



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 541.183

doi: 10.17308/sorpchrom.2023.23/11001

Определение сероводорода в воздухе полупроводниковым сенсором на основе оксида индия

Алексей Владимирович Шапошник¹✉,

Алексей Алексеевич Звягин¹, Станислав Викторович Рябцев²

¹Воронежский государственный аграрный университет, Воронеж, Россия, a.v.shaposhnik@gmail.com

²Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

Аннотация. Сероводород является токсичным газом, который может попасть в воздух при добыче нефти и природного газа, в металлургических производствах, а также при хранении и переработке техногенных и бытовых отходов. Определение сероводорода в атмосфере является актуальной задачей аналитической химии. Для осуществления непрерывного мониторинга содержания сероводорода в труднодоступных местах не подходят такие известные методы, как хроматография или масс-спектрометрия, поэтому возникла практическая задача создания недорогого химического сенсора, обладающего достаточно высокой чувствительностью и селективностью. В нашей работе были синтезированы газочувствительные материалы на основе In_2O_3 с каталитическими добавками - палладием (который содержится преимущественно в виде оксида PdO) и серебром (преимущественно в виде оксида Ag_2O). Синтез проводился в несколько этапов, первый из которых включал получение золя $\text{In}(\text{OH})_3$. После центрифугирования проводилась термообработка гидроксида индия, в результате которого был получен нанопорошок оксида индия. Полученный материал были охарактеризованы с помощью просвечивающей электронной микроскопии и рентгеновского фазового анализа. В дальнейшем нанопорошок оксида индия смешивался с каталитическими добавками и связывающим веществом до образования пасты. Газочувствительный материал был получен в результате отжига пасты при температуре 750°C . Были исследованы сенсорные свойства газочувствительных материалов по отношению к сероводороду, а также по отношению к угарному газу при нестационарных температурных режимах – нагрев до температуры 450°C в течение 2 секунд и охлаждение до температуры 100°C в течение 13 секунд. Показано, что материалы на основе нанодисперсного оксида индия имеют высокую чувствительность по отношению к сероводороду, а также высокую селективность.

Ключевые слова: металлоксидные сенсоры, сероводород, синтез оксида индия, характеристика оксида индия, чувствительность, нестационарный температурный режим.

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-03-00901

Для цитирования: Шапошник А.В., Звягин А.А., Рябцев С.В. Определение сероводорода в воздухе полупроводниковым сенсором на основе оксида индия // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2023. Т. 23, № 1. С. 138-146. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11001>

Original article

Determination of hydrogen sulfide in the air with a semiconductor sensor based on indium oxide

Alexey V. Shaposhnik¹✉, **Alexey A. Zvyagin¹, Stanislav V. Ryabtsev²**

¹Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia,

a.v.shaposhnik@gmail.com✉

²Voronezh State University, Voronezh, Russia



Abstract. Hydrogen sulphide is a toxic gas that can get into the air during the extraction of oil and natural gas, in metallurgical industries, as well as during the storage and processing of man-made and household waste. Determination of hydrogen sulphide in the atmosphere is an urgent task of analytical chemistry. For the continuous monitoring of hydrogen sulphide content in low-accessibility areas, such well-known methods as chromatography or mass spectrometry are not suitable, therefore, a practical task of the production of an inexpensive chemical sensor with sufficiently high sensitivity and selectivity appeared. In our study, we synthesized gas sensitive materials based on In_2O_3 with catalytic additives – palladium (which is contained mainly in the form of PdO) and silver (mainly in the form of Ag_2O). The synthesis was carried out in several stages, the first stage included the preparation of $\text{In}(\text{OH})_3$ sol. After centrifugation, the heat treatment of indium hydroxide was carried out, as a result of which indium oxide nanopowder was obtained. The resulting material was characterized by transmission electron microscopy and X-ray phase analysis. Subsequently, the indium oxide nanopowder was mixed with catalytic additives and a binder to form a paste. The gas-sensitive material was obtained by annealing of the paste at a temperature of 750°C .

The sensory properties of gas-sensitive materials with respect to hydrogen sulphide and carbon monoxide under non-stationary temperature conditions - heating to a temperature of 450°C for 2 seconds and cooling to a temperature of 100°C for 13 seconds were investigated. It was shown that materials based on nanodispersed indium oxide have a high sensitivity to hydrogen sulphide, as well as high selectivity.

