

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

УДК 621.382

**ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ ТИТАНОМ
НА СВОЙСТВА МЕМРИСТОРОВ Ag/ α -Si**А. С. Самсонова¹, О. А. Клименко^{1,2}, В. Н. Антонов¹

Мемристоры катионного типа являются перспективными компонентами для вычислительных систем нового поколения благодаря низкому энергопотреблению, высокой масштабируемости и возможности аналогового переключения. Однако мемристоры на основе кремния, как правило, требуют относительно высоких напряжений электроформирования, что отрицательно сказывается на надёжности и энергоэффективности. В данной работе исследуется влияние легирования Ti на электрические свойства мемристоров α -Si/Ag с варьированием концентрации Ti до 27.4%. Напряжение электроформирования снижается с 5.0 В в нелегированных устройствах до 1.1 В в образцах с самой высокой концентрацией Ti. При этом сохраняется высокое отношение сопротивлений ON/OFF ($\sim 10^3$), стабильность резистивных состояний в течение не менее 12 часов и многоуровневый характер переключений с числом состояний $> 10^3$. Наблюдаемые изменения можно объяснить образованием неподвижных центров в α -Si при легировании Ti, которые служат основой при формировании проводящих Ag филаментов. Результаты исследования открывают новые возможности для оптимизации работы мемристоров на основе кремния за счёт модификации переключающей среды.

Ключевые слова: мемристор, резистивная память с произвольным доступом, аморфный кремний, резистивные переключения.

¹ Сколковский институт науки и технологий, 121205 Россия, Москва, территория инновационного центра “Сколково”, Большой бул., 30, стр. 1; e-mail: alena.samsonova@skoltech.ru.

² ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53.

Введение. Мемристоры относятся к классу устройств с резистивными переключениями, которые благодаря низкому энергопотреблению, высокой масштабируемости и способности к аналоговому переключению между резистивными состояниями могут применяться в качестве энергонезависимой памяти нового поколения для нейроморфных вычислений [1–3]. Мемристоры катионного типа, как правило, на основе кремния с проводящими металлическими каналами являются привлекательными благодаря низкому напряжению включения/выключения, высокой скорости переключений между резистивными состояниями и совместимости с технологией комплиментарной структуры металл-оксид полупроводник (КМОП) [4, 5]. В таких устройствах резистивные переключения происходят за счёт образования и разрыва металлических каналов (обычно из серебра и/или меди) в диэлектрическом слое [6]. Этот процесс происходит за счёт миграции катионов металла под воздействием приложенного электрического поля и последующих электрохимических реакций [7–9].

В последние годы значительное внимание уделяется улучшению характеристик катионных мемристоров в связи с демонстрацией их синаптических свойств для нейроморфных вычислительных систем [10]. Такие параметры, как однородность переключений, время удержания резистивных состояний и линейность аналоговых переключений, были улучшены за счёт применения различных подходов, основанных на материаловедении и структурной модификации. К ним относятся стабилизация проводящих Ag филаментов путём легирования медью для повышения однородности переключения и устойчивости состояний [5, 11], введение барьерного слоя $i\text{-SiO}_x$ между переключающей средой и нижним электродом для увеличения времени удержания [12], а также внедрение нанокластеров Ti в уплотнённую переключающую среду для повышения линейности аналогового переключения [13].

Наряду с перечисленными параметрами, напряжение электроформовки остается важным и ограничивающим фактором для практической реализации мемристоров. Электроформовка – необратимый процесс, который инициирует образование проводящих каналов и обеспечивает последующие резистивные переключения [14]. Как правило, мемристоры требуют относительно высоких напряжений электроформовки, что негативно сказывается на выходе готовых устройств, их надёжности, а также приводит к росту энергопотребления и ограничивает интеграцию в большие массивы [15]. Таким образом, контролируемое снижение напряжения электроформовки является важной задачей в разработке мемристоров и их практическом применении. В то же время снижение напряжения электроформовки без ухудшения характеристик переключения

представляет собой сложную задачу. В литературе описано несколько подходов к снижению напряжения электроформовки [16–20]. Некоторые из них требуют сложных технологических процессов. Однако существуют и относительно простые решения. Так, в работе [19] показано, что напряжение электроформовки α -Si мемристоров может быть уменьшено в два раза за счёт введения монослоя наночастиц Au на границе между α -Si и нижним электродом.

