

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА
НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

УДК 546

СИНТЕЗ НАНОРАЗМЕРНОГО WO_3 МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОГО
ОСАЖДЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЩАВЕЛЕВОЙ КИСЛОТЫ

© 2021 г. Ф. Ю. Горобцов^а, *, Т. Л. Симоненко^а, Н. П. Симоненко^а, Е. П. Симоненко^а,
В. Г. Севастьянов^а, Н. Т. Кузнецов^а

^аИнститут общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Ленинский пр-т, 31, Москва, 119991 Россия

*e-mail: phigoros@gmail.com

Поступила в редакцию 01.07.2021 г.

После доработки 12.07.2021 г.

Принята к публикации 17.07.2021 г.

Изучен процесс синтеза наноразмерного WO_3 методом химического осаждения с использованием щавелевой кислоты. Полученный порошок исследован методами ИК-спектроскопии и рентгенофазового анализа, а его термическое поведение изучено с помощью синхронного ТГА/ДСК-анализа. Установлено, что осадок до высокотемпературной обработки представляет собой смесь $WO_3 \cdot 2H_2O$ и оксалата вольфрама. Термообработка при $400^\circ C$ приводит к разложению оксалата, а при $500^\circ C$ формируется однофазный WO_3 с моноклинной кристаллической структурой (средний размер ОКР составляет 36 ± 4 нм, длина частиц – 50 ± 5 нм, ширина – 40 ± 4 нм). С помощью Кельвин-зондовой силовой микроскопии оценена работа выхода электрона с поверхности сформированных частиц WO_3 на воздухе. Показано, что химическое осаждение оксида вольфрама(VI) с использованием щавелевой кислоты является перспективным методом получения нанопорошка соответствующего состава.

Ключевые слова: оксид вольфрама, нанопорошок, работа выхода, осаждение

DOI: 10.31857/S0044457X21120035

ВВЕДЕНИЕ

Оксид вольфрама(VI) на сегодняшний день является широко востребованным материалом в самых разных областях применения. Он относится к наиболее часто исследуемым и используемым катодным электрохромным материалам [1–3], чьи электрооптические свойства были открыты почти 50 лет назад [4]. Как катодный электрохромный материал WO_3 изменяет свою окраску с прозрачной бесцветной или бледно-желтой на малопрозрачную синюю в результате частичного восстановления W^{6+} до W^{5+} и интеркаляции катионов щелочных металлов. Кроме того, WO_3 является перспективным фотокатализатором – моноклинная фаза $\gamma-WO_3$ проявляет высокую каталитическую активность при расщеплении воды [5–8] и обладает меньшей оптической шириной запрещенной зоны (2.7–3.0 эВ) и большей проводимостью, чем TiO_2 . Помимо электрохромных и фотокаталитических свойств триоксид вольфрама обладает ярко выраженными фотохромными свойствами [9–12], перспективен в газовой сенсорики [13–16] и других областях.

Для получения оксида вольфрама(VI) используются различные методы и подходы, такие как золь-гель технология [17–19], электрохимическое

[20–22], химическое газозольное осаждение [23, 24] и др. Гидротермальный метод, являющийся одним из наиболее удобных методов синтеза наноматериалов благодаря возможности получать анизотропные и иерархически организованные микроstructures, варьировать кристаллическую структуру веществ [25–27], также активно используется для получения WO_3 [3, 28–30]. При этом нередко в качестве реагентов, вступающих в реакцию с вольфрамсодержащим соединением в ходе гидротермального синтеза, выступают оксалаты [29] или щавелевая кислота [31–34]. В то же время для синтеза наноразмерного оксида вольфрама(VI) применяют и метод осаждения WO_3 из растворов вольфраматов под действием сильных неорганических кислот, таких как соляная [35] или азотная [36]. Щавелевая кислота является сильной органической кислотой и может выступать в качестве хелатного лиганда, образуя комплексные соединения с различными металлами, включая вольфрам [37], но в литературе не удалось найти примеры ее применения при синтезе наноразмерного WO_3 методом химического осаждения без гидротермальной обработки. Таким образом, целью настоящей работы является изучение процесса синтеза наноразмерного WO_3 ме-