Keywords: metal oxide sensors, hydrogen sulphide, indium oxide synthesis, indium oxide characterization, sensitivity, non-stationary temperature regime.

Acknowledgments: the study was funded by the Russian Foundation for Basic Research, project No. 20-03-00901.

For citation: Shaposhnik A.V., Zvyagin A.A., Ryabtsev S.V. Determination of hydrogen sulfide in the air with a semiconductor sensor based on indium oxide. *Sorbtsionnyye i khromatograficheskiye protsessy*. 2023. 23(1): 138-146. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11001>

Введение

Сероводород образуется в результате метаболизма и выполняет ряд жизненно важных функций в организме, но вместе с тем он является довольно сильным нервно-паралитическим ядом, вдыхание которого при концентрации 1-10 ppm вызывает головокружение, головную боль, тошноту и рвоту. При концентрации 10-100 ppm сероводород может вызвать кому, судороги и отек легких, а при концентрации сероводорода в воздухе свыше 100 ppm отравление развивается почти мгновенно: судороги и потеря сознания оканчиваются смертью от остановки дыхания.

Сероводород обладает сильным запахом, однако при вдыхании воздуха с достаточно большой концентрацией из-за паралича обонятельного нерва запах почти сразу перестает ощущаться. Сероводород присутствует в составе природного газа и попутных нефтяных газов, иногда в весьма значительных количествах. Сероводород образуется в металлургии, а

также при хранении и переработке техногенных отходов. Кроме того, сероводород выделяется при гниении белков [1].

Задача определения малых концентраций сероводорода в воздухе является актуальной виду опасности отравления организма человека. Сероводород является также биомаркером состояния организма. Кроме того, определение сероводорода может быть использовано для контроля качества пищевых продуктов.

Существуют методы газового анализа, сочетающие высокую чувствительность и селективность – газовая хроматография, масс-спектрометрия, хромато-масс-спектрометрия, однако все эти приборы не только имеют высокую стоимость, но также требуют высококвалифицированного обслуживания. Для непрерывного мониторинга атмосферы в труднодоступных местах необходимо разрабатывать компактные недорогие газоанализаторы на основе химических сенсоров. Для определения сероводорода могут быть использованы, например, полупроводниковые или электрохимические сенсоры. Преимуществом полупроводниковых

сенсоров перед электрохимическими является более низкая стоимость, а также возможность непрерывной работы в течение длительного времени.

Сенсорный отклик в полупроводниковых металлоксидных сенсорах связан с изменением электропроводности, вызванной окислительно-восстановительными реакциями на поверхности. Для определения сероводорода обычно используются газочувствительные материалы особого состава, включающие, например, оксиды меди или серебра. Это связано с тем, что сорбция сероводорода может приводить не только к его окислению до оксидов серы, но также и к изменению фазового состава, обратимому превращению оксидов в сульфиды, обладающие высокой электропроводностью. Данный процесс может давать дополнительный вклад в сенсорный отклик. Например, добавки оксида меди (+2) приводят к изменению состава газочувствительного слоя при сорбции сероводорода [2-3].

Наиболее распространенным материалом для сенсоров сероводорода является диоксид олова с добавкой оксида меди (+2). Высокую чувствительность и селективность показали, в частности, полученные электроспиннингом нановолокна SnO₂, покрытые CuO [4-5]. Были получены сенсоры на H₂S на основе нанонитей SnO₂, покрытых наночастицами CuO [6-7], исследован механизм сенсорного отклика на сероводород тонких пленок SnO₂:CuO, полученных термическим распылением [8]. Газочувствительный материал на основе полых наносфер, покрытых CuO, успешно использовался для определения сероводорода в медицинской диагностике [9]. Многослойная структура SnO₂-CuO показала отклик более четырех порядков по отношению к 20 ppm H₂S в сочетании с низким временем отклика [10]. Было рассмотрено влияние взаимной диффузии наночастиц SnO₂ и CuO на сенсорные свойства по отноше-

нию к сероводороду [11]. Были исследованы также сенсорные свойства тонкослойных наноструктур на основе CuO/SnO₂ [12]. Однако наиболее распространенный способ изготовления нанокомпозитов SnO₂/CuO – золь-гель процесс [13].

