

Экспериментальная динамика температурно-иницированного фазового перехода «металл-диэлектрик» в диоксиде ванадия*И. С. Гибин, П. Е. Котляр*

Представлены результаты аналитического исследования ключевых экспериментов по исследованию динамики обратимого температурно-иницированного фазового перехода «металл-диэлектрик» в диоксиде ванадия, приводящего к появлению аномальных физических явлений в оптических, электрических, тепловых и других свойствах образцов. Особое внимание уделено анализу кривых температурного гистерезиса, являющихся основным источником информации о фазовом переходе и изменению температурного положения фазового перехода. Фазовый переход «металл-диэлектрик» сопровождается аномально большими и быстрыми изменениями электрических, оптических, тепловых и магнитных свойств, открывающими принципиально новые возможности использования уникальных свойств фазового перехода в специальном приборостроении.

Ключевые слова: диоксид ванадия, фазовый переход, температура, пленка, металл, диэлектрик, гистерезис, зерно, кристаллическая ячейка.

Ссылка: Гибин И. С., Котляр П. Е. // Прикладная физика. 2019. № 5. С. 44.

Reference: I. S. Gibin and P. E. Kotlyar, Prikl. Fiz., No. 5, 44 (2019).

Введение

Неослабевающий интерес к явлениям, сопровождающим фазовый переход «металл-диэлектрик», обусловлен не только их актуальностью с точки зрения решения целого ряда фундаментальных проблем физики твердого тела, но и чрезвычайно широким спектром практических приложений.

В 1954 году группой специалистов по физике твердого тела Bell Telephone Laboratories на основании изучения свойств оксидов металлов переходной группы было высказано предположение о том, что электронные свой-

ства могут значительно изменяться при сильном взаимодействии катионов металла, находящихся в октаэдрических ячейках кристаллической решетки. Предполагалось, что это взаимодействие может быть достаточно сильным, если соседние октаэдры имеют общую грань или ребро. Наибольшие надежды возлагались на оксиды со структурой корунда, в которых октаэдры имеют общую грань (Ti_2O_3 , V_2O_3 , Cr_2O_3 , Fe_2O_3) и оксиды со структурой рутила, в которых октаэдры имеют общее ребро (TiO_2 , VO_2 , CrO_2 , MnO_2) [1]. Это предположение было подтверждено Ф. Морином [2], который в 1959 году впервые наблюдал обратимый фазовый переход «металл-диэлектрик» (MIT) в монокристаллических образцах различных оксидов ванадия и титана (рис. 1, б). Диоксид ванадия VO_2 привлек основное внимание исследователей, так как в нем фазовый переход осуществляется при наиболее «технологичной» температуре $+67^\circ C$, при этом изменение удельного сопротивления имеет очень большую относительную амплитуду (более пяти порядков), рекордно малое время переключения и значительные изменения оптических параметров.

Гибин Игорь Сергеевич^{1,2}, гл.н.с., д.т.н., профессор.
Котляр Петр Ефимович¹, вед. инженер, д.г.-м.н., профессор.

¹ Институт автоматизации и электрометрии СО РАН.
Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1.

E-mail: gibin@iae.nsk.su; 21031940@mail.ru

² Новосибирский государственный технический университет.

Россия, 630073, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20.

Статья поступила в редакцию 8 октября 2019 г.

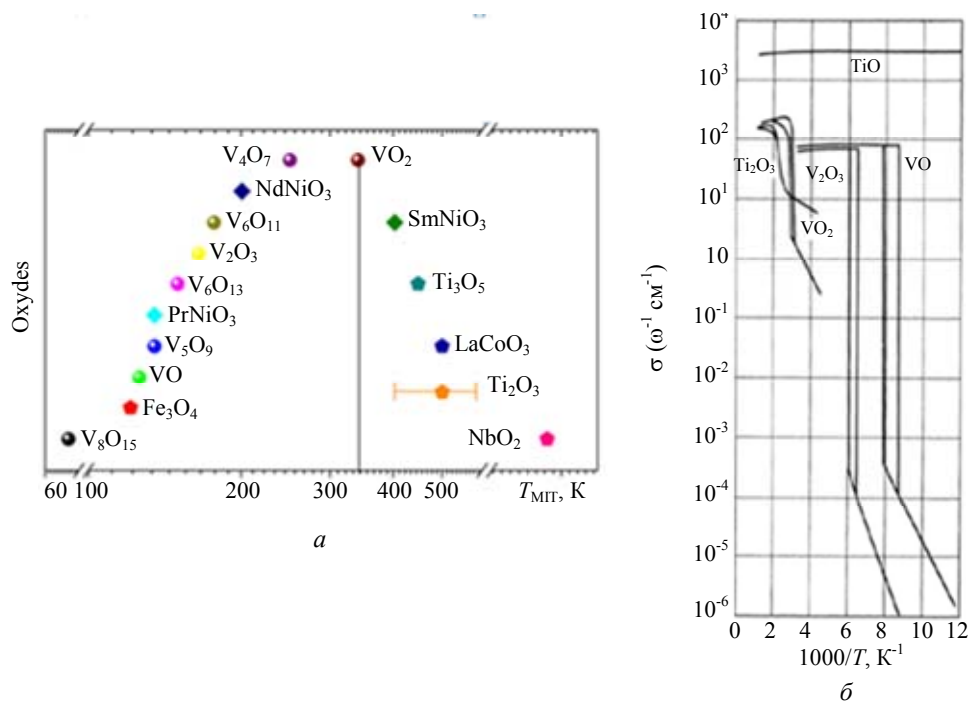


Рис. 1. Обратимый фазовый переход «металл-диэлектрик»: а) – температура фазового перехода «металл-диэлектрик» T_{MIT} в монокристаллических образцах различных оксидов по [3]; б) – проводимость как функция обратной температуры для низших оксидов титана и ванадия по [2].