тодом химического осаждения с использованием шавелевой кислоты.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для синтеза оксида вольфрама(VI) в 43 мл дистиллированной воды при перемешивании растворяли 1.126 г паравольфрамата аммония, 0.582 г шавелевой кислоты и 0.582 г поливинилпирролидона. Затем раствор выдерживали при 25°C в течение 5 сут, после чего наблюдали выпадение осадка светло-желтого цвета. Полученный осадок отделяли от маточного раствора и промывали (два раза дистиллированной водой и один раз этиловым спиртом) путем ступенчатого центрифугирования с последующей сушкой при 50°C в течение 13 ч. Далее, опираясь на результаты термического и рентгенофазового анализа, с целью формирования однофазного оксида WO_3 порошок подвергали термообработке при 500°C на протяжении 1 ч. Для более детального изучения процесса кристаллизации оксида вольфрама был также получен порошок при более низкой температуре (400°C, 1 ч).

ИК-спектры пропускания порошка после сушки и высокотемпературной обработки регистрировали в диапазоне волновых чисел 350–4000 cm^{-1} с использованием ИК-Фурье-спектрометра ИнфралЮМ ФТ-08 (время накопления сигнала составляло 15 с, разрешение – 1 cm^{-1}). Для этого готовили суспензии в вазелиновом масле, которые помещали в виде пленки между стеклами КВг.

Термическое поведение порошка после сушки исследовали с помощью синхронного термоанализатора SDT Q600 (TA Instruments) в диапазоне температур 25–1000°C в токе воздуха 250 мл/мин (скорость нагрева 10 град/мин, масса навески 21.5210 мг).

Рентгенофазовый анализ (РФА) порошка после сушки и высокотемпературной обработки проводили на дифрактометре D8-Advance (Bruker, CuK_{α} -излучение, $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$, Ni-фильтр, $E = 40 \text{ кэВ}$, $I = 40 \text{ мА}$, время накопления сигнала в точке 0.3 с, шаг 0.02°, диапазон углов 5°–80°).

Форму и размер частиц оксида вольфрама(VI) определяли с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ, JEOL-JEM 1011).

Морфологию и электрофизические характеристики порошка WO_3 изучали также с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ). Для этого порошок диспергировали в дистиллированной воде, после чего каплю образовавшейся дисперсии наносили на медную подложку и подвергали сушке при 70°C в течение 2 ч. Нанесенное таким образом покрытие изучали на сканирующем зондовом микроскопе Solver PRO-M (NT-MDT) с использованием зондов с проводящим покрытием HA-HR/W2C+ серии ETALON (резонансная

частота ~230 кГц, радиус скругления <35 нм). Измерения проводили в полуконтактном режиме, в котором также было выполнено сканирование в режиме сканирующей емкостной микроскопии и Кельвин-зондовой силовой микроскопии (КЗСМ).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе было изучено термическое поведение порошка после сушки. Как следует из термограмм (рис. 1), при нагревании до 1000°C наблюдается несколько ступеней потери массы, которые сопровождаются соответствующими тепловыми эффектами. В интервале температур от 25 до 200°C имеет место заметная потеря массы (4.301%), сопровождаемая эндоэффектом с минимумом около 100°C, что может быть связано с удалением остаточного растворителя и сорбированных газов. Дальнейшему нагреванию в интервале 200–325°C отвечает более интенсивная потеря массы (12.03%) и два экзотермических эффекта с максимумами при 293 и 326°C, относящихся к окислению органических фрагментов оксалата вольфрама. В диапазоне температур 325–475°C наблюдается менее активная потеря массы (3.355%), связанная с окислением остаточного углерода. Соответствующий экзотермический эффект с максимумом при 475°C также может быть связан с кристаллизацией WO_3 . В ходе последующего повышения температуры от 475 до 1000°C масса вещества практически не изменяется. Таким образом, суммарная потеря массы в исследуемом диапазоне температур составляет 19.91%, а в качестве режима термообработки с целью кристаллизации оксида вольфрама выбран режим с выдержкой при 500°C в течение 1 ч.

