

Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 543.061:547.281.1

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/11946>

**Синтез и сенсорные свойства наноматериалов  
на основе оксида вольфрама (VI)**

А. В. Шапошник<sup>1✉</sup>, А. А. Звягин<sup>1</sup>, С. В. Рябцев<sup>2</sup>, О. В. Дьяконова<sup>1</sup>, Е. А. Высоцкая<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет»,  
ул. Мичурина, 1, Воронеж 394087, Российская Федерация

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»,  
Университетская пл., 1, Воронеж 394018, Российская Федерация

**Аннотация**

Целью работы явилась разработка методики синтеза наномерных материалов на основе  $WO_3$ , их характеристика и исследование сенсорных свойств.

Нанопорошок был изготовлен при медленном добавлении азотной кислоты к водному раствору паравольфрамата аммония  $(NH_4)_{10}W_{21}O_{41} \cdot xH_2O$  с последующим центрифугированием, высушиванием и прокаливанием. Методом просвечивающей электронной микроскопии установлен размер зерен триоксида вольфрама, который составил 10–20 нм. По данным рентгеновского фазового анализа порошок, прокаленный при температуре 500 °С, состоит преимущественно из триклинной фазы. В дальнейшем к нанопорошку  $WO_3$  был добавлен нитрат диамминпалладия (II) и терпениол для образования пасты. Полученная паста была нанесена на специальную диэлектрическую подложку и прокалена до температуры 750 °С, в результате чего был получен хрупкий гель на основе триоксида вольфрама. Массовая доля палладия в хрупком геле составила 3 %. Сенсорные свойства полученного газочувствительного материала были исследованы при стационарном (300 °С) и нестационарном температурном режиме работы сенсора (быстрый нагрев до 450 °С и медленное охлаждение до 100 °С).

Показано резкое увеличение чувствительности сенсора на основе триоксида вольфрама при использовании нестационарного температурного режима в зависимости от состава газочувствительного слоя.

**Ключевые слова:** металлоксидные сенсоры, чувствительность, температурная модуляция

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-23-00329).

**Для цитирования:** Шапошник А. В., Звягин А. А., Рябцев С. В., Дьяконова О. В., Высоцкая Е. А. Синтез и сенсорные свойства наноматериалов на основе оксида вольфрама (VI). *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2023;24(2): 349–355. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/11946>

**For citation:** Shaposhnik A. V., Zviagin A. A., Ryabtsev S. V., Dyakonova O. V., Vysotskaya E. A. Synthesis and sensory properties of tungsten (VI) oxide-based nanomaterials. *Condensed Matter and Interphases*. 2023;24(2): 349–355. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/11946>

✉ Шапошник Алексей Владимирович, e-mail: [a.v.shaposhnik@gmail.com](mailto:a.v.shaposhnik@gmail.com)

© Шапошник А. В., Звягин А. А., Рябцев С. В., Дьяконова О. В., Высоцкая Е. А., 2024



## 1. Введение

Триоксид вольфрама является полупроводником с шириной запрещенной зоны 2.4–2.8 эВ [1].  $WO_3$  получил довольно широкое применение – он используется, например, при изготовлении сцинтилляторов и люминофоров, а также при изготовлении электрохромного оконного стекла, способного изменять светопропускание при изменении электрического напряжения. Материалы на основе триоксида вольфрама используются в качестве катализаторов гидрогенизации при крекинге углеводородов. В последние годы нанодисперсный оксид вольфрама (VI) стал широко использоваться в качестве газочувствительного материала химических сенсоров [2].

В большинстве случаев  $WO_3$  является основной газочувствительного материала, а для повышения чувствительности и селективности вносятся добавки. Например, высокочувствительный сенсор на ацетон был получен из нанокompозита  $WO_3/Au$  [3]. Мезопористый сенсор на основе  $WO_3-TiO_2$  гетероперехода имеет высокую чувствительность к водороду [4]. Высокую чувствительность к ацетальдегиду показал сенсор с *p-n* гетеропереходом на границе  $NiO$  нанолитов и  $WO_3$  наностержней [5].

