

УДК 621.315.592

Энергоэффективные и стабильные резистивные переключения в нанокристаллах диоксида ванадия

© К.Е. Капогузов^{1,2}, С.В. Мутилин¹, Д.М. Миллюшин^{1,2}, В.Б. Калинина^{1,2},
Б.В. Волошин¹, И.В. Корольков³, В.Н. Кичай³,
Л.В. Яковкина³, В.А. Селезнев¹

¹ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова
Сибирского отделения Российской академии наук,
630090 Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет,
630090 Новосибирск, Россия

³ Институт неорганической химии им. А.В. Николаева
Сибирского отделения Российской академии наук,
630090 Новосибирск, Россия

E-mail: k.kapoguzov@isp.nsc.ru

Поступила в Редакцию 26 марта 2025 г.

В окончательной редакции 23 июня 2025 г.

Принята к публикации 23 июня 2025 г.

Исследуется электрически инициированный фазовый переход полупроводник–металл в сформированных поликристаллических пленках, массивах нанокристаллов и одиночных нанокристаллах диоксида ванадия. В массиве нанокристаллов продемонстрировано увеличение скачка тока при фазовом переходе примерно на порядок по сравнению со сплошными пленками, что согласуется с моделью параллельных сопротивлений. Показано, что пороговая мощность на переключение снижается на 4–5 порядков при переходе от сплошной пленки к одиночным нанокристаллам за счет меньшего отвода тепла и достигает величины около 40 нВт. Нанокристаллы диоксида ванадия продемонстрировали высокую стабильность при переключениях не менее 10^{10} раз. Полученные результаты перспективны для формирования энергоэффективных, стабильных и долговечных переключающих элементов на основе одиночных нанокристаллов диоксида ванадия.

Ключевые слова: диоксид ванадия, фазовый переход полупроводник–металл, резистивные переключатели, наноструктуры, пороговая мощность, стабильность переключений.

DOI: 10.61011/FTP.2025.03.61089.7734

1. Введение

В настоящее время идет активный поиск новых функционально богатых материалов и структур для создания электронных и оптических вычислительных устройств нового поколения [1,2]. Одним из наиболее перспективных кандидатов является диоксид ванадия (VO_2) — материал со сверхбыстрым (до 26 фс) [3], обратимым фазовым переходом полупроводник–металл, происходящим при температуре $\sim 68^\circ\text{C}$ и сопровождающимся изменением проводимости на несколько порядков [1,4,5]. Уникальные свойства VO_2 делают его многообещающим материалом для энергоэффективных и быстрых переключателей, используемых в нейроморфных системах, памяти, а также в других высокоскоростных устройствах [5–8].

Основное внимание исследователей сосредоточено на формировании тонких поликристаллических пленок VO_2 , что обусловлено относительной простотой и низкой стоимостью технологии синтеза [9]. Однако применение поликристаллических пленок в коммерческих устройствах серьезно ограничено из-за структурного фазового перехода из моноклинной решетки

(в полупроводниковом состоянии) в тетрагональную решетку (в металлическом состоянии). При структурном переходе происходит изменение постоянной решетки на 1%, что приводит к возникновению значительных механических напряжений, образованию трещин и деградации материала при многократных циклах переключений [10].

В последние годы активно развиваются методы создания наноразмерных кристаллов VO_2 . Сокращение размеров активной области и локализация электрического тока внутри одного нанокристалла позволяют снизить необходимую энергию на фазовый переход и повысить стабильность работы переключателей [11–14]. Однако синтез высококачественных нанокристаллов VO_2 и формирование контактов к ним остаются технологически сложными задачами [15,16]. Также остается открытым вопрос изучения механизма фазового перехода в одиночном нанокристалле VO_2 и определение его параметров.

В данной работе исследуется электрически инициированный фазовый переход в сформированных поликристаллических пленках, массивах нанокристаллов и одиночном нанокристалле VO_2 . Демонстрируются результа-

ты исследования морфологии и фазового состава сформированных структур, определены основные параметры электрически инициированного фазового перехода в них. Показано, что пороговая мощность на одно резистивное переключение последовательно снижается при переходе от сплошной пленки VO_2 к массиву нанокристаллов и далее к одиночным нанокристаллам. Затрачиваемая пороговая мощность на переключение в нанокристаллах на 4–5 порядков меньше, чем в сплошных пленках за счет снижения отвода джоулева тепла при переключениях. Полученные результаты показывают, что резистивные переключатели на основе одиночных нанокристаллов VO_2 перспективны в качестве энергоэффективных, стабильных и долговечных элементов для нейроморфных систем.

2. Методика эксперимента

Поликристаллические пленки VO_2 толщиной ~ 200 нм были синтезированы на подложках проводящего кремния ($n\text{-Si}$, $\rho \approx 0.001\text{--}0.005$ Ом·см) методом химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ) в горизонтальном реакторе с горячими стенками, подробные условия синтеза описаны в работе [17]. Массивы одиночных нанокристаллов VO_2 были сформированы из аморфных пленок VO_x , синтезированных на подложках $n\text{-Si}$ методом атомно-слоевого осаждения (АСО) с последующим отжигом при температуре 650°C в течение 2 ч. Подробный анализ оптимальных условий послеростового отжига тонких аморфных пленок для формирования высококачественных нанокристаллов VO_2 описан в работе [18].