С помощью ИК-спектроскопии были изучены порошки после сушки и термообработки при 500°C. В результате анализа полученного спектра (рис. 2а) и сравнения его с литературными данными для различных карбоксилатных комплексов вольфрама [37–40] установлено, что в качестве твердой фазы при осаждении образуется оксалатный комплекс вольфрама. При 1590–1700 cm^{-1} наблюдается набор характеристичных полос, отвечающих асимметричным колебаниям групп COO^- , полосу же около 1730 cm^{-1} можно отнести к колебаниям свободной карбоксильной группы. Полоса поглощения с максимумом около 810 cm^{-1} соответствует асимметричным колебаниям связи $W-O-W$, а три полосы с максимумами при 897, 934, 975 cm^{-1} – симметричным и асимметричным колебаниям связи $W=O$ [41, 42]. На спектре также присутствует полоса с максимумом около 612 cm^{-1} , которую можно отнести к симметричным колебаниям группы $W-O-W$. Колебания связи $W-O-W$ могут относиться как к мостикам в составе оксалата, так и к гидрату $WO_3 \cdot 2H_2O$, имеющему, со-

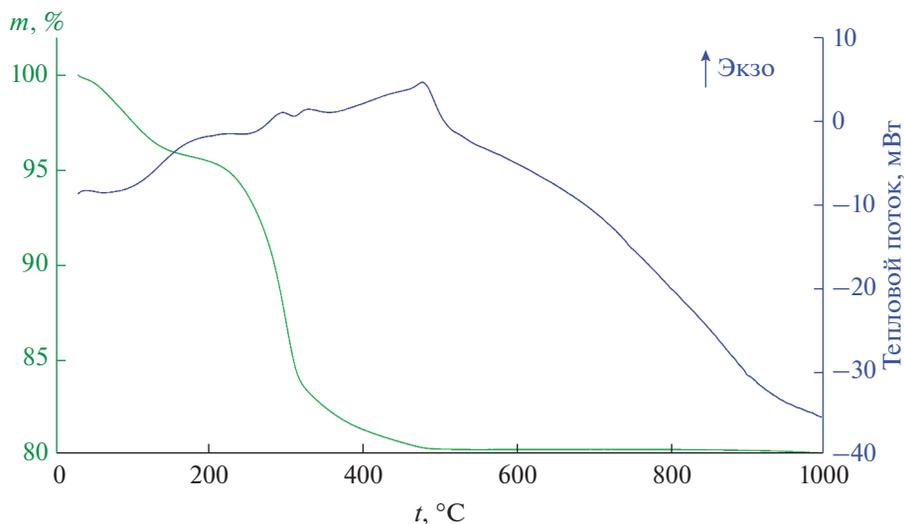


Рис. 1. Результаты ТГА/ДСК-анализа порошка после сушки при 50°C.

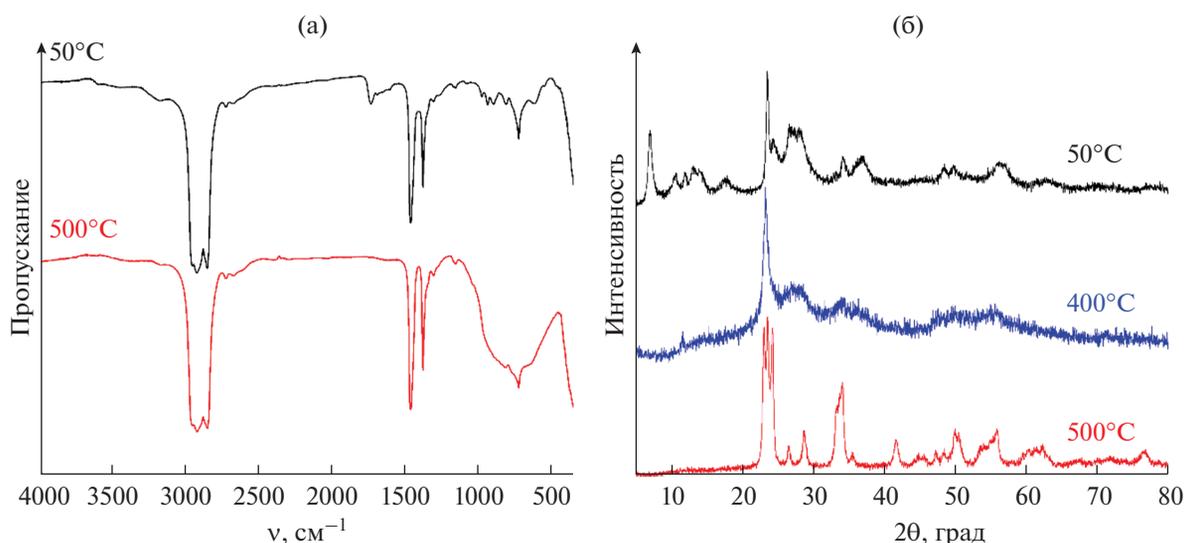


Рис. 2. ИК-спектры полученного порошка после сушки и прокаливания (а); рентгенограммы полученного порошка после сушки и прокаливания (б).

