Изменение оптических параметров в микроструктурах диоксида ванадия при резистивных переключениях

© К.Е. Капогузов[1,2], С.В. Мутилин[1], В.Б. Калинина[1,2], И.А. Азаров[1,2], А.Е. Гайдук[1], В.С. Тумашев[1], Д.М. Милюшин[1,2], В.Н. Кичай[3], Л.В. Яковкина[3]

[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: kapoguzovkirill@gmail.com

Поступила в Редакцию 31 марта 2026 г.
В окончательной редакции 15 июля 2026 г.
Принята к публикации 15 июля 2026 г.

Исследованы параметры электрических и оптических переключений в двухконтактных микроструктурах на основе поликристаллических пленок VO_2, синтезированных методом газофазного осаждения. Измерены параметры температурного фазового перехода полупроводник-металл в полученных двухконтактных микроструктурах шириной 10 мкм и расстоянием между контактами 4 мкм. Измерения температурных зависимостей сопротивления показали резкий скачок сопротивления на величину около 3 порядков при температуре прямого фазового перехода около 65 °C. Сформированные структуры демонстрируют выраженные резистивные переключения со скачком тока примерно в 20 раз при пороговом напряжении ≈ 19.5 В, обусловленные формированием локального металлического филамента между контактами. Методами спектральной эллипсометрии и микроэллипсометрии исследован оптический отклик структур при температурно- и электрически инициированном фазовом переходе полупроводник–металл в VO_2. Установлено, что на длине волны 633 нм при температурном фазовом переходе параметр Ψ изменяется на 4.2°, а параметр Δ на 6.5°, тогда как при резистивных переключениях наблюдаются скачки Ψ на 2.4° и Δ на 3.4°. Для количественной интерпретации изменения эллипсометрических параметров выполнен численный расчет коэффициентов отражения поперечно-магнитной и поперечно-электрической поляризаций в диапазоне длин волн 400−1000 нм с учетом геометрии зондирующего пучка, золотых контактов и металлического филамента. Показано, что рассчитанные изменения Ψ и Δ согласуются с экспериментальными значениями по порядку величины. Установлено, что при резистивных переключениях на изменение оптических параметров VO_2 оказывает влияние дополнительный разогрев окружающей области VO_2 от металлического филамента. Полученные результаты демонстрируют возможность модуляции оптических параметров VO_2 электрическим сигналом и вносят вклад в понимание механизмов оптических эффектов при резистивных переключениях в микроструктурах, что перспективно для создания перестраиваемых электрических и оптических структур и фотонных устройств.

Ключевые слова: диоксид ванадия, фазовый переход полупроводник–металл, микроструктуры, двухконтактные переключатели, эллипсометрия, оптический отклик.

DOI: 10.61011/FTP.2026.04.63692.9396

1. Введение

Диоксид ванадия (VO_2) относится к классу коррелированных оксидов переходных металлов и представляет собой один из наиболее изучаемых материалов с обратимым фазовым переходом полупроводник–металл [1]. Этот переход может инициироваться тепловым нагревом (68 °C), электрическим воздействием (полем/током), механическими деформациями, а также оптической накачкой, что делает VO_2 перспективной платформой для создания функциональных элементов в электрических и оптических устройствах [2,3]. При этом фазовый переход в VO_2 сопровождается резкими изменениями фундаментальных параметров: электропроводность возрастает до 5 порядков, параметры решетки изменяются до 1моноклинной фазы в рутильную), а в инфракрасном (ИК) диапазоне демонстрируется существенная перестройка спектрального отклика (n и k изменяются в разы) [2,4].

Как известно, при температурном фазовом переходе в VO_2 происходит постепенное изменение доли металлической (рутильной) фазы в общем объеме пленки, в то время как электрически инициированный переход развивается с образованием узкой проводящей области между контактами за счет локального джоулева разогрева [5,6]. Для двухконтактных переключателей это проявляется в резистивном переключении: при достижении порогового напряжения/тока возникает локализованный джоулев разогрев, далее формируется токопроводящий металлический филамент в VO_2 между контактами, что приводит к скачку тока и выраженной нелинейности на

вольт-амперной характеристике. Управление геометрией контактов позволяет целенаправленно изменять как пороговые электрические параметры, так и интегральный оптический отклик, поскольку доля металлической фазы в общем объеме непосредственно задает эффективные оптические константы в области измерений.

В последнее время наряду с исследованиями кинетики и механизма фазового перехода в структурах VO_2 активно развивается прикладное направление, ориентированное на интеграцию VO_2 в микро- и нанофотонные устройства: метаповерхности, перестраиваемые резонаторы, перестраиваемые волноводные компоненты и электрооптические модуляторы ближнего и среднего ИК диапазонов [3,7]. В таких системах принципиальна важна возможность электрического управления оптическими константами VO_2 [8,9]. Для практических применений важными требованиями являются высокая стабильность и воспроизводимость параметров устройств при многократных переключениях в VO_2, и высокое быстродействие таких устройств, соответствующих современным требованиям фотоники [10,11].

Для разработки электрически управляемых оптических переключателей на основе микроструктур VO_2 принципиально важным является исследование взаимосвязи между параметрами электрически инициированных резистивных переключений и изменением оптических констант материала, в том числе в динамике. Это требует использования методов, способных регистрировать спектральную перестройку оптического отклика непосредственно в процессе электрически инициированных переключений. Одним из таких методов является эллипсометрия, обладающая высокой чувствительностью к изменениям оптических свойств материалов [12]. При этом, несмотря на широкое использование эллипсометрии для исследования температурно-инициированного перехода в VO_2 и для извлечения спектральных зависимостей $n(\lambda)$ и $k(\lambda)$, применение *in situ* спектральной и микроэллипсометрии именно к электрически инициированному фазовому переходу встречается крайне редко. В большинстве работ оптический отклик при электрическом возбуждении регистрируют методами отражения/пропускания на одной длине волны, микроскопией доменной структуры или через интеграцию VO_2 в готовые нанофотонные элементы, что затрудняет количественное разделение вкладов частичной металлизации, геометрии филамента и паразитных эффектов контактов [9,13,14].

