



Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 543.061:547.281.1

Научная специальность ВАК – 1.4.1. Неорганическая химия

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/13328>

Биотемплатный синтез In_2O_3 -Pd для низкотемпературного сенсора водорода

А. В. Шапошник^{1✉}, О. А. Арефьева¹, А. А. Звягин¹, Н. Ю. Брежнев¹, Е. А. Высоцкая¹,
А. А. Васильев², С. В. Рябцев³, С. Ю. Турищев³

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

²ФГБОУ ВО «Университет «Дубна»»,
ул. Университетская, 19, Дубна 141982, Московская обл., Российская Федерация

³ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»,
Университетская пл., 1, Воронеж 394018, Российская Федерация

Аннотация

Цель статьи: Решение актуальной задачи создания компактных газоанализаторов, способных к длительной автономной работе в труднодоступных местах, связано с разработкой сенсоров, имеющих сниженное энергопотребление. Целью данной работы явилось создание низкотемпературного сенсора водорода, поскольку именно нагрев сенсора вносит определяющий вклад в энергопотребление всего прибора.

Экспериментальная часть: Для решения поставленной задачи была разработана новая методика синтеза наноматериала на основе In_2O_3 с добавкой 3 % палладия, существенно отличающаяся от распространенных методов – золь-гель синтеза и гидротермального синтеза. Это было связано с тем, что при низких температурах сенсора важнейшее значение приобретает минимизация влияния влажности. Проведение синтеза в водной среде приводит к появлению на поверхности большого количества гидроксильных групп, притягивающих воду. В нашей работе наноматериал был изготовлен прокаливанием целлюлозного волокна, предварительно пропитанного раствором нитрата индия (+3) и нитрата тетраамминпалладия (+2). По данным рентгеновского фазового анализа, порошок, прокаленный при температуре 500 °С, состоит преимущественно из триклинной фазы оксида индия (+3). По данным сканирующей электронной микроскопии, образцы во многом сохранили воспроизводимую характерную макроструктуру целлюлозного темплата. Электрофизические характеристики наноматериала, полученные при комнатной температуре, показали возможность определения водорода в воздухе. Предел обнаружения – менее 10 ppm.

Выводы: Чувствительность полученного нами сенсора водорода при комнатной температуре больше чувствительности сенсоров, описанными в других публикациях. Влияние влажности на показания сенсора сведено к минимуму.

Ключевые слова: металлоксидные сенсоры, биотемплатный синтез, водород, комнатная температура, оксид индия, палладий

Благодарности: СВР и СЮТ благодарят за поддержку грант Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект No FZGU-2023-0006) в части характеристики материала.

Для цитирования: Шапошник А. В., Арефьева О. А., Звягин А. А., Брежнев Н. Ю., Высоцкая Е. А., Васильев А. А., Рябцев С. В., Турищев С. Ю. Биотемплатный синтез In_2O_3 -Pd для низкотемпературного сенсора водорода. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2025;27(4): 689–695. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/13328>

For citation: Shaposhnik A. V., Arefieva O. A., Zviagin A. A., Brezhnev N. Ya., Vysotskaya E. A., Vasiliev A. A., Ryabtsev S. V., Turishchev S. Ya. Biotemplate synthesis of In_2O_3 -Pd for room temperature sensor of hydrogen. *Condensed Matter and Interphases*. 2025;27(4): 689–695. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/13328>

✉ Шапошник Алексей Владимирович, e-mail: a.v.shaposhnik@gmail.com

© Шапошник А. В., Арефьева О. А., Звягин А. А., Брежнев Н. Ю., Высоцкая Е. А., Васильев А. А., Рябцев С. В., Турищев С. В., 2025



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

1. Введение

Определение водорода и других горючих взрывоопасных газов в труднодоступных местах является важной практической задачей. Для решения этой задачи обычно используются газовые сенсоры – в первую очередь, термокаталитические, электрохимические и полупроводниковые. Преимуществом термокаталитических сенсоров является их простота и дешевизна, однако они не обладают высокой чувствительностью и селективностью. Преимущество электрохимических сенсоров, напоминающих по своему устройству топливные элементы, достаточно высокая чувствительность и селективность, однако они имеют и недостаток – ограниченность ресурса, связанную с расходом реагента. С помощью полупроводниковых сенсоров может быть достигнута и высокая чувствительность, и высокая селективность, однако их применение обычно связано с необходимостью поддержания рабочей температуры около 300 °С. Значительный расход электроэнергии затрудняет изготовление на основе полупроводниковых сенсоров автономных газоанализаторов, способных работать в труднодоступных местах длительное время.

