

## ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 666.266.52:661.888.1

DOI: 10.34708/GSTOU.2022.47.67.005

### РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОСАЖДЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК $V_2O_5$

© И. О. Аймбетова<sup>1</sup>, Э. О. Аймбетова<sup>2</sup>, О. С. Байгенженов<sup>3</sup>,  
Д. Берди<sup>1</sup>, Б. Умиров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Международный казахско-турецкий университет  
имени Ходжи Ахмеда Ясави, Туркестан, Казахстан

<sup>2</sup>РГП «Национальный центр по комплексной переработке  
минерального сырья», Алматы, Казахстан

<sup>3</sup>Казахский национальный исследовательский технический университет  
имени К. И. Сатпаева, Алматы, Казахстан

На основании технологического и экономического анализа самым оптимальным и технологически приемлемым методом получения термохромных композиций является легирование пленок фазопереходными материалами, позволяющих управлять основными параметрами энергосбережения и других термосвойств, с последующим нанесением на стеклянные и/или другие подложки. Исследован рост кристаллитов поликристаллических пленок, изготовленных путем одновременной вариации толщины напыленной пленки оксида ванадия и времени ее термообработки при различных температурах. Исследование структуры пленки осуществлено рентгеновским микронзондовым анализатором. Для определения оптимального ведения процесса осаждения тонких пленок оксида ванадия на поверхность стеклянной подложки были исследованы методы магнетронного осаждения, метод центрифугирования, нанесение опусканием в раствор с термохромным материалом. При spin-coating осаждении планарных покрытий тонких пленок  $V_2O_5$  использована золь-гель техника. На основании проведенных исследований выявлено, что эффективные термохромные и электрохромные свойства демонстрируются пленками, поперечный размер которых менее 2 микронметров. Термическая обработка при температуре 400 позволяет кальцинацию и отжиг вещества. Выявлено, что при совместном послойном осаждении пентаоксида ванадия с оксидами переходных металлов на стеклянную подложку повышение/понижение температуры влияет на индуцированные изменения химических связей в комплексе и/или координации лигандов вокруг иона переходного металла, который способствует снижению фотокаталитической активности, порция ультрафиолетового света, поступающая на поверхность нанокатализатора, полностью поглощается каркасом слоя  $V_2O_5$ .

**Ключевые слова.** Оксид ванадия, магнетронное напыление, метод центрифугирования, термохромность, пленка, подложка.

#### Введение

Термохромные материалы являются наиболее важными и фундаментальными компонентами, необходимыми для достижения функции термохромизма для смарт-окон. Смарт стекла по химической структуре на-

несенных покрытий регулирует пропускание солнечного света извне. Среди многих известных термохромных материалов основной категорией являются оксиды металлов, такие как оксид ванадия, вольфрама, титана и других элементов. Основные химические соеди-

нения, используемые для регуляции прохождения солнечного света, наносятся непосредственно на поверхность стекла, и в связи с фазовым переходом материала в известной температуре обеспечивают комфортность пользователю сохранением необходимого микроклимата внутри помещения.

Известно, что в оксиде ванадия (IV) при температуре 67°C происходит фазовый переход «полупроводник-металл», характеризующийся резким изменением удельного сопротивления и коэффициента пропускания световой энергии в инфракрасных и сверхвысоко-частотных диапазонах [1, 2]. При этом происходит скачок электропроводности от  $10^{-6}$  до  $10^{-1}$  ом\*метр. Меняются также и оптические свойства: показатель преломления падает от 2,5 до 2,0 [2]. Изменение кристаллической структуры связано с фазовым превращением оксида ванадия из моноклинной в тетрагональную, обладающую эффектами резистивного электрического переключения, фазового перехода, фото-, электро- и термохромизма. Таким образом, уникальные фазопереходные свойства оксида ванадия (IV) применяются в производстве ванадиевых бронз, как полупроводниковый материал для терморезисторов, переключателей элементов памяти, дисплеев, для стеклянных покрытий, которые блокируют инфракрасное излучение [3-5]. Поликристаллические плёнки  $\text{VO}_2$  используют в электронных устройствах, в визуализаторах инфракрасного (ИК) излучения, нелинейно-оптических ограничителях излучения, в качестве сред для записи голограмм, в зеркалах с управляемым коэффициентом отражения.

Данная работа направлена на создание базовых основ термохромных энергоэффективных композиций на основе оксида ванадия с целью использования в стекольной промышленности, обладающих способностью светопропускающих, контролирующих тепло и световых энергий при гражданском строительстве.

В Казахстане нет отечественных производств термохромных энергоэффективных композиций на основе оксида ванадия, не проводятся научные исследования по их составлению.

Целью данной работы является разработка композиции на основе оксида ванадия, обладающего термохромным энергоэффективным свойством, используемой в стекольной промышленности для smart-окон. Разработка состава позволит создать благоприятные условия в строительстве, при этом экономически важным является снижение высокого потребления энергии, обусловленного городским развитием, ростом населения и улучшением требований внутреннего климатического комфорта в гражданском строительстве [6].

Основные подходы исследования заключаются в известных в мире способах получения термохромных наполнителей; имеющиеся продуктивные результаты зарубежных исследований базируются на методах получения термохромных наполнителей на основе низкомолекулярных органических соединений, эмиссионных полимерных или нанокомпозитных пленок, фото- и термофункциональных комплексов переходных металлов.