Цель настоящей работы — исследование изменения эллипсометрических параметров микроструктур VO_2 при температурном фазовом переходе и электрически инициированных резистивных переключениях, а также количественная интерпретация этих изменений с учетом реальной геометрии микроэллипсометрического измерения. Новизна работы состоит в экспериментальной регистрации обратимого изменения параметров Ψ и Δ при локальном электрически инициированном фазовом переходе в двухконтактной структуре VO_2, сопровождающемся формированием металлического филамента, и в численном расчете эффективных коэффициентов отражения TM- и TE-поляризаций для такой неоднородной области. Было обнаружено обратимое изменение эллипсометрического параметра Ψ и Δ при локальном электрически инициированном фазовом переходе в VO_2, что позволяет говорить о модуляции электрическим сигналом оптических коэффициентов VO_2. Полученные в работе результаты исследования микро- и наноструктур VO_2 перспективны для разработки перестраиваемых электрических и оптических переключателей, сенсоров и нейроморфных систем на основе VO_2.

2. Методика эксперимента

Пленки VO_2 были синтезированы методом газофазного осаждения на подложках SiO_2(300 нм)/Si. Детальное описание параметров синтеза приведено в работах [15,16]. На основе синтезированных пленок были сформированы двухконтактные резистивные переключатели с помощью фотолитографии и магнетронного распыления золота толщиной 100 нм. Ширина золотых контактов составила 10 мкм, зазор между двумя контактами 4 мкм. Морфология и состав сформированных структур был исследован с помощью сканирующей электронной микроскопии (Hitachi SU8220, энергия электронного пучка 5 кэВ) и рентгенофазового анализа (Bruker D8, источник CuK_α, детектор LYNXEYE XE-T, диапазон 2θ углов 5–65°, шаг 0.03°).

Для всех сформированных двухконтактных переключателей VO_2 был исследован температурный и электрически инициированный фазовый переход с помощью источника-измерителя Keysight B2900. Для исследования температурного фазового перехода была измерена зависимость сопротивления от температуры в диапазоне от 30 до 80 °C. Для исследования электрически инициированного фазового перехода были измерены вольт-амперные характеристики пленок VO_2 в диапазоне подаваемых напряжений от 0 до 20 В. Таким образом были определены значения скачка сопротивления при переходе полупроводник-металл, значение температуры прямого и обратного фазового перехода, величина порогового напряжения и скачка тока при электрически инициированном переходе.

Методом эллипсометрии исследован оптический отклик структуры при температурном фазовом переходе. Для этого были получены зависимости эллипсометрических параметров Ψ и Δ от температуры в диапазоне от 30 до 80 °C с шагом 1 °C при нагреве и охлаждении образца. Измерения проводились с помощью спектрального эллипсометра „Спектр 1891“ на угле падения света 45° при фиксированной длине волны 633 нм. При этом в области сканирования располагалась только поверхность пленки VO_2 без металлических контактов. Для исследования динамики оптического отклика при

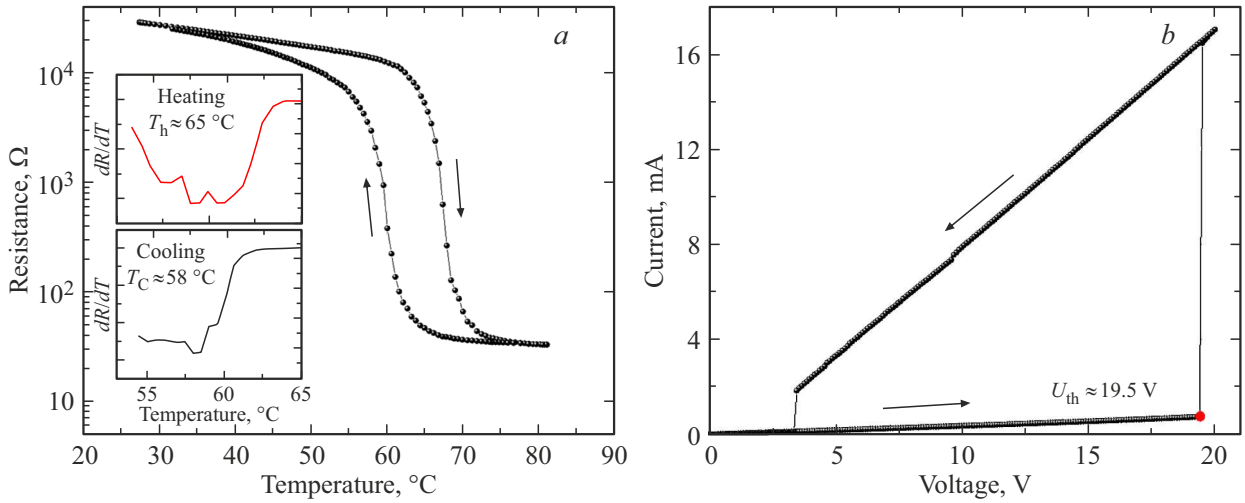


Рис. 1. *a* — зависимость сопротивления от температуры переключателя на основе поликристаллической пленки VO_2. На вставке — зависимость производной сопротивления по температуре от температуры при нагреве и охлаждении. *b* — электрические характеристики в режиме источника напряжения переключателя на основе сплошной поликристаллической пленки VO_2.