Наряду с добавками оксида меди, для определения сероводорода используются сенсоры с добавкой серебра. Так же, как и оксид меди, оксид серебра способен обратимо переходить в сульфид серебра, имеющий высокую электропроводность. Переход оксида серебра в сульфид вносит большой вклад в аналитический сигнал сенсора [14-15]. Добавление серебра к нанокристаллическому SnO₂ увеличивает отклик на сероводород [16-18].

Для определения сероводорода использовался чистый SnO₂ [19], а также SnO₂ с добавкой платины [20], или фуллеренов [21]. Оксид меди в некоторых случаях являлся не добавкой к другим металлоксидным материалам, а основой сенсора, например, высокочувствительный сенсор был получен на базе легированных палладием «наноцветков» из CuO [22]. Исследовались сенсорные свойства неспеченных нанонитей оксида меди (+2) [23].

Известно, что переход от обычных стационарных температурных режимов к нестационарным нередко приводит к весьма значительному повышению чувствительности [24]. Как показано в нашей работе, использование нестационарных температурных режимов способствует также и повышению селективности анализа сероводорода.

Экспериментальная часть

1.25 г нитрата индия (CAS: 207398-97-8 In₃O₉·nH₂O Sigma-Aldrich) растворили в 250 мл ледяной уксусной кислоты. К полученному раствору, охлажденному до 8-10°C, добавляли по каплям водный раствор аммиака (w=25%) до достижения изоэлектрической точки гидроксида индия (pH=6):

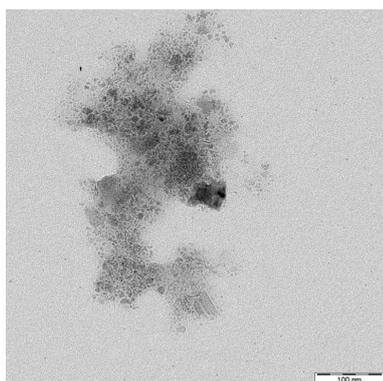
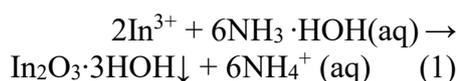


Рис. 1. Изображение частиц порошка оксида индия, полученное с помощью просвечивающего электронного микроскопа

Fig. 1. Image of indium oxide powder particles obtained using a transmission electron microscope



Добавление аммиака происходило при непрерывном перемешивании, температура реакционной смеси 8-10°C поддерживалась постоянной. Образовавшийся золь гидроксида индия осаждали центрифугированием, после этого надосадочный раствор удалили, а осадок с остатками раствора перенесли в выпаривательную чашку и сушили при 80°C в течение 12 ч. Далее просушенный материал прокаливали в течение 8 часов при температурах 300°C (образец 1) и дополнительно 6 часов при 500°C (образец 2). В результате отжига происходило образование порошка оксида индия:



Полученный порошок оксида индия был исследован с помощью просвечивающей электронной микроскопии (рис. 1). Характеризация образцов In_2O_3 , полученных при температурах отжига 300 и 500°C, проведена методом рентгенофазного анализа (РФА) с помощью прибора ДРОН-4 с медным анодом. Расшифровку полученных дифрактограмм выполняли с использованием базы Powder Diffraction File (PDF-2). В результате расшифровки

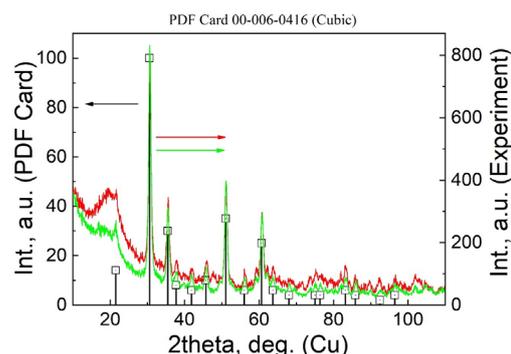


Рис. 2. Рентгеновский фазовый анализ порошка оксида индия

Fig. 2. X-ray phase analysis of indium oxide powder

дифрактограмм установлено, что оба образца (300 и 500°C) имеют кубическую сингонию. По левой оси ординат рисунка 2 отложены данные PDF карты In_2O_3 кубической модификации, по правой оси ординат – экспериментальные данные РФА.