Поэтому возникает необходимость получения термохромных материалов с низкой себестоимостью, пригодных для использования в ограждающих конструкциях зданий, для регулирования тепла в их помещениях. Согласно литературному обзору [7-8], в настоящее время актуальными представляются исследования, направленные на разработку термохромных материалов на основе оксида ванадия.  $\text{VO}_2$  является наиболее изученным, обладающим удобной для измерений температурой фазового перехода. Например,  $\text{VO}_2$  при температуре 67°C (340 K) происходит фазовый переход из полупроводникового в металлическое состояние, в зависимости от примесных компонентов и нестехиометрии по кислороду данный оксид в составе композиции обладает отражающим эффектом. Фазовый переход в  $\text{VO}_2$  можно считать сверхбыстрым, поскольку в существенно неравновесных условиях, например при воздействии на него короткого импульса света достаточной энергии, время перехода из полупроводниковой фазы в металлическую составляет около 100 фс [9, 10]. Данный процесс сопровождается изменением оптических характеристик  $\text{VO}_2$ : коэффициентов отражения, поглощения и пропускания.

Коэффициент пропускания зависит от длины и интервала времени излучения и его поляризации в кристаллографических осях  $\text{VO}_2$ .

Таким образом, оксид ванадия можно использовать в температурных сенсорах [11], оптических переключателях [12,13], покрытиях стёкол, в качестве носителя информации (благодаря малому времени перехода – 30 наносекунд, и малой энергии возбуждения) [14].

### Методы исследования

Методологической и теоретической базой исследования являются работы отечественных и зарубежных ученых, посвященные разработке композиционных и наноматериалов на основе оксидных материалов [15-18].

В лабораторных условиях установлены оптимальные условия процесса составления рецептов на основе изучения физико-химической характеристики сырья и продукции, а именно прочность, устойчивость, химический и радиологический анализ, зависимости изменения электрического сопротивления и оптического пропускания от температуры, теплопроводность, степень пропускания ИК и УФ излучений, влаго и химическая стойкость, коэффициент теплоотдачи.

С помощью техники электронной микроскопии исследован рост кристаллитов поликристаллических пленок, изготовленных путем одновременной вариации толщины напыленной пленки оксида ванадия и времени ее термообработки при различных температурах.

Исследование структуры пленки осуществлено рентгеновским микрозондовым анализатором.

Основным методом анализа результатов исследований являются методы оптической спектроскопии, использованы следующие оборудования: спектрофотометры SPECORD со встроенным программным обеспечением и компьютерным интерфейсом для определения спектров поглощения, компьютерная программа MatLab для анализа контура и поиска спектральных форм оксида ванадия и легирующих добавок, определения структуры полос поглощения из оптических плотностей.

### Результаты исследований

#### Методика осаждения тонких пленок $\text{V}_2\text{O}_5$

В данном разделе приведены методики получения тонких пленок  $\text{V}_2\text{O}_5$ . Даны результаты исследования морфологии поверхности, структурные свойства, термические характеристики, элементный состав и оптические характеристики полученных материалов.

#### 1.1. Магнетронное осаждение тонких пленок $\text{V}_2\text{O}_5$ на проводящее стекло ИТО.

Для магнетронного напыления тонких пленок использовалась установка магнетронного распыления МАГНА ТМ-200-1, схема рабочего процесса которой представлена на рисунке 1.

Формирование тонких пленок оксида ванадия на поверхности ИТО стекла путем магнетронного осаждения протекало в режиме работы источника энергии при постоянном токе.

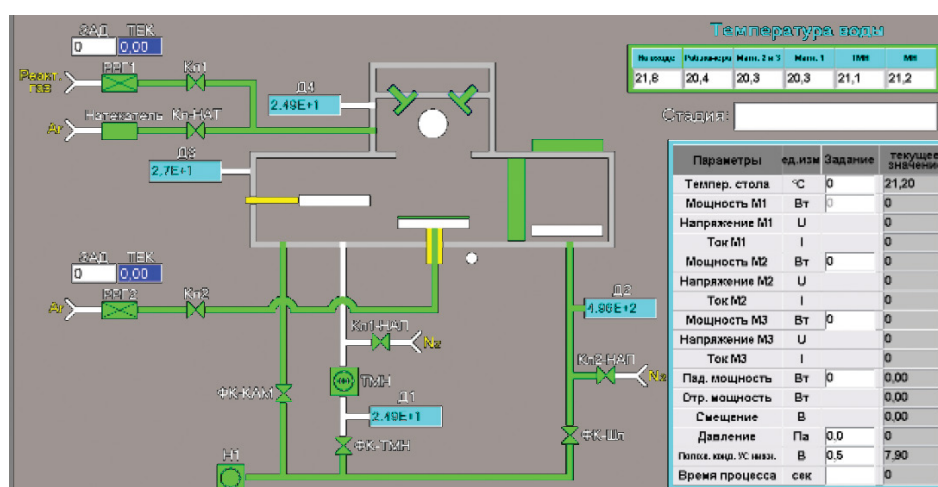


Рис. 1. Схема установки нанесения металлических слоев

Процесс осаждения сопровождался подачей в камеру с глубоким вакуумом ( $2.95 \cdot 10^{-5}$  миллибар) смеси рабочих газов аргон (99.95 %) и кислород (99.92 %). Устранение окислов с поверхности металлической мишени достигалось путем проведения предварительного распыления материала ванадиевой мишени в плазме аргона в течение 15-25 минут. Физическое распыление ванадия протекало при бомбардировке ускоренными ионами распыляющего газообразного аргона поверхности ванадиевой мишени, чистота которой составляла 99.98 %, после чего следовала реакция атомов ванадия, вырванных с поверхности мишени, с реактивным газообразным кислородом. Подача газов аргон и кислород производилась через каналы независимых газовых натекаателей с контроллерами массового газового расходомера.