электрических переключениях в тонких пленках VO_2 был использован метод микроэллипсометрии. Измерения проводились при комнатной температуре с помощью эллипсометра Микроскан-М на угле падения света 58.5° и длине волны 633 нм. Падающий пучок диаметром ~ 10 мкм фокусировался в области пленки VO_2 между двумя золотыми контактами. Для инициации электрических переключений между двумя контактами импульсно подавалось постоянное напряжение 25 В, превышающее напряжение резистивных переключений. Фазовый переход в VO_2 локально происходил в результате джоулева нагрева электрическим током, что приводило к изменению оптических констант VO_2. Таким образом, были получены зависимости параметров Ψ и Δ от времени — до и после электрической инициации фазового перехода в VO_2 между контактами. При этом стоит отметить, что для исследуемой геометрии переключателя и размеров зондирующего пучка света в исследуемую область пучка попадает как область пленки VO_2, так и часть золотых контактов [17].

Для количественной интерпретации изменения эллипсометрических параметров при резистивных переключениях были проведены численные расчеты методом конечных элементов коэффициентов отражения электромагнитной волны TM- и TE-поляризаций. Расчет выполнялся в диапазоне длин волн 400–1000 нм при угле падения 58.5° для тонких слоев VO_2 и Au на подложке SiO_2/Si. После расчета коэффициентов отражения для отдельных областей структуры были определены эффективные коэффициенты отражения освещенной области с учетом диаметра зондирующего пучка, площади золотых контактов, попадающих в область измерения, и площади области VO_2, переходящей в металлическое состояние при формировании филамента.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

В результате газофазного синтеза были получены поликристаллические пленки VO_2 толщиной ~ 300 нм, которые имеют выраженную поликристаллическую морфологию поверхности (см. *Приложение*, рисунок, *a*). На основании дифракционных измерений получено, что все синтезированные структуры содержат пики VO_2 M1 (011) и VO_2 M1 (022) большой интенсивности и слабый пик V_2O_5 (002), что указывает на значительное преобладание кристаллической фазы VO_2 M1 (см. *Приложение*, рисунок, *b*).

На рис. 1, *a* представлена зависимость сопротивления от температуры для сформированных переключателей на основе поликристаллических пленок VO_2. На полученной зависимости явно виден резкий скачок сопротивления в ~ 500 раз при температуре ~ 65 °C, происходящий в результате фазового перехода полупроводник–металл. Обратный фазовый переход металл-полупроводник происходит при температуре ~ 58 °C.

На рис. 1, *b* представлена вольт-амперная характеристика для сформированных переключателей. На полученных электрических характеристиках явно виден резкий скачок тока в ~ 20 раз при пороговом напряжении $U_{th} \approx 19.5$ В. Этот скачок обусловлен формированием токопроводящего филамента, возникающего в результате локального фазового перехода в VO_2 между контактами при разогреве электрическим током [18,19]. Обратный скачок тока при уменьшении напряжения до значения ~ 2 В обусловлен разрушением этого филамента в результате остывания пленки VO_2.

В результате эллипсометрических измерений были получены зависимости параметров Ψ и Δ в пленках

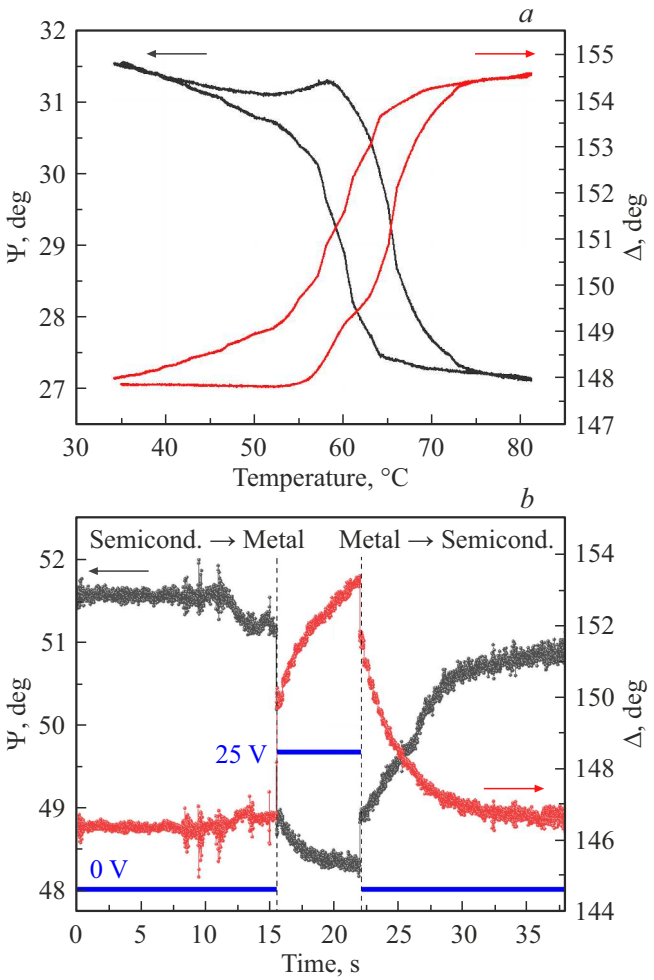


Рис. 2. *a* экспериментальные зависимости эллипсометрических параметров Ψ (черная кривая) и Δ (красная кривая) от температуры пленки VO_2. *b* — зависимость эллипсометрических параметров Ψ (черная кривая) и Δ (красная кривая) от времени при резистивных переключениях в двухконтактных микроструктурах VO_2, синей линией показано значение подаваемого напряжения в зависимости от времени.