Сенсоры с очень низким энергопотреблением могут быть созданы на основе индивидуальной металлоксидной нанонити [6]. Очень быстрый наносекундный отклик и крайне низкое энергопотребление на уровне нескольких микроватт было реализовано при использовании индивидуальной нанонити  $WO_3$ , на поверхность которой была нанесена платина [7]. Механизм химических процессов при определении водорода в воздухе был исследован на газочувствительном материале, состоящем из наностержней  $WO_3$  [8]. Гетеропереход *p-NiCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/n-WO<sub>3</sub>* позволил получить сенсор с высокой чувствительностью к диоксиду азота [9]. Кроме того, сенсор  $NO_x$  был создан на основе  $WO_3$ , допированного палладием [10]. Допирование полупроводника *n*-типа, наносфер  $WO_3$  полупроводником *p*-типа (сурьмой) позволило получить сенсор на аммиак, работающий при температуре, близкой к комнатной [11].

Структуры, подобные цветам (flower-like)  $WO_3-In_2O_3$  на основе полых микросфер были использованы в качестве газочувствительного материала для определения ацетона [12]. Допированный железом восстановленный оксид графена (rGO) был добавлен к  $WO_3$  для создания низкотемпературного сенсора ацетона [13]. Сенсор, способный определять амины на уровне ppb-концентраций, был

создан на основе  $WO_3-W_{18}O_{49}$  гетероструктур с добавлением слоев графена и наночастиц PdO [14].

$WO_3/CuWO_4$  гетероструктура с 3D иерархическими порами была использована для создания высокочувствительного сенсора, работающего при комнатной температуре под действием видимого излучения [15]. Pd- $WO_3$  сенсор, созданный при помощи «самосборки», позволил детектировать водород даже при комнатной температуре [16].

Хеморезистивный  $NO_2$  сенсор, полученный на основе  $WO_3$ , допированного лантаном, был синтезирован пламенным пиролизом [17]. Высокочувствительный высокоселективный сенсор по отношению к  $H_2S$  на основе цветоподобного (flower-like)  $WO_3/CuO$  нанокompозита способен работать при низких, близких к комнатным, температурах [18].

Очень низкий предел обнаружения для аммиака при комнатной температуре был достигнут для нанокompозита, состоящего из  $WO_3$  и многостенных углеродных нанотрубок (MWCNT) [20]. Низкотемпературный сенсор  $WO_3-Bi_2WO_6$  с иерархической цветоподобной структурой позволил детектировать  $H_2S$  на уровне ppb-концентраций [21]. Сенсор водорода с высоким быстродействием и высокой скоростью релаксации был получен при допировании палладием аморфных тонких пленок  $WO_3$  [22]. Нановолокно на основе  $TiO_2$ , декорированное  $WO_3$ , позволило получить гетероструктуру с высокой чувствительностью к водороду [23]. Поверхностная модификация наноматериала  $WO_3$  частицами Pt и Ru была использована для получения сенсоров, чувствительных к парам легкокипящих жидкостей [24]. На основе архитектуры ядро-оболочка (core-shell)  $WO_3-PdO$  был получен высокочувствительный к ацетону сенсор [25].

Подробно исследованы сенсорные свойства нанопленок на основе  $WO_3$ , полученных магнетронным распылением [26].  $WO_3$ -нанопленки могут быть получены также термическим окислением металлического вольфрама, однако отклики по отношению к оксидам азота и по отношению к аммиаку были не слишком высокими [27]. Микроустройство на основе сенсора  $WO_3$  было создано для определения газов-окислителей, причем авторам удалось достигнуть не только значительных откликов, но также и высокой селективности за счет обработки результатов по принципу «электронного носа» [28]. Высокочувствительный водородный сенсор был создан при совместном распылении вольфрама и платины [29].

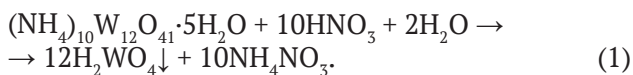
Одной из важнейших проблем газового анализа с помощью сенсоров является недостаточная селективность [30], повысить которую можно с помощью нестационарного температурного режима сенсора [31–33].

