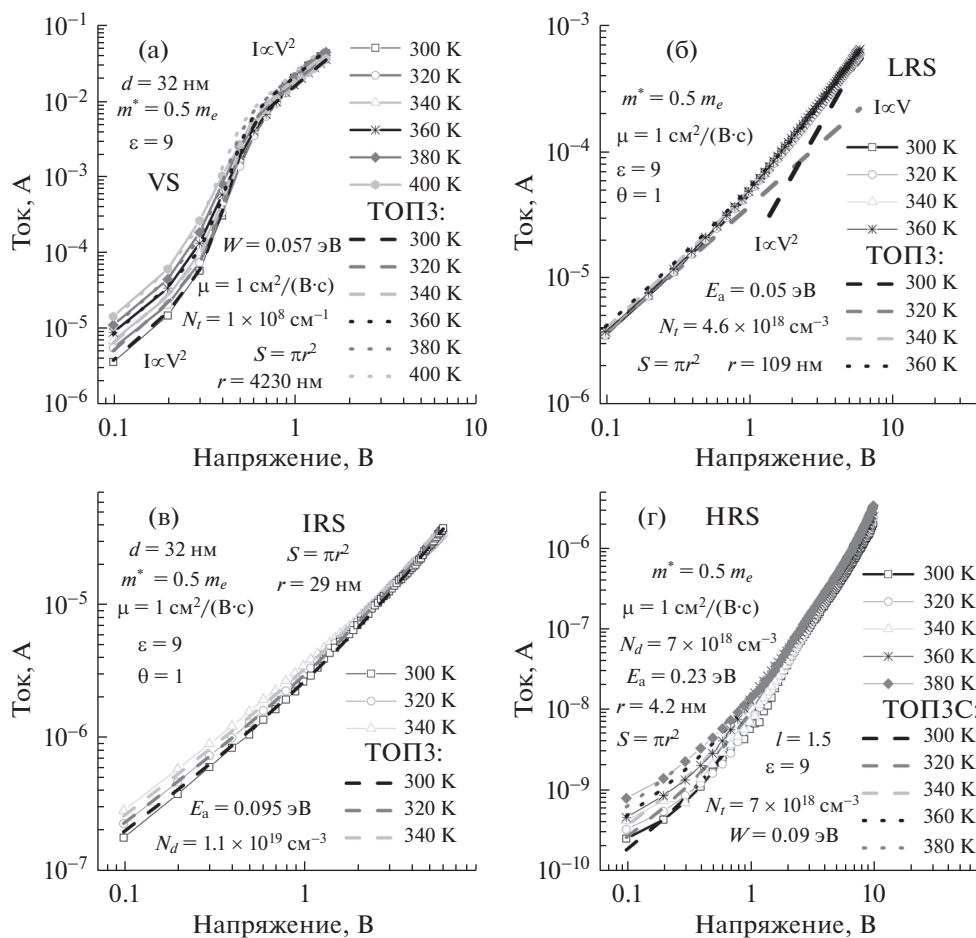
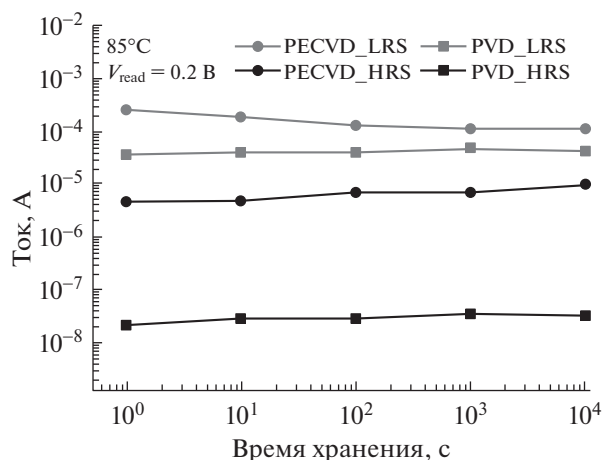
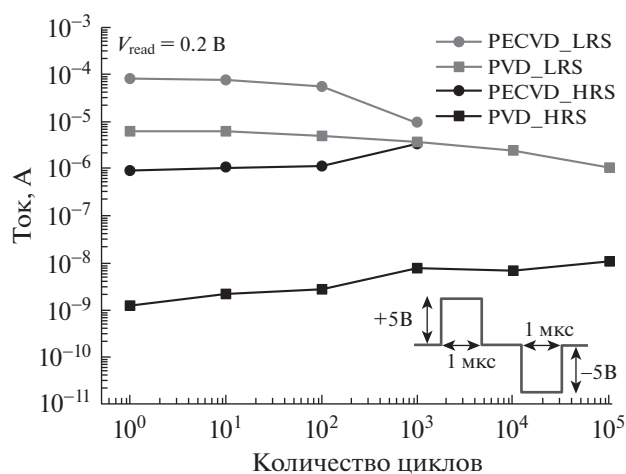