Существует несколько подходов к решению проблемы снижения энергопотребления полупроводниковыми сенсорами. Один из них – миниатюризация сенсора, изготовление специальных диэлектрических подложек, имеющих низкую теплоемкость [1]. Второй подход – импульсный нагрев, позволяющий не только снизить энергопотребление, но и повысить в некоторых случаях чувствительность и селективность анализа [2]. Однако в последние годы появилось множество публикаций, авторы которых предлагают третий подход к решению проблемы – синтез газочувствительных материалов, способных проводить газовый анализ без нагрева сенсора. В англоязычной литературе в этом случае используется термин “room temperature sensor”. Подобные сенсоры могут применяться для определения в воздухе различных газов, как восстановителей, например, аммиака [3, 4, 5] и сероводорода [6, 7, 8], так и окислителей, таких, как NO_2 [9, 10, 11].

Были синтезированы газочувствительные материалы для низкотемпературных сенсоров водорода. Наночастицы PdO с добавкой палладия позволяют определять очень высокие концентрации водорода, более 1000 ppm при комнатной температуре [12]. Наноматериал на осно-

ве WO_3 , графена и палладия позволил получить отклик величиной в несколько процентов при концентрации водорода 10000 ppm и температуре 50 °С [13]. Отклик максенов состава Ti_2CTx по отношению к 1000 ppm водорода составил несколько процентов [14]. Материал на основе наносфер TiO_2 с добавками палладия позволил определять водород при концентрации 500 ppm [15]. Материал на основе наноиголок NiCo_2O_4 с добавкой палладия позволил уверенно определять водород при концентрации 100 ppm [16]. Наноматериал на основе WO_3 позволил получить сенсорный отклик 12 % при концентрации водорода 100 ppm [17]. Примерно такая же величина отклика у наноматериала на основе смешанных оксидов марганца и кобальта с добавкой восстановленного графена [18]. Значительно больший отклик к водороду у наноматериала на основе оксида вольфрама (VI) с добавкой палладия [19]. Довольно значительные отклики к водороду при комнатной температуре удалось получить при использовании наноматериалов на основе TiO_2 , однако для этого необходимо было использовать УФ-излучение для активации чувствительного материала и измерение импеданса [20].

Наноматериалы на основе оксида индия (III) находят широкое применение [21, 22]. Например, модифицированные серебром наноленты In_2O_3 при УФ-излучении были использованы для определения бутанола-1 [23]. Тонкопленочный оксид индия, полученный термическим напылением, позволил при комнатной температуре определять NO_2 и H_2S [24].

Важной проблемой при определении газов низкотемпературными (“room temperature”) полупроводниковыми сенсорами является миниатюризация влияния влажности среды. Наличие на поверхности металлоксидных полупроводников гидроксильных групп, образующихся при синтезе, делает их уязвимыми к сорбции воды, которая приводит к существенному повышению вклада ионной проводимости. Электрокондуктивный отклик полупроводниковых сенсоров основан на изменении концентрации электронов и изменении их подвижности, поэтому увеличение вклада ионной проводимости мешает проведению газового анализа. Таким образом, для получения газочувствительных материалов низкотемпературных сенсоров имеет смысл выбирать методы, в которых взаимодействие реагентов протекает не в водной среде. В большинстве работ, посвященных “room temperature

sensors”, не используется ни золь-гель синтез, ни гидротермальный синтез.

В данной работе синтез наноматериала In_2O_3 был проведен биотемплатным методом, который в последние годы находит самое разнообразное применение, например, для производства биокатализаторов, антибиотиков и антиканцерогенных медицинских препаратов [25]. Применяется биотемплатный синтез и для получения газочувствительных материалов. Например, материал на основе CeO_2 -ZnO пустотелых нитей был успешно использован для получения сенсора этанола [26]. Нанотрубки на основе SnO_2 позволили создать сенсор ацетона [27].