Целью данной работы является синтез наноматериалов на основе  $WO_3$ , их характеристика, а также исследование сенсорных свойств по отношению к сероводороду и угарному газу. Кроме того, задачей данного исследования является сравнение двух температурных режимов – стационарного и нестационарного.

## 2. Экспериментальная часть

### 2.1. Синтез и характеристика газочувствительного материала

6.25 г паравольфрамата аммония (Sigma-Aldrich, Product Number 510114, Batch number MKCL8549) растворили в 250 мл деионизированной воды при 80 °С. Далее в раствор по каплям при непрерывном перемешивании добавляли 3 М раствор азотной кислоты до достижения pH = 0, поддерживая температуру 80 °С. Полученную смесь в течение 30 минут выдерживали при температуре 80 °С, а потом охлаждали до комнатной температуры и выдерживали в течение одного часа.



Центрифугированием отделяли осадок вольфрамовой кислоты, промывали деионизированной водой, высушивали при 80 °С в течение

12 часов. При дальнейшей термообработке высушенного осадка вольфрамовой кислоты в течение 24 часов при температуре 500 °С произошло образование триоксида вольфрама:



Характеризация нанопорошка триоксида вольфрама проведена методом просвечивающей электронной микроскопии (рис. 1) и методом рентгенофазного анализа (РФА) с помощью прибора ДРОН-4 с кобальтовым анодом (рис. 2). Как следует из данных электронной микроско-

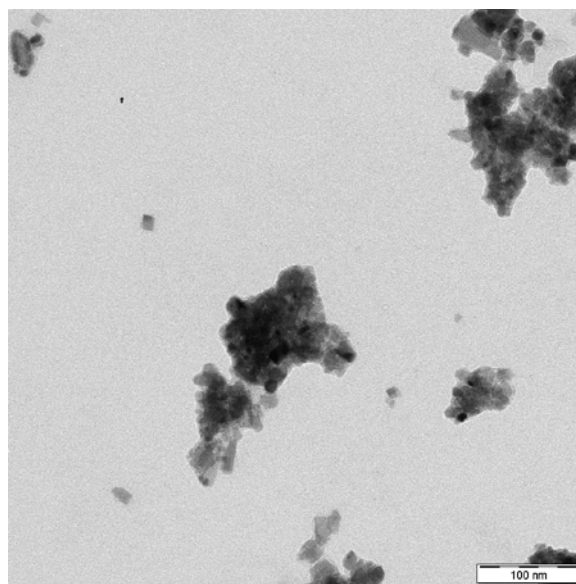


Рис. 1. Снимок порошка  $WO_3$ , полученный на просвечивающем электронном микроскопе

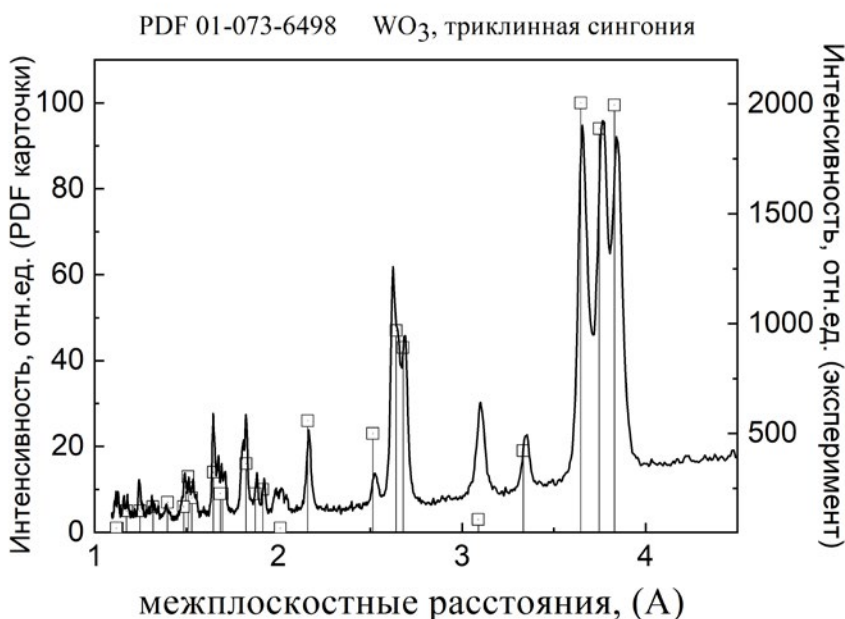


Рис. 2. Рентгенограмма нанопорошка оксида вольфрама (VI), прокаленного при температуре 500 °С

