

УДК 621.315.592

Влияние условий импульсного лазерного осаждения на структурные, электрические и оптические свойства тонких пленок VO₂

© О.А. Новодворский*[¶], Л.С. Паршина*, О.Д. Храмова*, В.А. Михалевский*,
К.Д. Щербачев⁺, В.Я. Панченко*

* Институт проблем лазерных и информационных технологий Российской академии наук,
140700 Шатура, Россия

⁺ Национальный исследовательский технологический университет „МИСиС“,
119049 Москва, Россия

(Получена 4 сентября 2014 г. Принята к печати 23 сентября 2014 г.)

Методом импульсного лазерного осаждения с сепарацией капель факела на монокристаллических подложках сапфира (0001) и кремния (111) получены тонкие пленки VO₂. Установлено влияние плотности энергии на мишени и давления кислорода на структурные и электрические свойства пленок. Все кристаллические пленки VO₂ демонстрируют переходы полупроводник–металл со значительным изменением электрического сопротивления от двух до пяти порядков величины. Исследовано пропускание пленок в диапазоне 200–800 нм и отражение в диапазоне 400–700 нм в интервале температур от 20 до 100°С. Коэффициент пропускания пленок на длинах волн от 300 до 800 нм демонстрирует скачок пропускания и гистерезис при нагреве и охлаждении. Впервые установлено, что характер изменения пропускания пленок на разных длинах волн различается, и вид температурного гистерезиса оптического пропускания в области длин волн видимого и ближнего ультрафиолетовых диапазонов не везде повторяет вид гистерезиса электрического сопротивления пленок VO₂. Различное поведение кривых гистерезиса объясняется изменением поглощения в пленках при варьировании температуры.

1. Введение

К оксиду ванадия проявляется большой интерес в связи с наличием в нем перехода металл–полупроводник при изменении температуры и значительным изменением оптических и электрических свойств, которое сопровождает эти переходы. В значительной степени интерес к оксиду ванадия VO₂ вызван тем, что его температура перехода близка к комнатной температуре. Монокристалл VO₂ демонстрирует изменение электрического сопротивления до 10⁵ раз при изменении температуры на 0.1°С при 68°С [1]. Характеристики пропускания в ИК области также сильно изменяются во время фазового перехода. Уникальные свойства VO₂ делают его пригодным в качестве неохлаждаемых болометров инфракрасных камер [2], переключателей и сенсоров в микроволновой и терагерцовой областях спектра [3].

Таковыми же свойствами обладают и тонкие пленки VO₂, причем они выдерживают значительно большее число циклов переключений, чем монокристаллические образцы [4]. Термохромные свойства пленок VO₂ находят широкое применение от устройств микроэлектроники до интеллектуальных покрытий окон зданий [5]. Тонкие пленки VO₂ были получены различными методами: химическим осаждением металлоорганических соединений из газовой фазы [6], испарением [7], магнетронным рассеянием [8], золь-гель методом [9] и импульсным лазерным осаждением [2,10,11]. Большинство тонких пленок VO₂ демонстрируют значительное изменение электрического сопротивления при температуре перехода около 68°С с термическим гистерезисом 2–5°С при

нагревании и последующем охлаждении. Исследовались механизмы изменения электрических свойств пленок — перестройка кристаллической структуры [12] и электронной подсистемы [13], а также изменение характеристик пленок в среднем и дальнем ИК диапазоне спектра [14].

Метод импульсного лазерного осаждения (ИЛО) успешно применяется для получения тонких пленок полупроводников, сверхпроводников, изоляторов, диэлектриков. Так как метод ИЛО работает при довольно высоком давлении в напылительной камере, он является уникальным при напылении тонких пленок оксидов. Впервые зависимость качества пленок VO₂ от давления кислорода при напылении пленок методом ИЛО наблюдалась в работах [1,15]. Установлено, что большое влияние на электрические характеристики пленок VO₂ оказывает ориентация подложки [15].

В настоящей работе на монокристаллических подложках сапфира и кремния получены пленки VO₂ методом ИЛО с сепарацией частиц по скорости. Исследовано влияние плотности энергии на мишени и давления кислорода в камере на структуру пленок, полученных методом ИЛО на сапфировых подложках. Изучены температурные зависимости электрических и оптических свойств фазового перехода пленок в отражении и пропускании пленок в области спектра 200–800 нм от температуры в диапазоне от 20 до 100°С.