Морфология сформированных структур была исследована с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе Hitachi SU8220 при энергиях электронного пучка 5 кэВ.

Сформированные структуры были охарактеризованы с помощью рентгенофазового анализа на дифрактометре Bruker D8 (источник — $\text{CuK}\alpha$, детектор — LYNXEYE XE-T, диапазон 2θ углов — $5\text{--}65^\circ$, шаг — 0.03° , время накопления — 5 с на измерение). Полученные дифрактограммы были проанализированы в соответствии с картотекой PDF [19].

Для всех синтезированных образцов были проведены температурные измерения сопротивления в диапазоне $20\text{--}80^\circ\text{C}$. Скачок сопротивления более чем на 3 порядка, вызванный фазовым переходом полупроводник–металл в VO_2 М-фазе, был обнаружен при температуре $65\text{--}70^\circ\text{C}$.

Электрические измерения образцов выполнены с использованием измерительного прибора Keysight 34461A в диапазоне от 0 до 5 В с ограничением по току 1 мА. Проводящая подложка $n\text{-Si}$ выступала в качестве одного контакта. Второй контакт представлял собой вольфрамовую иглу с радиусом кривизны в несколько десятков микрометров, которую можно рассматривать

как плоский прижимной контакт, ввиду того что ее радиус кривизны намного больше среднего размера кристаллитов VO_2 (~ 100 нм).

Электрические характеристики одиночного кристалла VO_2 в диапазоне температур от 20 до 70°C с шагом в 5°C были измерены с помощью метода атомно-силовой микроскопии (АСМ) с проводящим зондом на микроскопе NTEGRA AURA (NT-MDT). В качестве одного из электрических контактов использовались коммерчески доступные проводящие АСМ-иглы с радиусом кривизны ~ 35 нм (NT-MDT), вторым контактом являлась проводящая подложка $n\text{-Si}$. Площадь контакта АСМ-иглы с измеряемыми нанокристаллами будет составлять от 10 до 500 нм² [20].

Для испытания сформированных пленок и кристаллов VO_2 на стабильность при многократных резистивных переключениях были измерены электрические характеристики в импульсном режиме. На структуру подавался треугольный сигнал частотой 100 кГц в диапазоне напряжений от 0 до 3 В с ограничением по току 1 мА. Было проведено 10^{10} циклов резистивных переключений.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

В результате синтеза методами ХОГФ были получены поликристаллические пленки толщиной ~ 200 нм, которые имеют выраженную поликристаллическую морфологию поверхности (см. Приложение, рис. П.1, а).

Массивы нанокристаллов VO_2 были получены в результате температурного отжига аморфных пленок VO_x . Исходные АСО аморфных пленок VO_x содержат ванадий со степенями окисления +4 и +5 и имеют сопротивление ~ 10 МОм. В результате отжига такие пленки VO_x кристаллизуются и распадаются в массивы одиночных нанокристаллов (см. Приложение, рис. П.1, б). Процент покрытия кристаллами поверхности подложки составляет 40–80 %, их средняя высота составляет 150–200 нм, а латеральный размер составляет 300–400 нм.

В результате дифракционных измерений массива нанокристаллов получено, что все синтезированные структуры содержат преимущественно пики VO_2 М1 (001) и VO_2 М1 (002), что указывает на значительное преобладание кристаллической фазы VO_2 М1 в нанокристаллах (см. Приложение, рис. П.2, а).

Для массивов нанокристаллов VO_2 была измерена зависимость сопротивления от температуры в интервале $20\text{--}80^\circ\text{C}$. Получено, что при температуре 66°C происходит фазовый переход полупроводник–металл с резким уменьшением сопротивления в $\sim 10^3$ раз (см. Приложение, рис. П.2, б). Такая величина скачка сопротивления подтверждает преобладание VO_2 М-фазы в полученных структурах, что согласуется с результатами рентгенофазового анализа.