Практически сразу же после открытия Ф. Морина начались обширные исследования химических, структурных и других свойств VO_2 , а также возможности использования уникальных свойств фазового перехода в специальном приборостроении.

Диоксид ванадия VO_2 существует в двух кристаллических модификациях; при 68°C α -форма превращается в β -форму (скрытая теплота фазового превращения ~ 1020 кал/моль; ΔH° перехода $3,1$ кДж/моль). При этом α -форма – антиферромагнетик, температура Нееля в чистой стехиометричной двуокиси ванадия, при которой происходит переход из антиферромагнитного состояния в парамагнитное, составляет 340 К. Не растворим в воде.

VO_2 характеризуется многообразием химических связей между атомами ванадия и кислорода в соединениях. Различают тринадцать фаз оксида ванадия от V_4O до V_2O_5 [4].

Целью данной работы является аналитическое исследование ключевых экспериментов по исследованию динамики обратимого температурно-инициированного фазового перехода «металл-диэлектрик» в диоксиде ванадия, приводящего к появлению аномальных физических явлений в оптических, электрических, тепловых и других свойствах образцов.

Образцы и их характеристики

Первоначально исследовалось изменение удельного электрического сопротивления при медленном изменении температуры вблизи критического значения на монокристаллических образцах. Характерной чертой фазового перехода в диоксиде ванадия, имеющего мартенситный характер, является наличие температурного гистерезиса на зависимостях свойств. При этом величина скачка физических параметров, ширина петли гистерезиса, ее форма существенным образом зависят от мерности и морфологии образцов, степени отклонения их состава от стехиометрического. Фазовый переход в VO_x при $T_{MIT} \sim 340$ К существует при $1,99 < x < 2,05$, причем уменьшение концентрации кислорода на один процент приводит к снижению величины T_{MIT} на десять градусов. В настоящее время освоено получение следующих видов образцов диоксида ванадия: трехмерных или объемных (3D), двумерных или пленочных (2D), одномерных нановискеров (наностержней, нанонитей) (1D), нульмерных в виде наночастиц (0D) и аморфных. Методом рентгеноструктурного анализа было обнаружено, что аморфная пленка VO_2 может содержать кластеры, раз-

меры которых не превышают 5 Å. Микрофотографии образцов VO_2 различной мерности представлены на рис. 2.

Наиболее узкие (порядка 0,5–1,0 К) петли и максимальная относительная амплитуда (10^5) изменения удельного сопротивления были получены на монокристаллических образцах (рис. 3, а). Приближение к температуре фазового перехода характеризуется экспоненциальным ростом электропроводности в низкотемпературной полупроводниковой фазе и слабым ее уменьшением в металлической фазе при увеличении температуры образца.

Фазовый переход в монокристаллических образцах сопровождается возникновением значительных упругих напряжений, которые

из-за малой пластичности материала приводят к их разрушению. По этой причине значительная доля исследований и большинство практических применений диоксида ванадия связано с использованием нано- и микроразмерных структур на основе диоксида ванадия, в частности пленок и нановолокон, которые не разрушаются при неограниченном циклировании вблизи температуры фазового равновесия. В настоящее время наибольшее число исследований физических процессов и возможности технических приложений выполняется на пленках толщиной от 0,1 до 1 мкм. Основным химическим методом получения тонких пленок диоксида ванадия в настоящее время является золь-гельный процесс. Пленки

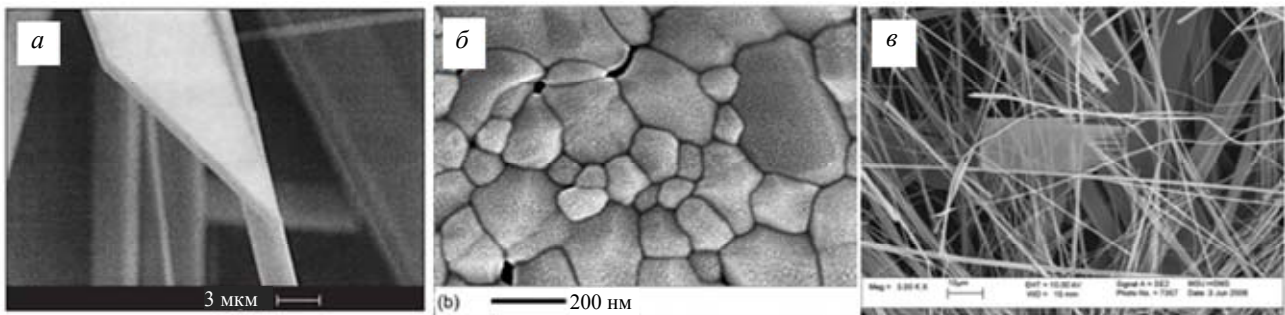


Рис. 2. Микрофотографии образцов VO_2 различной мерности: а) – пластинчатый монокристалл VO_2 по [5]; б) – микрофотография пленки VO_2 , полученная на сканирующем электронном микроскопе по Е. Доневу [6]; в) – одномерные нановискеры по [7].