В настоящей работе мы исследуем влияние легирования титаном на электрические свойства α -Si/Ag мемристоров. Путём легирования изолирующего α -Si слоя мы стремимся модифицировать формирование в нем проводящих каналов. Мы нашли, что добавление Ti снижает напряжение электроформовки с ~ 5 В до ~ 1 В. При этом устройства сохраняют высокое соотношение сопротивлений ON/OFF ($\sim 10^6$), стабильное удержание резистивных состояний в течение не менее 12 часов и наличие более 10^3 различных резистивных состояний. Таким образом, мы предлагаем новый подход к разработке мемристоров путём модификации материала переключающей среды.

Экспериментальная часть.

а. Изготовление образцов. Образцы на основе α -Si изготавливались на подложке SiO_2/Si в виде перекрёстных структур с использованием прямой лазерной литографии. Нижние электроды осаждались методом электронно-лучевого термического испарения слоёв Ti/Au (5 нм/25 нм), где подслоя Ti напылялся для улучшения адгезии. Поверх нижних электродов наносился слой SiO_2 толщиной 50 нм методом магнетронного распыления. Он предотвращает электрический контакт между верхними и нижними электродами. Над нижними электродами в слое SiO_2 формировались окна размером 6×6 мкм². Активный слой α -Si:Ti/Ag/Ti осаждался методом AC/DC магнетронного распыления при комнатной температуре. Слой α -Si толщиной 7.5 нм осаждался одновременно с Ti. Концентрация Ti в α -Si регулировалась изменением DC мощности, подаваемой на головку магнетрона с Ti мишенью. Содержание Ti в α -Si варьировалось от 0% до 27.4%. Доля Ti определялась по отношению скорости осаждения Ti при заданной мощности к скорости осаждения Si. Толщины верхних слоёв Ag и Ti составляли 10 нм и 40 нм, соответственно, при этом слой Ti служит для пассивации Ag. Завершающим этапом являлось осаждение верхних поперечных Al электродов толщиной 100 нм методом DC магнетронного распыления. Схематическое изображение структуры и оптические фотографии готовых устройств приведены на рис. 1(а)–(с).

б. Экспериментальная установка. Все измерения проводились при комнатной температуре с использованием схемы постоянного напряжения: смещение прикладывалось