Рис. 8. ВАХ мемристора в двойном логарифмическом масштабе на основе плазмохимического нитрида кремния, измеренные при разных температурах в различных состояниях мемристора; точки – эксперимент, штриховые линии – моделирование на основе модели ТОПЗ [45]. Исходное состояние (virgin state – VS) (а), низкоомное состояние (LRS) (б), промежуточное состояние (intermediate state – IRS) (в), высокоомное состояние (HRS) (г) мемристора на основе плазмохимического нитрида кремния, транспорт заряда описывается моделью ТОПЗ с различными параметрами.



**Рис. 9.** Хранение информации, зависимость окна памяти от времени при 85°C для мемристоров на основе плазмохимического нитрида кремния и нитрида кремния, полученного распылением мишени из нитрида кремния. Измеряемая структура  $p^+ - Si/SiN_x(25 \text{ нм})/n^+ - Si$  [44].



**Рис. 10.** Зависимость окна памяти от числа циклов для мемристоров на основе плазмохимического нитрида кремния и нитрида кремния, полученного распылением мишени из нитрида кремния в структуре  $p^+ - Si/SiN_x(25 \text{ нм})/n^+ - Si$  [44].

оксида и нитрида кремния сопоставима с МНОП из [41].

Изученные МНОП-мемристоры не требуют процедуры формовки.

## 2.2. Запоминающие свойства мемристоров на основе плазмохимического и физически осажденного нитрида кремния

Запоминающие свойства мемристоров на основе плазмохимического и физически осажден-

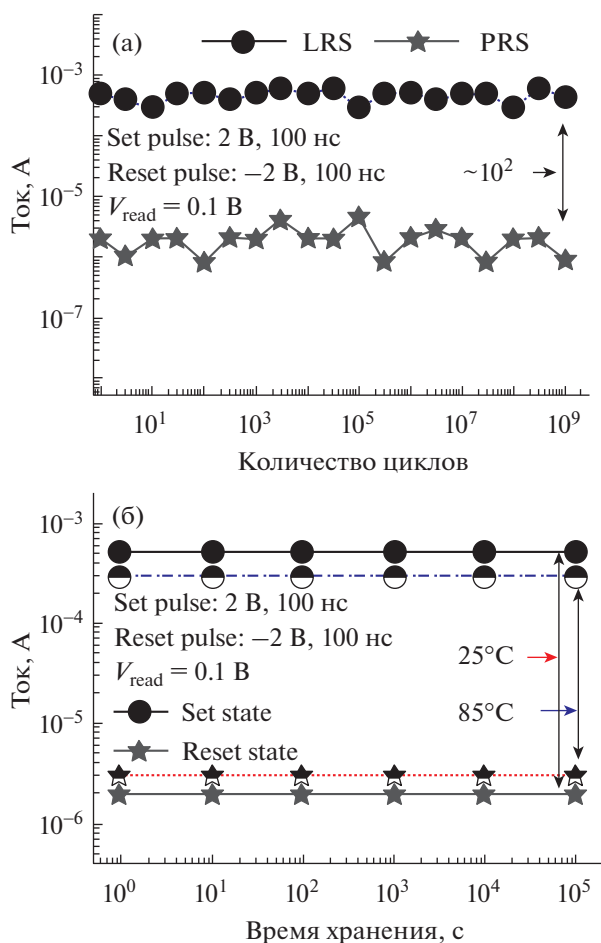
ного нитрида кремния изучались в [42–45]. На рис. 6 представлены ВАХ мемристора при циклировании на основе плазмохимического нитрида кремния  $p^+ - Si/SiN_x(33 \text{ нм})/Ni$ . Окно памяти мемристора на основе плазмохимического нитрида составляет около одного порядка. На рис. 7 представлены циклирование при комнатной температуре (а) и хранение информации при 85°C (б). Мемристор выдерживает до  $10^4$  циклов перепрограммирования и может хранить информацию до 10 лет при 85°C.