2. Методы получения и исследования

Установка ИЛО с механической сепарацией частиц была описана ранее в работе [16]. Абляция мишеней осу-

[¶] E-mail: onov@mail.ru

Таблица 1. Характеристики исследуемых пленок VO₂

№ образца	Тип и ориентация подложки	T подложки, °C	E, Дж/см ²	P _{O₂} , мТорр	Толщина пленок, нм	Сопротивление пленки, кОм
1	Сапфир (0001)	630	6.5	20.0	43	75
2	Сапфир (0001)	630	5.9	20.0	37	1500
3	Сапфир (0001)	630	5.9	30.0	24	108
4	Кремний (111)	630	5.9	20.0	94	3000

шествовалась эксимерным KrF-лазером с частотой повторения импульсов 10 Гц и плотностью энергии лазерного излучения на мишени от 4.0 до 6.5 Дж/см². В качестве мишеней использовали металлический ванадий чистотой 99.9%. Для равномерной выработки мишени, чтобы уменьшить неоднородность поверхности, она вращалась с частотой примерно 1 Гц. Исходный (предварительный) вакуум в рабочей камере (10⁻⁷ Торр) достигался с помощью турбомолекулярного и криогенного насосов. После этого в камеру напускался буферный газ. Подложки располагались на расстоянии 70 мм от мишени. Осаждение пленок проводилось в диапазоне давления буферного кислорода от 10 до 30 мТорр. Напуск буферного газа осуществлялся с помощью прецизионного натекателя Shell CMV-NW-10. Пленки были выращены на подложках сапфира (0001) и кремния (100) размером 10 × 10 мм. Держатель подложки нагревался резистивным нагревателем. Температура подложки в процессе напыления составляла 630 °C и контролировалась термопарой. После осаждения образцы охлаждались до комнатной температуры при рабочем давлении кислорода.

Кристаллическая структура тонких пленок оксида ванадия определялась методом рентгеновской дифракции. Исследования проводили на многоцелевом рентгеновском дифрактометре D8 Discover (фирма Bruker-AXS, Германия) в геометрии 2θ–ω. Источником рентгеновского излучения являлась рентгеновская трубка мощностью 1.6 кВт с медным анодом. Параллельный пучок с расходимостью 0.03° формировался зеркалом Гёбеля. Ширина рентгеновского пучка составляла 0.2 мм. Интенсивность отраженного луча измеряли с помощью позиционно-чувствительного детектора LynxEye (угловое разрешение 0.015°).

Исследования электрических характеристик пленок проводили четырехточечным методом на Pro4 и методом вольт-амперных характеристик (ВАХ) (Keithley-2612). В последнем случае омические контакты обеспечивались нанесением индиевых контактов на пленку. Зависимость электрического сопротивления от температуры образцов определялась при нагревании на воздухе от комнатной температуры до 100 °C и последующем охлаждении опять до комнатной температуры с шагом 2 °C

со скоростью 2 °C/мин. В окрестности перехода шаг изменения температуры уменьшался до 1 °C.

Спектры пропускания пленок исследовались в спектрофотометре Cary-50 при нагревании на воздухе от комнатной температуры до 100 °C и последующем охлаждении опять до комнатной температуры с шагом 2 °C со скоростью 2 °C/мин.

Спектры отражения при температуре 24 и 80 °C были получены на спектрофотометре СФ-56 с интегрирующей сферой.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Влияние плотности энергии на структурные характеристики пленок

Были получены пленки VO₂ при различной плотности энергии на мишени и давлении кислорода в напылительной камере. Условия получения и характеристики пленок приведены в табл. 1.

Результаты рентгеновских исследований пленок оксида ванадия представлены на рис. 1. Из рис. 1 видно

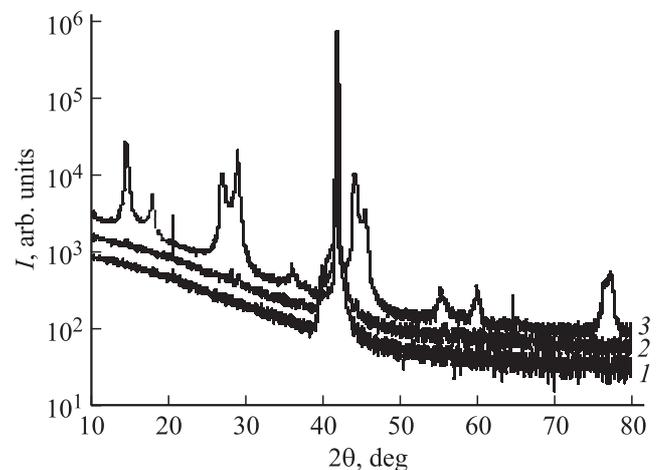


Рис. 1. Дифрактограммы тонких пленок оксида ванадия, 2θ–ω сканы для образцов 1, 2, 3.