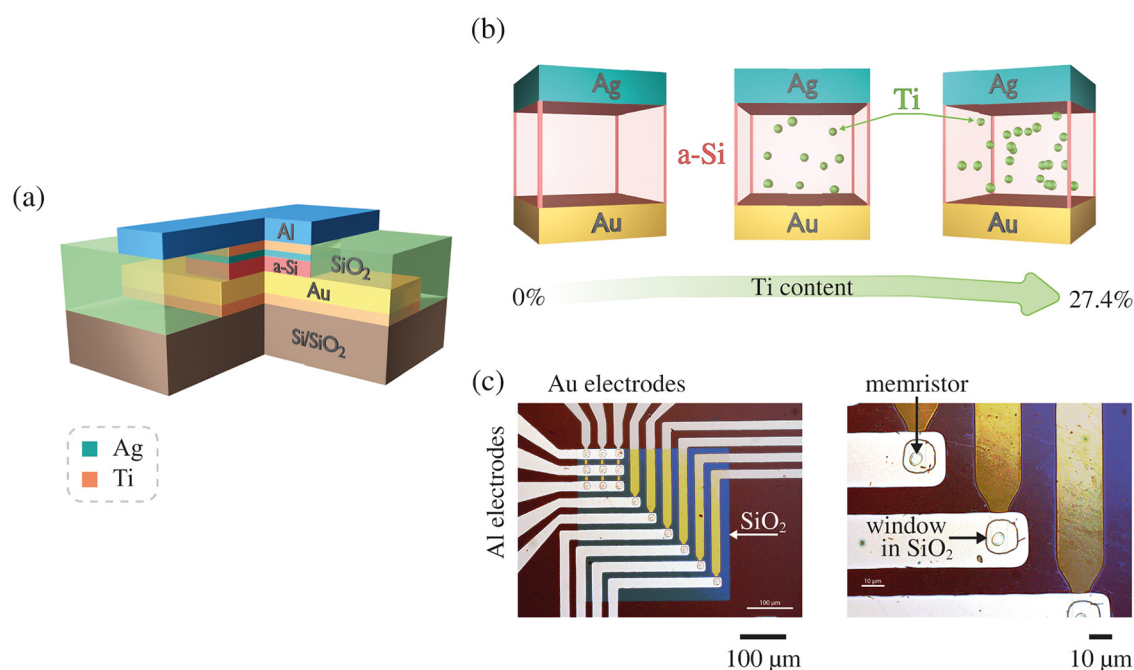


Рис. 1: (а) трёхмерная схема мемристора α -Si/Ag на подложке Si/SiO₂; (б) схематичное изображение образцов с разной степенью легирования титаном от 0 до 27.4%; (с) оптические фотографии готовых устройств (вид сверху).

к верхнему электроду, в то время как нижний электрод заземлен. Измерения проводились с использованием пикоамперметра – источника напряжения совместно с генератором сигналов для подачи импульсов напряжения. Для получения биполярных ВАХ использовалась треугольная форма напряжения в диапазоне от 0 В до ± 7 В. Во время электроформовки и последующих включений мемристора задавалось ограничение по току с целью предотвращения деградации устройства. Измерения времени удержания резистивных состояний проводились путем перевода мемристора в низкоомное состояние (LRS) и последующего измерения тока в течение длительного времени до 12 часов. Измерение осуществлялось короткими импульсами напряжения 0.25 В длительностью 500 мс, подаваемыми каждые 14 с. При измерении множества резистивных состояний каждое состояние фиксировалось и считывалось в течение 60 с. По полученным временным зависимостям для каждого состояния вычислялось среднее значение проводимости и её стандартное отклонение для анализа флуктуаций и уровня шума каждого состояния. Во всех экспериментах сопротивление мемристора в низкоомном состоянии определялось со смещением 0.25 В, которое выбрано для минимизации воздействия на резистивное состояние устройства.

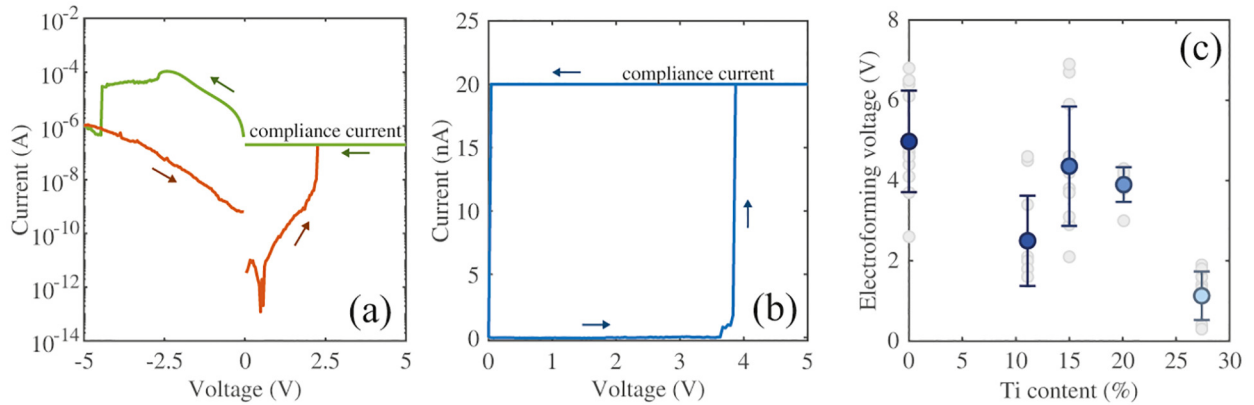


Рис. 2: (a) типичная биполярная вольт-амперная характеристика (ВАХ) мемристора после электроформовки, демонстрирующая резкое включение и плавное выключение; (b) типичная ВАХ электроформовки мемристора α -Si:Ti/Ag; (c) зависимость напряжения электроформовки от концентрации Ti в α -Si.