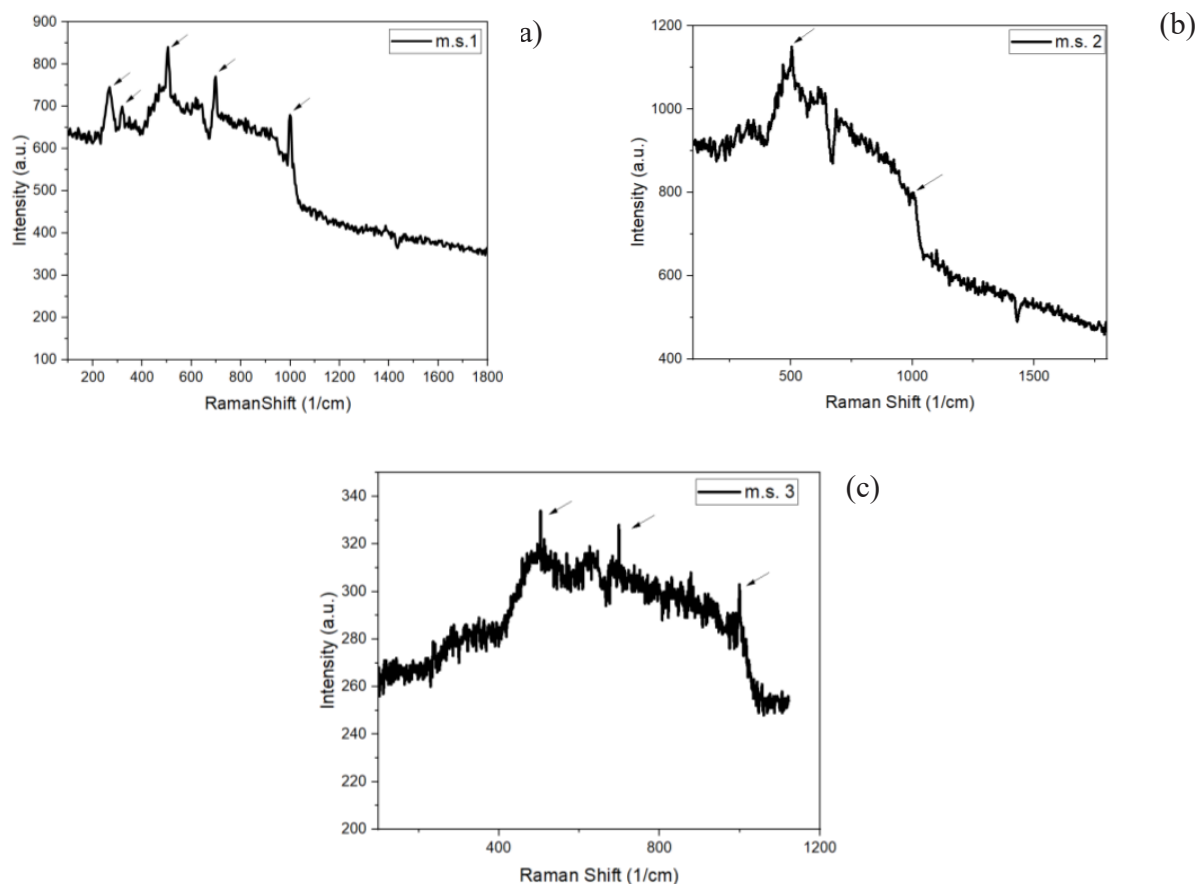
Процесс магнетронного осаждения оксида ванадия на приводящее стекло запускался при достижении давления газообразного аргона

значений 0.6 Паскаль, при этом реакционный газообразный кислород подводился до достижения 10 % от находящегося в камере реактора аргона.

Мощность магнетрона варьировалась в пределах 100-500 Вт. Образец 1 сформирован при достижении мощности магнетрона, равной 100 Вт, 2 сформирован при достижении мощности магнетрона, равной 300 Вт, 3 сформирован при достижении мощности магнетрона, равной 500 Вт. Температура подложки поддерживалась на уровне 300°C. Скорость откачки 0.6 л/час, при этом расход аргона составлял порядка 5.5 см<sup>3</sup>/час.

Полученные образцы подвергались анализу на установке Рамановской спектроскопии (АСМ – Раман – СБОМ – TERS). На рисунке 2 представлены спектры комбинационного рассеяния пленок 1-3 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Прослеживаемый пик при 145 см<sup>-1</sup> связан с колебаниями группы V – O – V. Однако мало-



**Рис. 2.** Спектры комбинационного рассеяния образцов V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1-3 (а-с), полученных магнетронным распылением

прослеживаемый пик не характеризует структуру  $V_2O_5$  целиком, показывая лишь отношение пленки к слоистым структурам. Стрелками на рисунке 3 а показаны более интенсивные пики, рамановский сдвиг которых характерен для структур  $V_2O_5$  орторомбической фазы –  $283\text{ см}^{-1}$ ,  $305\text{ см}^{-1}$ ,  $525\text{ см}^{-1}$ ,  $695\text{ см}^{-1}$ ,  $987\text{ см}^{-1}$ . При увеличении мощности магнетронного распыления до 300 Вт и 500 Вт, интенсивность пиков, относящихся к орторомбической фазе  $V_2O_5$ , снижается, что, возможно, относится к изменению валентного состояния  $V_xO_y$ .