гласно литературным данным, характеристическую полосу поглощения с максимумом около 610 см⁻¹ [43]. В ходе термообработки при 500°C происходит разложение комплекса и гидрата с образованием WO₃, а набор и интенсивность полос поглощения свидетельствуют о формировании моноклинной модификации оксида вольфрама(VI) [43].

Для определения фазового состава порошка после сушки и высокотемпературной обработки был проведен рентгенофазовый анализ (рис. 2б), который показал, что порошок после сушки представляет собой смесь карбоксилата вольфрама [40, 44] и гидрата состава WO₃ · 2H₂O, что под-

тверждает предположение об отнесении полосы поглощения с максимумом около 612 см⁻¹ на соответствующем ИК-спектре (рис. 2а) к примесной фазе состава WO₃ · 2H₂O. Термообработка при 400°C, по данным РФА, приводит к разложению оксалата и образованию однофазного гидрата WO₃ · 2H₂O, а при 500°C формируется WO₃ с моноклинной структурой (пр. гр. *P21/n*, PDF 01-072-0677). Каких-либо кристаллических примесей после термообработки при 500°C не обнаружено. С помощью полнопрофильного анализа были рассчитаны параметры кристаллической решетки: $a = 7.3010(8)$, $b = 7.5004(9)$, $c = 7.665(1)$ Å, $\beta =$