Результаты и их обсуждение. На рис. 2(a) представлена типичная биполярная ВАХ устройства. Процесс включения характеризуется пороговым переключением из высокоомного (HRS) в низкоомное состояние (LRS), тогда как процесс выключения носит более плавный, аналоговый характер. Предварительно α -Si мемристоры требуют электроформовки, которая происходит при первом приложении напряжения и представляет собой процесс, аналогичный мягкому пробое диэлектрика (рис. 2(b)). Такое поведение указывает на то, что образование проводящих каналов начинается при достижении критической напряжённости электрического поля, что приводит к резкому возрастанию тока. Напряжение электроформовки V_{form} определялось как напряжение, при котором ток превышает 10 нА. Как видно из рис. 2(c), для нелегированного α -Si напряжение электроформовки составляет 5.0 ± 1.3 В. С увеличением концентрации Ti величина V_{form} снижается до 1.1 ± 0.6 В при максимальной концентрации Ti, приближаясь к рабочему напряжению включения.

После электроформовки процессы включения и выключения требуют более низких напряжений, определяемых как V_{set} и V_{reset} , соответственно. Для всех образцов величина V_{reset} остается практически неизменной, тогда как V_{set} уменьшается с увеличением концентрации Ti. Для устройств с максимальной концентрацией Ti переключение в низкоомное состояние происходит при $V_{\text{set}} = 0.9 \pm 0.6$ В, в то время как для нелегированных образцов $V_{\text{set}} = 1.6 \pm 1.0$ В. Известно, что Ti обладает значительно меньшей диффузионной подвижностью в Si по сравнению с Ag и, следовательно, не участвует

непосредственно в росте проводящих каналов [21, 22]. Кроме того, стандартный восстановительный потенциал Ti ($E_{\text{Ti}}^{\varphi} = -1.63$ В) существенно ниже, чем у Ag ($E_{\text{Ag}}^{\varphi} = +0.8$ В), что облегчает перенос электронов от Ti к катионам Ag и тем самым способствует восстановлению Ag [23]. С точки зрения взаимодействия с кремнием серебро термодинамически не смешиваемо с Si, что и обуславливает его использование в качестве подвижной примеси [24]. Напротив, Ti может образовывать термодинамически устойчивые соединения Ti-Si [13, 25]. Такие соединения в дальнейшем могут служить благоприятными центрами для восстановления Ag и формирования проводящих каналов. Несмотря на вышеупомянутые улучшения, все образцы демонстрируют заметную изменчивость как от цикла к циклу, так и от устройства к устройству, что является естественным следствием случайного пространственного распределения кластеров Ti и стохастической природы формирования проводящих каналов.

Т а б л и ц а 1

Оценка числа устойчивых резистивных состояний мемристоров с различной концентрацией Ti, рассчитанная по формуле (1), а также параметры, использованные при расчёте

% Ti	G_{max} , мкСм	G_{min} , нСм	σ_G , мкСм	N_{states}
0%	930	0.012	0.139	1113
11.1%	880	0.11	0.355	415
15.0%	1990	0.36	0.108	3070
20.1%	2690	0.07	0.286	1571
27.4%	2100	0.08	0.303	1153

Нелинейность тока ($k = \frac{I(V)}{I(V/2)}$) и коэффициент выпрямления ($RR = \frac{I(V)}{I(-V)}$) мемристоров в низкоомном состоянии имеют решающее значение для реализации больших матриц мемристоров типа “кроссбар”, поскольку высокие значения k и RR позволяют подавлять токи утечки и тем самым снижать ошибки считывания. Для всех исследованных образцов ни один из этих параметров не демонстрирует заметной зависимости от концентрации Ti: k достигает 3.1, а RR – 4.2. В экспериментах также не наблюдается асимметрии k и RR , обусловленной различными барьерами Шоттки на границах Au/ α -Si и Ag/ α -Si. При отсутствии дефектных состояний на границе раздела материалов можно было бы предположить различную величину барьеров Шоттки; 1.3 эВ на границе Au/ α -Si ($\varphi_{\text{Au}} = 5.3$ эВ [26]) и около 0.3 эВ на границе Ag/ α -Si ($\varphi_{\text{Ag}} = 4.3$ эВ [27]). Оценки получены в предположении, что электронное сродство кристаллического