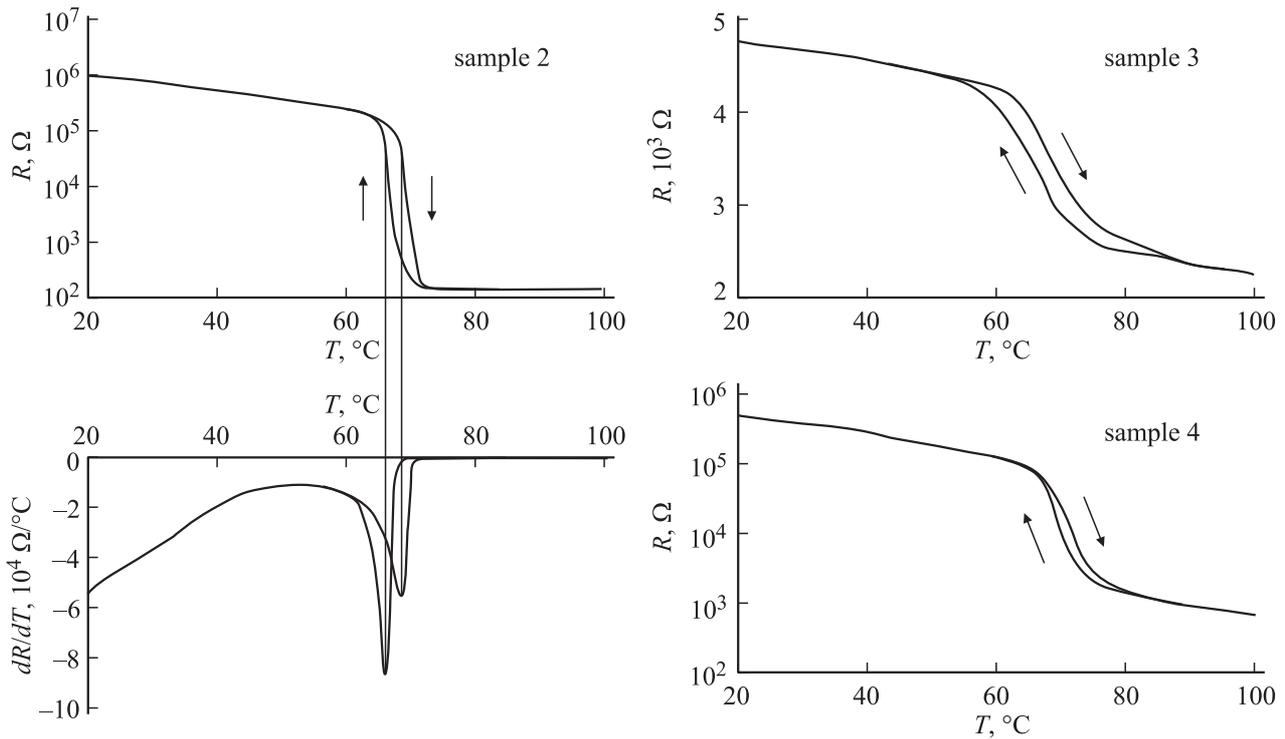


Рис. 2. Зависимость электрического сопротивления пленок VO₂ от температуры при последовательном нагреве и охлаждении (для образцов 2, 3) на подложке сапфира (0001) и образца 4 на подложке кремния (111) и производные от кривых электрического сопротивления для образца 2. Стрелками указано направление изменения температуры.

(кривая 1), что при давлении 20 мТорр и плотности энергии на мишени 6.5 Дж/см² пленка получается аморфной. При снижении плотности энергии до 5.9 Дж/см² (кривая 2) наблюдаются три пика, соответствующих (002), (003) и (221) моноклинного VO₂ при углах 2θ, равных соответственно 29.0, 44.1, 55.4°. Кроме того, наблюдаются слабые пики, соответствующие V₈O₁₅. Других пиков, определяющих высокую взаимную ориентацию кристаллитов структуры, не наблюдалось. Полученные результаты указывают на то, что уменьшение плотности энергии ведет к зарождению кристаллического VO₂, а наличие фазы V₈O₁₅ указывает на недостаток кислорода при формировании пленки. При увеличении давления кислорода до 30 мТорр (кривая 3) получены четкие пики от пленки, которые соответствуют фазе VO₂. Наблюдаются пики, соответствующие (001), (-201), (002), (-402), (003), (221), (004), (130) моноклинного VO₂ при углах 2θ, равных соответственно 14.4, 17.8, 29.0, 36.1, 44.1, 55.4, 60.2, 77.4°. Пленка является поликристаллической, преимущественной ориентации кристаллитов нет.

Значительное уширение рефлексов в образце 3 свидетельствует о напряженном состоянии кристаллитов. Это приводит к изменению и других характеристик пленок, в частности, к снижению удельного сопротивления и уширению температурного диапазона гистерезиса (рис. 2), которое наблюдалось и другими исследователями [17]. Отнесение наблюдаемых рефлексов проводилось по карте номер 81-2392 базы ICDD PDF-2, 2004 год.