На рис. 8 показаны ВАХ мемристора на основе плазмохимического нитрида кремния в двойном логарифмическом масштабе, измеренные при разных температурах в различных состояниях мемристора [45]. По данным модели ТОПЗ энергия ловушек в различных состояниях мемристора: 0.057 эВ в исходном, 0.05 эВ в низкоомном, 0.095 эВ в промежуточном, 0.09 эВ в высокоомном. Для сравнения отметим, что энергия электронных и дырочных ловушек в пиролитическом нитриде кремния, который используется в качестве запоминающей среды в современной флэш-памяти, составляет величину 1.4 эВ [32].

В [44] сравнивались запоминающие свойства мемристоров на основе плазмохимического нитрида кремния и нитрида кремния, полученного распылением мишени из нитрида кремния (рис. 9). Величина окна памяти последнего больше и более стабильна по сравнению с аналогичными данными для мемристора на основе плазмохимического нитрида кремния. Это связано с тем, что в плазмохимическом нитриде кремния содержится большое количество водорода. Из-за большого количества связей водорода с азотом и кремнием, образованных при получении плазмохимическим методом, деградация мемристора на основе плазмохимического  $SiN_x$  наступает быстрее, чем нитрида кремния, полученного распылением мишени из нитрида кремния, где в технологии получения водород отсутствует.

Из рис. 10 следует, что мемристор на основе плазмохимического нитрида кремния выдерживает  $10^3$  циклов перепрограммирования. Мемристор на основе нитрида кремния, полученного распылением мишени из нитрида кремния, выдерживает по крайней мере  $10^5$  циклов перепрограммирования.

Хорошие запоминающие свойства мемристора на основе нитрида кремния, полученного высокочастотным реактивным распылением, продемонстрированы в [46] (рис. 11). Мемристор выдерживает по крайней мере  $10^9$  циклов перепрограммирования без заметной деградации и стабильное хранение информации при 25 и 85°C.



**Рис. 11.** Циклирование (а) и зависимость окна памяти от времени (б) для мемристора на основе нитрида кремния, полученного высокочастотным реактивным распылением в структуре Ti/SiN<sub>x</sub>(10 нм)/Pt/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si. Pt-электрод был заземлен, сигнал подавался на верхний Ti-электрод [46].

2.3. Запоминающие свойства мемристоров на основе плазмохимического оксида кремния

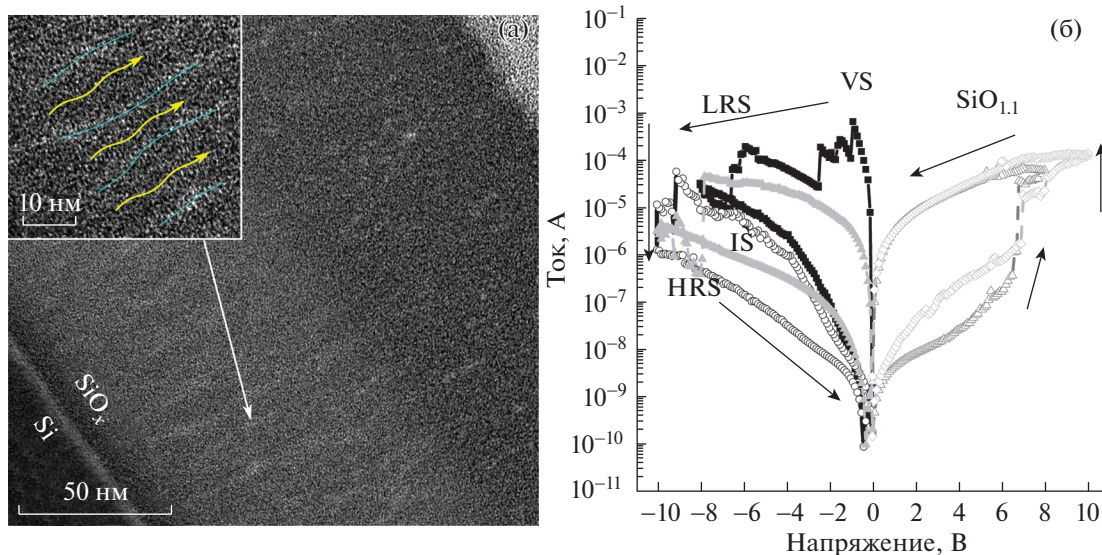
Запоминающие свойства мемристоров на основе плазмохимического оксида кремния изучались в [47]. На рис. 12а представлено изображение пленки плазмохимического SiO<sub>1,1</sub> толщиной 130 нм, полученное с помощью высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии. Режимы синтеза для SiO<sub>1,1</sub>-пленки и мемристора на основе SiO<sub>1,1</sub> одни и те же. На рисунке чередующиеся темные и светлые полосы являются проводящими каналами, которые получаются на стадии синтеза. ВАХ на рис. 12б подтверждает наличие проводящих каналов, так как исходное состояние мемристора является сильно проводящим.