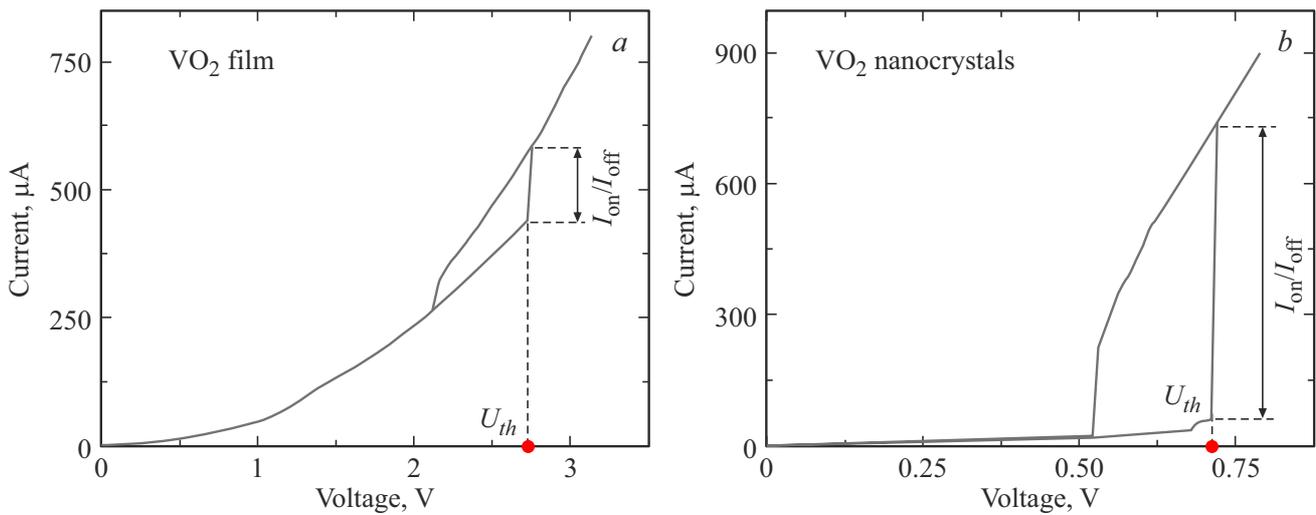


Рис. 1. Электрические характеристики в режиме источника напряжения для сплошной поликристаллической пленки VO₂ (a) и массива нанокристаллов VO₂ с процентом заполнения кристаллами поверхности подложки ~ 40% (b).

В результате измерений электрических характеристик в режиме источника напряжения были получены зависимости тока от напряжения для поликристаллических пленок VO₂ и массивов нанокристаллов VO₂ (рис. 1). На всех зависимостях был обнаружен скачок тока в несколько раз, соответствующий изменению сопротивления при электрически инициированном фазовом переходе (резистивное переключение). Этот скачок происходит при достижении порогового напряжения U_{tr} и соответствующего ему тока I_{off} , значения которых зависят от геометрических размеров структуры и свойств VO₂. Соответствующие электрические характеристики в режиме источника тока приведены в *Приложении*, рис. П.3.

На основе полученных электрических характеристик было рассчитано значение пороговой мощности на одно переключение $P_{th} = U_{th} \cdot I_{off}$. Для поликристаллических пленок это значение составляет 1.3 ± 0.1 мВт, в то время как для массива нанокристаллов оно в ~ 20 раз меньше и составляет 54 ± 5 мкВт. Такое уменьшение пороговой мощности в массиве нанокристаллов главным образом связано с меньшими пороговыми токами I_{off} , а также с меньшим отводом тепла при переключениях.

Величина скачка тока, а также пороговое напряжение в значительной степени определяются геометрией образца и контактов. Известно, что в VO₂ в случае электрически инициированного фазового перехода образуется узкий канал с металлической проводимостью (токопроводящий филамент) [21–23]. В то же время часть VO₂ остается в полупроводниковом высокоомном состоянии. Таким образом, структуру после электрически инициированного фазового перехода можно рассматривать, используя модель двух параллельных сопротивлений, одно из которых соответствует тонкому каналу

с высокой проводимостью (металлическому состоянию), а второе — оставшейся части VO₂ с низкой проводимостью (полупроводниковому состоянию). Значение скачка тока при фазовом переходе в такой модели определяется уравнением

$$\frac{I_{on}}{I_{off}} = 1 + \left(\frac{S_{met}}{S_0} \right) \cdot \left(\frac{\rho_{sem}}{\rho_{met}} - 1 \right), \quad (1)$$

где I_{on} и I_{off} — токи, протекающие в металлическом и полупроводниковом состоянии соответственно; S_{met} — площадь металлической части VO₂ после перехода; S_0 — общая площадь VO₂ между двумя контактами; ρ_{sem} и ρ_{met} — удельное сопротивление полупроводниковой и металлической фазы VO₂ соответственно.

Из формулы (1) следует, что с уменьшением процента заполнения кристаллами поверхности подложки и, как следствие, с уменьшением общей площади кристаллов между двумя контактами S_0 величина скачка тока будет увеличиваться. Этот эффект наблюдался экспериментально при исследовании электрических характеристик образцов с разным процентом заполнения кристаллами поверхности подложки. Для поликристаллических пленок VO₂ с процентным содержанием кристаллов, покрывающих поверхность подложки, 95–100% наблюдался скачок тока при фазовом переходе в 1.5–3 раза (рис. 1, a). Для массива нанокристаллов VO₂ с процентным заполнением кристаллами поверхности подложки 40–80% скачок тока составлял 7–15 раз во время фазового перехода (рис. 1, b). Аналогичный эффект увеличения скачка тока с уменьшением области VO₂ между контактами наблюдался для поликристаллических пленок в работе [24].