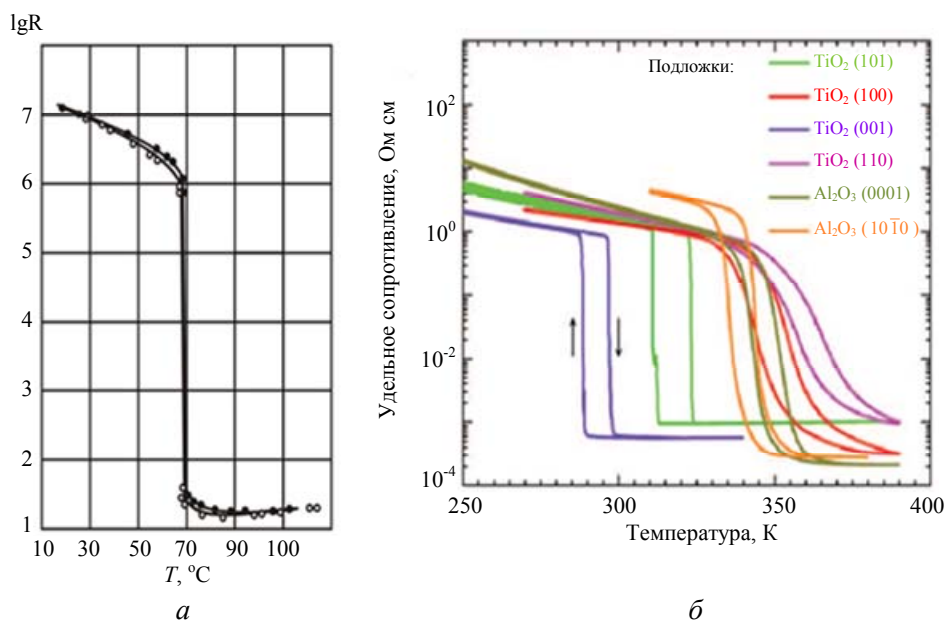


Рис. 3. Температурные эффекты в диоксидах: а) – температурный гистерезис монокристалла диоксида ванадия (ширина петли гистерезиса $\sim 1^\circ\text{C}$) по [8]; б) – фазовый переход «металл-диэлектрик» в пленочных образцах, выполненных на различных подложках по [9].

получают также осаждением из газовой фазы, анодным окислением и с помощью физических методов распыления, включая лазерную абляцию.

Пленки VO_2 характеризуются значительным уширением петли температурного гистерезиса (от 5 К до 20 К и более), уменьшением максимальной относительной амплитуды изменения удельного сопротивления до 2–4 порядков и изменением самой формы петли температурного гистерезиса (из прямоугольной в S-образную с увеличением температурной протяженности ветвей главной петли гистерезиса). Форма петли температурного гистерезиса зависит также от материала подложки и кристаллографических индексов ее поверхности (рис. 3, б). Наиболее узкие (~1 К) петли были получены на подложках из монокристаллического Al_2O_3 , при синтезе на других подложках ширина главной петли росла в ряду TiO_2 , ZrO_2 , Si, плавленый SiO_2 , что связано с уменьшением в этом ряду коэффициента поверхностной диффузии ванадия [5].

Важнейшим для практических приложений параметром петли гистерезиса является температурное положение фазового перехода T_{MIT} . Как следует из рис. 3, б, эффективным способом воздействия на параметры петли является выбор материала подложки и кристаллографических индексов ее поверхности, позволяющие снизить температуру фазового перехода вплоть до комнатной.

Вторым методом снижения температуры перехода в пленках VO_2 является их легирование при синтезе. Легирование является классическим методом контроля концентрации носителей в материалах. В зависимости от вида легирующих элементов, легирование сопровождается инжекцией электронов или инжекцией дырок. В качестве легирующих примесей, снижающих температуру фазового перехода, использовались W, Mo и Nb. Температура фазового перехода линейно зависит от концентрации легирующей примеси и для монокристаллических образцов VO_2 , легированных W, смещается в область низких температур приблизительно на 18 °C/ат.%, для поликристаллических пленок смещение составляет приблизительно 24 °C/ат.% и для порошков 25–26 °C/ат.%. С ростом доли атомов легиру-

ющего элемента происходит заметное увеличение температурной протяженности ветвей главной петли гистерезиса и уменьшение относительной амплитуды изменения удельного сопротивления (см. рис. 4). Снижение температуры перехода четко коррелирует с повышением концентрации свободных носителей заряда в образце.

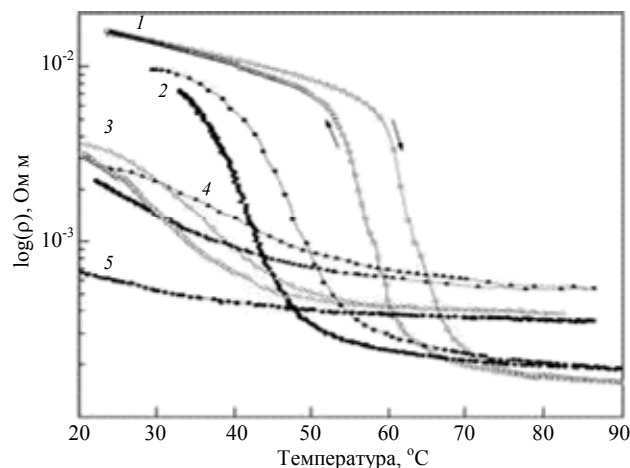


Рис. 4. Температурные зависимости удельного сопротивления пленок $V_{1-y}WyO_2$ на ситалле, при различной концентрации «y» примеси вольфрама 1 – $y = 0$; 2 – $y = 0,016$; 3 – $y = 0,03$; 4 – $y = 0,06$; 5 – $y = 0,12$ и времени отжига 60 мин. По [10].