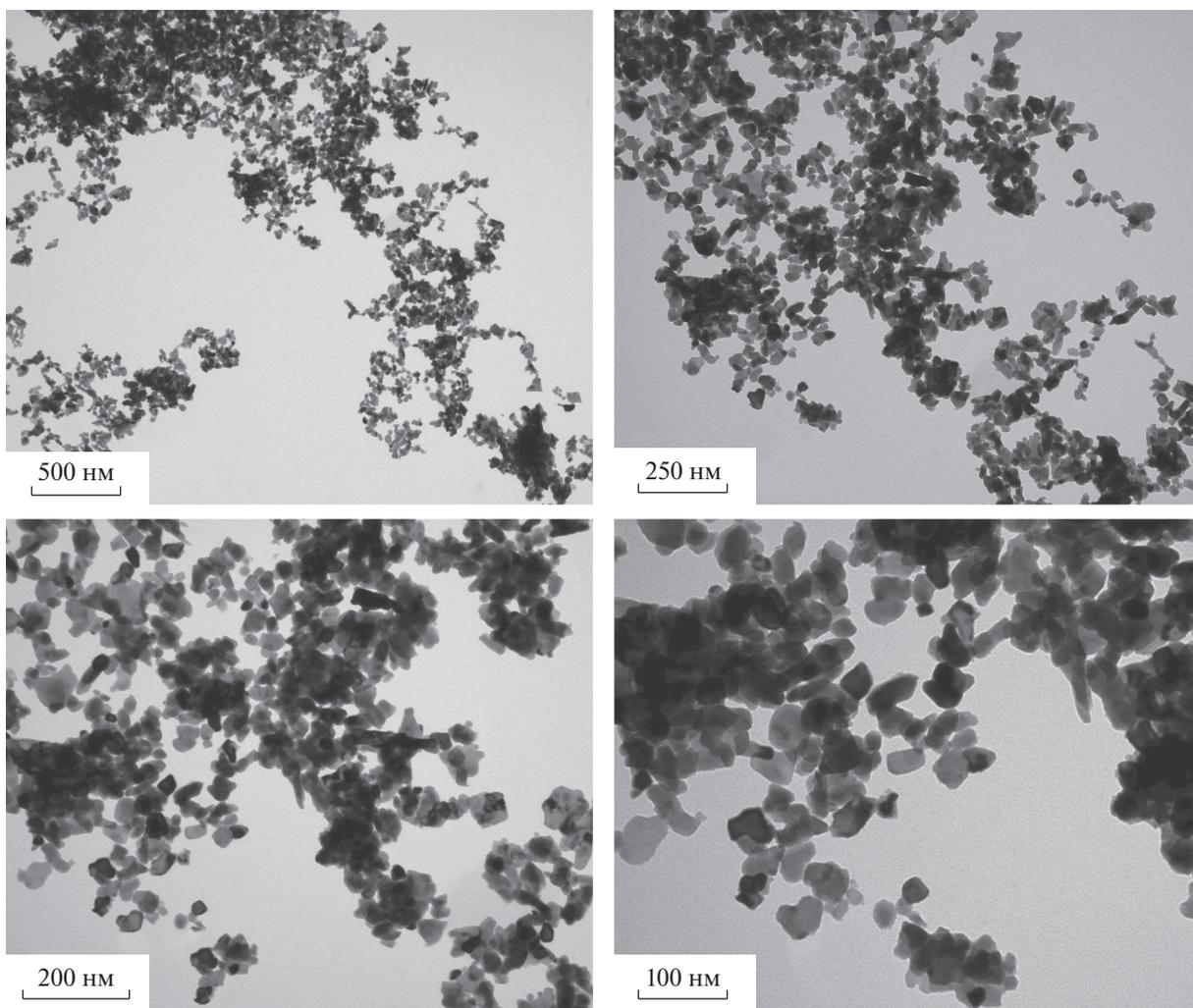


Рис. 3. Микрофотографии (ПЭМ) порошка WO_3 , полученного после прокаливания при $500^\circ C$.

$= 90.487(3)^\circ$. Средний размер областей когерентного рассеяния (ОКР) при этом составил 36 ± 4 нм.

С помощью ПЭМ были определены форма и размер частиц полученного оксида вольфрама(VI) (рис. 3). Как видно из микрофотографий, порошок в основном состоит из частиц чуть вытянутой формы длиной $\sim 50 \pm 5$ и шириной $\sim 40 \pm 4$ нм, что достаточно хорошо согласуется с рассчитанными значениями ОКР. Таким образом, можно предположить, что сформировавшиеся частицы WO_3 состоят в основном из одного кристаллита.

Для изучения морфологии полученного порошка оксида вольфрама(VI) и изучения его локальных электрофизических характеристик применяли также атомно-силовую микроскопию (рис. 4). Так, на полученном топографическом изображении (рис. 4а) и изображении фазового контраста (рис. 4б) прослеживаются та же форма и размер частиц, как и по данным ПЭМ. При

этом длина частиц равна 74 ± 9 , а ширина – 40 ± 4 нм. Большой размер частиц в латеральной плоскости в данном случае объясняется влиянием радиуса скругления (< 35 нм) острия зонда. С помощью сканирующей емкостной и Кельвинзондовой силовой микроскопии были изучены локальные электрофизические свойства сформированных в ходе термообработки при $500^\circ C$ наночастиц WO_3 , в частности, распределение носителей заряда на поверхности соответствующей пленки на медной подложке и работа выхода электрона. Так, из карты емкостного контраста (рис. 4в) видно, что на границах между частицами наблюдается повышенная емкость по сравнению с остальной их поверхностью. Это можно объяснить образованием обедненных электронами зон в местах контакта частиц. Распределение поверхностного потенциала (рис. 4г) свидетельствует о том, что носители заряда в большей степени сосредоточены вдали от границ между частицами,