Цель нашей работы состояла не только в исследовании газовой чувствительности полученного материала по отношению к водороду, но также и в исследовании влияния влажности на фоновое сопротивление, поскольку эта проблема в публикациях, посвященных “room temperature sensors”, по непонятным причинам не рассматривается.

2. Экспериментальная часть

2.1. Изготовление материала

Навеску нитрата индия (CAS: 207398-97-8 $\text{InN}_3\text{O}_9 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ MW: 300.83 g/mol form: powder and chunks product of USA Sigma-Aldrich), соответствующую 0.05 моль(экв)/л, смешали с водным раствором уксусной кислоты (pH = 5). Смесь выдержали при комнатной температуре до полного растворения нитрата индия.

Листы беззольных целлюлозных фильтров (красная лента) промыли элюентом, смесью «бутанол – уксусная кислота» в объемном соотношении 1:4. В стакан 0.5 л налили 50 мл элюента, в раствор на глубину 1–2 см погрузили листы целлюлозы. Стакан закрыли стеклом и выдержали 5 часов. Далее листы извлекли из стакана, высушили, после сушки отрезали и удалили 2 см верхний части листов и далее нагревали 3 часа в сушильном шкафу при 105 °C.

В стакан налили 50 мл рабочего раствора нитрата индия, погрузили в него на глубину 1 см листы промытой, просушенной фильтровальной бумаги, закрыли и выдержали 2 часа. После пропитки целлюлозу извлекли из камеры и высушили при 105 °C в течение 3 часов, далее материал прокалили при 500 °C в течение 6 часов для выгорания целлюлозы и образования оксида индия:



2.2. Изготовление сенсора

Газочувствительный слой на основе In_2O_3 +Pd (массовая доля палладия 3 %) был создан путем обработки материала In_2O_3 раствором нитрата тетраамминпалладия (II). После сушки материал смешивали с терпениеолом, используемым в качестве вяжущего компонента, до образования пасты. На диэлектрическую подложку, выполненную из оксида алюминия, с платиновыми электродами и нагревателем наносили полученную пасту и прокаливали до температуры 750 °C, в результате чего терпениеол выгорал и на подложке образовывался полупроводниковый слой хрупкого геля оксида индия.

2.3. Характеризация материала

Характеризация структуры образца In_2O_3 была проведена методом рентгенофазного анализа (РФА) с помощью прибора ДРОН-4 с кобальтовым анодом. Последующая расшифровка полученных дифрактограмм выполнялась с использованием базы данных ICSD Database 2010-2).

Материал был исследован на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6380LV в режиме регистрации вторичных электронов.

2.4. Исследование сенсорных характеристик

Были использованы поверочные газовые смеси «водород в синтетическом воздухе» с концентрациями 10 ppm и 200 ppm. Для достижения нужной концентрации водорода поверочные газовые смеси разбавляли синтетическим воздухом. Часть потока синтетического воздуха пропускали через дистиллированную воду для увлажнения. После смешивания трех потоков – сухого воздуха, увлажненного воздуха и поверочной газовой смеси, влажность и температуру измеряли датчиком Honeywell HIH-4602-A. В камеру из нержавеющей стали помещали находящийся в металлическом корпусе ТО-8 сенсор.

С помощью специально разработанного устройства измеряли электрическое сопротивление газочувствительного слоя сенсора с частотой дискретизации 40 Гц и записывали в виде компьютерного файла.

Отклик сенсора S определяли как относительную разность электрической проводимости в газовой среде σ и в синтетическом воздухе σ_0 , что равнозначно относительной разности электрического сопротивления в газовой среде R и в синтетическом воздухе R_0 :

$$S = \frac{\sigma - \sigma_0}{\sigma_0} = \frac{R_0 - R}{R}. \quad (2)$$

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Морфология и структура материала

На рис. 1 показаны снимки образца оксида индия, полученные на сканирующем электронном микроскопе. Образцы во многом сохранили воспроизводимую характерную макроструктуру целлюлозного темплата. По своей морфологии изученный материал представляет агломерации волоконобразных объектов, каждый из которых изогнут или «закручен», иногда многократно, вдоль своей длины, составившей от единиц микрометра до нескольких десятков микрометров. При этом толщина достаточно плоских волокон может составлять и субмикронные значения при ширине в микрометры, образуя протяженные «листы». В отдельных областях агло-