Было обнаружено, что эффект W-легирования вызывает не только инжекцию электронов, но также сопровождается деформацией решетки, которая может играть важную роль в снижении температуры фазового перехода VO_2 . Для повышения температуры фазового перехода используются ионы металлов с низкой валентностью, такие как Cr, Ga и Al.

Динамика фазового перехода

Диоксид ванадия показал себя достаточно легко управляемым соединением, с точки зрения внешнего воздействия. Помимо температуры, фазовый переход в диоксиде ванадия может происходить под влиянием электрического поля, электронной инжекции, оптических и деформационных возбуждений, электромагнитного излучения терагерцового диапазона. В некоторых случаях сочетание двух или более возбуждений может привести к переходу на разных температурах.

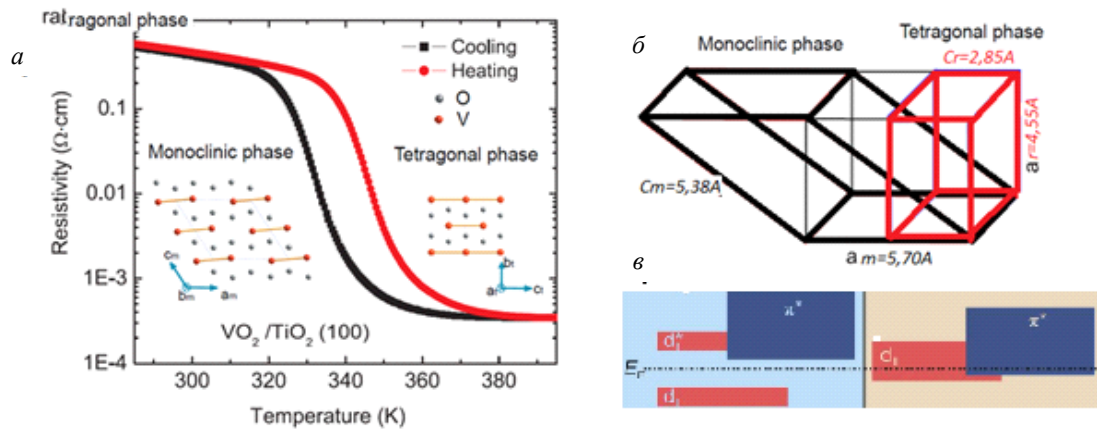


Рис. 5. Эволюция кристаллической структуры VO_2 от структуры $M1$ к структуре рутила. Черный контур представляет моноклинную структуру VO_2 ниже температуры перехода. Красный контур представляет собой структуру рутила VO_2 выше температуры перехода по [6]: а) – схема, иллюстрирующая фазовый переход в пленочном образце VO_2 из моноклинной фазы в фазу рутила (красная линия – нагревательная ветвь, черная линия – охладительная ветвь) по [6]; б) – оксид ванадия (IV) в модификации, соответствующей комнатной температуре, образует кристаллы моноклинной сингонии, пространственная группа $P 2_1/c$, параметры ячейки $a = 0,5743 \text{ нм}$, $b = 0,4517 \text{ нм}$, $c = 0,5375 \text{ нм}$, $\beta = 122,61^\circ$, $Z = 4$. При температуре 68°C происходит переход в фазу тетрагональной сингонии, пространственная группа $P 4_1/mnt$, параметры ячейки $a = 0,454 \text{ нм}$, $c = 0,285 \text{ нм}$, $Z = 2$. По [11] с изменениями; в) – трансформация зонной структуры VO_2 при фазовом переходе по [12].

Зонная структура VO_2 претерпевает значительные изменения одновременно с фазовым переходом МИТ (см. рис. 5). В нижней части рис. 5, в показана энергетическая структура высокотемпературной рутиловой (металлической) фазы и низкотемпературная структура моноклинной (полупроводниковой). В структуре рутиловой фазы уровень Ферми находится между полосой π^* и полосой $d_{||}$, что обеспечивает электропроводность металла.

В структуре моноклинной фазы полоса $d_{||}$ разбита на две энергетические зоны (полоса $d_{||}$ и полоса d^*), и между полосой $d_{||}$ и полосой π^* образуется запрещенная зона. Ширина запрещенной зоны составляет приблизительно 0,7 эВ, уровень Ферми попадает в запрещенную зону, что делает VO_2 изоляционным материалом.

Более детально трансформация зонной структуры VO_2 при фазовом переходе представлена на рис. 6 по [13].