пии, размер зерен составляет  $WO_3$  10–20 нм. Расшифровку дифрактограммы выполняли с использованием базы данных Powder Diffraction File (PDF-2). По левым осям ординат отложены данные PDF карт  $WO_3$  гексагональной и триклинной модификации. Экспериментальные данные РФА относятся к правым осям ординат. Установлено, что образец соответствует триклинной фазе  $WO_3$  (PDF card 01-073-6498).

Газочувствительный слой на основе  $WO_3$  с добавкой оксида палладия был получен путем обработки порошка триоксида вольфрама раствором нитрата тетраамминпалладия (II) с добавлением терпениола в качестве связующего компонента. На диэлектрическую подложку, выполненную из оксида алюминия, с платиновыми электродами и нагревателем наносили полученную пасту и прокаливали до температуры 750 °С, в результате чего терпениол выгорал и на подложке образовывался слой триоксида вольфрама с добавкой оксида палладия в виде геля.

### 2.2. Измерение сенсорных характеристик

Поверочные газовые смеси «сероводород в синтетическом воздухе» и «угарный газ в синтетическом воздухе» с концентрациями 10 ppm и 200 ppm, разбавленные синтетическим воздухом со скоростью протока 250 мл/мин, были использованы для исследования сенсорных свойств полученных материалов. В камеру из нержавеющей стали помещали находящийся в металлическом корпусе ТО-8 сенсор, температура которого устанавливалась специальным электронным

устройством по температурному коэффициенту сопротивления нагревателя.

С помощью специального электронного устройства измеряли электрическое сопротивление газочувствительного слоя сенсора с частотой дискретизации 40 Гц и записывали в виде компьютерного файла. Каждый цикл измерений длился 15 секунд: 2 секунды нагрев от 100 до 450 °С, а затем 13 секунд охлаждение от 450 до 100 °С. Эти циклы следовали друг за другом непрерывно (рис. 3). Полученные в первых пяти циклах результаты измерений не учитывались. Для количественного определения использовалась только одна из 575 точек цикла, которая соответствует времени 14.95 секунд после начала измерений.

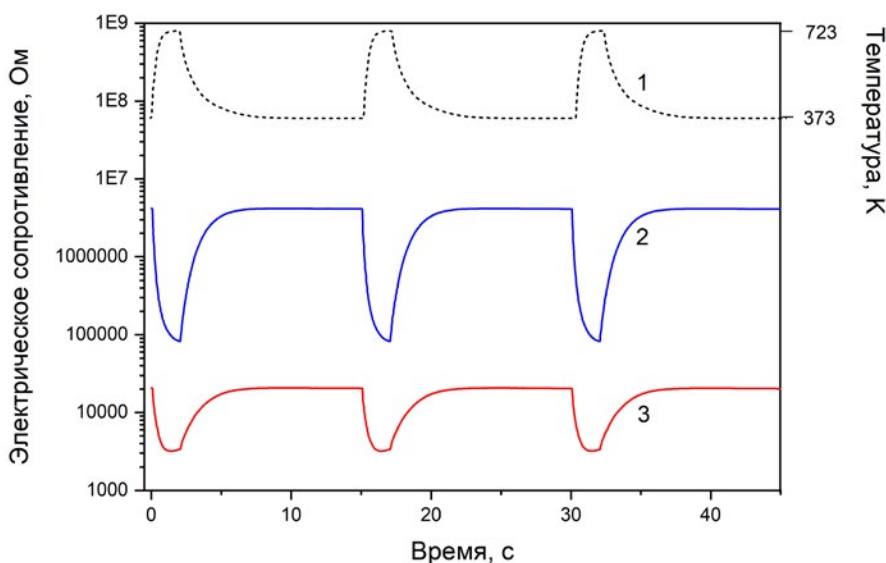
По отношению активного электрического сопротивления  $R_0$  в чистом воздухе к активному электрическому сопротивлению  $R_g$  в исследуемой газовой среде рассчитывали отклик  $S$  по формуле:

$$S = R_0/R_g. \tag{3}$$

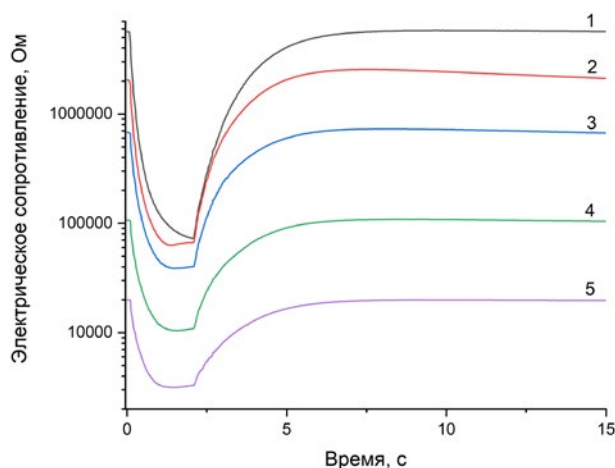
### 3. Результаты и их обсуждение

Температура сенсора (кривая 1), а также электрическое сопротивление сенсора  $WO_3$ -Pd при определении угарного газа (кривая 2) и сероводорода (кривая 3) на протяжении трех циклов измерений показаны на рис. 3.

На рис. 4 представлены концентрационные зависимости электрического сопротивления сенсора  $WO_3$ -Pd от времени на протяжении одного цикла измерений для сероводорода.



**Рис. 3.** Температура (кривая 1) и электрическое сопротивление сенсора  $WO_3$ -Pd в 50 ppm угарного газа (кривая 2) и в 50 ppm сероводорода (кривая 3) в нестационарном температурном режиме на протяжении трех циклов измерений



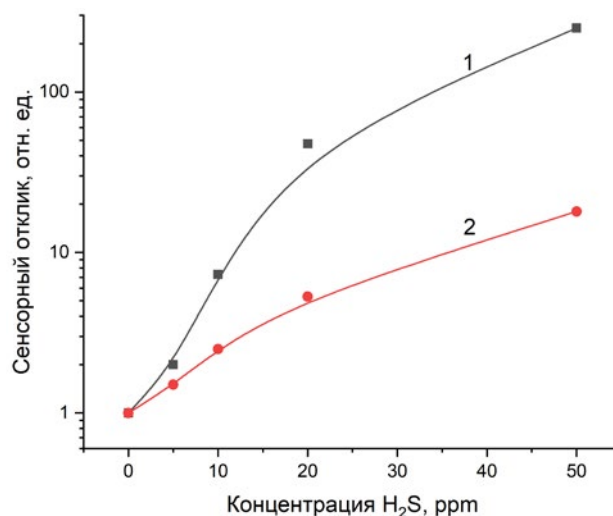
**Рис. 4.** Электрическое сопротивление сенсора  $WO_3$ -Pd при различных концентрациях сероводорода на протяжении одного измерительного цикла. 1 – синтетический воздух, 2 – 5 ppm  $H_2S$ , 3 – 10 ppm  $H_2S$ , 4 – 20 ppm  $H_2S$ , 5 – 50 ppm  $H_2S$

На рис. 5 показана зависимость отклика сенсора  $WO_3$ -Pd от концентрации сероводорода в стационарном (кривая 1), и в нестационарном температурных режимах (кривая 2). Из рисунка следует, что нестационарный режим способствует повышению отклика сенсора к сероводороду примерно на порядок. Разница в форме зависимостей сопротивления сенсора от времени при определении угарного газа и при определении сероводорода может быть использована для повышения селективности анализа [33].