Энергия ловушки в различных состояниях мемристора на основе SiO<sub>1,1</sub> лежит в диапазоне 0.05–0.42 эВ (рис. 13). Для сравнения отметим, что энергии электронных [48] и дырочных [49] ловушек в диоксиде кремния равны 1.6 эВ.

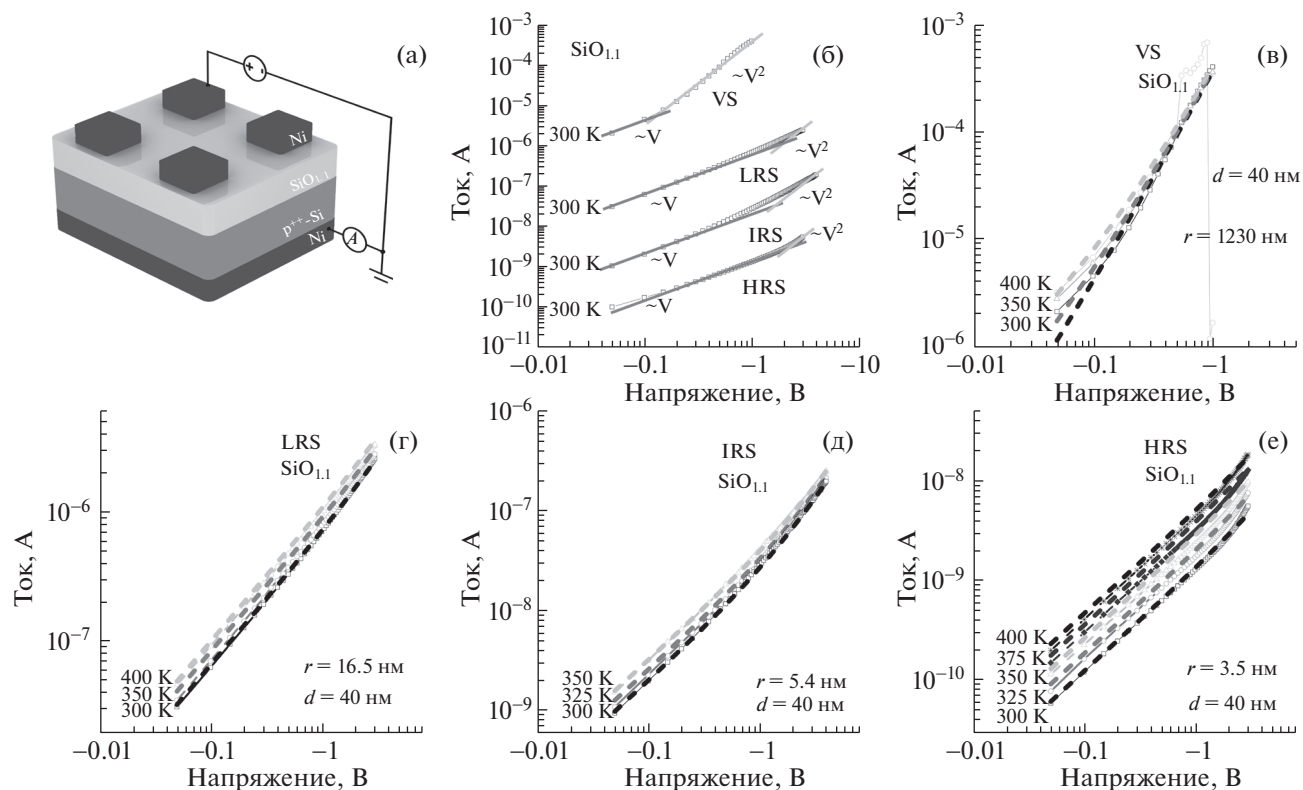
Для сравнения запоминающих свойств мемристоров на основе SiO<sub>x</sub> разного состава были измерены ВАХ для первых циклов переключения (рис. 14). Нестехиометрические пленки SiO<sub>x</sub> проявляют мемристорные свойства в диапазоне  $x = 0.7–1.8$ .

Измерения хранения заряда при 85°C для HRS и LRS были выполнены для четырех составов (рис. 15а–15г). По наклону кривой хранения заряда кривые были аппроксимированы до 10 лет. Наилучшими свойствами хранения заряда обладает мемристор на основе SiO<sub>1,1</sub>.