3.2. Электрические измерения

На рис. 2 приведены зависимости электрического сопротивления образцов пленок VO₂ на подложках сапфира (0001) (образцы 2 и 3) и на подложке кремния (111) (образец 4) от температуры при последовательном нагреве и охлаждении, полученных при плотности энергии на мишени 5.9 Дж/см². При нагревании и охлаждении образцов наблюдался гистерезис электрического сопротивления. На этом же рисунке приведен пример графиков производных зависимостей dR(T)/dT (где T — температура) для пары кривых „нагрев“ и „охлаждение“ для образца 2. По этим кривым определяли температуру перехода и ширину гистерезиса для всех образцов. Полученные результаты приведены в табл. 2. Образцы показывают типичную полупроводниковую характеристику уменьшения электрического сопротивления с увеличе-

Таблица 2. Значения температуры перехода и ширины гистерезиса для пленок на подложках сапфира (образцы 1, 2, 3) и кремния (образец 4)

№ образца	T _{c heat} , °C	T _{c cool} , °C	T _c , °C	ΔT _c , °C
1	—	—	—	—
2	69	66	67.5	3
3	70	66	68	4
4	68	66	67	2

нием температуры до температуры перехода. С увеличением температуры выше температуры перехода электрическое сопротивление незначительно растет, демонстрируя металлическое поведение. Наличие гистерезиса вблизи температуры 67°C указывает на доминирование в пленке фазы VO_2 . Известно, что даже малое изменение содержания кислорода в оксиде ванадия приводит к большому сдвигу в температуре перехода T_c , например, $T_c(\text{V}_5\text{O}_9) = 135\text{ K}$ [18], $T_c(\text{V}_6\text{O}_{13}) = 145\text{ K}$ [19].

Значения температуры перехода для пленок на подложках сапфира (0001) и кремния (111) равны соответственно 67.5 и 67°C . Значение T_c определяли как $T_c = (T_{c\text{ heat}} + T_{c\text{ cool}})/2$, где $T_{c\text{ heat}}$ и $T_{c\text{ cool}}$ — температуры перехода при нагревании и охлаждении соответственно. Пленки на подложках кремния (111) имеют более низкую температуру перехода по сравнению с пленками на сапфире (0001). Ширины гистерезиса оказались соответственно равны 3 и 2°C . Для пленок на подложках сапфира (0001) эта величина обычно равна 3°C [1]. Ширина гистерезиса для пленки на кремнии (111) также была уже, чем для пленки на подложке сапфира (0001) при одинаковом давлении. Отношение электрического сопротивления при 24 и 100°C было равно $3.9 \cdot 10^3$ для пленок на *c*-сапфире (0001) и $4.1 \cdot 10^2$ для пленки на кремнии (111).

Аморфные пленки (образец 1) демонстрируют характерную полупроводниковую зависимость от температуры и отсутствие фазового перехода полупроводник–металл.

3.3. Влияние давления кислорода

В процессе движения от мишени частицы ванадия реагируют с кислородом в камере, причем относительная концентрация кислорода в факеле во время движения к подложке увеличивается, определяя степень окисления ванадия. Этим объясняется то, почему давление кислорода в камере является одним из критических параметров для оптимизации процесса роста пленки VO_2 . При изменении давления кислорода могут расти кристаллиты различной ориентации (поликристаллические пленки), о чем было сказано выше. При этом дефекты на границах могут служить источником носителей заряда. Так, при увеличении давления кислорода до 30 мТорр сопротивление пленки на сапфире (0001) (образец 3, рис. 2) снизилось до 108 кОм , а ширина петли гистерезиса увеличилась по сравнению с пленкой, которая напылялась при давлении 20 мТорр (образец 2). При увеличении давления кислорода растут и T_c , и ширина гистерезиса. Аналогичную тенденцию наблюдали авторы [15]. Дальнейшее увеличение давления кислорода приводит к образованию V_2O_5 и других высших оксидов ванадия, и пленки становятся диэлектрическими во всем исследуемом температурном диапазоне.

3.4. Спектры пропускания и отражения

Мы исследовали спектры пропускания пленок VO_2 на сапфире в спектральном диапазоне $200\text{--}800\text{ нм}$ в температурном интервале $20\text{--}100^\circ\text{C}$. Шаг изменения температуры составлял 2°C , а в окрестности фазового перехода 1°C . Спектры пропускания пленки (образец 2) при двух температурах ниже и выше T_c представлены на рис. 3. На основе экспериментальных данных по спектрам пропускания были построены зависимости величины пропускания от температуры на длинах волн $300, 400, 500, 600, 700, 800\text{ нм}$ для режимов „нагрев“ и „охлаждение“. Результаты для образца 2 приведены на рис. 4. Видно, что коэффициент пропускания пленок на всех длинах волн демонстрирует скачок и гистерезис изменения пропускания при нагреве и охлаждении. Характер изменения пропускания пленок различается на разных длинах волн. На длине волны 500 нм наблюдалось наиболее значительное изменение пропускания. Характер изменения пропускания напоминает поведение сопротивления при изменении температуры пленки — в окрестности температуры фазового перехода T_c у пропускания имеется скачок, но имеются и некоторые особенности. В окрестности T_c имеется гистерезис при нагреве и охлаждении, который по характеру повторяет гистерезис электрического сопротивления. В то же время ниже T_c пропускание практически не зависит от температуры и резко снижается в окрестности T_c , затем монотонно уменьшается при возрастании температуры выше T_c .