VO_2 от температуры (рис. 2, *a*). На данных зависимостях явно выражена петля температурного гистерезиса со скачком в параметрах Ψ и Δ при фазовом переходе в VO_2 при температуре $\sim 65\,^{\circ}$C, что хорошо согласуется с температурными измерениями сопротивления тех же пленок. В результате прямого фазового перехода значение параметра Ψ уменьшилось с 31.2 до 27°, а значение параметра Δ увеличилось с 147.8 до 154.3°. При обратном фазовом переходе при температуре $\sim 59\,^{\circ}$C значение параметра Ψ увеличилось с 27.4 до 30.7°, а значение параметра Δ уменьшилось с 154.2 до 148.1°. В диэлектрическом состоянии VO_2 значение параметра Ψ обусловливается в том числе интерференцией между пленкой VO_2 и подложкой SiO_2, тогда как в металлическом состоянии VO_2 проникновение излучения в пленку VO_2 практически отсутствует и существенную роль играет отражение от нее. Подчеркнем, что значения температур, при которых происходит наиболее резкий скачок эллипсометрических параметров (65 и 59 °C), с хорошей точностью совпадают с температурами прямого (65 °C) и обратного (58 °C) фазового перехода, полученными из поведения сопротивления при нагреве и охлаждении (рис. 1, *a*).

Для исследования электрически инициированного изменения оптического отклика методом микроэллипсометрии была получена зависимость эллипсометрических параметров Ψ и Δ от времени при подаче электрического напряжения 25 В на переключатель VO_2 (рис. 2, *b*).

На полученных зависимостях явно виден резкий скачок эллипсометрических параметров, связанный с локальным фазовым переходом в VO_2 и изменением его оптических коэффициентов (подпись „semicond. → metal“ на рис. 2, *b*). Значение параметра Ψ при переключении изменяется с 51.2 до 48.8°, а значение параметра Δ изменяется с 146.6 до 150°. После снятия подаваемого электрического напряжения эллипсометрический параметр Ψ скачкообразно изменяется с 48.2 до 48.9°, параметр Δ от 153.1 до 151.6°, а затем они плавно возвращаются к первоначальному значению в течение ~ 10 с. Полученные результаты скачкообразного изменения эллипсометрических параметров и гистерезисный характер изменения объясняются изменением оптических констант — показателей преломления и поглощения — при локальном фазовом переходе в VO_2.

Рассмотрим подробнее полученные изменения эллипсометрических параметров Ψ и Δ при резистивных переключениях в VO_2. Так, при переключении с формированием металлического филамента изменение параметра Ψ составляет 2.4° (с 51.2 до 48.8°), а параметр Δ изменяется на 3.4° (с 146.6 до 150°). При этом было получено, что при температурном фазовом переходе пленки VO_2 параметр Ψ уменьшается на 4.2°, а Δ увеличивается на 6.5° (рис. 2, *a*). Меньшее изменение Ψ и Δ при резистивных переключениях может быть объяснено локальностью процесса — при резистивных переключениях, в отличие от температурного перехода, в металлическое состояние переходит не вся пленка VO_2, а только узкий металлический филамент. Таким образом, эффект модуляции эффективных оптических констант VO_2 при резистивных переключениях оказывается меньше, чем при температурном фазовом переходе.

Отметим, что прямое восстановление значений показателей n и k для металлической фазы VO_2 из микроэллипсометрических данных в данном случае представляет собой неочевидную задачу, поскольку зондирующий пучок регистрирует эффективный сигнал от неоднородной области, включающей золотые контакты, VO_2 в полупроводниковом состоянии и локальный металлический филамент. Поэтому для количественной оценки изменения эллипсометрических параметров была использована геометрическая модель исследуемой структуры с учетом вклада золотых контактов, пленки диоксида ванадия в

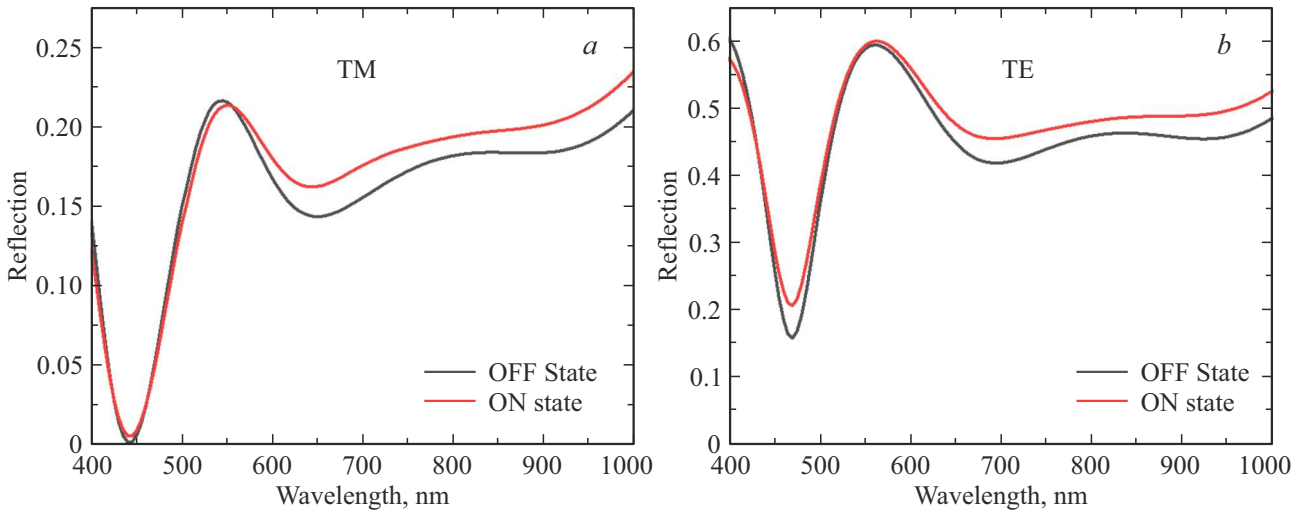


Рис. 3. Рассчитанные спектральные зависимости эффективных коэффициентов отражения исследуемой области микроструктуры VO_2 с учетом геометрии контактов для TM- (a) и TE- (b) поляризаций. Черная кривая соответствует состоянию до резистивного переключения (OFF State), красная — после резистивного переключения (ON State).