кремния $\chi_{\text{Si}} = 4.0$ эВ [28]. Асимметрия барьеров должна приводить к усилению выпрямляющих свойств мемристоров, поскольку при обратном смещении (положительное напряжение на Ag) основное падение потенциала происходило бы на границе раздела Au/ α -Si, что сопровождается увеличением области обеднения, тогда как область обеднения на границе Ag/ α -Si сужается. Считается, что при нанесении α -Si образуется большое количество поверхностных и объемных дефектов, которое приводит к пиннингу уровня Ферми. Вследствие этого высота барьера Шоттки почти всегда жёстко фиксируется дефектными состояниями на границе раздела и обычно составляет около половины ширины запрещенной зоны α -Si, независимо от материала контакта.

Время удержания резистивных состояний не демонстрирует какой-либо систематической зависимости от концентрации Ti, как показано на рис. 3(a). Все образцы, изначально переведенные в низкоомное состояние с сопротивлением $R \approx (46 \pm 5)$ кОм, сохраняют стабильное сопротивление в течение 12 часов при комнатной температуре. На рис. 3(b) представлено распределение множества состояний сопротивления для образца с концентрацией Ti, равной 20.1%. Хотя большинство состояний сопротивления остаются стабильными, в малом числе случаев наблюдаются переходы между соседними состояниями. Эти переходы, вероятно, обусловлены возможными изменениями в распределении Ag в проводящих каналах в процессе считывания сопротивления. Отношение сопротивлений ON/OFF достигает $\sim 10^6$ и остаётся одинаковым для всех образцов, без заметной зависимости от концентрации Ti. Эти результаты свидетельствуют о том, что, несмотря на влияние Ti на процессы формирования проводящих каналов, долговременная стабильность уже сформированных каналов, а также параметры k и RR остаются неизменными.

Для оценки числа достоверно различимых резистивных состояний были измерены и проанализированы зависимости уровня шума от проводимости состояний образцов с различной степенью легирования. Образец с помощью программирующего импульса напряжением в несколько вольт переводился в новое резистивное состояние, после чего измерялась его проводимость в течение 60 с. Для каждого состояния вычислялось среднее значение проводимости и её среднеквадратичное отклонение (SD). Для всех образцов какой-либо возрастающей и убывающей зависимости SD от среднего значения проводимости выявлено не было (рис. 3(c)), поэтому оценка числа состояний проводилась в предположении, что величина SD не зависит от проводимости состояния, т.е. число состояний определяется усреднённым по всем состояниям значением SD, σ_G :

$$N_{\text{states}} = \frac{G_{\text{max}} - G_{\text{min}}}{\alpha \sigma_G}, \quad (1)$$