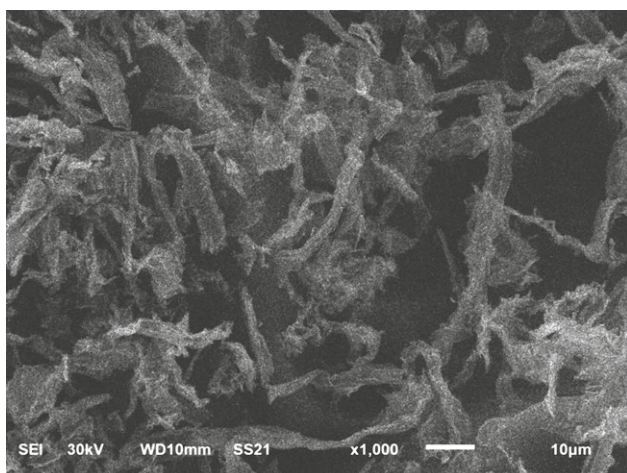


Рис. 1. СЭМ изображение материала In_2O_3 , полученного биотемплатным методом

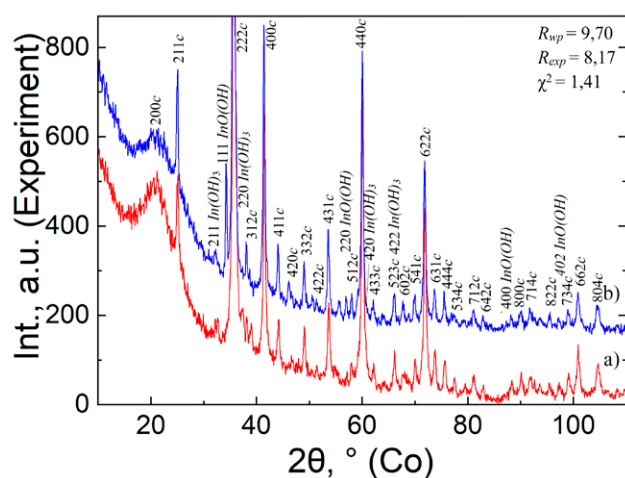


Рис. 2. Рентгенограмма нанопорошка, прокаленного при температуре 500 °С. Присутствующие соединения: с – In_2O_3 (кубическая, ПГ Ia); $\text{InO}(\text{OH})$ (кубическая, ПГ P2₁3); $\text{In}(\text{OH})_3$ (кубическая, ПГ Im)

мераций волокон отмечаются объекты малой толщины (размера) ~ 100 нм.

В результате расшифровки дифрактограмм установлено, что исследуемый образец практически полностью (более 95 %) представлен основной модификацией кристаллического оксида индия (III), которая является кубической (ПГ Ia). Кроме того, в малых количествах обнаружено присутствие смешанного оксид-гидроксида индия $\text{InO}(\text{OH})$ (кубическая, ПГ P2₁3, до 3 %), а также гидроксида индия $\text{In}(\text{OH})_3$ (кубическая, ПГ Im, менее 1 %), что может быть объяснено недостаточностью термической обработки по времени или температуре. Данные об R-факторах и добротности дифрактограммы также приведены на рис. 2.

3.2. Исследование сенсорных свойств

На рис. 3 показано электрическое сопротивление сенсора при добавлении в воздух водорода с концентрацией 10 ppm. Как и следовало ожидать, характер отклика донорный, приводящий к увеличению электрической проводимости сенсора. Это связано с тем, что оксид индия – полупроводник *n*-типа, а водород является восстановителем. Добавление водорода увеличивает концентрацию электронов в полупроводнике:



На рис. 4 показана градуировочная зависимость сенсора In_2O_3 +Pd при температуре 25 °С. Чувствительность сенсора в нашей работе выше, чем работах [12–18].