полупроводниковой и металлической фазах:

$$\delta\Psi = \mathrm{arctg}\left|\frac{S_{\mathrm{Au}}\cdot R_p^{\mathrm{Au}} + S_{\mathrm{VO}_{2s}}\cdot R_p^{\mathrm{VO}_{2s}}}{S_{\mathrm{Au}}\cdot R_s^{\mathrm{Au}} + S_{\mathrm{VO}_{2s}}\cdot R_s^{\mathrm{VO}_{2s}}}\right|$$

$$-\mathrm{arctg}\left|\frac{S_{\mathrm{Au}}\cdot R_p^{\mathrm{Au}} + (S_{\mathrm{VO}_{2s}} - S_{\mathrm{VO}_{2m}})\cdot R_p^{\mathrm{VO}_{2m}} + S_{\mathrm{VO}_{2m}}\cdot R_p^{\mathrm{VO}_{2m}}}{S_{\mathrm{Au}}\cdot R_s^{\mathrm{Au}} + (S_{\mathrm{VO}_{2s}} - S_{\mathrm{VO}_{2m}})\cdot R_s^{\mathrm{VO}_{2m}} + S_{\mathrm{VO}_{2m}}\cdot R_s^{\mathrm{VO}_{2m}}}\right|$$

$$\delta\Delta = \mathrm{Arg}\left(\frac{S_{\mathrm{Au}}\cdot R_p^{\mathrm{Au}} + S_{\mathrm{VO}_{2s}}\cdot R_p^{\mathrm{VO}_{2s}}}{S_{\mathrm{Au}}\cdot R_s^{\mathrm{Au}} + S_{\mathrm{VO}_{2s}}\cdot R_s^{\mathrm{VO}_{2s}}}\right)$$

$$-\mathrm{Arg}\left(\frac{S_{\mathrm{Au}}\cdot R_p^{\mathrm{Au}} + (S_{\mathrm{VO}_{2s}} - S_{\mathrm{VO}_{2m}})\cdot R_p^{\mathrm{VO}_{2m}} + S_{\mathrm{VO}_{2m}}\cdot R_p^{\mathrm{VO}_{2m}}}{S_{\mathrm{Au}}\cdot R_s^{\mathrm{Au}} + (S_{\mathrm{VO}_{2s}} - S_{\mathrm{VO}_{2m}})\cdot R_s^{\mathrm{VO}_{2m}} + S_{\mathrm{VO}_{2m}}\cdot R_s^{\mathrm{VO}_{2m}}}\right)$$

где S_{Au}, $S_{\mathrm{VO}_{2s}}$, $S_{\mathrm{VO}_{2m}}$ — площади золотых электродов, диоксида ванадия в полупроводниковом и металлическом состояниях соответственно, R_p^{Au}, R_s^{Au}, $R_p^{\mathrm{VO}_{2s}}$, $R_s^{\mathrm{VO}_{2s}}$, $R_p^{\mathrm{VO}_{2m}}$, $R_s^{\mathrm{VO}_{2m}}$ — коэффициенты отражения p- и s-волн от золота, диоксида ванадия в полупроводниковом и металлическом состояниях соответственно. Диаметр пучка был принят равным 10 мкм, площадь золотых контактов, освещенных лазером, 15 мкм^2. Согласно данной оценке, изменение параметра Ψ составляет $\sim 2.5^\circ$, а $\Delta \sim 4.5^\circ$, что по порядку величины сходится с экспериментально полученным в данной работе изменением Ψ на 2.4° и Δ на 3.4°.

На рис. 3 представлены рассчитанные спектральные зависимости эффективных коэффициентов отражения исследуемой области для TM- и TE-поляризаций до (OFF State) и после (ON State) резистивного переключения. Видно, что формирование металлической области VO_2 приводит к изменению коэффициентов отражения для обеих поляризаций. Наиболее выраженное изменение наблюдается в длинноволновой части спектра, что связано с большим контрастом оптических констант VO_2 в полупроводниковой и металлической фазах. Осцилляции в коротковолновой части спектра обусловлены интерференционными эффектами и переотражениями в слое SiO_2.

Таким образом, численное моделирование коэффициентов отражения позволяет перейти от качественного описания изменения Ψ и Δ к количественной интерпретации результатов микроэллипсометрии. При этом рассчитанные величины следует рассматривать как эффективные параметры неоднородной освещенной области, а не как собственные параметры VO_2. Такое рассмотрение соответствует реальной геометрии эксперимента и объясняет, почему изменение эллипсометрических параметров при резистивном переключении меньше, чем при температурном фазовом переходе всей пленки.

Теперь рассмотрим динамику оптических и электрических параметров исследуемых структур VO_2 после резистивного переключения. Так, в результате локального фазового перехода полупроводник–металл между двумя контактами образуется металлический филамент, что скачкообразно изменяет проводимость структуры (рис. 1, b). Это приводит к резкому изменению оптических констант, что выражается в скачке параметров Ψ и Δ на рис. 2, b. При увеличении времени измерений и при условии поддерживания электрического напряжения параметры Ψ и Δ продолжают плавно изменяться (область от ≈ 15 до 22 с на рис. 2, b). Это плавное изменение параметров Ψ и Δ, по нашему мнению, может быть связано с разогревом части пленки VO_2, оставшейся в полупроводниковом состоянии, и плавным изменением ее оптических констант, а также с увеличением латеральных размеров металлического филамента.