### *1.2. Гидротермальный синтез наноструктур $V_xO_y$ .*

Для проведения гидротермального синтеза наноструктур  $V_xO_y$  был использован водный раствор  $NH_4VO_3$ . После достижения полного растворения вещества в ДИ воде смесь помещалась в автоклавный реактор высокого давления для проведения гидротермального синтеза. Температурные параметры синтеза регулировались муфельной печью. После проведения ряда экспериментальных работ температура рабочего процесса выбрана в диапазоне  $190\text{--}230^\circ\text{C}$ . Время синтеза варьировалось от 24 до 36 часов. После завершения гидротермального синтеза образцы подвергались тщательной очистке в воде, для исключения остаточных продуктов на поверхности наноструктур. Фильтрация полученного материала проводилась с целью селекции синтезируемого материала от рабочего раствора. Термообработка проводилась в два этапа. Первый этап – сушка в атмосфере воздуха при температуре  $100^\circ\text{C}$  для удаления воды в течение 30 минут. Второй этап – кальцинация при температуре  $400^\circ\text{C}$  для получения волокон оксида ванадия. Продолжительность второго этапа составляла 120 минут.

Детали: в 100 мл автоклавный реактор помещали 75 мл водного раствора, содержащего 50 г  $NH_4VO_3$ . Исключено полное заполнение реактора раствором, в противном случае произойдет полная разгерметизация реактора вследствие больших давлений.

Анализ морфологии поверхности полученных образцов исследован на установках электронных растровых микроскопов JSM-6490 LA (JEOL) и MIRA 3LMU (Tescan, Чехия) с вольфрамовым катодом прямого накала. Ос-

новной электронный пучок генерируется нагретой вольфрамовой нитью или пушкой для полевого выброса, и обычно ускоряется приложением напряжения  $1\text{--}30\text{ кВ}$ . Наличие электромагнитных линз приводит к фокусировке луча на образце до размера пятна в нанометровом диапазоне. Когда электронный луч проникает в образец, происходит несколько процессов, таких как поглощение, рассеяние и излучение. Изучение морфологии поверхности полученных образцов проходило при анализе данных детектора вторичных электронов. Вторичные электроны генерируются, когда на образец попадают электроны падающего пучка с достаточно высокой энергией. Поскольку энергия вторичных электронов довольно мала ( $<50\text{ эВ}$ ), то можно получить сведения, касающиеся только поверхности материала. Обратные рассеянные и дифрагированные электроны также можно обнаружить (такие электроны теряют только  $20\text{--}40\%$  начальной энергии), однако они проявляются при различных дифракционных углах. Микрографические снимки нановолокна VO представлены на рисунке 3.

На рисунке приведены изображения образца, синтезированного гидротермальным методом на протяжении 20 часов. При анализе микрографических снимков (рисунки 3 а-d) видно, что при увеличении частицы порошка диаметром несколько миллиметров (рисунок 3а) прослеживаются нановолокна VO, длина которых достигает нескольких микрометров, при этом поперечный диаметр варьируется от десятков до сотен нанометров (рисунок 3б), размерность нановолокна VO лежит в субмикронной и наноразмерной области. По результатам исследования морфологии поверхности полученных материалов установлено, что допустимой температурой гидротермального синтеза нановолокна VO является уровень в  $220\text{--}240^\circ\text{C}$ . При этом временные параметры не вносят характерный вклад в развитие морфологии нановолокна VO. Так, обнаружено, что при недостаточном времени гидротермального синтеза структуры материала не сформированы в виде нановолокна VO (рисунок 3с), при достижении 24-часового синтеза прослеживаются нановолокна VO в объеме раствора (реактора). При увеличении времени синтеза до 36