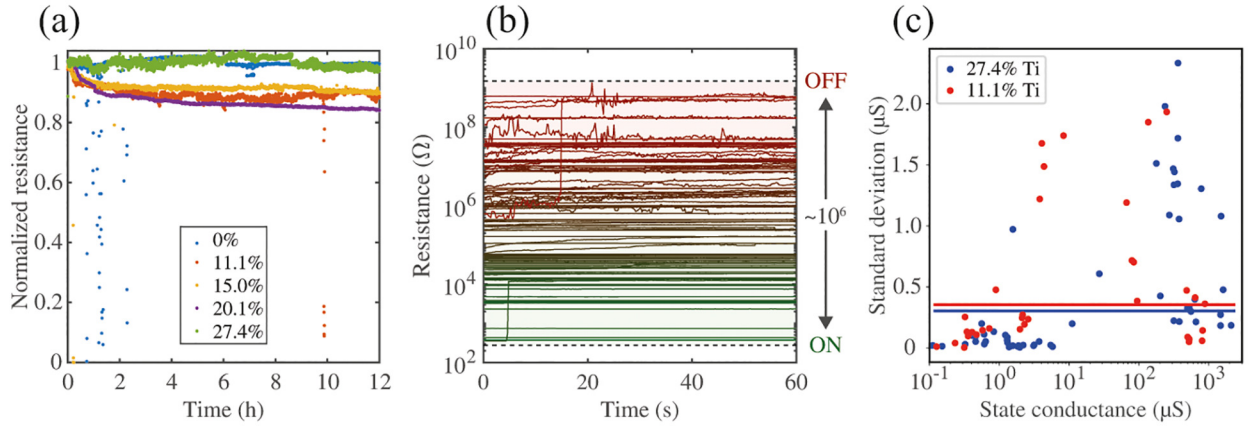


Рис. 3: (а) характеристика удержания резистивного состояния мемристоров в течение 12 часов при напряжении считывания 0.25 В, переведенных в низкоомное состояние с сопротивлением $R \approx 46 \pm 5$ кОм; (б) распределение множества состояний сопротивления для мемристора с концентрацией Ti, равной 20.1%; (с) зависимость уровня шума от проводимости состояния для мемристоров с концентрацией Ti, равной 11.1% (красные точки) и 27.4% (синие точки). Точки соответствуют среднеквадратичному отклонению проводимости от её среднего значения, сплошные линии – средние значения среднеквадратичного отклонения, усреднённые по всем измеренным состояниям (подробности см. в тексте).

где $G_{\max}$ и $G_{\min}$ – максимальное и минимальное значения проводимости мемристора, а α – коэффициент надёжности. В данной работе мы используем принятую для микроэлектроники величину $\alpha = 6$, что позволяет учесть сравнительно широкий разброс значений SD и гарантировать надёжное разделение соседних состояний. В табл. 1 приведены полученные результаты оценки числа устойчивых резистивных состояний образцов, а также использованные при расчётах параметры. Для большинства образцов (кроме 11.1% Ti) число состояний превысило 1000, достигая максимального значения 3070 для образцов с концентрацией Ti, равной 15%.

Дополнительно были исследованы характеристики переключения мемристора с концентрацией Ti, равной 27.4%, в низкоомное состояние при варьировании как амплитуды, так и длительности импульсов напряжения. Записывающий импульс подавался на мемристор в высокоомном состоянии, после чего следовал считывающий импульс (0.25 В, 500 мс). Регистрировались успешные события включения, соответствующие переходу в низкоомное состояние, после чего мемристор переводился в низкоомное состояние перед началом следующего цикла. Общее число циклов для каждой пары значений

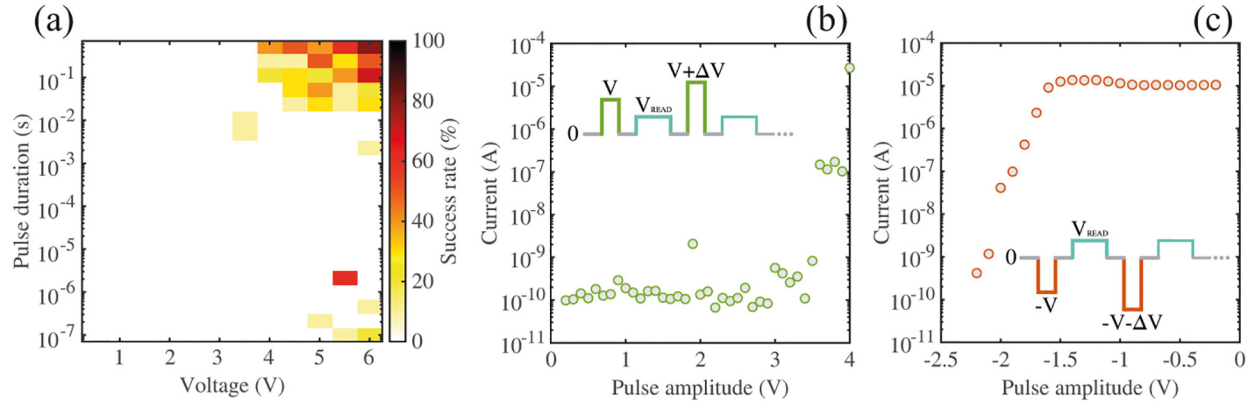


Рис. 4: (a) карта вероятности успешного переключения в низкоомное состояние для образца с концентрацией Ti , равной 27.4%. Для каждой комбинации амплитуды и длительности импульса к мемристору в высокоомном состоянии прикладывается запиывающий импульс, за которым следует импульс считывания (0.25 В, 500 мс). Каждая комбинация тестировалась 10 раз. Цветовая шкала показывает долю успешных переключений; (b) резкий процесс переключения мемристора в низкоомное состояние под действием импульса напряжения фиксированной длительности (500 мс) с постепенно увеличивающейся амплитудой (шаг 0.1 В). Последовательность импульсов записи (V) и считывания ($V_{\text{read}} = 0.25$ В) показана на схеме; (c) плавный процесс переключения мемристора в высокоомное состояние под действием импульса напряжения фиксированной длительности (500 мс) с постепенно увеличивающейся амплитудой (шаг 0.1 В). Напряжение считывания составляет 0.25 В.