На длине волны 300 нм в окрестности T_c пропускание возрастает при увеличении температуры. Выше T_c оно линейно растет с температурой. Ниже T_c пропускание практически не зависит от температуры. Общий характер зависимости пропускания выглядит зеркально симметричным характеру изменения электрического сопротивления относительно вертикальной оси y в точке T_c . При этом имеется гистерезис при нагреве и охлаждении, который по характеру повторяет гистерезис электрического сопротивления.

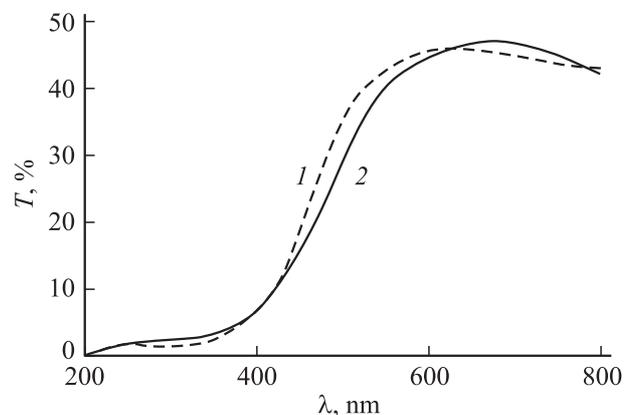


Рис. 3. Спектры пропускания пленки VO_2 (образец 2) при двух температурах — ниже и выше T_c (1 — 20°C и 2 — 100°C).