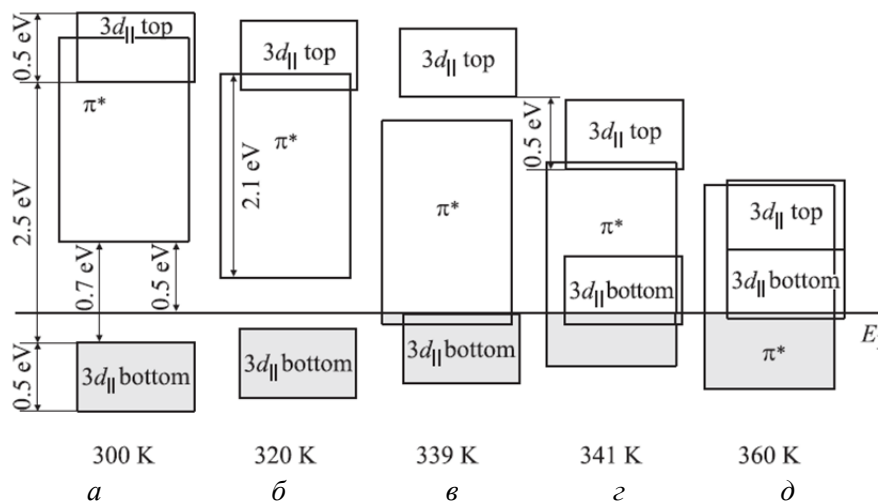


Рис. 6. Трансформация зонной структуры VO_2 при фазовом переходе по [13]: а, б – низкотемпературная (300, 320 К) моноклинная полупроводниковая фаза; в – моноклинная фаза вблизи температуры структурного перехода (339 К); г – тетрагональная металлическая фаза вблизи температуры (341 К); д – тетрагональная металлическая фаза при высокой температуре (360 К).

Согласно представленной схеме фазового перехода, нагрев образца приводит к изменению энергетической щели между нижней $3d_{||}$ -подзоной и π^* -зоной от стартовой величины 0,7 эВ в сторону ее уменьшения за счет корреляционного движения зон из-за термического заброса электронов из нижней $3d_{||}$ -подзоны в π^* -зону (см. рис. 6, а, б). При этом возникает положительная обратная связь между шириной щели и заселенностью зон: уменьшающаяся щель способствует увеличению темпа термической генерации электронов в π^* -зону, которое в свою очередь уменьшает щель. Обратный процесс перехода материала из металлической фазы в полупроводниковую сопровождается термическим забросом электронов из π^* -зоны в нижнюю $3d_{||}$ -подзону.

Электронные фазовый переход в VO_2 являются безгистерезисным, а структурный обладает термическим гистерезисом, ширина петли которого зависит в первую очередь от размера микрокристалла [13].

Особенности гистерезиса диоксида ванадия

Наличие гистерезиса характеризует перестройку решетки в фазовом переходе «металл–полупроводник» и является свидетельством фазового перехода первого рода. Гистерезис связан с явлениями перегрева и переохлаждения, т. е. с существованием метастабильных состояний и проявляется в том, что температура Нееля элементарного кристаллита не является константой, а зависит от направления температурного воздействия. Наличие двух неелевских температур обусловлено асимметрией энергетического барьера, вызванного механическими напряжениями в основном в системе «пленка-подложка». Чтобы оценить характеристику фазового перехода пленки, определяют производную измеренной величины по температуре. Графики производной температурной зависимости измеряемого параметра от температуры для нагревательной и охлаждающей ветвей содержат экстремумы. Температуру, соответствующую экстремуму каждой ветви, определяют как температуру фазового перехода при нагревании T_{H1} и охлаждении T_{H2} пленки. Температуру перехода T_{MIT} пленки вычисляют в форме среднего $T_{MIT} = (T_{H1} + T_{H2})/2$, а ширину ΔT гистерезиса – как разность $\Delta T = T_{H1} - T_{H2}$.

Ширина температурного интервала фазового перехода при нагревании или охлаждении характеризуется полушириной каждой кривой. Ширина гистерезиса зависит от энергетического барьера перехода между металлической и полупроводниковой фазами. Энергетический барьер перехода является функцией размера зерна, поэтому ширина гистерезиса пленки VO_2 будет функцией распределения размера зерна (см. рис. 2, б) и от степени отклонения состава пленки от стехиометрического. Гистерезисный характер фазового перехода в VO_2 проявляется во всех его физических свойствах, а именно: электрических, оптических, теплофизических, магнитных, механических.

Распределение петель по ширинам и положению относительно температуры впервые математически описал И. А. Меркулов в 1978 году [14], фактически применив аналогии ферромагнетизма. Основные положения предложенной им модели, детально доработанной впоследствии В. А. Климовым с соавторами [15], сводятся к следующему:

- поликристаллическая пленка диоксида ванадия состоит из отдельных монокристаллических зерен; зерна эти распределены в некотором интервале как по размерам (см. рис. 2, б), так и по коэрцитивным температурам T_c равновесия полупроводниковой и металлической фаз в них;

- каждому из монокристаллических зерен (доменов) соответствует своя, «элементарная» петля гистерезиса, имеющая прямоугольную форму и ограниченная температурами перехода из полупроводниковой фазы в металлическую (T_{H1}) и обратно (T_{H2}), что обусловлено мартенситным характером данного фазового превращения;

- ширина «элементарной» петли по оси абсцисс обратно пропорциональна квадрату корню из поперечника зерна;

- в тонких пленках любое зерно имеет границы: а) с соседними зернами, б) с подложкой, в) с окружающей средой; наличие у каждого зерна границы с подложкой и с окружающей средой является главной причиной отличия свойств тонких пленок от свойств макроскопических образцов пленок, где большинство зерен ограничено лишь межзеренными границами;

– высота «элементарной» петли пропорциональна объему зерна в общем объеме пленки;

– петля гистерезиса всей пленки в целом (предельная петля), представляет собой сумму всех элементарных петель (скачков Баркгаузена).