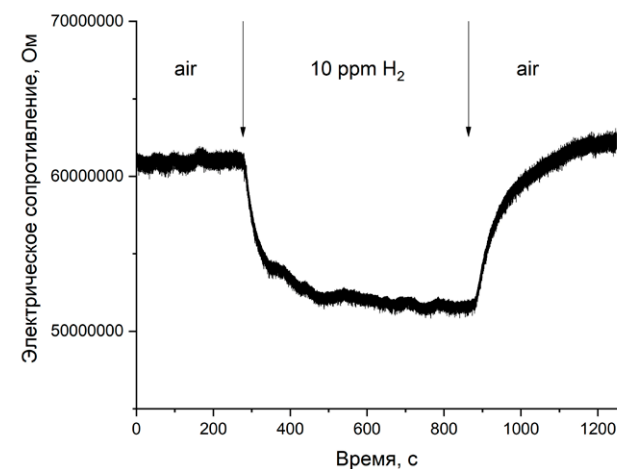


Рис. 3. Электрическое сопротивление сенсора In_2O_3 -Pd при добавлении водорода. Температура сенсора 25 °С, влажность воздуха 25 %

3.3. Исследование влияния влажности среды

Как уже было отмечено, важной проблемой низкотемпературных сенсоров является минимизация влияния влажности. На рис. 5 показана зависимость электрического сопротивления сенсора In_2O_3 -Pd от влажности при температуре 25 °C.

Как и следовало ожидать, повышение влажности приводит к существенному снижению электрического сопротивления, которое связано с появлением дополнительного (ионного) механизма проводимости, вызванного сорбцией воды на поверхности металлоксидного полупроводника [28]. Этот механизм вызван диссоциацией воды и появлением на поверхности значительного количества катионов водорода. Кроме того, перенос заряда может быть связан и транспортом гидроксид-анионов.

4. Заключение

Синтезированные биотемплатным методом образцы наноматериалов In_2O_3 -Pd показали возможность определения довольно низких концентраций водорода при комнатной температуре, поэтому они могут быть использованы для создания сенсоров, не требующих энергопотребления для нагрева.

Несмотря на выбор неводного метода синтеза и минимальное количество гидроксильных групп в составе металлоксидного полупроводника, сопротивление полученного сенсора существенно зависит от влажности, поэтому практическое применение соответствующего газоаналитического прибора возможно только с комбинации с датчиком влажности.

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. Kul O., Vasiliev A., Shaposhnik A. ... Simonenko E. Novel screen-printed ceramic MEMS microhotplate for MOS sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2024;379(8): 115907. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115907>
2. Shaposhnik A. V., Moskalev P. V., Zviagin A. A. ... Vasiliev A. A. Selective determination of hydrogen sulfide using SnO_2 -Ag sensor working in non-stationary temperature

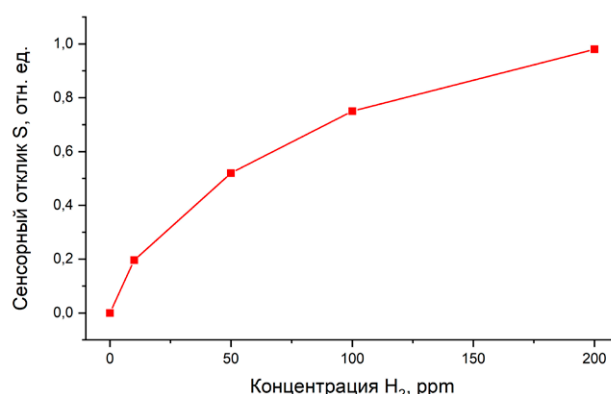


Рис. 4. Зависимость отклика сенсора In_2O_3 -Pd от концентрации водорода при температуре 25 °C

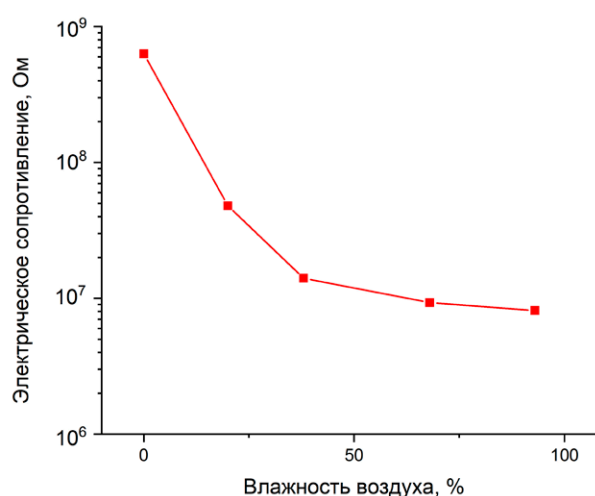


Рис. 5. Зависимость электрического сопротивления сенсора In_2O_3 -Pd от влажности воздуха при температуре 25 °C

regime. *Chemosensors*. 2021;9(8): 203. <https://doi.org/10.3390/chemosensors9080203>