Исследования электрических характеристик одиночных нанокристаллов VO₂ проводящим АСМ-зондом проводились на отдельных кристаллах высотой ~ 150 нм из

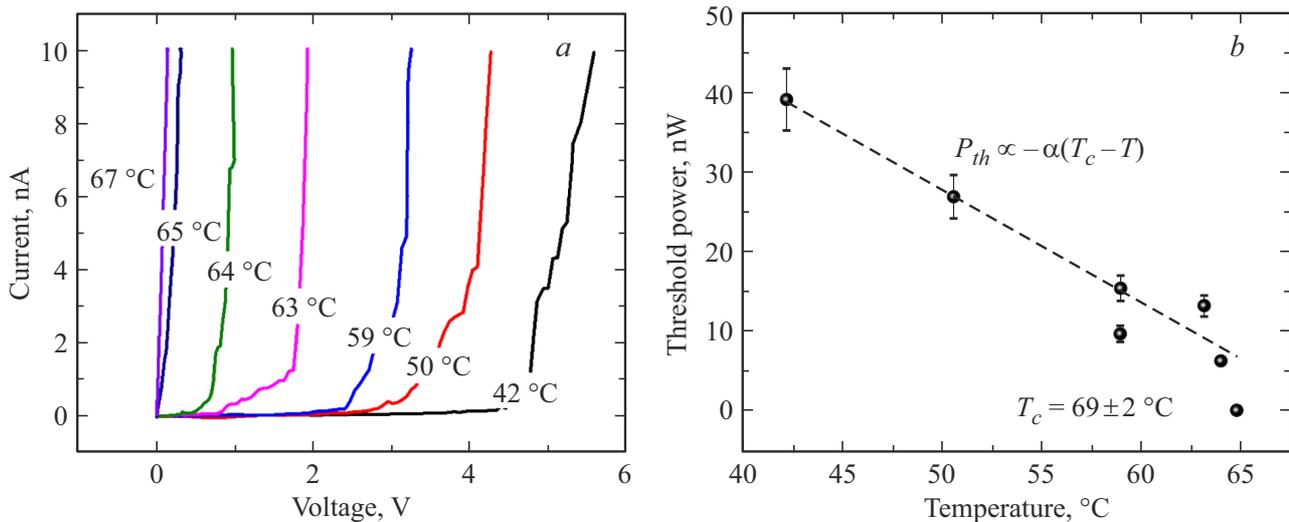


Рис. 2. *a* — вольт-амперные характеристики одиночного нанокристалла VO₂ при различных температурах. *b* — зависимость пороговой мощности на переключение от температуры одиночного нанокристалла VO₂.

сформированного массива. На рис. 2, *a* показаны вольт-амперные характеристики одиночного кристалла VO₂ в диапазоне температур от 20 до 70 °С. При превышении порогового значения напряжения отчетливо видны резкие скачки тока, связанные с фазовым переходом. Пороговое напряжение уменьшается с ростом внешней температуры, и при $T \geq 65 \pm 2$ °С вольт-амперная характеристика становится линейной, что соответствует металлическому состоянию VO₂.

На рис. 2, *b* приведена зависимость пороговой мощности на одно переключение, выраженной как $P_{th}(T) = U_{th}(T) \cdot I_{off}(T)$, от температуры. Поведение этой зависимости можно объяснить в рамках уравнения теплового баланса $dQ/dt = P(t) - k\nabla T$, которое определяет соотношение между джоулевой мощностью $P(t)$ протекающего тока и суммарной рассеиваемой мощностью в окружающую среду $k\nabla T$. В стационарном состоянии ($dQ/dt = 0$) пороговая мощность при электрических переключениях линейно зависит от внешней температуры: $P_{th} = -\alpha(T_c - T_0)$, где T_0 — внешняя температура, T_c — температура фазового перехода в VO₂ [25,26]. Аппроксимация экспериментальных точек $P_{th}(t)$ линейной функцией позволяет оценить точку температурного фазового перехода, которая соответствует точке пересечения с осью абсцисс и составляет 69 ± 2 °С. Это значение с хорошей точностью совпадает с температурой теплового фазового перехода 65 °С, полученной при электрических измерениях и со значением пороговой температуры, полученной при измерении зависимости сопротивления от температуры нагрева VO₂.

Значение рассчитанного коэффициента угла наклона α зависимости $P_{th}(T_0)$ для одного нанокристалла VO₂ составляет $(1.4 \pm 0.1) \cdot 10^{-9}$ Вт/К, что на ~ 4 – 5 порядков меньше полученного ранее значения $(7 \pm 0.8) \cdot 10^{-4}$ Вт/К для поликристаллических пленок [27].