Наиболее типичные петли гистерезиса представлены на рис. 7.

Наиболее узкие (~ 1 К) и практически прямоугольные петли с максимальной относительной амплитудой (10^5) изменения удельного сопротивления были получены на стехиометрических монокристаллических образцах (рис. 7, а) и на одномерных нановискерах, в которых практически отсутствуют межзеренные (междоменные) границы, а фазовый переход осуществляется одним гигантским скачком, охватывающим объем всего образца. Температурные границы фазового перехода практически равны ширине петли гистерезиса.

На рис. 7, б представлена петля гистерезиса, характерная для пленочных образцов VO_2 . Она характеризуется изменением самой формы петли гистерезиса (из прямоугольной в S-образную). Современные технологии выращивания позволяют получать пленки с значительными вариациями основных параметров фазового перехода (температура фазового перехода, ширина петли температурного гистерезиса (от 5 К до 20 К и более)). Температурные границы фазового перехода значительно расширяются и могут достигать 5–10 ширин петли гистерезиса. Подобное «уширение» петли свидетельствует о том, что пленка VO_2 имеет в своей структуре множество микрокристаллов, каждый из которых обладает сво-

ей температурой фазового перехода и своей шириной петли гистерезиса. Естественно, что «гладкость» петли гистерезиса на рис. 7, б имеет условный характер. В общем случае петля гистерезиса выполняется серией скачков, обусловленных фазовым переходом в отдельных зернах (см. рис. 7, в и рис. 8, а, рис. 8, б). Возможность получения значительных вариаций температурных границ фазового перехода в пленках диоксида ванадия, в сравнении с монокристаллами, создает возможность плавно менять передаточные характеристики устройств. Для получения широкой «главной» петли гистерезиса увеличивают ширину «элементарных» петель, которая в толстых пленках обратно пропорциональна поперечному размеру зерна. Поэтому в данном случае необходимо синтезировать возможно более мелкозернистые пленки. Размеры зерен при синтезе, в свою очередь, определяются условиями зародышеобразования и роста зерен, что определяется коэффициентом поверхностной диффузии ванадия, который увеличивается с понижением величины парциального давления кислорода и с ростом температуры подложки [8].

Возникновение прерывистых лавин отдельных скачков на нагревательной и охлаждающей ветвях главной петли соответствует факту наличия нескольких максимумов в распределении зерен по размерам, тем самым, по ширинам элементарных петель. Шарони и соавт. [17] установили, что скачки сопротивления происходили даже при очень медленной скорости изменения температуры, при которых соседствующие отсчеты были разделены менее чем на 0,5 мК.

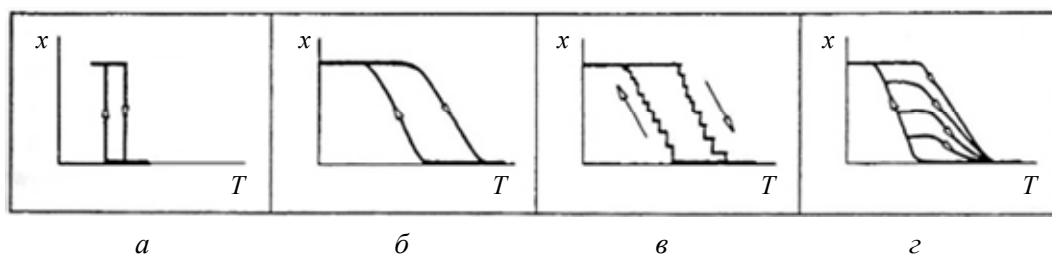


Рис. 7. Схематическое изображение некоторых петель гистерезиса, встречающихся в термически-индуцированных переходах: а) – односкачковое преобразование в монокристалле; б) – многоскачковое преобразование, характерное для пленочных образцов; в) – преобразование серией прерывистых лавин; г) – частные циклы. По [16] с изменениями.

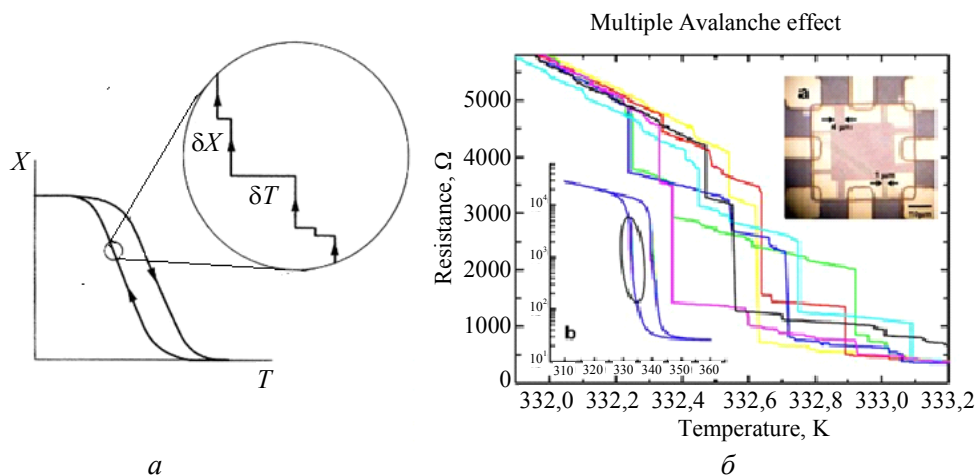


Рис. 8. Характеристики гистерезиса: а) – петля гистерезиса, выполненная серией скачков, обусловленных фазовым переходом в отдельных зернах по [17]; б) – фрагмент записи 8 последовательных циклов изменения сопротивления пленочного образца при охлаждении по [17].