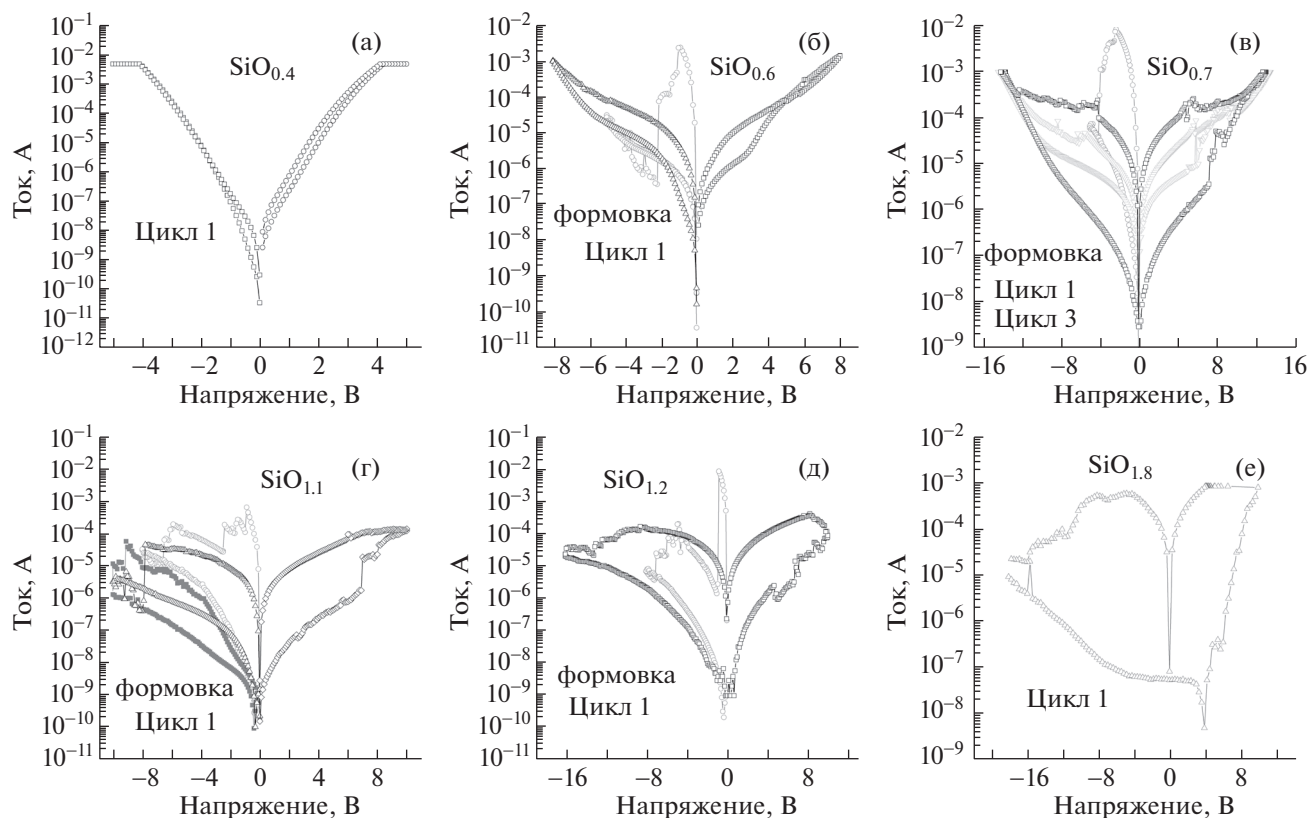
Измерения циклов включения/выключения также проводились для четырех составов



**Рис. 12.** Структура и запоминающие свойства мемристора на основе плазмохимического оксида кремния  $p^{++}$ -Si/SiO<sub>1,1</sub>(40 нм)/Ni: а – сечение запоминающей среды SiO<sub>1,1</sub> (толщина 130 нм), выращенной в тех же режимах, что и мемристор на основе SiO<sub>1,1</sub>; б – ВАХ мемристора на основе SiO<sub>1,1</sub> [47].