Этот коэффициент показывает суммарный вклад отвода тепла. Чем коэффициент α меньше, тем меньше отвод тепла от исследуемого объекта во внешнюю среду. Уменьшение отвода тепла приводит к тому, что пороговая мощность на переключение уменьшается. Рассчитанное значение пороговой мощности на одно резистивное переключение P_{th} при комнатной температуре для одиночного нанокристалла VO₂ высотой ~ 150 нм составляет 40 ± 5 нВт, что почти на 4 порядка меньше полученного значения для пленок и на 3 порядка меньше значения для массивов нанокристаллов VO₂. Таким образом, повышение энергоэффективности резистивного переключателя на основе одиночного нанокристалла VO₂ практически на 3–5 порядков, по сравнению с переключателем на основе сплошной пленки и на основе массива нанокристаллов, происходит за счет уменьшения отвода тепла, выделяемого джоулевым нагревом. Для испытания сформированных поликристаллических пленок и массивов нанокристаллов VO₂ на стабильность при многократных резистивных переключениях было исследовано поведение электрических характеристик при подаваемом треугольном сигнале (рис. 3, *a*). При этом измерялся протекающий ток через VO₂. Аналогично электрическим характеристикам, полученным при измерении на постоянном токе, вплоть до значения порогового напряжения перехода U_{th} , VO₂ находится в полупроводниковом состоянии с высоким сопротивлением, и измеряемый сигнал представляет собой линейную зависимость тока от напряжения. При величине напряжения U_{th} происходит резкий скачок тока, протекающего через образец, связанный с фазовым переходом VO₂ в металлическое состояние, которое сохраняется при дальнейшем увеличении амплитуды подаваемого напряжения. При уменьшении амплитуды подаваемого напряжения от максимального значения

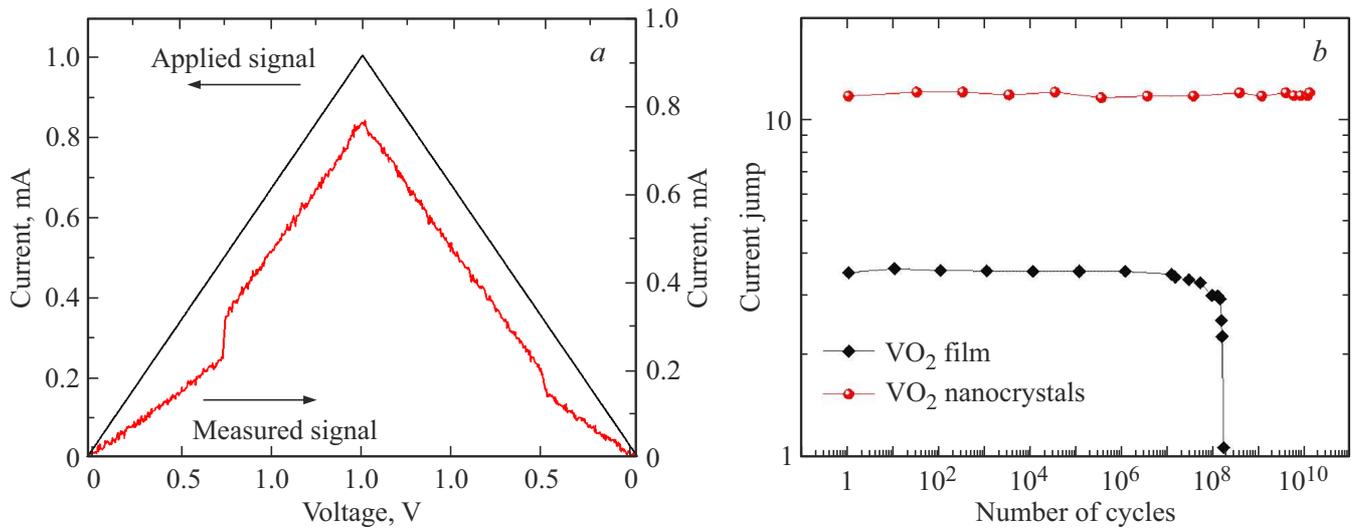


Рис. 3. *a* — электрическая характеристика для структур VO_2 со скачком тока при электрически инициированном фазовом переходе. *b* — изменение величины скачка тока при испытании пленок (черные точки) и нанокристаллов VO_2 (красные точки) на стабильность вплоть до 10^{10} циклов переключений.

до нуля, VO_2 остается в металлическом состоянии до достижения определенного значения, при котором происходит резкое падение тока, связанное с фазовым переходом VO_2 обратно в полупроводниковое состояние. Отметим, что величина скачка тока при переходе из металлического состояния в полупроводниковое меньше, чем величина скачка тока при переходе полупроводник–металл. Это связано с непрерывным уменьшением размера проводящего канала при уменьшении подаваемого напряжения, что напрямую влияет на величину скачка тока. При обратном переходе металл–полупроводник размеры проводящего канала меньше, чем аналогичные размеры формируемого канала при прямом переходе, что и приводит к меньшей величине скачка тока.