Для исследования этого эффекта локального разогрева VO_2 после резистивных переключений были изго-

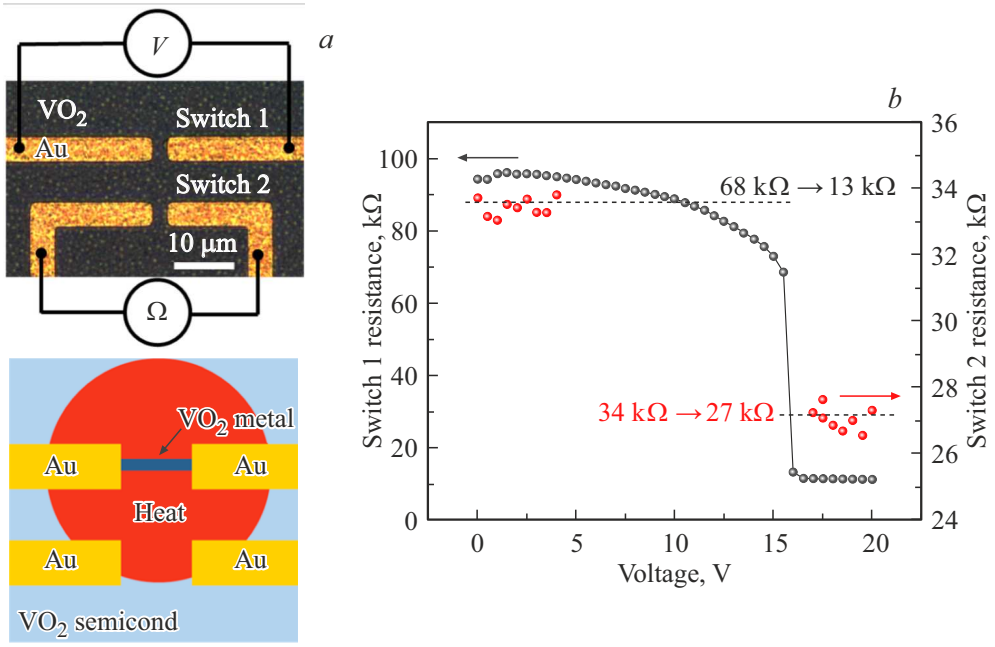


Рис. 4. *a*) сверху — оптическое изображение двух близко расположенных переключателей VO_2 со схематичным обозначением источника напряжения V и измерителя сопротивления Ω, снизу — схематическое изображение распределения тепла после резистивного переключения с сформированным металлическим филаментом. *b* — зависимость сопротивления первого (черные точки) и второго (красные точки) переключателя VO_2 от подаваемого напряжения на первый переключатель.

товлены литографические структуры с двумя парами контактов, расположенных на расстоянии 10 мкм друг от друга (верхний рис. 4, *a*). В таких структурах между одной парой контактов инициировался фазовый переход („Switch 1“ на верхнем рис. 4, *a*), а между другой измерялось сопротивление („Switch 2“ на верхнем рис. 4, *a*). Измерение сопротивления второго переключателя происходило при приложении напряжения 100 мВ, что много меньше порогового значения напряжения резистивных переключений. Таким образом, резистивные переключения возможны только между первой парой контактов („Switch 1“ на верхнем рис. 4, *a*). При этом область VO_2 между второй парой контактов разогревается теплом от металлического филамента, образовавшегося между первой парой контактов (нижний рис. 4, *a*). В результате таких измерений была получена зависимость сопротивления первого и второго переключателя VO_2 от подаваемого напряжения на первый переключатель (рис. 4, *b*). Установлено, что после резистивного переключения и формирования металлического филамента в первом переключателе, сопротивление второго переключателя начинает скачкообразно уменьшаться. При этом сопротивление первого переключателя изменяется в ≈ 5.2 раза, с 68 до 13 кОм, в то время как сопротивление второго переключателя изменяется лишь в ≈ 1.3 раза, с 34 до 27 кОм. Такое изменение сопротивления второго переключателя может быть объяснено его разогревом теплом от металлического филамента первого переключателя. Согласно нашим оценкам с учетом экспериментально полученной зависимости сопротивления от температуры VO_2 (рис. 1, *a*), скачок сопротивления второго переключателя с 34 до 27 кОм соответствует изменению его температуры на величину $\sim 10\,^{\circ}$C. Для описания теплового взаимодействия между близко расположенными переключателями можно ввести условие независимой работы соседнего элемента: $T_0 + \Delta T(L) < T_c$, где T_0 — температура подложки, $\Delta T(L)$ — повышение температуры на расстоянии L от металлического филамента, T_c — температура фазового перехода VO_2. При выполнении этого условия нагрев соседней структуры недостаточен для ее перехода в металлическое состояние. В исследуемой геометрии при $L = 10$ мкм, а повышение температуры ΔT, по нашим оценкам, составляет $\sim 10\,^{\circ}$C. Следовательно, при комнатной температуре такое тепловое влияние не приводит к переключению соседнего элемента, но заметно изменяет его сопротивление и оптические параметры. При работе структуры вблизи температуры фазового перехода это расстояние следует рассматривать как расстояние выраженной тепловой связи. Отметим, что точное определение критического расстояния требует отдельной серии экспериментов по формированию и исследованию структур с различными L.

Полученные результаты исследования двух близко расположенных переключателей VO_2 позволяют объяснить динамику параметров Ψ и Δ после резистивного переключения. Было получено, что параметр Ψ про-

должает медленно уменьшаться после произошедшего скачка тока и образования металлического филамента (рис. 2, *b*). Это уменьшение можно объяснить нагревом части пленки VO_2 теплотой от металлического филамента. Действительно, как было показано в результате электрических измерений двух пар контактов, металлический филамент способен нагревать окружающую пленку VO_2, в результате чего в ней будет возникать температурный градиент, вблизи филамента нагрев будет наибольший. На расстоянии же 10 мкм, в области второго переключателя, изменение температуры, по нашим оценкам, составляет $\sim 10\,^{\circ}$C. В результате этого происходит плавное изменение оптического отклика этой части пленки VO_2, что и приводит к изменению параметров Ψ и Δ после резистивных переключений. Отметим также, что изменение параметров Ψ и Δ после резистивных переключений при условии поддерживания электрического напряжения может быть объяснено увеличением латеральных размеров металлического филамента.