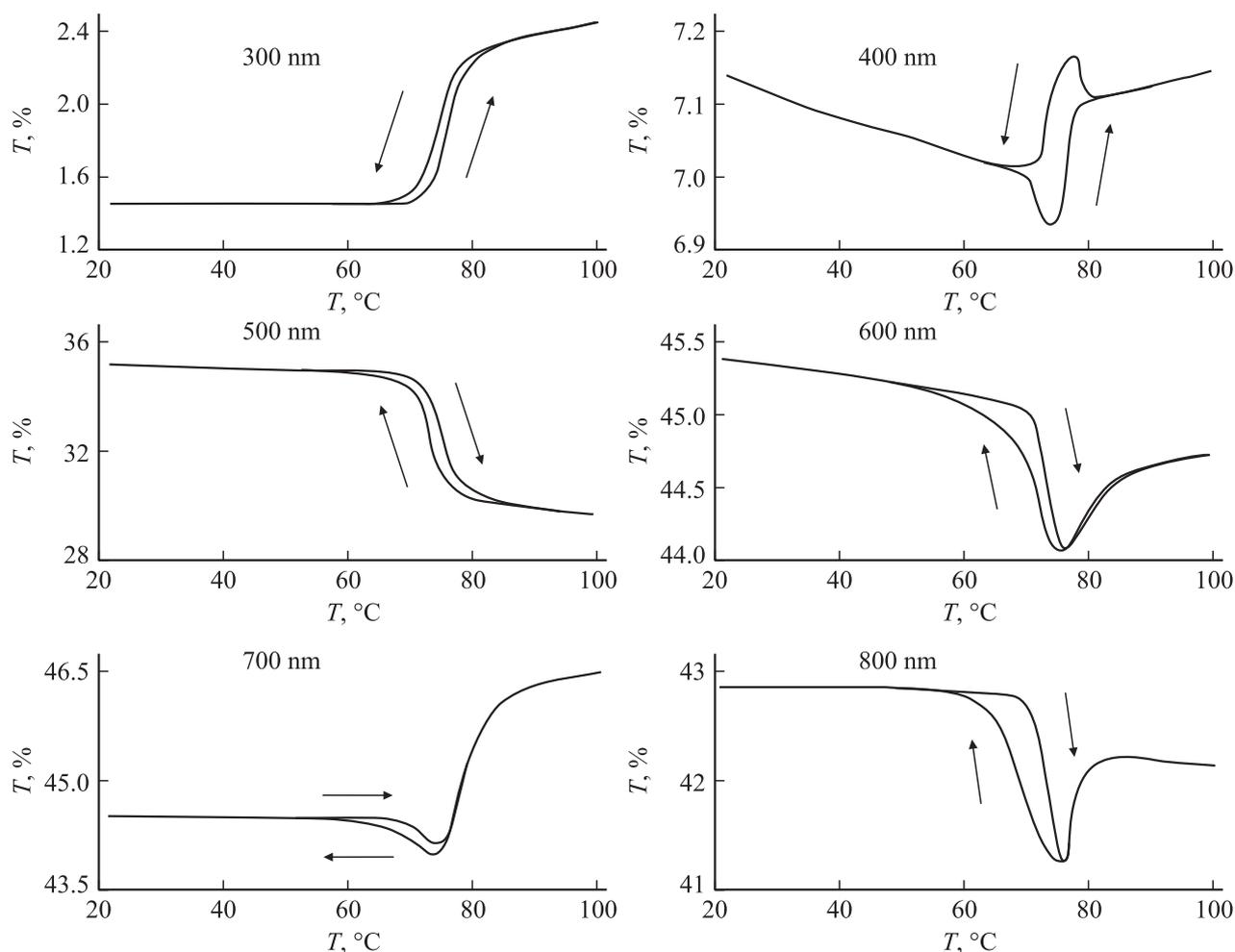


Рис. 4. Температурные зависимости пропускания пленки VO_2 (образец 2) на длинах волн 300, 400, 500, 600, 700, 800 нм при нагреве и охлаждении. Стрелками указано направление изменения температуры.

На длине волны 400 нм, что соответствует оптической ширине запрещенной зоны пленки VO_2 , изменение пропускания относительно невелико, но имеет сложный характер. При температуре ниже T_c пропускание уменьшается с возрастанием температуры как для кривой нагрева, так и для кривой охлаждения. В окрестности T_c наблюдается гистерезис сложной формы, кривая нагрева дает выброс вниз перед резким подъемом вверх, а кривая охлаждения имеет выброс вверх перед участком резкого снижения по ходу уменьшения температуры. При этом изменение пропускания при температуре 80 и 24°C практически отсутствует, тогда как изменение отражения составляет 2.4%, следовательно, имеет место снижение поглощения на длине волны 400 нм при переходе полупроводник–металл в пленке VO_2 .

Зависимости величины пропускания от температуры на длинах волн 600, 700 и 800 нм (рис. 4) характеризуются наличием локального снижения пропускания в окрестности T_c . На 600 нм при температуре ниже T_c пропускание линейно уменьшается с возрастанием температуры как для кривой нагрева, так и для кри-

вой охлаждения. В окрестности T_c происходит резкое снижение пропускания, а затем оно снова возрастает. Между кривыми „нагрев“ и „охлаждение“ наблюдается гистерезис.

На длине волны 700 нм при температуре ниже T_c пропускание не зависит от температуры, а выше T_c монотонно возрастает. Обе кривые „нагрев“ и „охлаждение“ характеризуются небольшим провалом в окрестности T_c , и между ними наблюдается гистерезис.

На длине волны 800 нм при температуре ниже T_c пропускание не зависит от температуры. Выше T_c пропускание также не зависит от температуры, но его значение ниже. На обеих кривых „нагрев“ и „охлаждение“ наблюдается резкое снижение пропускания в окрестности T_c . Между кривыми „нагрев“ и „охлаждение“ также наблюдается гистерезис. Гистерезис пропускания в ИК области подробно исследован в [20,21].

Чтобы выяснить природу различного характера поведения пропускания в характерных точках, были получены спектры отражения пленок VO_2 при температуре 24°C (полупроводниковое состояние) и при тем-

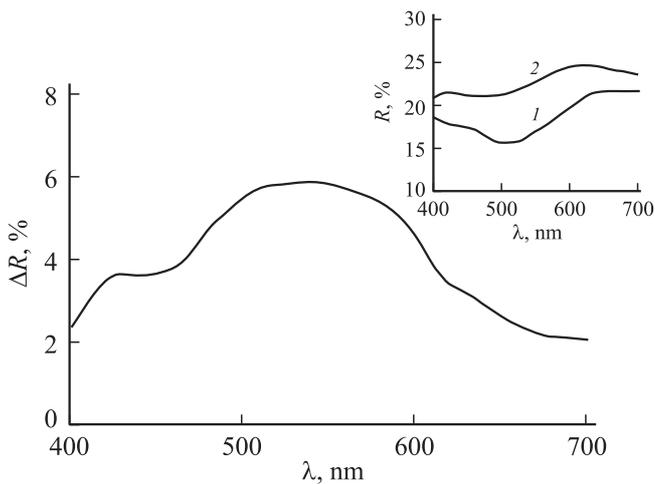


Рис. 5. Зависимость изменения отражения ΔR от длины волны в спектральном диапазоне 400–700 нм (образец 2). На вставке — спектры отражения пленок в диапазоне 400–700 нм при температуре 24 °С (кривая 1) и 80 °С (кривая 2)