Причиной увеличения чувствительности сенсора  $WO_3$ -Pd при определении сероводорода может являться временное разделение каталитической активности газочувствительного слоя сенсора и сорбции газа-аналита [31]. Нестационарный температурный режим, по-видимому, сначала активизирует газочувствительный слой сенсора до начала протекания десорбции газа-аналита. Кроме того, отклик сенсора также зависит от общей концентрации носителей заряда. Отклик сенсора тем выше, чем меньше носителей заряда присутствует в металлоксидном сенсоре до напуска газа-аналита, поэтому импульсный температурный режим повышает сопротивление сенсора  $WO_3$ -Pd на воздухе благодаря значительной сорбции кислорода.

#### 4. Заключение

В работе по классической золь-гель технологии был изготовлен сенсор на основе  $WO_3$ -Pd путем добавления к нанопорошку триоксида воль-



**Рис. 5.** Зависимость отклика сенсора  $WO_3$ -Pd от концентрации сероводорода при нестационарном режиме (1) и при стационарной температуре 300 °C (2)

фрама оксида палладия (3 % по массе), а также исследованы сенсорные характеристики полученного материала по отношению к сероводороду и угарному газу. Проведенные исследования сенсорных характеристик в двух температурных режимах показали, что использование импульсного температурного режима приводит к существенному повышению чувствительности сенсора к сероводороду. Таким образом, при работе в нестационарном температурном режиме сенсор  $WO_3$ -Pd может быть использован при определении сероводорода и других газов-восстановителей.

#### Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

#### конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

#### Список литературы

1. Tesfamichael T., Ponzoni A., Ahsan M., Faglia G. Gas sensing characteristics of Fe-doped tungsten oxide thin films. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2012;168(2): 345–353. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2012.04.032>
2. Tesfamichael T., Ahsan M., Notarianni M., ... Bell J. Gas sensing of ruthenium implanted tungsten oxide thin films. *Thin Solid Films*. 2014;558: 416–422. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2014.02.084>