4. Заключение

В данной работе был исследован оптический отклик при резистивных переключениях в двухконтактных микроструктурах на основе поликристаллических пленок VO_2. Показано, что сформированные структуры демонстрируют резистивные переключения со скачком тока примерно 20 раз при напряжении ~ 19.5 В. При этом скачок сопротивления при температурном фазовом переходе полупроводник-металл вблизи 65 °C составляет около 3 порядков по величине. Методом эллипсометрии исследованы зависимости параметров Ψ и Δ от температуры VO_2 на длине волны 633 нм. Обнаружено, что при температурном фазовом переходе в VO_2 значение параметра Ψ уменьшилось с 31.2 до 27°, а значение параметра Δ увеличилось с 147.8 до 154.3°, что связано с изменением показателей преломления и поглощения в пленке VO_2. Методом микроэллипсометрии было исследовано изменение параметров Ψ и Δ в микроструктурах VO_2 при резистивных переключениях. Обнаружен резкий скачок Ψ на 2.4° и Δ на 3.4°, что связано с формированием металлического филамента между контактами и, следовательно, локальным изменением оптического отклика структуры. Для количественной интерпретации полученных результатов выполнен численный расчет коэффициентов отражения TM- и TE-поляризаций с учетом геометрии зондирующего пучка, золотых контактов и металлического филамента. Согласно полученным данным, изменение эффективных коэффициентов отражения наиболее выражено в длинноволновой части спектра, а рассчитанные изменения Ψ и Δ согласуются с экспериментальными значениями по порядку величины. Обнаружен эффект плавного изменения эллипсометрических параметров после формирования металлического филамента. Установлено, что данный эффект обусловлен локальным разогревом пленки VO_2 теплом от металлического филамента. Показано, что на расстоянии ~ 10 мкм от филамента температура пленки повышается на $\sim 10\,^{\circ}$C, что приводит к дополнительной модуляции оптических свойств VO_2. Для оценки независимой работы близко расположенных переключателей предложен критерий $T_0 + \Delta T(L) < T_c$, согласно которому нагрев соседнего элемента не должен приводить к достижению температуры фазового перехода. Полученные результаты позволяют говорить о возможности модуляции оптических констант VO_2 внешним электрическим сигналом, что крайне важно для разработки электрических и оптических элементов, сенсоров, модуляторов на основе микроструктур VO_2.

Финансирование работы

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

Благодарности

Авторы благодарят (Центр коллективного пользования научным оборудованием „Высокие технологии и аналитика наносистем“ при Новосибирском государственном университете за проведение эллипсометрических измерений.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

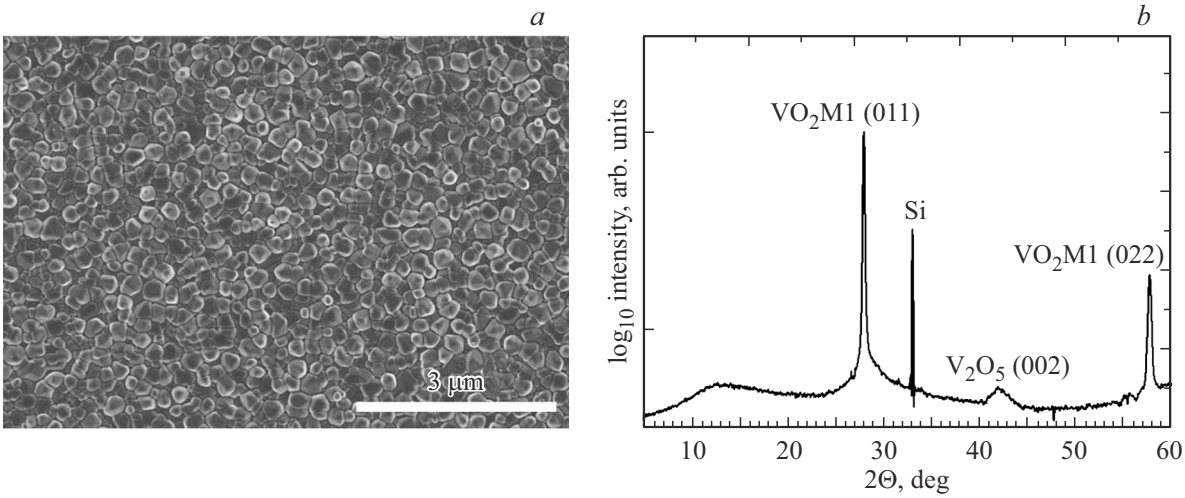
Список литературы

[1] F.J. Morin. Phys. Rev. Lett., **3** (1), 34 (1959). DOI: 10.1103/PhysRevLett.3.34
[2] Y. Ke, S. Wang, G. Liu, M. Li, T.J. White, Y. Long. Small, **14** (39), 1802025 (2018). DOI: 10.1002/smll.201802025
[3] S. Cueff, J. John, Z. Zhang, J. Parra, J. Sun, R. Orobtchouk, S. Ramanathan, P. Sanchis. APL Photonics, **5** (11), 110901 (2020). DOI: 10.1063/5.0028093
[4] C. Wan, Z. Zhang, D. Woolf, C.M. Hessel, J. Rensberg, J.M. Hensley, Y. Xiao, A. Shahsafi, J. Salman, S. Richter, Y. Sun, M.M. Qazilbash, R. Schmidt-Grund, C. Ronning, S. Ramanathan, M.A. Kats. Ann. Phys., **531** (10), 1900188 (2019). DOI: 10.1002/andp.201900188
[5] A. Crunteanu, J. Givernaud, J. Leroy, D. Mardivirin, C. Champeaux, J.-C. Orlianges, A. Catherinot, P. Blondy. Sci. Technol. Adv. Mater., **11** (6), 065002 (2010). DOI: 10.1088/1468-6996/11/6/065002
[6] A. Joushaghani, J. Jeong, S. Paradis, D. Alain, J.S. Aitchison, J.K.S. Poon. Appl. Phys. Lett., **105** (23), 231904 (2014). DOI: 10.1063/1.4903806