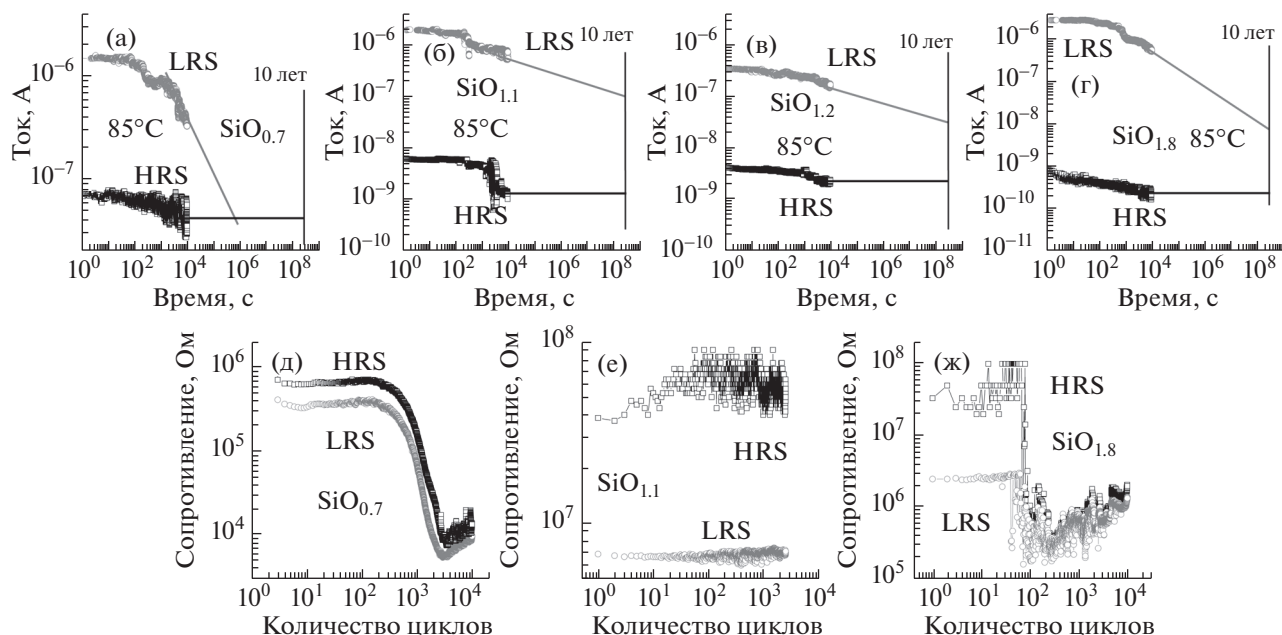


**Рис. 13.** Структура Si/SiO<sub>1.1</sub>(40 нм)/Ni-мемристора (а), ВАХ мемристора при комнатной температуре в различных состояниях (б): исходное состояние (virgin state VS), низкоомное (LRS), промежуточное (intermediate state – IRS), высокоомное (HRS). ВАХ при различных температурах, в разных состояниях: в – исходное, г – низкоомное, д – промежуточное, е – высокоомное [47].



**Рис. 14.** ВАХ мемристора на основе SiO<sub>0.4</sub> (а), SiO<sub>0.6</sub> (б), SiO<sub>0.7</sub> (в), SiO<sub>1.1</sub> (г), SiO<sub>1.2</sub> (д), SiO<sub>1.8</sub> (е).





**Рис. 15.** Хранение заряда для мемристора на основе SiO<sub>0.7</sub> (а), SiO<sub>1.1</sub> (б), SiO<sub>1.2</sub> (в), SiO<sub>1.8</sub> (г) при напряжении чтения – 1 В. Циклирование мемристоров на основе SiO<sub>0.7</sub> (д), SiO<sub>1.1</sub> (е), SiO<sub>1.8</sub> (ж) при напряжении чтения –1 В и при напряжениях переключения +12 и –12 В.

(рис. 15д–15ж). Мемристор на основе SiO<sub>1.2</sub> не имел окна памяти в импульсном режиме. Мемристоры на основе SiO<sub>0.7</sub> и SiO<sub>1.8</sub> выдерживают ~10<sup>2</sup> циклов переключений. Наилучшими запоминающими свойствами обладает мемристор на основе плазмохимического SiO<sub>x</sub> состава x = 1.1.

Наилучшим составом для мемристора является состав x = 1.1, с учетом погрешности определения состава в 10% x = 1.1 ± 0.1. Если состав меньше x < 1, то сопротивление в HRS-состоянии за счет сильного обогащения кремнием больше, чем при составах x > 1, т.е. если состав x < 1, то окно памяти мемристора около порядка (SiO<sub>0.6</sub>) или быстро становится около одного порядка (SiO<sub>0.7</sub>). Если состав x > 1, то окно памяти для плазмохимического мемристора на основе SiO<sub>x</sub> составляет около двух порядков. Состав x = 1.1 ± 0.1 является оптимальным по соотношению кремния к кислороду. При уменьшении Si в пленках SiO<sub>x</sub> уменьшается ресурс циклов записи/чтения. По-видимому, это связано с уменьшением количества дефектов за счет обеднения Si пленок SiO<sub>x</sub>.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены запоминающие свойства и механизмы транспорта заряда мемристоров на основе нитрида и оксида кремния. Такие мемристоры обеспечивают приемлемое окно памяти, хранение информации и число циклов перепрограммирования. Отметим, что мемристоры на основе

нитрида кремния, полученные методом физического осаждения, по сравнению с мемристорами на основе пиролитического и плазмохимического нитрида кремния имеют число циклов переключения (10<sup>9</sup>), существенно более высокое, чем число циклов перепрограммирования современной флэш-памяти (10<sup>4</sup>).