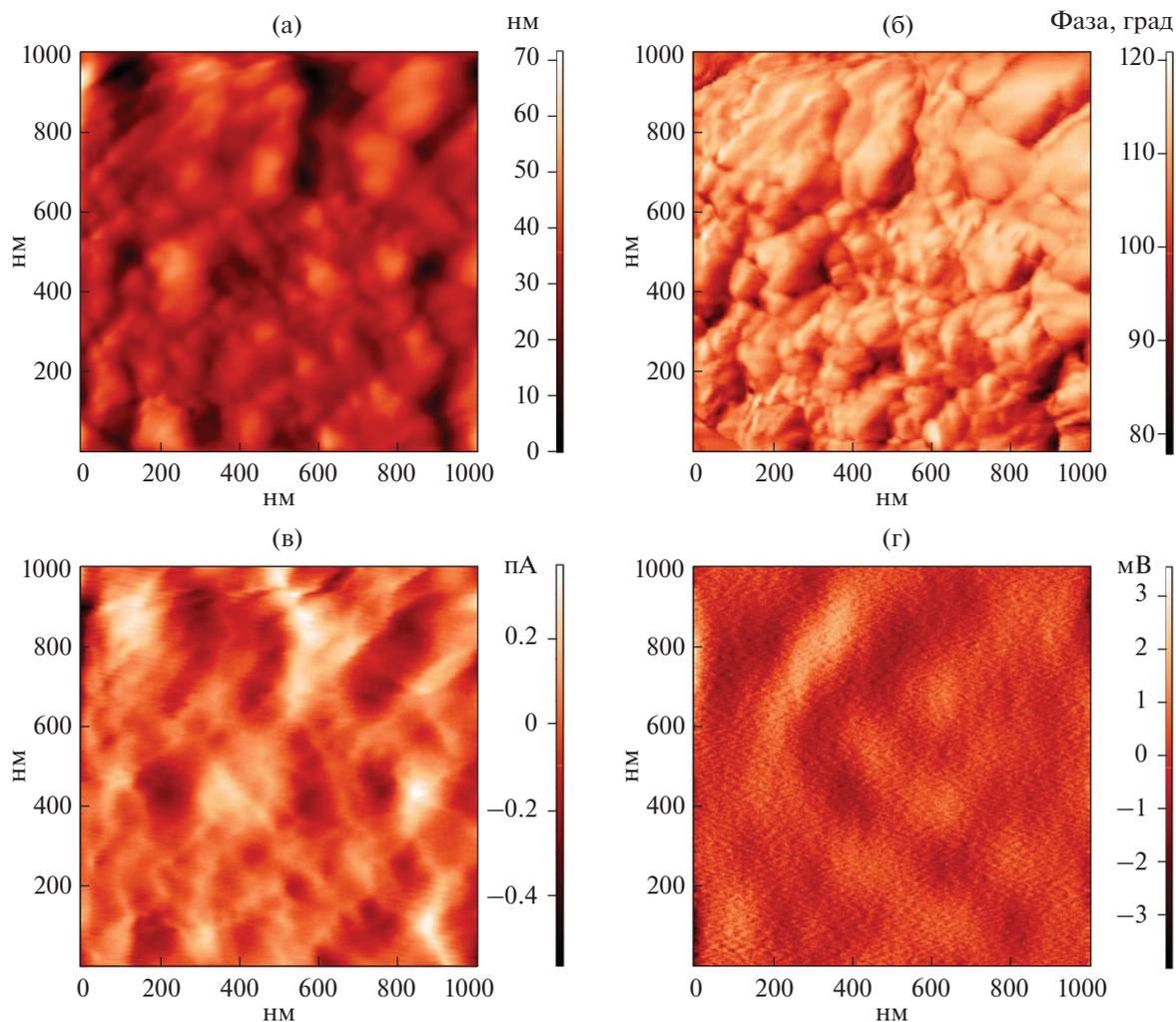


Рис. 4. Результаты АСМ пленки из частиц порошка WO₃, полученного после прокаливания при 500°C: а – топография, б – фазовый контраст, в – емкостной контраст, г – распределение поверхностного заряда.

хотя в целом поверхностный потенциал распределен достаточно равномерно по всей просканированной площади материала. Из результатов КЗСМ было рассчитано значение работы выхода электрона для полученного WO₃, составившее 4.664 ± 0.003 эВ, что близко к нижней границе диапазона значений работы выхода, встречающихся в литературе (4.7–6.4 эВ) [45], свидетельствуя о несколько повышенной электропроводности полученного оксида вольфрама(VI).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучен процесс синтеза наноразмерного WO₃ методом химического осаждения с использованием щавелевой кислоты. Полученный в результате осаждения и последующей сушки продукт, по результатам колебательной спектроскопии и рентгенофазового анализа, представляет собой смесь оксалата и гидрата состава WO₃ · 2H₂O. При

дальнейшей термообработке при 400°C формируется однофазный гидрат WO₃ · 2H₂O, а при 500°C образуется нанопорошок WO₃ с моноклинной кристаллической структурой. Результаты ПЭМ и АСМ свидетельствуют о формировании оксидных частиц чуть вытянутой формы. Средний размер ОКР для данного нанодисперсного порошка γ-WO₃ составляет 36 ± 4 нм, длина частиц – 50 ± 5 нм, ширина – около 40 ± 4 нм. С помощью КЗСМ определено значение работы выхода электрона с поверхности наночастиц оксида вольфрама(VI), которое составило 4.664 ± 0.003 эВ, что близко к нижней границе диапазона значений работы выхода, встречающихся в литературе, свидетельствуя о несколько повышенной электропроводности материала.