Частные циклы (рис. 7, з), регистрируемые при инверсии подвода тепла при наличии в образце диэлектрической и металлической фаз, характеризуются резким изменением крутизны характеристики и наличием начальных безгистерезисных участков.

Переход динамической петли гистерезиса в область неустойчивости начинает проявляться с появлением на ветвях петли небольших участков неустойчивости из-за вариации поля старта.

Фазовый переход «металл–полупроводник» в диоксиде ванадия сопровождается изменением его оптических характеристик, а именно, коэффициентов отражения и поглощения. Эти величины зависят от длины волны света и его поляризации относительно кристаллографических осей VO_2 . Такие изменения оптических характеристик позволяют фиксировать динамику фазового перехода по изменению коэффициента отражения VO_2 аналогично изучению температурной зависимости электрического сопротивления образца.

Рис. 9 иллюстрирует гетерогенность процесса зарождения новой фазы. Различные цвета областей с металлической фазой – светло-голубой, зеленый и красный могут быть объяснены разбросом в ориентации кристаллографических осей образующихся кристаллитов.

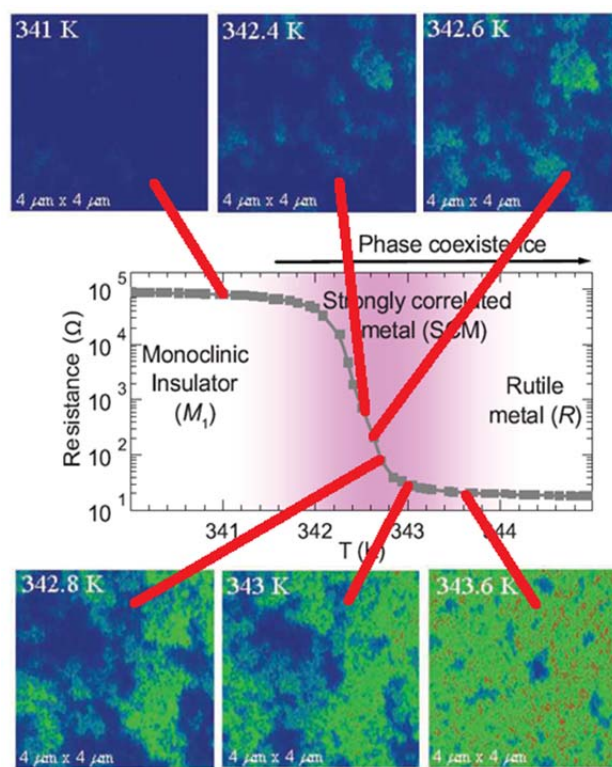


Рис. 9. Динамика фазового перехода в пленочном образце диоксида ванадия, зарегистрированная с помощью сканирующего ближнепольного инфракрасного микроскопа рассеивающего типа (s-SNIM) на ИК-волне 10,7 мкм (области с моноклинной фазой – темно-синий цвет, области с тетрагональной, металлической фазой – светло-голубой, зеленый и красный цвета) по [18].

Заключение

Диоксид ванадия в настоящее время занимает ведущее место среди материалов оптоэлектроники. Обратимый фазовый переход «металл-изолятор» в диоксиде ванадия сопровождается аномально большими и быстрыми изменениями электрических, оптических, тепловых и магнитных свойств. Современные технологии обеспечивают получение материала с необычайной эластичностью передаточной характеристики в виде температурного положения фазового перехода, крутизны ветвей, гистерезиса физических свойств и температурного диапазона фазового перехода, что позволяет конструировать широкий спектр принципиально новых сенсоров, обладающих рекордной чувствительностью

Исследование выполнено за счет средств субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания № АААА-А17-117052410034-6 в ИАиЭ СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Jaffray J., Dumas D. // J. Rech. Cent. Natl. Rech. Sci. Lab. Bellevue. 1954. Vol. 5. P. 360.
2. Morin F. J. // Phys. Rev. Lett. 1959. Vol. 3. P. 34.
3. Zheng Yang, Changhyun Ko, Shriram Ramathan // Annual Review of Materials Research. 2011. March 30.
4. Émond N. Synthèse et caractérisation de couches minces de VO₂ et de W_xV_{1-x}O₂ pour des applications dans

les domaines infrarouge et terahertz – Université du Québec Centre Énergie Matériaux Télécommunications (EMT) 2017. P. 306.