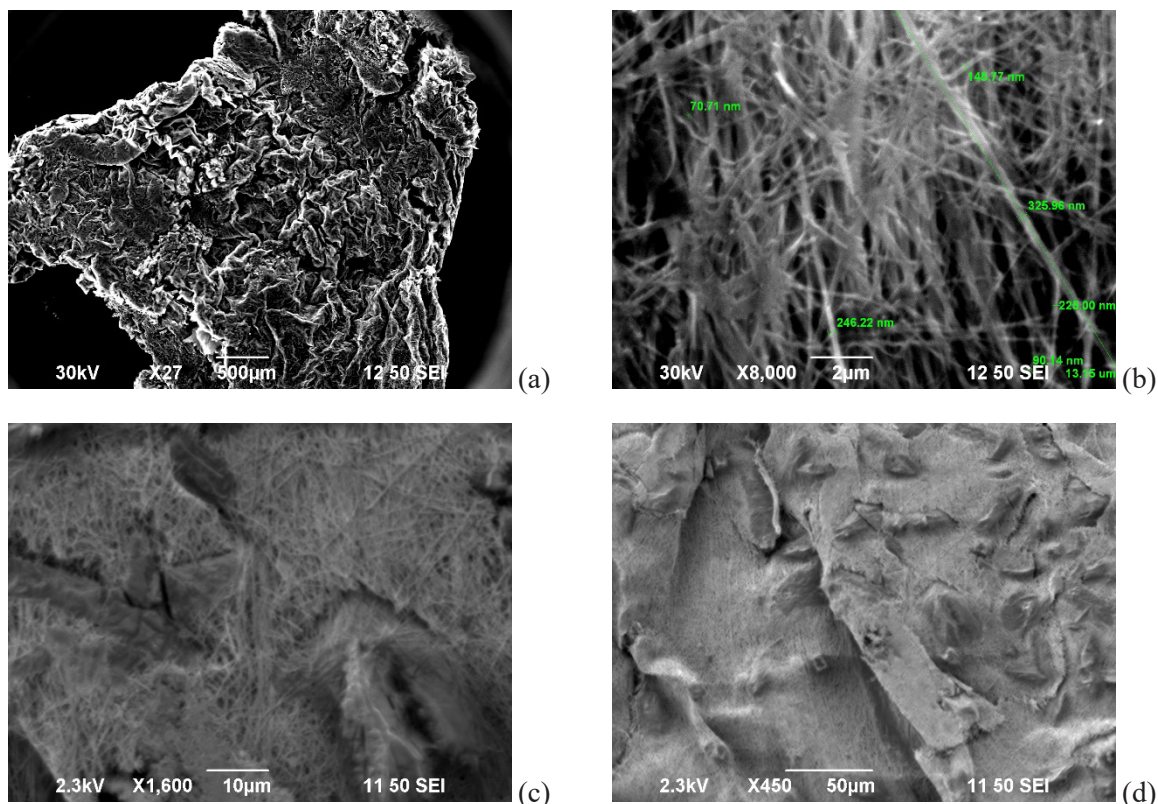


Рис. 3. SEM снимок морфологии поверхности нановолокна VO

часов образовавшиеся нановолокна VO оседают на стенках реактора, образуя порошковидную массу (рисунок 3d). При изучении морфологии поверхности такой порошковидной массы замечено, что нановолокна VO не изменяют обретенные ранее геометрические параметры, что свидетельствует об отсутствии необходимости проведения длительного (более 24 часов) гидротермального синтеза.

Термические характеристики образцов, полученных гидротермальным методом, изучались на установке дифференциально-термического анализатора с приставкой термогравиметрического анализатора, DSC, с диапазоном измерения  $\pm 1000$  мг, с разрешением 0,2 мкг или 0,02 мкг. Прибор представляет собой печь с металлическим резистором и температурным диапазоном от комнатной до  $1600^{\circ}\text{C}$  со скоростью сканирования от 0,01 до  $100^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ .

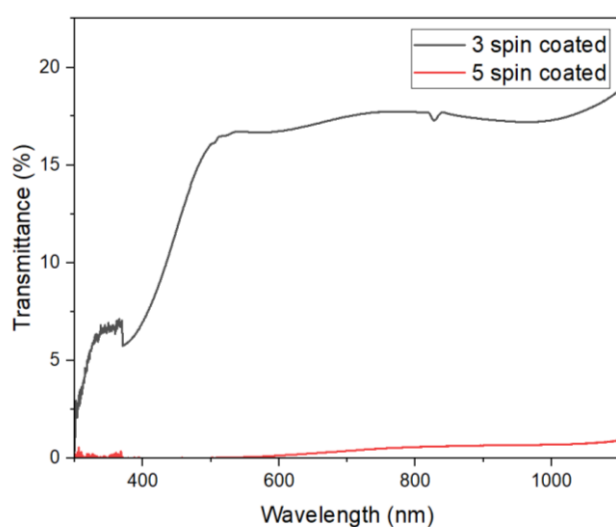
Основные этапы потери массы исследуемого образца демонстрируются при  $75^{\circ}\text{C}$ ,  $650^{\circ}\text{C}$ ,  $780^{\circ}\text{C}$  и  $960^{\circ}\text{C}$ . Первый этап потери массы находит объяснение, связанное с фазовым переходом, что придает материалу особые

характеристики, связанные с термохромными свойствами нановолокна VO, дальнейшая потеря массы объясняется возможной кальцинацией образца.

### 1.3. Spin-coating метод формирования планарных пленок на проводящей подложке

Spin-coating осаждение планарных покрытий тонких пленок  $\text{V}_2\text{O}_5$  используют золь-гель технику. Установка для spin-coating осаждения состоит из вращающейся с контролируемой скоростью платформой, на которую помещается образец. Скорость вращения платформы с образцом варьируется в диапазоне 500-4000 об./мин. Позиционирование образца (ITO стекло) на поверхности платформы должно обеспечивать попадание приготовленного заранее золь на поверхность подложки. В случае использования токопроводящего стекла в качестве подложки нужно поместить стекло так, чтобы ITO слой был направлен вверх, для нанесения на его поверхность рабочего раствора.

Рецепт приготовления раствора для проведения spin-coating нанослоев  $\text{V}_2\text{O}_5$  заключается в приготовлении золь-геля. Золь состоит



**Рис. 4.** Спектр оптического пропускания образцами 3 spin coated и 5 spin coated

из коллоидного  $V_2O_5$ , полученного быстрым окислением в среде  $H_2O_2$ . Рецепт раствора: в 60 мл 36% технического  $H_2O_2$  разбавляли 6 г порошка  $V_2O_5$  при быстром перемешивании в прохладной среде (бытовой холодильник, 7°C) на протяжении трех дней. Вследствие приведенных действий раствор обретает темно-красный цвет. Вязкость раствора зависит от скорости перемешивания. Использование вязких растворов при нанесении слоев  $V_2O_5$  методом spin-coating не позволяет получить равномерных пленок.

При нанесении 10 слоев  $V_2O_5$  в режиме spin-coating 2500 об/мин геометрический размер поперечного сечения получаемой пленки достигает 2.65 микронетров.