Таким образом, в ходе исследования было показано, что с применением щавелевой кислоты

методом химического осаждения может быть получен наноразмерный оксид вольфрама(VI).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-33-90136, в части синтеза оксида вольфрама(VI)) и Минобрнауки России в рамках государственного задания ИОНХ РАН (в части изучения локальных электрофизических свойств полученного материала). Исследования методом РФА выполнены с использованием оборудования ЦКП ФМИ ИОНХ РАН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Granqvist C.G.* // *Thin Solid Films*. 2014. V. 564. P. 1. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2014.02.002>
2. *Mortimer R.J.* // *Annu. Rev. Mater. Res.* 2011. V. 41. № 1. P. 241. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-062910-100344>
3. *Zhang J., Tu J.P., Xia X.H. et al.* // *J. Mater. Chem.* 2011. V. 21. № 14. P. 5492. <https://doi.org/10.1039/c0jm04361c>
4. *Deb S.K.* // *Philos. Mag.* 1973. V. 27. № 4. P. 801. <https://doi.org/10.1080/14786437308227562>
5. *Liu Y., Li J., Li W. et al.* // *J. Phys. Chem. C*. 2015. V. 119. № 27. P. 14834. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b00966>
6. *Zhang J., Chang X., Li C. et al.* // *J. Mater. Chem. A*. 2018. V. 6. № 8. P. 3350. <https://doi.org/10.1039/c7ta10056f>
7. *Dong P., Hou G., Xi X. et al.* // *Environ. Sci. Nano*. 2017. V. 4. № 3. P. 539. <https://doi.org/10.1039/c6en00478d>
8. *Liu X., Wang F., Wang Q.* // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2012. V. 14. № 22. P. 7894. <https://doi.org/10.1039/c2cp40976c>
9. *He T., Yao J.* // *J. Mater. Chem.* 2007. V. 17. № 43. P. 4547. <https://doi.org/10.1039/b709380b>
10. *Huang R., Shen Y., Zhao L. et al.* // *Adv. Powder Technol.* 2012. V. 23. № 2. P. 211. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2011.02.009>
11. *Songara S., Gupta V., Kumar Patra M. et al.* // *J. Phys. Chem. Solids*. 2012. V. 73. № 7. P. 851. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2012.02.020>
12. *Kozlov D.A., Shcherbakov A.B., Kozlova T.O. et al.* // *Molecules*. 2020. V. 25. № 1. P. 154. <https://doi.org/10.3390/molecules25010154>
13. *Ponzoni A., Comini E., Sberveglieri G. et al.* // *Appl. Phys. Lett.* 2006. V. 88. № 20. P. 28. <https://doi.org/10.1063/1.2203932>
14. *Ponzoni A., Russo V., Bailini A. et al.* // *Sensors Actuators, B: Chem.* 2011. V. 153. № 2. P. 340. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2010.10.045>
15. *Penza M., Tagliente M.A., Mirengi L. et al.* // *Sensors Actuators, B: Chem.* 1998. V. 50. № 1. P. 9. [https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(98\)00149-X](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(98)00149-X)
16. *Llobet E., Molas G., Molinàs P. et al.* // *J. Electrochem. Soc.* 2000. V. 147. № 2. P. 776. <https://doi.org/10.1149/1.1393270>
17. *Costa C., Pinheiro C., Henriques I. et al.* // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2012. V. 4. № 3. P. 1330. <https://doi.org/10.1021/am201606m>
18. *Breedon M., Spizzirri P., Taylor M. et al.* // *Cryst. Growth Des.* 2010. V. 10. № 1. P. 430. <https://doi.org/10.1021/cg9010295>
19. *Chatzikyriakou D., Krins N., Gilbert B. et al.* // *Electrochim. Acta*. 2014. V. 137. P. 75. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2014.05.139>
20. *Kwong W.L., Savvides N., Sorrell C.C.* // *Electrochim. Acta*. 2012. V. 75. P. 371. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.05.019>
21. *Giannouli M., Leftheriotis G.* // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 2011. V. 95. № 7. P. 1932. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.02.024>
22. *Poongodi S., Kumar P.S., Masuda Y. et al.* // *RSC Adv*. 2015. V. 5. № 117. P. 96416. <https://doi.org/10.1039/c5ra19177g>
23. *Annanouch F.E., Haddi Z., Vallejos S. et al.* // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2015. V. 7. № 12. P. 6842. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b00411>
24. *Wu W., Yu Q., Lian J. et al.* // *J. Cryst. Growth*. 2010. V. 312. № 21. P. 3147. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2010.07.057>
25. *Simonenko T.L., Bocharova V.A., Simonenko N.P. et al.* // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2020. V. 65. № 4. P. 459. <https://doi.org/10.1134/S003602362004018X>
26. *Simonenko T.L., Bocharova V.A., Gorobtsov P.Y. et al.* // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2020. V. 65. № 9. P. 1292. <https://doi.org/10.1134/S0036023620090193>
27. *Simonenko T.L., Bocharova V.A., Gorobtsov P.Y. et al.* // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2020. V. 65. № 9. P. 1304. <https://doi.org/10.1134/S0036023620090181>
28. *Phuruangrat A., Ham D.J., Hong S.J. et al.* // *J. Mater. Chem.* 2010. V. 20. № 9. P. 1683. <https://doi.org/10.1039/b918783a>
29. *Zhang J., Liu Z., Liu Z.* // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2016. V. 8. № 15. P. 9684. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b00429>
30. *Yao S., Qu F., Wang G. et al.* // *J. Alloys Compd.* 2017. V. 724. P. 695. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.07.123>
31. *Liu Z., Miyauchi M., Yamazaki T. et al.* // *Sensors Actuators, B: Chem.* 2009. V. 140. № 2. P. 514. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2009.04.059>
32. *Ma D., Wang H., Zhang Q. et al.* // *J. Mater. Chem.* 2012. V. 22. № 32. P. 16633. <https://doi.org/10.1039/c2jm32784h>
33. *Patil V.B., Adhyapak P.V., Suryavanshi S.S. et al.* // *J. Alloys Compd.* 2014. V. 590. P. 283. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.12.102>