Нами было проведено 10^{10} циклов резистивных переключений. На рис. 3, *b* показано значение величины скачка тока от числа проведенных переключений. В образцах с поликристаллическими пленками VO_2 значение величины скачка тока резко уменьшается с ≈ 3 до 1 при достижении $\approx 10^8$ числа переключений (рис. 3, *b*, черные точки). Такое резкое уменьшение величины скачка тока говорит о деградации пленки VO_2 , связанной с накопленными механическими напряжениями. Для массива нанокристаллов VO_2 после 10^{10} циклов переключения значение величины скачка тока изменилось менее чем на 2% (рис. 3, *b*, красные точки). При этом такое изменение на 2% может быть связано со стабильностью прижимного контакта, а не с деградацией кристалла VO_2 . Этот результат говорит о высокой стабильности сформированных нанокристаллов VO_2 и позволяет рассматривать их в качестве перспективных структур для дол-

говечных и энергоэффективных резистивных переключателей.

4. Заключение

В данной работе сформированы поликристаллические пленки и массивы нанокристаллов VO_2 , исследованы резистивные переключения в них в вертикальной геометрии контактов. Поликристаллические пленки были сформированы методом химического осаждения из газовой фазы, массивы одиночных нанокристаллов были получены из аморфных пленок, синтезированных методом атомно-слоевого осаждения с последующим отжигом. Рентгенофазовый анализ полученных структур показал преобладание VO_2 M1-фазы. Все структуры демонстрируют резкий скачок сопротивления до 10^3 раз при температуре $\sim 68^\circ\text{C}$. Показано, что пороговая мощность на одно резистивное переключение снижается на 4–5 порядков при переходе от сплошной пленки к одиночному нанокристаллу и достигает значения 40 ± 5 нВт. Установлено, что такое снижение потребляемой мощности связано с уменьшением отвода тепла от нанокристалла по сравнению со сплошной пленкой. Сформированные одиночные нанокристаллы VO_2 обладают высокой стабильностью при многократных резистивных переключениях и способны выдерживать не менее 10^{10} циклов без существенного изменения своих свойств. Использование одиночных нанокристаллов VO_2 для создания энергоэффективных и стабильных резистивных переключателей открывает новые возможности для их применения в современных электронных устройствах.

Приложение

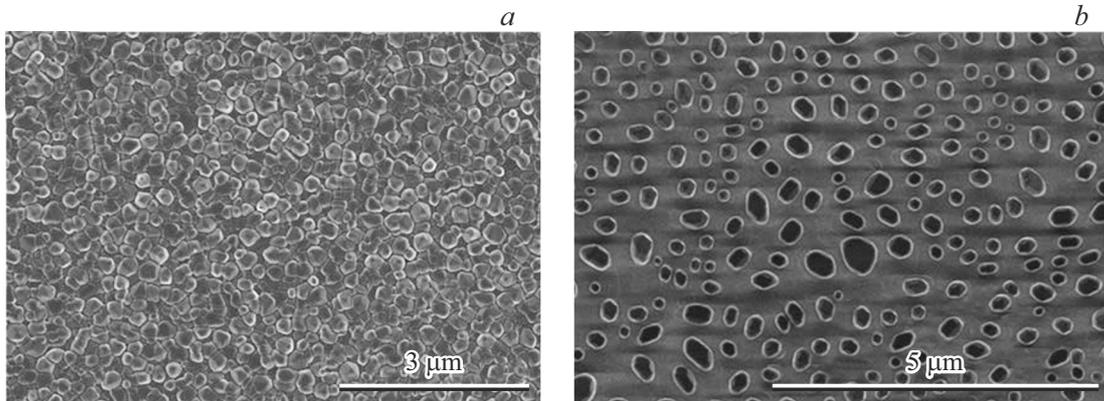


Рис. П.1. Характерные СЭМ-изображения для синтезированной поликристаллической пленки VO_2 (a), сформированного массива нанокристаллов VO_2 (b).