Для получения газочувствительного слоя на основе оксида индия с добавками оксида серебра порошок оксида индия обрабатывали раствором нитрата серебра, просушивали, после чего к порошку добавляли терпениол в качестве связующего компонента. Полученную пасту наносили на диэлектрическую подложку, сделанную из оксида алюминия со специальными платиновыми электродами для измерения электропроводности, а также с платиновым нагревателем. Подложка с нанесенной на нее пастой прокаливалась до температуры 750°C, в результате чего связующий компонент выгорал и образовывался гель оксида индия с добавкой серебра.

Получение газочувствительного слоя на основе оксида индия с добавками оксида палладия проводили по той же методике, но порошок оксида индия вместо раствора нитрата серебра обрабатывали раствором нитрата тетраамминпалладия (II).

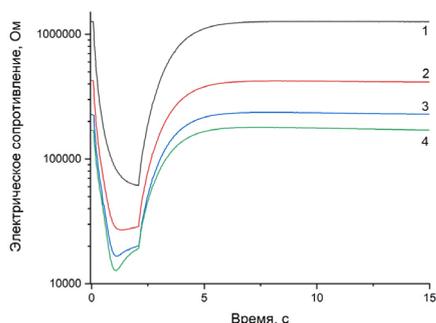


Рис. 3. Зависимость электрического сопротивления сенсора $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Pd}$ от времени на протяжении одного цикла измерений при изменении температуры от 100 до 450 градусов: 1 – синтетический воздух; 2 – 5 ppm H_2S ; 3 – 20 ppm H_2S ; 4 – 50 ppm H_2S

Fig. 3. Time dependence of the electrical resistance of $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Pd}$ sensor during one measurement cycle when the temperature changed from 100 to 450 degrees: 1 – synthetic air; 2 – 5 ppm H_2S ; 3 – 20 ppm H_2S ; 4 – 50 ppm H_2S

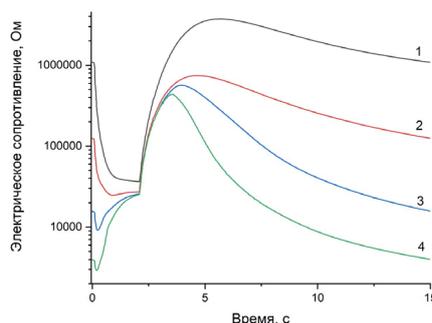


Рис. 4. Зависимость электрического сопротивления сенсора $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Ag}$ от времени на протяжении одного цикла измерений при изменении температуры от 100 до 450 градусов: 1 – синтетический воздух; 2 – 5 ppm H_2S ; 3 – 20 ppm H_2S ; 4 – 50 ppm H_2S .

Fig. 4. Time dependence of the electrical resistance of the $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Ag}$ sensor during one measurement cycle when the temperature changed from 100 to 450 degrees: 1 - synthetic air; 2 – 5 ppm H_2S ; 3 – 20 ppm H_2S ; 4 - 50 ppm H_2S .

Для исследования сенсорных свойств полученных материалов использовали поверочные газовые смеси «сероводород в синтетическом воздухе» и «угарный газ в синтетическом воздухе» с концентрациями 10 и 200 ppm, которые разбавляли синтетическим воздухом. Общая скорость протока составляла $250 \text{ см}^3/\text{мин}$. Сенсор, находящийся в металлическом корпусе ТО-8, был помещен в камеру из нержавеющей стали. Его температуру устанавливали с помощью специального электронного устройства на основе полученного в предварительных измерениях температурного коэффициента сопротивления нагревателя.

Электрическое сопротивление газочувствительного слоя определяли с помощью специального электронного устройства с частотой до 40 Гц и записывали в виде компьютерного файла. Длительность каждого цикла измерений составляла 15 секунд, из которых 2 секунды продолжался нагрев от 100 до 450°C , а следующие 13 секунд – охлаждение от 450 до 100°C . Циклы нагрев-охлаждение

следовали друг за другом без перерыва. Результаты измерений, полученные в первых пяти циклах, отбрасывались. Для количественного анализа использовали только одну из 575 точек цикла, соответствующую времени 14.95 секунд после начала цикла.