34. *Ding D., Shen Y., Ouyang Y. et al.* // *Thin Solid Films*. 2012. V. 520. № 24. P. 7164.
<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2012.08.003>
35. *Nayak A.K., Lee S., Choi Y.I. et al.* // *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2017. V. 5. № 3. P. 2741.
<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b03084>
36. *Supothina S., Seeharaj P., Yoriya S. et al.* // *Ceram. Int.* 2007. V. 33. № 6. P. 931.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2006.02.007>
37. *Dengel A.C., Griffith W.P., Powell R.D. et al.* // *Dalton Trans.* 1987. № 1. P. 17.
38. *Deepa M., Sharma N., Varshney P. et al.* // *J. Mater. Sci.* 2000. V. 35. № 21. P. 5313.
<https://doi.org/10.1023/A:1004838627252>
39. *Zhang H., Zhao H., Jiang Y.Q. et al.* // *Inorg. Chim. Acta.* 2003. V. 351. № 1. P. 311.
[https://doi.org/10.1016/S0020-1693\(03\)00177-4](https://doi.org/10.1016/S0020-1693(03)00177-4)
40. *Li D.M., Cui L.F., Xing Y.H. et al.* // *J. Mol. Struct.* 2007. V. 832. № 1–3. P. 138.
<https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2006.08.014>
41. *Young C.G., Gable R.W., Mackayla M.F.* // *Inorg. Chem.* 1990. T. 29. № 9. P. 1777.
<https://doi.org/10.1021/ic00334a036>
42. *Llopis E., Ramírez J.A., Doménech A. et al.* // *J. Chem. Soc., Dalton Trans.* 1993. № 7. P. 1121.
<https://doi.org/10.1039/DT9930001121>
43. *Daniel M.F., Desbat B., Lassegues J.C. et al.* // *J. Solid State Chem.* 1987. V. 67. № 2. P. 235.
[https://doi.org/10.1016/0022-4596\(87\)90359-8](https://doi.org/10.1016/0022-4596(87)90359-8)
44. *Cindri M., Strukan N., Vrdoljak V. et al.* // *Inorg. Chim. Acta.* 2000. V. 309. № 1–2. P. 77.
[https://doi.org/10.1016/S0020-1693\(00\)00236-X](https://doi.org/10.1016/S0020-1693(00)00236-X)
45. *Han S., Shin W.S., Seo M. et al.* // *Org. Electron.* 2009. V. 10. № 5. P. 791.
<https://doi.org/10.1016/j.orgel.2009.03.016>