[7] I.O. Oguntoye, S. Padmanabha, M. Hinkle, T. Koutsougeras, A.J. Ollanik, M.D. Escarra. ACS Appl. Mater. Interfaces, **15** (34), 41141 (2023). DOI: 10.1021/acsami.3c08493
[8] P. Markov, R.E. Marvel, H.J. Conley, K.J. Miller, R.F. Haglund, jr., S.M. Weiss. ACS Photonics, **2** (8), 1175 (2015). DOI: 10.1021/acsphotonics.5b00244
[9] F. Bayram, D. Gajula, D. Khan, B. Uppalapati, S. Azad, G. Koley. Opt. Express, **29** (20), 32124 (2021). DOI: 10.1364/OE.432245
[10] V.Y. Prinz, S.V. Mutilin, L.V. Yakovkina, A.K. Gutakovskii, A.I. Komonov. Nanoscale, **12** (6), 3443 (2020). DOI: 10.1039/C9NR08712E
[11] K.E. Kapoguzov, S.V. Mutilin, S.V. Belaya, V.N. Kichay, L.V. Yakovkina, I.V. Korolkov, A.A. Saraev, M.L. Kosinova. Mater. Sci. Eng. B, **321**, 118511 (2025). DOI: 10.1016/j.mseb.2025.118511
[12] А.В. Ржанов, К.К. Свиташев, А.И. Соколов. *Основы эллипсометрии* (Новосибирск, Наука, Сиб. отд-ние, 1979).
[13] V.R. Shayapov, L.V. Yakovkina, N.V. Bulina, N.A. Chernikova. J. Struct. Chem., **58** (8), 1515 (2017). DOI: 10.1134/S0022476617080066
[14] D.K. Manousou, S. Gardelis, M. Calamiotou, V. Likodimos, E. Syskakis. J. Appl. Phys., **130** (4), 045107 (2021). DOI: 10.1063/5.0052954
[15] L.V. Yakovkina, S.V. Mutilin, V.Y. Prinz, T.P. Smirnova, V.R. Shayapov, I.V. Korol'kov, E.A.M. Maksimovsky, N.D. Volchok. J. Mater. Sci., **52** (7), 4061 (2017). DOI: 10.1007/s10853-016-0669-y
[16] S.V. Mutilin, K.E. Kapoguzov, V.Y. Prinz, L.V. Yakovkina. J. Vac. Sci. Technol. A, **40** (6), 063404 (2022). DOI: 10.1116/6.0002146
[17] К.Е. Капогузов, В.Б. Калинина, И.А. Азаров, А.Е. Гайдук, В.Н. Кичай, Л.В. Яковкина, С.В. Мутилин. Автометрия, **61** (6), 23 (2025).
[18] J. Yoon, G. Lee, C. Park, B.S. Mun, H. Ju. Appl. Phys. Lett., **105** (8), 083503 (2014). DOI: 10.1063/1.4893783
[19] E. Freeman, G. Stone, N. Shukla, H. Paik, J.A. Moyer, Z. Cai, H. Wen, R. Engel-Herbert, D.G. Schlom, V. Gopalan, S. Datta. Appl. Phys. Lett., **103** (26), 263109 (2013). DOI: 10.1063/1.4858468

Редактор Г.А. Оганесян

Приложение



a — СЭМ-изображение поверхности синтезированной поликристаллической пленки VO_2. *b* — дифрактограмма синтезированной поликристаллической пленки VO_2.

Changes in optical parameters of vanadium dioxide microstructures during resistive switching

K.E. Kapoguzov[1,2], S.V. Mutilin[1], V.B. Kalinina[1,2], I.A. Azarov[1,2], A.E. Gayduk[1], V.S. Tumashev[1], D.M. Milyushin[1,2], V.N. Kichay[3], L.V. Yakovkina[3]

[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 The parameters of electrical and optical switching in two-contact microstructures based on polycrystalline VO_2 films synthesized by chemical vapor deposition were investigated. The parameters of the semiconductor-metal temperature phase transition in the obtained two-contact microstructures with a width of 10 microns and a contact distance of 4 microns are measured. Measurements of the temperature dependences of the resistance showed a sharp jump in resistance by about three orders of magnitude at a direct phase transition temperature of about 65 °C. The formed structures exhibit pronounced resistive switching with a current surge of about 20 times at a threshold voltage of ≈ 19.5 V, due to the formation of a local metal filament between the contacts. The optical response of structures under temperature- and electrically-initiated semiconductor–metal phase transitions in VO_2 has been studied by spectral ellipsometry and microellipsometry. It was found that at a wavelength of 633 nm, during the temperature phase transition, the parameter Δ changes by 4.2° and the parameter Δ by 6.5°, whereas during resistive switching, jumps of Ψ by 2.4° and Δ by 3.4° are observed. For quantitative interpretation of the changes in ellipsometric parameters, numerical calculations of the reflection coefficients for transverse magnetic and transverse electric polarizations in the wavelength range of 400–1000 nm were performed, taking into account the geometry of the probing beam, gold contacts and metallic filament. The calculated changes in Ψ and Δ agree with the experimental values in order of magnitude. It is shown that during resistive switching, the change in the optical parameters of VO_2 is influenced by additional heating of the surrounding VO_2 region from the metal filament. The results obtained demonstrate the possibility of modulating optical parameters of VO_2 by an electric signal and contribute to understanding the mechanisms of electro-optical effects in microstructures, which is promising for creating tunable electro-optical structures and photonic devices.