3. Zhang X., Dong B., Liu W., ... Song H. Highly sensitive and selective acetone sensor based on three-dimensional ordered WO<sub>3</sub>/Au nanocomposite with enhanced performance. *Sensors Actuators B Chemical*. 2020;320(4): 128405. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.128405>
4. Li H., Wu C.-H., Liu Y.-C., ... Wu R.-J. Mesoporous WO<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> heterojunction for a hydrogen gas sensor. *Sensors Actuators B Chemical*. 2021;341(2): 130035. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130035>
5. Nakate U. T., Yu Y. T., Park S. High performance acetaldehyde gas sensor based on *p-n* heterojunction interface of NiO nanosheets and WO<sub>3</sub> nanorods. *Sensors Actuators B Chemical*. 2021;344(5): 130264. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130264>
6. Shaposhnik A. V., Shaposhnik D. A., Turishchev S. Y., ... Morante J. R. Gas sensing properties of individual SnO<sub>2</sub> nanowires and SnO<sub>2</sub> sol-gel nanocomposites. *Beilstein Journal of Nanotechnology*. 2019;10: 1380–1390. <https://doi.org/10.3762/bjnano.10.136>
7. Fan L., Xu N., Chen H., Zhou J., Deng S. A millisecond response and microwatt power-consumption gas sensor: Realization based on cross-stacked individual Pt-coated WO<sub>3</sub> nanorods. *Sensors Actuators B Chemical*. 2021;346(2): 130545. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130545>
8. Mineo G., Moulaei K., Neri G., Mirabella S., Bruno E. H<sub>2</sub> detection mechanism in chemoresistive sensor based on low-cost synthesized WO<sub>3</sub> nanorods. *Sensors Actuators B Chemical*. 2021;348: 130704. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130704>
9. Hu Y., Li T., Zhang J., Guo J., Wang W., Zhang D. High-sensitive NO<sub>2</sub> sensor based on *p*-NiCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/*n*-WO<sub>3</sub> heterojunctions. *Sensors Actuators B Chemical*. 2022;352(P2): 130912. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130912>
10. Karpe S. B., Bang A. D., Adhyapak D. P., Adhyapak P. V. Fabrication of high sensitive proto-type NO<sub>x</sub> sensor based on Pd nanoparticles loaded on WO<sub>3</sub>. *Sensors Actuators B Chemical*. 2022;354: 131203. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.131203>
11. Yao G., Yu J., Wu H., ... Tang Z. *P*-type Sb doping hierarchical WO<sub>3</sub> microspheres for superior close to room temperature ammonia sensor. *Sensors Actuators B Chemical*. 2022;359: 131365. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2022.131365>
12. Hu J., Xiong X., Guan W., Long H., Zhang L., Wang H. Self-templated flower-like WO<sub>3</sub>-In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hollow microspheres for conductometric acetone sensors. *Sensors Actuators B Chemical*. 2022;361(10): 131705. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2022.131705>
13. Sen S., Maity S., Kundu S. Fabrication of Fe doped reduced graphene oxide (rGO) decorated WO<sub>3</sub> based low temperature ppm level acetone sensor: Unveiling sensing mechanism by impedance spectroscopy. *Sensors Actuators B Chemical*. 2022;361(3): 131706. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2022.131706>
14. Wang X., Han W., Yang J., ... Lu G. Conductometric ppb-level triethylamine sensor based on macroporous WO<sub>3</sub>-W<sub>18</sub>O<sub>49</sub> heterostructures functionalized with carbon layers and PdO nanoparticles. *Sensors Actuators B Chem*. 2022;361(1): 131707. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2022.131707>
15. Liu Y., Li X., Li X., ... Liu Y. Highly permeable WO<sub>3</sub>/CuWO<sub>4</sub> heterostructure with 3D hierarchical porous structure for high-sensitive room-temperature visible-light driven gas sensor. *Sensors Actuators B Chemical*. 2022;365(4): 131926. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2022.131926>
16. Lee J., Kim S. Y., Yoo H. S., Lee W. Pd-WO<sub>3</sub> chemiresistive sensor with reinforced self-assembly for hydrogen detection at room temperature. *Sensors Actuators B Chemical*. 2022;368(6): 132236. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2022.132236>
17. Zhang Y., Wu C., Xiao B., ... Lin H. Chemo-resistive NO<sub>2</sub> sensor using La-doped WO<sub>3</sub> nanoparticles synthesized by flame spray pyrolysis. *Sensors Actuators B Chemical*. 2022;369(2): 132247. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2022.132247>
18. He M., Xie L., Zhao X., Hu X., Li S., Zhu Z.-G. Highly sensitive and selective H<sub>2</sub>S gas sensors based on flower-like WO<sub>3</sub>/CuO composites operating at low/room temperature. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019;788: 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.01.349>
19. Marikutsa A., Yang L., Kuznetsov A. N., Rumyantseva M., Gaskov A. Effect of W–O bonding on gas sensitivity of nanocrystalline Bi<sub>2</sub>WO<sub>6</sub> and WO<sub>3</sub>. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;856: 158159. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.158159>
20. Duong V. T., Nguyen C. T., Luong H. B., Nguyen D. C., Nguyen H. L. Ultralow-detection limit ammonia gas sensors at room temperature based on MWCNT/WO<sub>3</sub> nanocomposite and effect of humidity. *Solid State Sciences*. 2021;113(11): 106534. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2021.106534>
21. Zhang C., Wu K., Liao H., Debliquy M. Room temperature WO<sub>3</sub>-Bi<sub>2</sub>WO<sub>6</sub> sensors based on hierarchical microflowers for ppb-level H<sub>2</sub>S detection. *Chemical Engineering Journal*. 2022;430(P2): 132813. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132813>
22. Hwan Cho S., Min Suh J., Jeong B., ... Won Jang H. Fast responding and highly reversible gasochromic H<sub>2</sub> sensor using Pd-decorated amorphous WO<sub>3</sub> thin films. *Chemical Engineering Journal*. 2022;446(P1): 136862. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.136862>
23. Kumaresan M., Venkatachalam M., Saroja M., Gowthaman P. TiO<sub>2</sub> nanofibers decorated with mono-dispersed WO<sub>3</sub> heterostructure sensors for high gas

sensing performance towards H<sub>2</sub> gas. *Inorganic Chemistry Communications*. 2021;129(2): 108663. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2021.108663>