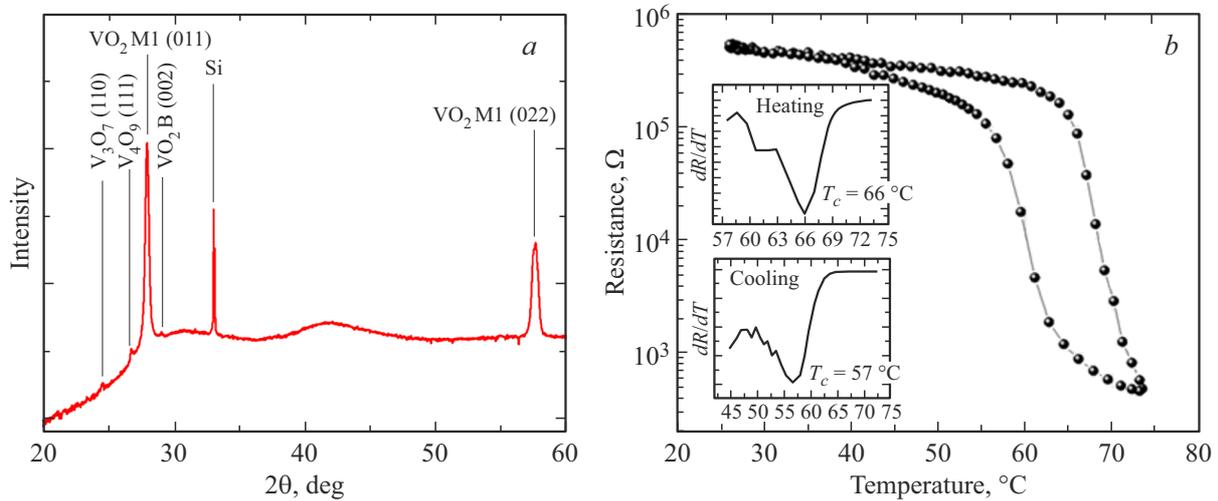


Рис. П.2. a — дифрактограмма для массива нанокристаллов, полученных при температуре отжига 650°C в течение 2 ч. b — характерная зависимость сопротивления от температуры для массива нанокристаллов. На вставке — температура фазового перехода в прямой и обратной ветвях как логарифм производной сопротивления по температуре.

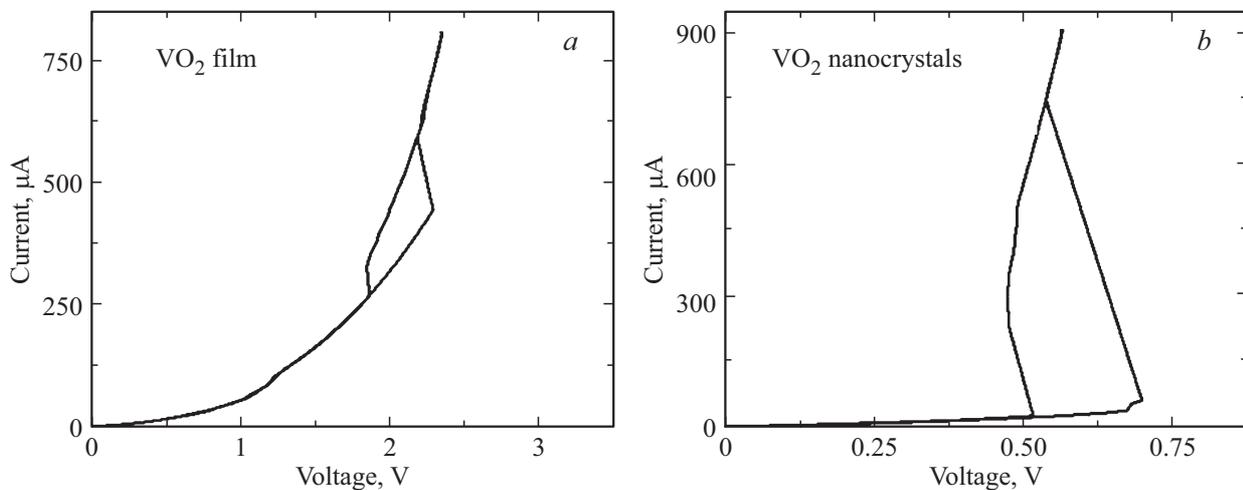


Рис. П.3. Электрические характеристики в режиме источника тока для сплошной поликристаллической пленки VO_2 (a) и массива нанокристаллов VO_2 с процентом заполнения кристаллами поверхности подложки $\sim 40\%$ (b).