Транспорт заряда в мемристорах на основе нитрида и оксида кремния описывается моделью токов, ограниченных пространственным зарядом. Энергии ловушек, ответственных за транспорт заряда, лежат в диапазоне 0.05–0.5 эВ, что существенно меньше энергий ловушек в нитриде 1.4 эВ и оксиде кремния 1.6 эВ.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 19-29-03018 (мемристоры на основе SiO<sub>x</sub>)) и Российским научным фондом (грант № 19-19-00286 (мемристоры на основе SiN<sub>x</sub>)).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пройдаков Э.М.* // Цифровая экономика. 2018. Т. 3. № 3. С. 50.
2. *Hu H., Wen Y., Chua T.-S., Li X.* // IEEE Access. 2014. V. 2. P. 652.
3. *Zakir J., Seymour T., Berg K.* // Issues in Information Systems. 2015. V. 16. P. 81.
4. *Гафаров Ф.М.* Искусственные нейронные сети и приложения. Казань: Казан, 2018.

5. Абгарян К.К., Гаврилов Е.С. // Информатика и ее применения. 2020. Т. 14. № 2. С. 104.
6. Теплов Г.С., Горнев Е.С. // Микроэлектроника. 2019. Т. 3. № 2. С. 163.
7. Бобков С.Г., Басаев А.С. Методы и средства аппаратного обеспечения высокопроизводительных микропроцессорных систем. М.: Техносфера, 2021.
8. Ермаков И.В., Шелепин Н.А. // Изв. вузов. Электроника. 2014. Т. 106. № 2. С. 31.
9. Meena J.S., Sze S.M., Chand U., Tseng T.-Y. // Nanoscale Res. Lett. 2014. V. 9. P. 256.
10. Zidan M.A., Strachan J.P., Lu W.D. // Nat. Electron. 2018. V. 1. P. 22.
11. Strukov D.B., Snider G.S., Stewart D.R., Williams R.S. // Nature. 2008. V. 453. P. 80.
12. Miao F., Strachan J.P., Yang J.J. et al. // Adv. Mater. 2011. V. 23. № 47. P. 5633.
13. Lee H.Y., Chen P.S., Wu T.Y. et al. // IEEE International Electron Devices Meeting. 2008. P. 297.
14. Chang W.Y., Lai Y.C., Wu T.B. et al. // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 92. P. 022110.
15. Argall F. // Solid State Electron. 1968. V. 11. № 5. P. 535.
16. Jeong D.S., Schroeder H., Waser R. // Electrochem. Solid State Lett. 2007. V. 10. P. 51.
17. Molina-Reyes J., Hernandez-Martinez L. // Complexity. 2017. V. 10. P. 8263904.
18. Kundozeroва T.V., Grishin A.M., Stefanovich G.B., Velichko A.A. // IEEE Trans. Electron Devices. 2012. V. 59. № 4. P. 1144.
19. Mehonic A., Shluger A.L., Gao D. et al. // Adv. Mater. 2018. V. 30. P. 1801187.
20. Kim S., Kim H., Hwang S., Kim M.H. // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2017. V. 9. P. 40420–7.
21. Koryazhkina M.N., Tikhov S.V., Mikhaylov A.N. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2018. V. 993. P. 012028.
22. Shaposhnikov A.V., Perevalov T.V., Gritsenko V.A. et al. // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 100. P. 243506.
23. Tang M.H., Wang Z.P., Li J.C. et al. // Semicond. Sci. Technol. 2011. V. 26. P. 075019.
24. Sun X., Li G., Zhang X. et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2011. V. 44. P. 125404.
25. Minnekhanov A.A., Emelyanov A.V., Lapkin D.A. et al. // Sci. Rep. 2019. V. 9. P. 10800.
26. Насыров К.А., Гриценко В.А. // Успехи физ. наук. 2013. Т. 183. № 10. С. 1099.
27. Gritsenko V.A. // Silicon Nitride on Si: Electronic Structure for Flash Memory Devices / Thin Films on Si: Electronic and Photonic Applications / Eds. Narayanan V. et al. Singapore: World Scientific Press, 2016. P. 273.  