5. Виноградова О. П., Сидоров А. И., Климов В. А. и др. // Физика твердого тела. 2008. Т. 50. Вып. 7. С. 1177.
6. Donev E. U. Metal–semiconductor transitions in nanoscale vanadium dioxide–thin films, subwavelength holes, and nanoparticles – Dissertation, December 2008, Nashville, Tennessee. P. 198.
7. Балахонов С. В., Лучинкин Д. С., Ефремова М. и др. // НАНОСИСТЕМЫ: ФИЗИКА, ХИМИЯ, МАТЕМАТИКА. 2011. Т. 2. № 3. С. 102.
8. Ильинский А. В., Климов В. А., Ханин С. Д. и др. // Известия Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена. 2000. Вып. 15. С. 100.
9. Jaewoo Jeong // SCIENCE. 2013. Vol. 339.
10. Березина О. Я., Зломанов В. П., Кириенко Д. А. и др. // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 4. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=9646>
11. Lu Guo Modification of metal insulator transition in ultrathin vo₂ films via ultra violet radiation – Dissertation, Pennsylvania State University. 2014. P. 71.
12. Zewei Shao, Xun Cao, Hongjie Luo, Ping Jin // NPG Asia Materials. 2018. Vol. 10. P. 581.
13. Ильинский А. В., Квашенкина О. Е., Шадрин Е. Б. // Физика и техника полупроводников. 2012. Т. 46. Вып. 9. С. 439.
14. Ланская Т. Г., Меркулов И. А., Чудновский Ф. А. // ФТТ. 1978. Т. 20. С. 1201.
15. Климов В. А., Тимофеева И. О., Ханин С. Д. и др. // Журнал технической физики. 2002. Т. 72. Вып. 9. С. 68.
16. Delaey L. Diffusionless Transformations in Phase Transformations in Materials – Wiley-VCH, Weinheim; New York; Chichester, new edition, 2001.
17. Sharoni A., Ramirez J. G., Schuller I. K. // Physical Review Letters. 2008. Vol. 101. P. 026404.
18. Qazilbash M. M., Brehm M., Chae B. G., Ho P. C., et al. // Science. 2007. Vol. 318. P. 1750.

PACS: 42.70 Pс, 42.65 Nq, 85.60-q

Experimental dynamics of temperature initiated phase transition of metal-dielectric in vanadium dioxide

I. S. Gibin^{1,2} and P. E. Kotlar¹

¹ Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science
1 Koptug Ave., Novosibirsk, 630090, Russia

² Novosibirsk State Technical University
20 K. Marks Ave., Novosibirsk, 630073, Russia
E-mail: gibin@iae.nsk.su, kozik@iae.nsk.su, nejevenko@iae.nsk.su

Received October 8, 2019

The article presents the key experiments analytic research results in the study of the dynamics of temperature initiated phase transition of metal-dielectric in vanadium dioxide than leads to the appearance of anomalistic physical phenomena in optical, electric, thermal and other properties of samples. Special attention is paid to the analysis of temperature hysteresis curves that are the main source of information about the phase transition and phase transition temperature position change. Phase transition of metal-dielectric is accompanied by anomalous large and quick changes of electric, optical, thermal and magnetic properties that give way to principally new opportunities of the use of the phase transition unique properties in special instrument making industry.

Keywords: vanadium dioxide, phase transition, temperature, coating, metal, dielectric, resistance, kernel, crystal cell.

REFERENCES

1. J. Jaffray and D. Dumas, J. Rech. Cent. Natl. Rech. Sci. Lab. Bellevue **5**, 360 (1954).
2. F. J. Morin, Phys. Rev. Lett. **3**, 34 (1959).
3. Zheng Yang, Changhyun Ko, and Shriram Ramanathan, Annual Review of Materials Research. March 30, 2011.
4. N. Émond, *Synthèse et caractérisation de couches minces de VO₂ et de W_{XV1}-XO₂ pour des applications dans les domaines infrarouge et térahertz* (Université du Québec Centre Énergie Matériaux Télécomm)
5. O. P. Vinogradova, A. I. Sidorov, V. A. Klimov, et al., Phys. Solid State **50** (7), 1177 (2008).
6. E. U. Donev, *Metal-semiconductor transitions in nanoscale vanadium dioxide—thin films, subwavelength holes, and nanoparticles* (Dissertation, December 2008, Nashville, Tennessee). P. 198.
7. S. V. Balakhonov, D. S. Louchinkin, V. Efremova, and Co., Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics **2** (3), 102 (2011).
8. A. V. Ilinsky, V. A. Klimov, S. D. Khanin, and Co., Izvestiya Rus. Gos. Pedagog. Univers., No. 15, 100 (2000).
9. Jaewoo Jeong, SCIENCE **339**, (2013).
10. O. Y. Berezina, V. P. Zlomanov, D. A. Kirienko, and Co., Sovremen. Probl. Nauki i Obrazov., No. 4, (2013); URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=9646>
11. Lu Guo, *Modification of metal insulator transition in ultrathin vo₂ films via ultra violet radiation*. (Dissertation, Pennsylvania State University, 2014). P. 71.
12. Zewei Shao, Xun Cao, Hongjie Luo, and Ping Jin, NPG Asia Materials **10**, 581 (2018).
13. A. V. Ilinsky, O. E. Kvashenkina, and E. B. Shadrin, Semiconductors **46** (9), 1194 (2012).
14. T. G. Lanskaya, I. A. Mercoulov, and F. A. Chudnovsky, Phys. Solid State **20**, 1201 (1978).
15. V. A. Klimov, I. O. Timofeeva, S. D. Khanin, and Co., Tech. Phy. **72** (9), 68 (2002).
16. L. Delaey, *Diffusionless Transformations in Phase Transformations in Materials* (Wiley-VCH, Weinheim; New York; Chichester, 2001).
17. A. Sharoni, J. G. Ramirez, and I. K. Schuller, Physical Review Letters **101**, 026404 (2008).
18. M. M. Qazilbash, M. Brehm, B. G. Chae, P. C. Ho, et al., Science **318**, 1750 (2007).