Свойства оптического пропускания электромагнитных волн в спектре от 300 до 1100 нм, присущие образцам, сформированным при 3 и 5 циклах нанесения  $V_2O_5$  в режиме spin-coating, представлены на рисунке 4.

Спектры оптического пропускания образцов  $V_2O_5$  3 spin coated и  $V_2O_5$  5 spin coated изображены черной и красной кривыми, соответственно. Видно, что 5 spin coated демонстрирует пропускание всего спектра на уровне меньшем 1.5%, с другой стороны, 3 spin coated образец имеет уровень оптического пропускания более 15%. Таким образом, можно предположить, что эффективные термохромные и электрохромные свойства демонстрируются

пленками, поперечный размер которых менее 2 микронетров.

#### 1.4. Dip-coating метод получения планарных покрытий $V_2O_5$

Dip-coating метод формирования тонких пленок  $V_2O_5$  проводился на автоматизированной установке, изображенной на рисунке 5.

Режим работы установки производства Nadetech Innovation экспериментально подобран согласно следующим параметрам:

- скорость погружения подложки в раствор равна 50 мм/мин.;
- скорость вынимания подложки из раствора 10 мм/мин.;
- скорость радиального перемещения подложки между сосудами с различными растворами 10°/сек.

Количество циклов dip-coating влияет на оптические свойства получаемых покрытий. Так, на рисунке 6 изображен спектр поглощения пленками  $V_2O_5$  при 1 и 5 циклах dip-coating. Спектр записан в интервале длин волн между 300 и 1100 нм.

Как видно из рисунка 6, поглощение света, вызванного материалом полупроводника в фиолетовой области, доминирует при 5-кратной абсорбции раствора. Тогда как при 1-кратном нанесении продукта поглощение света снижено в два раза.

Формирование тонких пленок  $V_2O_5$  путем dip-coating нанесения тонких слоев происходило, соблюдая следующие параметры синтеза: токопроводящая стеклянная пластинка последовательно погружалась в две емкости. Первая



**Рис. 5.** Фотографическое изображение установки для проведения dip-coating синтеза

емкость содержала рабочий золь-гель раствор. Вторая емкость содержала ДИ воду. При погружении подложки в первую емкость протекала реакция адсорбции  $V_2O_5$ . Время погружения составляло 10 секунд. Вторым шагом dip-coating синтеза – промывка в ДИ воде в течение 20 секунд, в результате чего происходит удаление избыточного материала, слабо связанного поверхностью подложки. Термическая обработка при температуре  $400^\circ\text{C}$  позволяет кальцинацию и отжиг вещества.

### Выводы

Низкоразмерные пленки  $V_2O_5$  были выращены на поверхности ИТО стекла методами магнетронного распыления, золь-гель spin/dip coating техниками и гидротермальным синтезом. После проведения работ по синтезу материала была проведена постобработка, включающая отжиг и кальцинацию в различном температурном диапазоне. Методами УФ/Вид спектроскопии проведены исследования оптических свойств образцов. Структурные исследования прове-

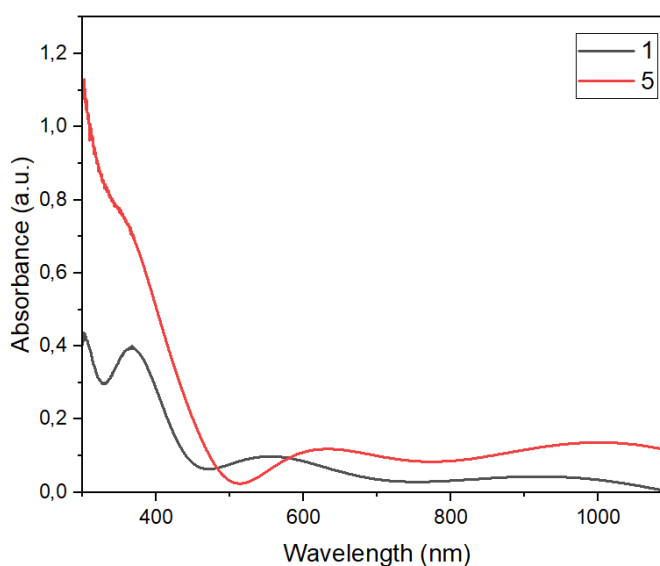


Рис. 6. Спектр поглощения пленками  $V_2O_5$  при 1 и 5 циклах dip-coating

дены, используя Рамановскую спектроскопию. Термические свойства изучены термогравиметрическим анализом.

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант №AP09058456).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Bruckner W., Opperman H., Reichelt W., Wolf G., Chudnovsky F.A., Terukov E.I. Vanadium dioxide. Berlin: Academy-Verlag, 1983. P. 23-25.
2. Ильинский А. В., Кващенко О. Е., Шадрин Е. Б. Фазовый переход и корреляционные эффекты в диоксиде ванадия // Физика и техника полупроводников. 2012. Том 46. Выпуск 4. С. 439-446.
3. Шадрин Е. Б. Ильинский А. В. О природе фазового перехода металл-проводник в диоксиде ванадия // Физика твердого тела. 2000. Том 42. Вып. 6. С. 1092-1099.
4. Marco C. Smart Buildings. Advanced Materials and Nanotechnology to Improve Energy-Efficiency and Environmental Performance. Elsevier Ltd. 2016. 355p.
5. Иванов А. В., Макаревич О. Н., Бойцова О. В., Макаревич А. М. Гидротермальный синтез порошков и пленок диоксида ванадия из растворов карбоксилатов ванадия // Сборник материалов Международной конференции с элементами научной школы для молодежи «Функциональные наноматериалы и Высокочистые вещества». Суздаль, 2018. С. 336-338.
6. Fan Lele, Zhu Yiyu et al. Modulation of VO<sub>2</sub> metal-insulator transition by co-doping of hydrogen and oxygen vacancy // Solar energy materials and solar cells. 2020. T. 212. 110562.
7. Liu Sai, Tso Chi Yan et al. Bio-inspired TiO<sub>2</sub> nano-cone antireflection layer for the optical performance improvement of VO<sub>2</sub> thermochromic smart windows // Scientific reports. 2020. T. 10. Vol. 1. P. 22-24.
8. Наноструктурные оксидные материалы в современной микро-, нано- и оптоэлектронике / Под ред. В. А. Мошников, О. А. Александровой. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. 266 с.