пературе 80 °С (металлическое состояние). На рис. 5 приведена зависимость изменения отражения ΔR от длины волны в спектральном диапазоне 400–700 нм (образец 2). Отражение пленок в диапазоне 400–700 нм при температуре 24 и 80 °С представлено на вставке рис. 5. Из сравнения пропускания и отражения на длине волны 500 нм можно видеть, что для температур ниже (24 °С) и выше T_c (80 °С) изменение пропускания совпадает с величиной изменения отражения. На всех исследованных длинах волн пленки VO_2 характеризуются уменьшением поглощения при температуре 80 °С по сравнению с температурой 24 °С. Так как $R + A + T = 1$, где R — отражение, T — пропускание, A — поглощение, то в первом приближении имеем для изменения этих параметров при изменении температуры $\Delta R(\%) + \Delta A(\%) + \Delta T(\%) = 0$. Отсюда по известным ΔR и ΔT определяем ΔA . Значения величин ΔR , ΔT и ΔA для температур 80 и 24 °С приведены в табл. 3.

На длине волны 500 нм наблюдается ожидаемое классическое уменьшение пропускания с наличием гистерезиса. Аналогичная зависимость (снижение пропуска-

Таблица 3. Изменение оптических характеристик тонких пленок VO_2 (образец 2) при изменении температуры от 24 до 80 °С

Длина волны, нм	ΔT (%)	ΔR (%)	ΔA (%)
300	0.9–1.0	Не измерялось	Не определялось
400	+0.02	+2.30	-2.32
500	-5.0	+5.4	-0.4
600	-0.6	+4.8	-4.2
700	1.8	2.2	-4.0
800	-0.6	Не измерялось	Не определялось

ния при температуре выше T_c) наблюдается, хотя и с прохождением через локальный минимум, на длинах волн 600 и 800 нм. Для „холодной“ и „горячей“ пленки пропускание практически не изменяется на длине волны 400 нм, хотя в окрестности перехода имеет сложный ход при изменении температуры. На длине волны 700 нм наблюдается возрастание пропускания, что вызвано изменением поглощения в пленках VO_2 на этой длине волны. Изменением поглощения в пленках при изменении температуры, по-видимому, определяется и поведение пропускания на длине волны 300 нм.

4. Заключение

В настоящей работе на монокристаллических подложках сапфира и кремния получены пленки VO_2 методом ИЛО с сепарацией частиц по скорости при различной плотности энергии на мишени и давлении кислорода в камере. Исследовано влияние плотности энергии на мишени на структуру пленок, полученных методом ИЛО на сапфировых подложках, и зависимость пропускания ($\lambda = 200$ –800 нм) и отражения ($\lambda = 400$ –700 нм) пленок от температуры. Исследованы структурные свойства пленок при изменении давления кислорода в напылительной камере. Изучены температурные зависимости электрических и оптических свойств перехода пленок VO_2 в видимой и ближней УФ и ИК областях спектра в диапазоне температур от комнатной до 100 °С. Измерено пропускание пленок в диапазоне 200–800 нм и отражение в диапазоне 400–700 нм при температурах 24 и 80 °С. Рассчитано изменение поглощения пленок VO_2 в диапазоне длин волн от 400 до 700 нм при изменении температуры от 24 до 80 °С. Впервые установлено, что в зависимости от длины волны наблюдаются кривые гистерезиса оптического пропускания различного вида. Коэффициент пропускания пленок на длинах волн от 300 до 800 нм демонстрирует скачок пропускания и гистерезис изменения при нагреве и охлаждении. Характер изменения пропускания пленок на разных длинах волн различается. Определено изменение поглощения пленок для температур выше и ниже T_c . Мы связываем различное поведение кривых гистерезиса со сложным поведением поглощения в пленках при изменении температуры. Величина изменения отражения при переходе металл–полупроводник показывает возможность использования пленок VO_2 в устройствах оптических переключателей в видимом диапазоне спектра.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проекты № 14-07-00408, № 14-07-00688).

Список литературы

[1] D.H. Kim, H.S. Kwok. Appl. Phys. Lett., **65** (25), 3188 (1994).
 [2] T. Kikuzuki, R. Takahashi, M. Lippmaa. Phys. Rev. B, **82**, 144 113 (2010).