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Центру коллективного пользования „Наноструктуры“ и лично Т.А. Гавриловой за СЭМ-изображения, а также за использование установки атомно-слоевого осаждения.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Y. Ke, S. Wang, G. Liu, M. Li, T.J. White, Y. Long. *Small*, **14**, 1802025 (2018).
- [2] R.W. Keyes. *Proc. IEEE*, **89**, 227 (2001).
- [3] M.F. Jager, C. Ott, P.M. Kraus, C.J. Kaplan, W. Pouse, R.E. Marvel, R.F. Haglund, D.M. Neumark, S.R. Leone. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **114**, 9558 (2017).
- [4] F.J. Morin. *Phys. Rev. Lett.*, **3**, 34 (1959).
- [5] M. Brahlek, L. Zhang, J. Lapano, H.-T. Zhang, R. Engel-Herbert, N. Shukla, S. Datta, H. Paik, D.G. Schlom. *MRS Commun.*, **7**, 27 (2017).
- [6] W. Yi, K.K. Tsang, S.K. Lam, X. Bai, J.A. Crowell, E.A. Flores. *Nature Commun.*, **9**, 4661 (2018).
- [7] Y. Zhou, S. Ramanathan. *Proc. IEEE*, **103**, 1289 (2015).
- [8] S.M. Bohaichuk, S. Kumar, M. Islam, M. Muñoz Rojo, R.S. Williams, G. Pitner, J. Jeong, M.G. Samant, S.S.P. Parkin. *E. Pop. Phys. Rev. Appl.*, **19**, 044028 (2023).
- [9] S. Mutilin, K. Kapoguzov, V. Prinz, L. Yakovkina. *J. Vac. Sci. Technol. A*, **40**, 063404 (2022).
- [10] B.S. Mun, K. Chen, J. Yoon, C. Dejoie, N. Tamura, M. Kunz, Z. Liu, M.E. Grass, S.-K. Mo, C. Park, Y.Y. Lee, H. Ju. *Phys. Rev. B*, **84**, 113109 (2011).
- [11] V.Y. Prinz, S.V. Mutilin, L.V. Yakovkina, A.K. Gutakovskii, A.I. Komonov. *Nanoscale*, **12**, 3443 (2020).
- [12] S.V. Mutilin, V.Y. Prinz, V.A. Seleznev, L.V. Yakovkina. *Appl. Phys. Lett.*, **113**, 013102 (2018).
- [13] C. Geng, S. Dou, J. Zhao, F. Ren, J. Gu, H. Wei, H. Guan, S. Liang, L. Li, Y. Li, Z. Tian. *Appl. Surf. Sci.*, **592**, 153267 (2022).
- [14] A.V. Ivanov, A.Y. Tatarenko, A.A. Gorodetsky, O.N. Makarevich, M. Navarro-Cía, A.M. Makarevich, A.R. Kaul, A.A. Eliseev, O.V. Boytsova. *ACS Appl. Nano Mater.*, **4**, 10592 (2021).
- [15] Y. Zhang, W. Xiong, W. Chen, Y. Zheng. *Nanomaterials*, **11**, 338 (2021).
- [16] W. Zeng, N. Chen, W. Xie. *CrystEngComm.*, **22**, 851 (2020).
- [17] L.V. Yakovkina, S.V. Mutilin, V.Y. Prinz, T.P. Smirnova, V.R. Shayapov, I.V. Korol'kov, E.A. Maksimovsky, N.D. Volchok. *J. Mater. Sci.*, **52**, 4061 (2017).
- [18] K.E. Kapoguzov, S.V. Mutilin, N.I. Lysenko, V.N. Kichay, L.V. Yakovkina, B.V. Voloshin, V.A. Seleznev. *Phys. E Low-Dim. Syst. Nanostructures*, **167**, 116165 (2025).
- [19] S. Gates-Rector, T. Blanton. *Powder Diffr.*, **34**, 352 (2019).
- [20] U. Celano, T. Hantschel, G. Giammaria, R.C. Chintala, T. Conard, H. Bender, W. Vandervorst. *J. Appl. Phys.*, **117**, 214305 (2015).
- [21] A.G. Shabalin, J. Valle, N. Hua, M.J. Cherukara, M.V. Holt, I.K. Schuller, O.G. Shpyrko. *Small*, **16**, 2005439 (2020).
- [22] J. Duchene. *Solid State Chem.*, **12**, 303 (1975).
- [23] B.S. Mun, K. Chen, Y. Leem, C. Dejoie, N. Tamura, M. Kunz, Z. Liu, M.E. Grass, C. Park, J. Yoon, Y.Y. Lee, H. Ju. *Phys. Status Solidi — Rapid Res. Lett.*, **5**, 107 (2011).
- [24] J. Lin, K. Alam, L. Ocola, Z. Zhang, S. Datta, S. Ramanathan, S. Guha. 2017 IEEE Int. Electron Dev. Meeting (IEDM). 23.4.1 (2017).
- [25] Y. Higuchi, T. Kanki, H. Tanaka. *Appl. Phys. Express*, **10**, 033201 (2017).
- [26] A. Joushaghani, J. Jeong, S. Paradis, D. Alain, J. Stewart Aitchison, J.K.S. Poon. *Appl. Phys. Lett.*, **105**, 231904 (2014).
- [27] K.E. Kapoguzov, S.V. Mutilin, V.S. Tumashev, E.K. Bagochus, V.N. Kichay, L.V. Yakovkina. 2024 IEEE 25th Int. Conf. of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), 190 (2024).

Редактор Г.А. Оганесян

Energy-efficient and stable resistive switching in vanadium dioxide nanocrystals

K.E. Kapoguzov^{1,2}, S.V. Mutilin¹, D.M. Milyushin^{1,2}, V.B. Kalinina^{1,2}, B.V. Voloshin¹, I.V. Korol'kov³, V.N. Kichay³, L.V. Yakovkina³, V.A. Seleznev¹

¹ Rzhanov Institute of Semiconductor Physics Siberian Branch

of the Russian Academy of Sciences, 630090 Novosibirsk, Russia

² Novosibirsk State University, 630090 Novosibirsk, Russia

³ Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630090 Novosibirsk, Russia

Abstract We investigate an electrically-driven semiconductor-metal phase transition in formed polycrystalline films, nanocrystal arrays, and a single nanocrystal of vanadium dioxide. An increase by about an order of magnitude in the current jump during the phase transition was observed in the nanocrystal arrays compared to solid films, which is in agreement with the parallel resistance model. We found that the switching threshold power decreases by 4–5 orders of magnitude when compared a solid film to single nanocrystals and reaches a value of about 40 nW. This effect occurs due to lower heat dissipation in single nanocrystals. Vanadium dioxide nanocrystals have demonstrated high stability when switched at least 10^{10} times. The results obtained are promising for the formation of energy-efficient, stable and durable switching elements based on vanadium dioxide single nanocrystals.