Отклик S вычисляли как отношение электрического сопротивления R_0 в чистом воздухе к электрическому сопротивлению R_g в исследуемой газовой среде:

$$S = R_0/R_g. \quad (3)$$

Обсуждение результатов

На рис. 3 показаны зависимости электрического сопротивления $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Pd}$ сенсора от времени на протяжении одного цикла измерений для разных концентраций сероводорода. Как следует из рисунка, увеличение концентрации сероводорода приводит не только к значительному увеличению отклика, меняется также и форма кривых на начальном участке кривой, соответствующей нагреву сенсора от 100 до 450°C .

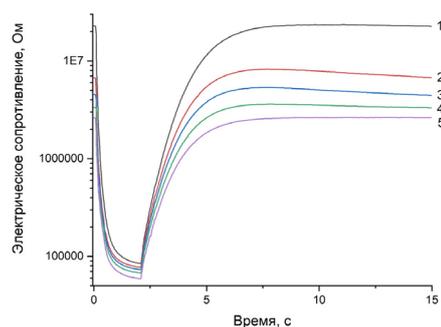


Рис. 5. Зависимость электрического сопротивления сенсора $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Pd}$ от времени на протяжении одного цикла измерений при изменении температуры от 100 до 450 градусов: 1 – синтетический воздух; 2 – 5 ppm CO; 3 – 10 ppm CO; 4 – 20 ppm CO; 4 – 50 ppm CO.

Fig. 5. Time dependence of the electrical resistance of the $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Pd}$ sensor during one measurement cycle when the temperature changed from 100 to 450 degrees:

1 – synthetic air; 2 – 5 ppm CO; 3 – 10 ppm CO; 4 – 20 ppm CO; 4 – 50 ppm CO

На рис. 4 показаны зависимости электрического сопротивления $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Ag}$ сенсора от времени на протяжении одного цикла измерений для разных концентраций сероводорода. Форма кривых сенсора $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Ag}$ (рис. 4) значительно отличается от форм кривых сенсора $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Pd}$ (рис. 3), что указывает на отличие механизмов процессов хемосорбции для различных газочувствительных материалов не только в среде сероводорода, но и в воздухе.

Для того, чтобы оценить селективность анализа сероводорода, было также проведено определение угарного газа. На рисунке 5 показаны зависимости электрического сопротивления $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Pd}$ сенсора от времени на протяжении одного цикла измерений для разных концентраций угарного газа.

Существуют два подхода к селективному определению газов с помощью сенсоров. Первый из них основан на использовании малоселективных сенсоров, к которым, например, можно отнести $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Pd}$.

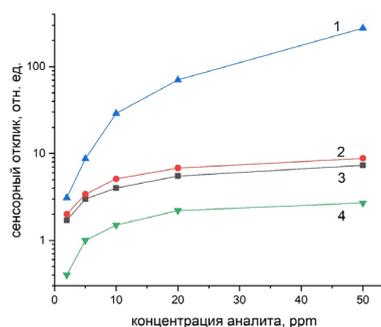


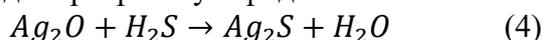
Рис. 6. Зависимость откликов сенсора $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Ag}$ (кривые 1 и 4) и сенсора $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Pd}$ (кривые 2 и 3) от концентрации сероводорода (кривые 1 и 3) и угарного газа (кривые 2 и 4).

Fig. 6. Dependence of responses $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Ag}$ sensor (curves 1 and 4) and $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Pd}$ sensor (curves 2 and 3) on the concentration of hydrogen sulphide (curves 1 and 3) and carbon monoxide (curves 2 and 4).

Как показано на рисунке 6, отклики такого сенсора при определении угарного газа (кривая 2) и при определении сероводорода (кривая 3) почти не отличаются, однако отличается форма кривых, особенно на участке нагрева, в течение первых двух секунд (рис.3 и рис.5). Отличие форм кривых предоставляет принципиальную возможность для селективного анализа при условии последующей обработки полученных многомерных массивов данных [24]. Качественный и количественный анализ различных газовых сред может быть осуществлен в этом случае с помощью единственного газового сенсора, и оптимальным допантом для металлоксидных полупроводников типа SnO_2 , ZnO , WO_3 или, как в данном случае, In_2O_3 , является универсальный и весьма эффективный катализатор палладий.