- [3] Minah Seo, Jisoo Kyoung, Hyeongryeol Park, Sukmo Koo, Hyun-sun Kim, Hannes Bernien, Bong Jun Kim, Jong Ho Choe, Yeong Hwan Ahn, Hyun-Tak Kim, Namkyoo Park, Q-Han Park, KwangjunAhn, Dai-sik Kim. *Nano Lett.*, **10**, 2064 (2010).
- [4] M. Rini, Z. Hao, R.W. Schoenlein, C. Giannetti, F. Parmigiani, S. Fourmaux, J.C. Kieffer, A. Fujimori, M. Onoda, S. Wall, A. Cavalleri. *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 181 904 (2008).
- [5] Pragna Kiri, Geoff Hyett, Russell Binions. *Adv. Mat. Lett.*, **1** (2), 86 (2010).
- [6] H.K. Kim, H. You, R.P. Chiarello, H.L.M. Chang, T.J. Zhang, D.J. Lam. *Phys. Rev. B*, **47** (12), 900 (1993).
- [7] F.C. Case, *J. Vac. Sci. Technol. A*, **5**, 1762 (1987).
- [8] D. Brassard, S. Fourmaux, M. Jean-Jacques, J.C. Kieffer, M.A. El. Khakani. *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 051 910 (2005).
- [9] Y. Ningyi, L. Jinhua, H.L.W. Chan, L. Chenglu. *Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process*, **78**, 777 (2004).
- [10] Bong-Jun Kim, Yong Wook Lee, Sungyoul Choi, Byung-Gyu Chae, Hyun-Tak Kim. *J. Korean Phys. Soc.*, **50** (3), 653 (2007).
- [11] T. Driscoll, S. Palit, M.M. Qazilbash, M. Brehm, F. Keilmann, Byung-Gyu Chae, Sun-Jin Yun, Hyun-Tak Kim, S.Y. Cho, N. Marie Jokerst, D.R. Smith, D.N. Basov. *Appl. Phys. Lett.*, **93**, 024 101 (2008).
- [12] А.В. Ильинский, О.Е. Квашенкина, Е.Б. Шадрин. *ФТП*, **46**, 439 (2012).
- [13] А.В. Ильинский, О.Е. Квашенкина, Е.Б. Шадрин. *ФТП*, **46**, 1194 (2012).
- [14] T.-W. Chiu, Kazuhiko Tonoooka, Naoto Kikuchi. *Thin Sol. Films*, **518**, 7441 (2010).
- [15] B.G. Chae, D.H. Youn, H.T. Kim, S.L. Maeng, K.Y. Kang. *J. Korean Phys. Soc.*, **44** (4), 884 (2004).
- [16] Патент на полезную модель № 89906, опубл. 20.12.2009, бюлл. № 35. О.А. Новодворский, А.А. Логин, Е.В. Хайдуков. Устройство для лазерно-плазменного напыления.
- [17] M. Gurvitch, S. Luryi, A. Polyakov, A. Shabalov. *J. Appl. Phys.*, **106**, 1 (2009).
- [18] K.D. Rogers, J.A. Coath, M.C. Lovell. *J. Appl. Phys.*, **70**, 1412 (1991).
- [19] M. Borek, F. Qian, V. Nagabushnam, R.K. Singh. *Appl. Phys. Lett.*, **63**, 3288 (1993).
- [20] E.U. Donev, J.Y. Suh, R. Lopez, L.C. Feldman, R.F. Haglund, jr. *Adv. Optoelectron.*, **1D**, 739 135 (2008).
- [21] Gang Xu, C.-M. Huang, Masato Tazawa, Ping Jin, D.-M. Chen, L. Miao. *Appl. Phys. Lett.*, **93**, 061 911 (2008).

Редактор А.Н. Смирнов

Influence of conditions of pulse laser deposition on structural, electric and optical properties of thin films of VO₂

O.A. Novodvorsky*, L.S. Parshina*, O.D. Khramova*, V.A. Mikhalevsky*, K.D. Shcherbachev⁺, V.Ya. Panchenko*

* Institute of Problems of Laser and Information Technologies, Russian Academy of Sciences, 140700 Shatura, Russia

+ Moscow State Institute of Steel and Alloys (Technological University), 119049 Moscow, Russia

Abstract The thin films of VO₂ on single-crystal substrates of sapphire (0001) and silicon (111) are obtained by the method of pulse laser deposition with the drops of the plume separation. Influence of energy density on target and pressure of oxygen upon structural and electric properties of films is established. All crystal films of VO₂ show the semiconductor-metal transitions with considerable change of electric resistance from two to five orders of size. The transmission of films in the range of 200–800 nm and reflection in the range of 400–700 nm in the range of temperatures from 20 to 100°C are investigated. The transmittance of films from 300 to 800 nm shows jump of a transmission and a hysteresis when heating and cooling. It is for the first time established that nature of change of a transmission of films on different lengths of waves differs, and the type of a temperature hysteresis of the optical transmission in the visible and near UV range repeats a type of a hysteresis of electric resistance of films of VO₂ not everywhere. Various behaviors of curves of a hysteresis is explained by change of absorption in films at temperature variation.