24. Chen L., Zhang Y., Sun B., ... Tian C. Surface modification of WO<sub>3</sub> nanoparticles with Pt and Ru for VOCs sensors. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*. 2022: 100143. <https://doi.org/10.1016/j.cjac.2022.100143>

25. Hu J., Xiong X., Guan W., Long H. Designed construction of PdO@WO<sub>3</sub> core-shell architecture as a high-performance acetone sensor. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021;9(6): 106852. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106852>

26. *Сенсорная электроника, датчики: твердотельные сенсорные структуры на кремнии: учебное пособие для вузов* / Э. П. Домашевская [и др.]; под редакцией А. М. Ховива. М: Издательство Юрайт, 2020. 203 с. Режим доступа: <https://urait.ru/bcode/518779>

27. Siciliano T., Tepore A., Micocci G., Serra A., Manno D., Filippo E. WO<sub>3</sub> gas sensors prepared by thermal oxidization of tungsten. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2008;133(1): 321–326. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2008.02.028>

28. Vallejos S., Khatko V., Calderer J., ... Correig X. Micro-machined WO<sub>3</sub>-based sensors selective to oxidizing gases. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2008;132(1): 209–215. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2008.01.044>

29. Zhang C., Boudiba A., Navio C., ... Debliquy M. Highly sensitive hydrogen sensors based on co-sputtered platinum-activated tungsten oxide films. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2010;36(1): 1107–1114. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.10.011>

30. Yakovlev P. V., Shaposhnik A. V., Voishchev V. S., Kotov V. V., Ryabtsev S. V. Determination of gases using polymer-coated semiconductor sensors. *Journal of Analytical Chemistry*. 2002;57(3): 276–279. <https://doi.org/10.1023/A:1014412919822>

31. Shaposhnik A. V., Moskalev P. V., Zviagin A. A., ... Vasiliev A. A. Selective determination of hydrogen sulfide using SnO<sub>2</sub>-Ag sensor working in non-stationary temperature regime. *Chemosensors*. 2021;9(8): 203. <https://doi.org/10.3390/chemosensors9080203>

32. Шапошник А. В., Звягин А. А., Васильев А. А. и др. Определение оптимальных температурных режимов работы полупроводниковых сенсоров. *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2008;8(3): 501–506. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11928774>

33. Shaposhnik A., Moskalev P., Sizask E., Ryabtsev S., Vasiliev A. Selective detection of hydrogen sulfide and methane by a single MOX-sensor. *Sensors (Switzerland)*. 2019;19(5): 1135. <https://doi.org/10.3390/s19051135>

### Информация об авторах

*Шапошник Алексей Владимирович*, д. х. н., профессор кафедры химии, Воронежский государственный аграрный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-1214-2730>  
a.v.shaposhnik@gmail.com

*Звягин Алексей Алексеевич*, к. х. н., доцент кафедры химии, Воронежский государственный аграрный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-9299-6639>  
a.a.zviagin@rambler.ru

*Рябцев Станислав Викторович*, д. ф.-м. н., заведующий лабораторией, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-7635-8162>  
ryabtsev@niif.vsu.ru

*Дьяконова Ольга Вячеславовна*, к. х. н., Воронежский государственный аграрный университет (Воронеж, Российская Федерация).

dyakol@yandex.ru

*Высоцкая Елена Анатольевна*, д. б. н., декан факультета технологии и товароведения Воронежский государственный аграрный университет (Воронеж, Российская Федерация).

murka1979@mail.ru

Поступила в редакцию 03.06.2023; одобрена после рецензирования 03.09.2023; принята к публикации 15.09.2023; опубликована онлайн 25.06.2024.

А. В. Ша  
Звягин<sup>1</sup>  
Дьяконо