Однако существует и другой подход для проведения селективного использования, он основан на получении высоко-селективных сенсоров. Как показано на рисунке 6, отклики сенсора $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Ag}$ при

определении сероводорода значительно превышают отклики того же сенсора при определении угарного газа. Таким образом, сенсор $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Ag}$ может быть использован для селективного определения сероводорода. Это связано с тем, что наряду с обычным механизмом возникновения донорного сенсорного отклика – окислительно-восстановительными процессами на поверхности, приводящими к снижению электрического сопротивления полупроводника n-типа, реализуется дополнительный механизм, вызванный процессами обратимого превращения оксида серебра в сульфид:



Сульфид серебра обладает высокой электропроводностью, поэтому его образование приводит к повышению концентрации электронов во всем газочувствительном материале (донорный отклик).

Заключение

Нанопорошки оксида индия получены осаждением из жидкой фазы с последующим центрифугированием, высушиванием и прокаливанием, после чего охарактеризованы с помощью просвечивающей электронной микроскопии и рентгеновского фазового анализа. Из нанопорошков оксида индия получены пасты в результате добавления катализаторов (палладия и серебра), а также связующей

добавки. Газочувствительные слои сенсоры сформированы в результате нанесения пасты на специальную диэлектрическую подложку с электродами и нагревателем и последующего прокаливания до температуры 750°C .

Сенсорный материал на основе оксида индия с добавкой палладия показал высокую чувствительность по отношению к сероводороду и угарному газу. В этом случае селективность анализа может быть достигнута анализом форм полученных кривых электрического сопротивления сенсора от времени.

Сенсорный материал на основе оксида индия с добавкой серебра показал высокую чувствительность по отношению к сероводороду и низкую чувствительность по отношению к угарному газу. В этом случае селективное определение сероводорода можно проводить без сложной математической обработки массивов многомерных данных.

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/References

1. Guidotti, T.L. Hydrogen sulfide: Advances in understanding human toxicity. *Int. J. Toxicol.* 2010; 29: 569-581.
2. Maekawa T. et al. Sensing Behavior of CuO-Loaded SnO_2 Element for H_2S Detection. *Chemistry Letters.* 1991; 20(4): 575-578.
3. Tamaki J. et al. CuO- SnO_2 element for highly sensitive and selective detection of H_2S . *Sensors Actuators B. Chem.* 1992; 9(3): 197-203.
4. Choi S.W. et al. H_2S sensing performance of electrospun CuO-loaded SnO_2 nanofibers. *Sensors Actuators, B*

Chem. 2012; 169: 54-60.

5. Zhao Y. et al. Porous CuO/ SnO_2 composite nanofibers fabricated by electrospinning and their H_2S sensing properties. *Sensors Actuators, B Chem.* 2012; 165(1): 82-87.

6. Shao F. et al. Heterostructured p-CuO (nanoparticle)/n- SnO_2 (nanowire) devices for selective H_2S detection. *Sensors Actuators, B Chem.* 2013; 181: 130-135.

7. Hwang I.S. et al. Enhanced H_2S sensing characteristics of SnO_2 nanowires functionalized with CuO. *Sensors Actuators, B Chem.* 2009; 142(1): 105-110.

8. Katti V.R. et al. Mechanism of drifts in H_2S sensing properties of $\text{SnO}_2\text{:CuO}$



composite thin film sensors prepared by thermal evaporation. *Sensors Actuators, B Chem.* 2003; 96(1-2): 245-252.

9. Choi K. Il et al. Ultrasensitive and ultrasensitive detection of H₂S in highly humid atmosphere using CuO-loaded SnO₂ hollow spheres for real-time diagnosis of halitosis // *Sensors Actuators, B Chem.* 2014; 194: 371-376.

10. Verma M.K., Gupta V. A highly sensitive SnO₂-CuO multilayered sensor structure for detection of H₂S gas. *Sensors Actuators, B Chem.* 2012; 166-167: 378-385.

11. Vasiliev R.B. et al. Effect of interdiffusion on electrical and gas sensor properties of CuO/SnO₂ heterostructure. *Mater. Sci. Eng. B.* 1999; 57(3): 241-246.