9. *Nagashima M., Wada H.* The oxygen deficiency effect of VO<sub>2</sub> thin films prepared by laser ablation // J. of materials research. 1997. Vol. 12. №2. P. 416-422.
10. *Маркова Т.С.* Спектроскопия комплексов переходных металлов с переносом заряда в термохромных средах // Автореферат дисс. ... канд. хим. наук. Санкт-Петербург, 2006. 22 с.
11. *Makarevich A.M., Ivanov A.V., Makarevich O.N., Sharovarov D.I., Amelichev V.A., Boytsova O.V.* Solvothermal Synthesis Of Vanadium Dioxide Epitaxial Films With Metal-Insulator Transition // XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry. Book 2a: Abstracts. Saint Petersburg, 2019. P. 396.
12. *Величко А.А., Кулдин Н.А., Стефанович Г.Б., Пергамент А.Л., Борисков П.П.* Аморфный оксид ванадия – неорганический резист для нанолитографии // Успехи современного естествознания. 2004. №4. P. 53-54.
13. *Радишевская Н.И.* Составы и технология получения неорганических пигментов и термохромных материалов на основе молибдофосфатов элементов триады железа: Автореферат дисс. ... канд. тех. наук. Томск, 2002. С. 3.
14. *Jian Wei Xu, Ming Hui Chua and Kwok Wei Shah.* Smart Materials – Electrochromic Smart Materials: Fabrication and Applications / Cambridge, Thomas Graham House. 2019. P. 499-502.
15. *Ritter A.* Smart Materials in Architecture, Interior Architecture and Design. Berlin: Walter de Gruyter, 2007. 188 p.
16. *Soltani M.* Thermochromic vanadium dioxide smart coatings grown on Kapton substrates by reactive pulsed laser deposition // Journal of Vacuum Science and Technology A. 2006. Vol. 24 (3). P. 612-621.
17. *Стефанович Г.Б.* Компоненты для 3d компьютерной памяти, гибкой и прозрачной электроники на основе оксидных материалов, получаемых низкотемпературными методами: Отчет о НИР. Петрозаводск, 2012. С. 23.
18. *Баснукаев И.Ш., Исламов А.А., Мусостова Д.Ш.* Нанотехнологии и наноматериалы // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2021. Том XVII. №4 (26). С. 50-56.

DEVELOPMENT OF A  $V_2O_5$  THIN FILM DEPOSITION TECHNIQUE© I. O. Aimbetova<sup>1</sup>, E. O. Aimbetova<sup>2</sup>, O. S. Baigenzhenov<sup>3</sup>,  
D. Berdi<sup>1</sup>, B. Umirov<sup>1</sup><sup>1</sup>*Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Turkistan, Kazakhstan*<sup>2</sup>*National center for mineral raw material comprehensive recycling, Almaty, Kazakhstan*<sup>3</sup>*Satbayev University, Almaty, Kazakhstan*

Based on technological and economic analysis, the most optimal and technologically acceptable method for obtaining thermochromic compositions is the alloying of films of phase-transition materials that allow controlling the main parameters of energy saving and other thermal properties, followed by application to glass and/or other substrates. The growth of crystallites of polycrystalline films made by simultaneous variation of the thickness of the sprayed vanadium oxide film and the time of its heat treatment at different temperatures is investigated. The study of the film structure was carried out by an X-ray microprobe analyzer. In order to determine the optimal conduct of the process of deposition methods of thin films of vanadium oxide on the surface of a glass substrate, magnetron deposition methods, the method of centrifugation deposition by lowering into a solution with thermochromic material were investigated. During spin-coating deposition of planar coatings of  $V_2O_5$  thin films, sol-gel technique was used. Based on the conducted studies, it was revealed that effective thermochromic and electrochromic properties are demonstrated by films whose transverse size is less than 2 micrometers. Heat treatment at a temperature of 400 allows calcination and annealing of the substance. It was revealed that during the joint layer-by-layer deposition of vanadium pentoxide with transition metal oxides on a glass substrate, an increase/decrease in temperature affects induced changes in chemical bonds in the complex and/or coordination of ligands around the transition metal ion, which contributes to a decrease in photocatalytic activity, a portion of ultraviolet light entering the surface of the nanocatalyst is completely absorbed by the framework of the  $V_2O_5$  layer.