амплитуды и длительности составляет 10. Результаты представлены в виде карты вероятности успешных переключений (рис. 4(a)). Надёжные переключения наблюдаются лишь при амплитудах выше 3.5 В и длительностях импульсов более 25 мс. Расхождение между значениями напряжения включения, полученными из ВАХ, и результатами импульсных измерений обусловлено временной зависимостью ионной миграции. Развёртка постоянного напряжения при измерении ВАХ является медленной, что даёт ионам достаточно времени для перемещения при более слабых электрических полях, тогда как импульсные измерения гораздо быстрее, что требует более высоких напряжений для перемещения ионов. Для оценки контролируемости переключений между резистивными состояниями были выполнены импульсные измерения с фиксированной длительностью импульса 500 мс. Амплитуда импульсов постепенно увеличивалась или уменьшалась в диапазоне от ± 200 мВ до ± 10 В с шагом 100 мВ пока ток через мемристор не дости-

гал заданного значения: 1 мкА для низкоомного состояния и 10 нА для высокоомного состояния. На рис. 4(b),(c) показано изменение тока при увеличении и уменьшении амплитуды импульсов, соответственно. Процесс включения происходит скачкообразно, что согласуется с ВАХ на рис. 2(a), тогда как выключение носит более плавный характер, позволяя контролируемо настраивать промежуточные резистивные состояния. Вместе с тем напряжение включения и напряжение выключения отличаются от цикла к циклу, что указывает на необходимость использования адаптивных алгоритмов программирования мемристоров.

Заключение. В настоящей работе показано, что введение Ti в α -Si улучшает электрические характеристики α -Si/Ag мемристоров. Увеличение концентрации Ti позволяет снизить напряжение электроформовки вплоть до значений, близких к рабочему напряжению включения, при сохранении других параметров, таких как стабильность резистивных состояний, высокое отношение ON/OFF сопротивлений и возможность реализации множества промежуточных резистивных состояний. Достигнутые улучшения можно объяснить появлением в α -Si неподвижных центров Ti, которые способствуют восстановлению серебра и формированию проводящих каналов. Для увеличения параметра нелинейности в таких системах требуется подбор альтернативной пары металл-полупроводник, имеющих оптимальные параметры работы выхода и сродства электронов [29] или внесение в дизайн мемристора элемента с большой нелинейной ВАХ [30].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 25-29-00544).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] D. S. Jeong, K. M. Kim, S. Kim, et al., Adv. Electron. Mater. **2**(9), 1600090 (2016). DOI: 10.1002/aelm.201600090.
- [2] D. Ielmini, H.-S.P. Wong, Nat. Electron. **1**(6), 333 (2018). DOI: 10.1038/s41928-018-0092-2.
- [3] Q. Xia, J. J. Yang, Nat. Mater. **18**(4), 309 (2019). DOI: 10.1038/s41563-019-0291-x.
- [4] S. H. Jo, K.-H. Kim, W. Lu, Nano Lett. **9**(1), 496 (2009). DOI: 10.1021/nl803669s.
- [5] H. Yeon, P. Lin, C. Choi, et al., Nat. Nanotechnol. **15**(7), 574 (2020). DOI: 10.1038/s41565-020-0694-5.
- [6] M. Lübben, I. Valov, Adv. Electron. Mater. **5**(9), 1800933 (2019). DOI: 10.1002/aelm.201800933.