[https://doi.org/10.1142/9789814740487\\_0006](https://doi.org/10.1142/9789814740487_0006)
28. Гриценко В.А., Алиев В.Ш., Исламов Д.Р., Воронковскый В.А. Способ изготовления активного слоя для универсальной памяти на основе резистивного эффекта. Пат. 2611580 (Россия). 2017.
29. Voronkovskii V.A., Perevalov T.V., Iskhakzay R.M.H. et al. // J. Non-Cryst. Solids. 2020. V. 546. P. 120256.  
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.120256>
30. Gritsenko V.A., Perevalov T.V., Orlov O.M., Krasnikov G.Ya. // Appl. Phys. Lett. 2016. V. 109. P. 06294.  
<https://doi.org/10.1063/1.4959830>
31. Орлов О.М., Гисматулин А.А., Гриценко В.А., Мизгунов Д.С. // Микроэлектроника. 2020. Т. 49. № 5. С. 395.  
<https://doi.org/10.31857/S0544126920050075>
32. Gismatulin A.A., Orlov O.M., Gritsenko V.A. et al. // Appl. Phys. Lett. 2020. V. 116. № 20. P. 203502.  
<https://doi.org/10.1063/5.0001950>
33. Gismatulin A.A., Orlov O.M., Gritsenko V.A., Krasnikov G.Y. // Chaos, Solitons Fractals. 2021. V. 142. P. 110458.  
<https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110458>
34. Kim S., Cho S., Park B.-G. // AIP Adv. 2016. V. 6. P. 015021.  
<https://doi.org/10.1063/1.4941364>
35. Tikhov S.V., Mikhaylov A.N., Belov A.I. et al. // Microelectron. Eng. 2018. V. 187–188. P. 134.  
<https://doi.org/10.1016/j.mee.2017.11.002>
36. Lampert M.A., Mark P. Current injection in solids. New York: Academic Press, 1970.
37. Shaposhnikov A.V., Petrov I.P., Gritsenko V.A., Kim C.W. // Phys. Solid State. 2007. V. 9. № 49. P. 1628.  
<https://doi.org/10.1134/S1063783407090041>
38. Гриценко В.А. // Успехи фи. наук. 2012. Т. 5. № 55. С. 498.  
<https://doi.org/10.3367/UFNr.0182.201205d.0531>
39. Gritsenko V.A., Meerson E.E., Morokov Y.N. // Phys. Rev. 1998. V. 4. № 57. P. 2081.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.57.R2081>
40. Hattori R., Shirafuji J. // Appl. Phys. Lett. 1989. V. 12. № 54. P. 1118.  
<https://doi.org/10.1063/1.101478>
41. Jiang X.F., Ma Z.Y., Xu J. et al. // Sci. Rep. 2015. V. 5. P. 15762.  
<https://doi.org/10.1038/srep15762>
42. Kim H.-D., An H.-M., Kim T.G. // Microelectron. Eng. 2012. V. 98. P. 351.  
<https://doi.org/10.1016/j.mee.2012.07.052>
43. Kim H.-D., An H.-M., Kim T.G. // J. Appl. Phys. 2011. V. 109. P. 016105.  
<https://doi.org/10.1063/1.3525991>
44. Yen T.J., Chin A., Gritsenko V.A. // Sci. Rep. 2020. V. 10. № 1. P. 2807.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-59838-y>
45. Gismatulin A.A., Kamaev G.N., Kruchinin V.N. et al. // Sci. Rep. 2021. V. 11. P. 2417.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-82159-7>
46. Kim H.-D., An H.-M., Hong S.M., Kim T.G. // Phys. Status Solidi A. 2013. V. 210. № 9. P. 1822.  
<https://doi.org/10.1002/pssa.201329021>
47. Gismatulin A.A., Voronkovskii V.A., Kamaev G.N. et al. // Nanotechnology. 2020. V. 31. P. 505704.  
<https://doi.org/10.1088/1361-6528/abb505>
48. Islamov D.R., Gritsenko V.A., Perevalov T.V. et al. // Appl. Phys. Lett. 2016. V. 109. P. 052901.  
<https://doi.org/10.1063/1.4960156>
49. Gritsenko V.A., Wong H. // Crit. Rev. Solid State Mater. Sci. 2011. V. 36. P. 129.  
<https://doi.org/10.1080/10408436.2011.592622>