3. Cai S., Huang X., Luo M. ... Gao Z. High-performance ammonia sensor at room temperature based on 2D conductive MOF $\text{Cu}_3(\text{HITP})_2$. *Talanta*. 2025;285(11): 127226 <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2024.127226>

4. Xue L., Zhang F., Dang J. ... Wang Q. Room-temperature NH_3 sensor with ppb detection via AACVD of nanosphere WO_3 on IO SnO_2 . *Ceramics International*. 2024;50(8): 47991–47999. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.09.146>

5. Tripathi S., Singh S. P., Tripathi S., Kumar A., Chauhan P. γ - WO_3 decorated MXene: an advanced nanomaterial for room temperature operable enhanced ammonia sensor. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2025;705(P1): 135538. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.135538>

6. Zhao W., Yao G., Wu H. ... Yu J. Chemiresistive room temperature H_2S sensor based on Cu_nO nanoflowers fabricated by laser ablation. *Sensors and Actuators B:*

Chemical. 2025;423: 136732. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2024.136732>

7. Huang C.-W., Wu C.-Y., Hsueh T.-J. Materials science in semiconductor processing a room temperature ZnO : Ga NWs & NSs / MEMS H_2S gas sensor. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2025;187(11): 109149. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2024.109149>

8. Bai H., Feng C., Chen Y.... Guo F. Chemiresistive room temperature H_2S gas sensor based on MoO_3 nanobelts decorated with MnO_2 nanoparticles. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2024;420(8): 136468. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2024.136468>

9. Hao X., Xing R. Fabrication of MoS_2 - Fe_3O_4 heterostructure as an ultrafast and high-sensitivity NO_2 gas sensor at room temperature. *Materials Letters*. 2024;377(8): 4–7. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2024.137387>

10. Ge C., Ni M., Liu S.,... Liu J. A room-temperature NO_2 gas sensor based on Zn^{2+} doped $\text{Cu}_2\text{O}/\text{CuO}$ composites with ultra-high response. *Ceramics International*. 2025;51 (2): 2194–2203. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.11.197>

11. Guo Y.-Y., Zheng X.-H., Bo L.-B., Gu Z.-Q., Zhang C., Liu Y.-F. UV-activated gas sensor based on ordered mesoporous ZnO – TiO_2 heterogeneous composites for trace NO_2 detection at room temperature. *Talanta*. 2025;285(10): 127415. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2024.127415>

12. Yang S., Chen G., Zheng F.... Zhang X. Pd-decorated PdO nanoparticle nanonetworks: a low-cost eye-readable H_2 indicator with reactivation ability. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2022;368(5): 132242. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2022.132242>

13. Wang L., An F., Liu X., Zhang D., Yang Z. Preparation and hydrogen-sensitive property of WO_3 /graphene/Pd ternary composite. *Chemosensors*. 2023;11(7). <https://doi.org/10.3390/chemosensors11070410>

14. Mokrushin A. S., Nagornov I. A., Gorobtsov P. Y. ... Kuznetsov N. T. Effect of $\text{Ti}_2\text{CT} \times \text{MXene}$ oxidation on its gas-sensitive properties. *Chemosensors*. 2023;11(1): 13. <https://doi.org/10.3390/chemosensors11010013>

15. Thathsara T, Harrison C. J., Hocking R. K., Shafiei M. Pd- and PdO-decorated TiO_2 nanospheres: hydrogen sensing properties under visible light conditions at room temperature. *Chemosensors*. 2023;11(7): 409. <https://doi.org/10.3390/chemosensors11070409>

16. Kim S.-H., Yun K.-S. Room-temperature hydrogen gas sensor composed of palladium thin film deposited on NiCo_2O_4 nanoneedle forest. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2023;376(PA): 132958. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2022.132958>

17. Shrisha Wu, C.-M., Motora K. G., Chen G.-Y., Kuo D.-H., Gultom N. S. Highly efficient reduced tungsten oxide-based hydrogen gas sensor at room temperature. *Materials Science and Engineering: B*. 2023;289: 116285. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2023.116285>