- [7] I. Valov, R. Waser, J. R. Jameson, M. N. Kozicki, *Nanotechnology* **22**(25), 254003 (2011). DOI: 10.1088/0957-4484/22/25/254003.
- [8] J. J. Yang, D. B. Strukov, D. R. Stewart, *Nat. Nanotechnol.* **8**(1), 13 (2012). DOI: 10.1038/nnano.2012.240.
- [9] Y. Yang, P. Gao, L. Li, et al., *Nat. Commun.* **5**, 4232 (2014). DOI: 10.1038/ncomms5232.
- [10] S. H. Jo, T. Chang, I. Ebong, et al., *Nano Lett.* **10**(4), 1297 (2010). DOI: 10.1021/nl904092h.
- [11] A. Samsonova, S. Yegiyani, O. Klimenko, et al., *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **166**(2), 255 (2024). DOI: 10.31857/S004445102408011X.
- [12] D. V. Ichytckin, M. E. Shiryaev, D. V. Novikov, et al., *Pisma v Zh. Tekh. Fiz.* **49**(20), 39 (2023). DOI: 10.61011/PJTf.2023.20.56346.19672.
- [13] J. Kang, T. Kim, S. Hu, et al., *Nat. Commun.* **13**, 4040 (2022). DOI: 10.1038/s41467-022-31804-4.
- [14] K. M. Kim, D. S. Jeong, C. S. Hwang, *Nanotechnology* **22**(25), 254002 (2011). DOI: 10.1088/0957-4484/22/25/254002.
- [15] J. Joshua Yang, F. Miao, M. D. Pickett, et al., *Nanotechnology* **20**(21), 215201 (2009). DOI: 10.1088/0957-4484/20/21/215201.
- [16] Y.-F. Chang, P.-Y. Chen, Y.-T. Chen, et al., *Appl. Phys. Lett.* **101**(5), 052111 (2012). DOI: 10.1063/1.4742894.
- [17] B. K. You, W. I. Park, J. M. Kim, et al., *ACS Nano* **8**(9), 9492 (2014). DOI: 10.1021/nn503713f.
- [18] G. Wang, A.-R. O. Raji, J.-H. Lee, J. M. Tour, *ACS Nano* **8**(2), 1410 (2014). DOI: 10.1021/nn4052327.
- [19] K. Qian, V. C. Nguyen, T. Chen, P. S. Lee, *Adv. Electron. Mater.* **2**(4), 1500370 (2016). DOI: 10.1002/aelm.201500370.
- [20] T. Wang, Y. Shi, F. M. Puglisi, et al., *ACS Appl. Mater. Interfaces* **12**(10), 11806 (2020). DOI: 10.1021/acsami.9b19362.
- [21] S. Shigehiro Kuge, H. Hiroshi Nakashima, *Jpn. J. Appl. Phys.* **30**(11R), 2659 (1991). DOI: 10.1143/JJAP.30.2659.
- [22] F. Rollert, N. A. Stolwijk, H. Mehrer, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **20**(9), 1148 (1987). DOI: 10.1088/0022-3727/20/9/010.
- [23] *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 95th ed. Edited by W.M. Haynes (CRC Press, London, 2014).
- [24] R. W. Olesinski, A. B. Gokhale, G. J. Abbaschian, *Bull. Alloy Phase Diagrams* **10**(6), 635 (1989). DOI: 10.1007/BF02877631.

- [25] S. M. Lee, E. T. Ada, H. Lee, et al., Surf. Sci. **453**(1–3), 159 (2000). DOI: 10.1016/S0039-6028(00)00339-3.
- [26] W. M. H. Sachtler, G. J. H. Dorgelo, A. A. Holscher, Surf. Sci. **5**(2), 221 (1966). DOI: 10.1016/0039-6028(66)90083-5.
- [27] A. W. Dweydari, C. H. B. Mee, Phys. Status Solidi A **27**(1), 223 (1975). DOI: 10.1002/pssa.2210270126.
- [28] J. Robertson, J. Vac. Sci. Technol. B **18**(3), 1785 (2000). DOI: 10.1116/1.591472.
- [29] G. Zhang, Z. Wang, X. Fan, et al., Appl. Phys. Lett. **125**(13), 133502 (2024). DOI: 10.1063/5.0225833.
- [30] A. Samsonova, D. Sukhomlin, O. Klimenko, et al., J. Appl. Phys. **137**(22), 215701 (2025). DOI: 10.1063/5.0269515.

Поступила в редакцию 26 марта 2026 г.

После доработки 22 июля 2026 г.

Принята к публикации 23 июля 2026 г.