12. Vasiliev R.B. et al. CuO/SnO₂ thin film heterostructures as chemical sensors to H₂S. *Sensors Actuators, B Chem.* 1998; 50 B50(3); 186-193.

13. Malyshev V.V., Pisyakov A.V. SnO₂-based thick-film-resistive sensor for H₂S detection in the concentration range of 1-10 mg m⁻³. *Sensors Actuators, B Chem.* 1998; 47(1-3): 181-188.

14. Lantto V., Mizsei J. H₂S monitoring as an air pollutant with silver-doped SnO₂ thin-film sensors. *Sensors Actuators B. Chem.* 1991; 5(1-4): 21-25.

15. Harkoma-Mattila A. et al. Sensitivity and selectivity of doped SnO₂ thick-film sensors to H₂S in the constant- and pulsed-temperature modes. *Sensors Actuators B. Chem.* 1992; 6(1-3): 248-252.

16. Gong J. et al. Micromachined nanocrystalline silver doped SnO₂ H₂S sensor. *Sensors Actuators, B Chem.* 2006; 114(1): 32-39.

17. Ngoc T.M. et al. Self-heated Ag-decorated SnO₂ nanowires with low power

consumption used as a predictive virtual multisensor for H₂S-selective sensing. *Anal. Chim. Acta.* 2019; 1069: 108-116.

18. Kolhe P.S. et al. Synthesis of Ag doped SnO₂ thin films for the evaluation of H₂S gas sensing properties. *Phys. B Condens. Matter.* 2017; 524(June): 90-96.

19. Song B.Y. et al. Highly selective ppb-level H₂S sensor for spendable detection of exhaled biomarker and pork freshness at low temperature: Mesoporous SnO₂ hierarchical architectures derived from waste scallion root. *Sensors Actuators, B Chem.* 2020; 307(December 2019): 127662.

20. Sberveglieri G. et al. Detection of sub-ppm H₂S concentrations by means of SnO₂(Pt) thin films, grown by the RGTO technique. *Sensors Actuators B. Chem.* 1993; 15(1-3): 86-89.

21. Keshtkar S. et al. A novel highly sensitive and selective H₂S gas sensor at low temperatures based on SnO₂ quantum dots-C60 nanohybrid: Experimental and theory study. *Talanta.* 2018; 188: 531-539.

22. Hu X. et al. Highly sensitive H₂S gas sensors based on Pd-doped CuO nanoflowers with low operating temperature. *Sensors Actuators, B Chem.* 2017; 253: 809-817.

23. Hu Q. et al. Binder-free CuO nanoneedle arrays based tube-type sensor for H₂S gas sensing. *Sensors Actuators, B Chem.* 2021; 326(June 2020): 128993.

24. Shaposhnik A. et al. Selective detection of hydrogen sulfide and methane by a single MOX-sensor. *Sensors (Switzerland).* 2019; 19(5): 1135.

Информация об авторах / Information about the authors

А.В. Шапошник – д.х.н., заведующий кафедры химии Воронежского государственного аграрного университета, Воронеж, Россия

А.А. Звягин – к.х.н., доцент кафедры химии кафедры химии Воронежского государственного аграрного университета, Воронеж, Россия

A.V. Shaposhnik – Doctor of Chemistry, Head of Department of Chemistry Voronezh State Agrarian University, Voronezh, Russia, E-mail: a.v.shaposhnik@gmail.com

A.A. Zviagin – Candidate of Chemical Sciences. Associate Professor of Department of Chemistry



С.В. Рябцев – д.ф.-м.н., заведующий лабораторией физического факультета Воронежского государственного университета, Воронеж, Россия

Voronezh State Agrarian University, Voronezh, Russia, E-mail: a.a.zviagin@rambler.ru

S.V. Ryabtsev – Doctor of Physics and mathematics, Head of Laboratory of Physics Faculty of Voronezh State University, Voronezh, Russia, E-mail: ryabtsev@phys.vsu.ru

Статья поступила в редакцию 18.12.2022; одобрена после рецензирования 11.01.2023; принята к публикации 25.01.2023.

The article was submitted 18.12.2022; approved after reviewing 11.01.2023; accepted for publication 25.01.2023.