18. Maji B., Barik B., Sahoo S. J.,... Dash P. Shape selective comprehensive gas sensing study of different morphological manganese-cobalt oxide based nanocomposite as potential room temperature hydrogen gas sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2023;380: 133348. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2023.133348>

19. Lee J., Kim S. Y., Yoo H. S., Lee W. Pd- WO_3 chemiresistive sensor with reinforced self-assembly for hydrogen detection at room temperature. *Sensors and*

Actuators B: Chemical. 2022;368: 132236. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2022.132236>

20. Peng X., Wang Z., Huang P., Chen X., Fu X., Dai W. Comparative study of two different TiO_2 film sensors on response to H_2 under UV light and room temperature. *Sensors*. 2016;16(8): 1249. <https://doi.org/10.3390/s16081249>

21. Артамонова О. В., Альмяшева О. В., Миттова И. Ю., Гусаров В. В. Нанокристаллы на основе циркония в системе $\text{ZrO}_2 - \text{In}_2\text{O}_3$. Неорганические материалы. 2006;42(10): 1178–1181. <https://doi.org/10.1134/s0020168506100049> Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9274047>

22. Артамонова О. В., Альмяшева О. В., Миттова И. Я., Гусаров В. В. Спекание нанопорошков и свойства керамики в системе $\text{ZrO}_2 - \text{In}_2\text{O}_3$. Перспективные материалы. 2009;1: 91–94. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11779849>

23. Meng F., Li M., Zhang R., Yuan Z. Room temperature n-butanol detection by Ag-modified In_2O_3 gas sensor with UV excitation. *Ceramics International*. 2025;51(2): 1764–1773. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.11.152>

24. Roopa, Kumar Pradhan B., Kumar Mauraya A., Chatterjee K., Pal P., Kumar Muthusamy S. High-sensitive and fast-responsive In_2O_3 thin film sensors for dual detection of NO_2 and H_2S gases at room temperature. *Applied Surface Science*. 2024;678: 161111. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.161111>

25. Kahandal A., Chaudhary S., Methe S., Nagwade P., Sivaram A., Tagad C. K. Galactomannan polysaccharide as a biotemplate for the synthesis of zinc oxide nanoparticles with photocatalytic, antimicrobial and anticancer applications. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2023;253(P3): 126787. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126787>

26. Yan S., Ma S., Xu X.,... Yang H. Synthesis and gas sensing application of porous CeO_2 -ZnO hollow fibers using cotton as biotemplates. *Materials Letters*. 2016;165: 9–13. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.11.095>

27. Song B. Y., Huang J., Cui Z. Q.... Gao S. Temperature-controlled dual-selectivity nitric oxide/acetone sensor constructed from mesoporous SnO_2 tubes doped by biomass-derived graphitic carbon. *Applied Surface Science*. 2023;623(3): 157009. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2023.157009>

28. Shaposhnik A. V., Moskalev P. V., Arefieva O. A., Zvyagin A. A., Kul O. V., Vasiliev A. A. Selective determination of hydrogen in a mixture with methane using a single metal oxide sensor. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;82: 523–530. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.07.379>

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

Арефьева Олеся Анатольевна, аспирант кафедры химии, Воронежский государственный аграрный университет, (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0009-0000-9629-2615>

behappy.89@mail.ru

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

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

Брежнев Николай Юрьевич, к. х. н., старший преподаватель кафедры химии, Воронежский государственный аграрный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-3287-8614>
brezhnevnick@gmail.com

Высоцкая Елена Анатольевна, д. б. н., профессор кафедры процессов и аппаратов перерабатывающих производств, Воронежский государственный аграрный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0009-0005-5992-7139>
Murka1979@mail.ru

Васильев Алексей Андреевич, д. т. н., заведующий лабораторией сенсорных систем Государственного университета «Дубна» (Дубна, Московская обл., Российская Федерация).

<http://orcid.org/0000-0002-7416-1638>
A-A-Vasiliev@yandex.ru

Рябцев Станислав Викторович, д. ф.-м. н., директор института физики, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

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

Турищев Сергей Юрьевич, д. ф.-м. н., доцент, заведующий кафедрой общей физики и физического материалообразования, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-3320-1979>
tsu@phys.vsu.ru

Поступила в редакцию 03.04.2025; одобрена после рецензирования 21.04.2025; принята к публикации 15.05.2025; опубликована онлайн 25.12.2025