**Keywords.** vanadium oxide, magnetron sputtering, centrifugation method, thermochromicity, film, surface.

## REFERENCES

1. Bruckner, W., Opperman, H., Reichelt, W., Wolf, G., Chudnovsky, F. A. and Terukov, E. I. (1983). Vanadium dioxide. Berlin, Academy-Verlag, pp. 23-25.
2. Il'inskij, A. V., Kvashenkina, O. E. and Shadrin, E. B. (2012) Fazovyy perekhod i korrelyatsionnye efekty v dioksida vanadiya. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*. [Phase transition and correlation effects in vanadium dioxide. Physics and technology of semiconductors]. T. 46. Vol. 4, pp. 439-446.
3. Shadrin, E. B. and Il'inskij, A. V. (2000) O prirode fazovogo perekhoda metall-provodnik v dioksida vanadiya. *Fizika tverdogo tela* [On the nature of the metal-conductor phase transition in vanadium dioxide. Solid State Physics]. T. 42. Vol. 6, pp. 1092-1099.
4. Marco, C. (2016) Smart Buildings. Advanced Materials and Nanotechnology to Improve Energy-Efficiency and Environmental Performance. Elsevier Ltd. 355p.
5. Ivanov, A. V., Makarevich, O. N., Bojcova, O. V. and Makarevich, A. M. (2018) Gidrotermal'nyy Sintez Poroshkov i Plenok Dioksida Vanadiya Iz Rastvorov Karboksilatov Vanadiya. *Sbornik materialov mezhdunarodnoj konferencii s elementami nauchnoj shkoly dlya molodezhi «Funkcional'nye Nanomaterialy i Vysokochistye Veshchestva»*. [Hydrothermal Synthesis Of Vanadium Dioxide Powders And Films From Solutions Of Vanadium Carboxylates. Proceedings of the international conference with elements of a scientific school for young people "Functional Nanomaterials And High-Purity Substances"] Suzdal'. P. 336-338.

6. Fan, Lele, Zhu and Yiyu, et all. (2020) Modulation of VO<sub>2</sub> metal-insulator transition by co-doping of hydrogen and oxygen vacancy. *Solar energy materials and solar cells*. T. 212. 110562.
7. Liu, Sai, Tso, Chi Yan, et all. (2020) Bio-inspired TiO<sub>2</sub> nano-cone antireflection layer for the optical performance improvement of VO<sub>2</sub> thermochromic smart windows. *Scientific reports*. T 10. Vol. 1. 22-24 pp.
8. Moshnikov, V. A. and Aleksandrova, O. A. (2017) Nanostrukturnye oksidnye materialy v sovremennoj mikro-, nano- i optoelektronike. [Nanostructured oxide materials in modern micro-, nano- and optoelectronics]. Publishing house of SPbSETU "LETI", Saint-Petersburg, 266 p.
9. Nagashima, M. and Wada, H. (1997) 'The oxygen deficiency effect of VO<sub>2</sub> thin films prepared by laser ablation'. *J. of materials research*. Vol. 12. №2. P. 416-422.
10. Markova, T. S. (2006) 'Spektroskopiya kompleksov perekhodnykh metallov s perenosom zaryada v termohromnykh sredah'. Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata himicheskikh nauk. [Spectroscopy of transition metal complexes with charge transfer in thermochromic media. Abstract of the dissertation of Ph. D. dissertation], Saint-Petersburg. 22 p.
11. Makarevich, A. M., Ivanov, A. V., Makarevich, O. N., Sharovarov, D. I., Amelichev, V. A. and Boytsova, O. V. (2019) Solvothermal Synthesis Of Vanadium Dioxide Epitaxial Films With Metal-Insulator Transition. *XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry. Book 2a: Abstracts*, Saint Petersburg. P. 396.
12. Velichko, A. A., Kuldin, N. A., Stefanovich, G. B., Pergament, A. L. and Boriskov, P. P. (2004). 'Amorfnyj oksid vanadiya – neorganicheskij rezist dlya nanolitografii'. *Uspekhi Sovremennogo Estestvoznaniya*. [Amorphous vanadium oxide – inorganic resist for nanolithography. Successes of Modern Natural Science]. №4. P. 53-54.
13. Radishevskaya, N. I. (2002) Sostavy i tekhnologiya polucheniya neorganicheskikh pigmentov i termohromnykh materialov na osnove molibdofosfatov elementov triady zheleza. Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. [Compositions and technology of obtaining inorganic pigments and thermochromic materials based on molybdenum phosphates of iron triad elements. Abstract of the dissertation of Ph. D. dissertation], Tomsk, p. 3.
14. Jian, W. X., Ming, H. C., Kwok, W. S. (2019) Smart Materials – Electrochromic Smart Materials: Fabrication and Applications. Cambridge, Thomas Graham House, p. 499-502.
15. Ritter, A. (2007) Smart Materials in Architecture, Interior Architecture and Design. Berlin, Walter de Gruyter, 188 p.
16. Soltani, M. (2006) 'Thermochromic vanadium dioxide smart coatings grown on Kapton substrates by reactive pulsed laser deposition'. *Journal of Vacuum Science and Technology A*. Vol. 24 (3), p. 612-621.
17. Stefanovich, G. B. (2002) *Komponenty dlya 3d komp'yuternoj pamyati, gibkoj i prozrachnoj elektroniki na osnove oksidnykh materialov, poluchaemykh nizkotemperaturnymi metodami. Otchet o NIR*. [Components for 3d computer memory, flexible and transparent electronics based on oxide materials obtained by low-temperature methods. Research report.] Petrozavodsk, p. 23.
18. Basnukaev, I. SH., Islamov, A. A. and Musostova, D. SH. (2021) 'Nanotekhnologii i nanomaterialy'. *Vestnik GGNTU. Tekhnicheskie nauki*. [Nanotechnologies and nanomaterials. Herald of GSTOU. Technical sciences] V. XVII, №4 (26), 50-56 p.