

УЛУЧШЕНИЕ СЕНСОРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БИНАРНЫХ И ТРОЙНЫХ ОКСИДНЫХ НАНОСИСТЕМ

З.В. Шомахов¹, С.С. Налимова², А.А. Рыбина², С.С. Бузовкин², З.Х. Калажоков¹,
В.А. Мошников²

¹ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет
им. Х.М. Бербекова»

360004, Россия, Кабардино-Балкарская республика, Нальчик, ул. Чернышевского, 173

²ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5 лит. Ф
shozamir@yandex.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.879

Аннотация: В настоящее время адсорбционные газовые сенсоры представляют большой интерес для мониторинга состояния окружающей среды. Среди подходов к улучшению их свойств выделяют синтез наноструктурированных материалов различной формы и модифицирование химического состава оксидов металлов. Целью этой работы является разработка способов улучшения сенсорных свойств наностержней оксида цинка за счет изменения структуры поверхности при обработке в растворах соединений олова и железа, а также добавлении дополнительных прекурсоров непосредственно при их синтезе. Слои, состоящие из наностержней оксида цинка, получены гидротермальным методом. На их основе синтезированы тройные оксидные наносистемы $Zn-Sn-O$ и $Zn-Fe-O$ при обработке наностержней оксида цинка в растворах, содержащих станнат калия и сульфат железа, соответственно. Также наностержни были получены синтезом из раствора, содержащего, помимо основных прекурсоров, бромид натрия. Химический состав поверхности проанализирован с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Сенсорные свойства исследованы при детектировании паров ацетона, изопропанола и метанола. Показано, что сенсорный отклик полученных образцов превышает отклик исходных наностержней оксида цинка. Наилучшим откликом обладают образцы тройной оксидной системы $Zn-Sn-O$. Улучшение сенсорного отклика может быть связано с увеличением содержания адсорбированных ионов кислорода на поверхности образцов, наличием катионов металлов с разными свойствами, а также образованием гетеропереходов.

Ключевые слова: газовые сенсоры, оксиды металлов, наноматериалы, оксид цинка, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, адсорбционные центры.

1. Введение

Быстрое увеличение количества выбросов выхлопных, взрывоопасных и токсичных газов требует повсеместного применения устройств детектирования состава окружающей среды [1]. Это поможет избежать взрывов и минимизировать вредное влияние опасных газов на природу и здоровье человека. Из всего многообразия доступных газовых сенсоров большое внимание привлекают полупроводниковые сенсоры адсорбционного типа [2, 3]. Были исследованы сенсорные свойства различных оксидов металлов, в частности SnO_2 [4], TiO_2 [5], ZnO [6, 7],

Fe_2O_3 [8], In_2O_3 [9] и другие. Среди них оксид цинка является одним из наиболее изученных полупроводниковых газочувствительных материалов.

Однако низкий отклик и длительное время отклика / восстановления сенсоров на основе оксидов металлов ограничивают их применение, поэтому улучшение характеристик газовых сенсоров на основе оксида цинка является важной задачей. Существует два наиболее распространенных подхода к улучшению сенсорных свойств. Первый заключается в синтезе наноструктурированных материалов различной формы. Второй способ улучшения сенсорных свойств оксидов металлов состоит в изменении химического состава материала, например, декорирование и легирование металлами, а также формирование гетероструктур. Были успешно синтезированы многокомпонентные оксидные системы с улучшенными сенсорными свойствами, например SnO_2 / ZnO [10], CuO / In_2O_3 [11], TiO_2 / Fe_2O_3 [12] и др.

Целью данной работы является разработка методов улучшения сенсорного отклика слоев на основе наностержней оксида цинка. Были синтезированы тройные оксидные наноструктуры $Zn-Sn-O$ и $Zn-Fe-O$, а также наностержни оксида цинка с высоким содержанием кислородных вакансий на поверхности. Показано, что эти структуры имеют высокий отклик к парам летучих органических соединений.

2. Эксперимент

В данной работе предлагается двухэтапный подход к получению тройных оксидных наноструктур различного состава и морфологии. Первым этапом является синтез наностержней оксида цинка [13]. На втором этапе состав наностержней изменяется при пост-обработке в растворе, содержащем ионы олова или железа, с получением тройных оксидов систем $Zn-Sn-O$ и $Zn-Fe-O$, соответственно [14, 15]. Сенсорные слои $Zn-Sn-O$ были получены в результате гидротермальной обработки наностержней оксида цинка в растворе, содержащем $K_2SnO_3 \cdot 2H_2O$ и $(NH_2)_2CO$. Слои $Zn-Fe-O$ были синтезированы в результате помещения наностержней оксида цинка в раствор $FeSO_4 \cdot 7H_2O$. Были выбраны оптимальные условия для синтеза каждой из тройных оксидных систем [16, 17]. Газочувствительные слои синтезировали на поверхности сенсорных платформ BI2 (Tesla Vlatna, Czech Republic).

Также были синтезированы бинарные оксидные наноструктуры $ZnO(Br)$, представляющие собой наностержни оксида цинка, в раствор для гидротермального синтеза которых был добавлен бромид натрия [18].

Формирование двойных и тройных оксидных систем было продемонстрировано с помощью рентгеновской фотоэлектронной

спектроскопии. Проведено исследование сенсорных свойств слоев, представляющих собой массивы наностержней оксида цинка и тройных систем $Zn-Sn-O$ и $Zn-Fe-O$ на их основе при температуре при детектировании паров изопропилового спирта, ацетона и метилового спирта. Величину отклика определяли как

$$S = R_{air} / R_{gas},$$

где R_{air} – сопротивление слоя в атмосфере воздуха, R_{gas} – сопротивление слоя в присутствии целевого газа.

3. Результаты и обсуждение

Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия показала, что на поверхности систем, синтезированных в результате дополнительной обработки наностержней оксида цинка, наблюдается олово (см. рис. 1 а) и железо (см. рис. 1 б). В то же время образцы, синтезированные с добавлением бромид натрия, не содержат дополнительных элементов (см. рис. 1 в).

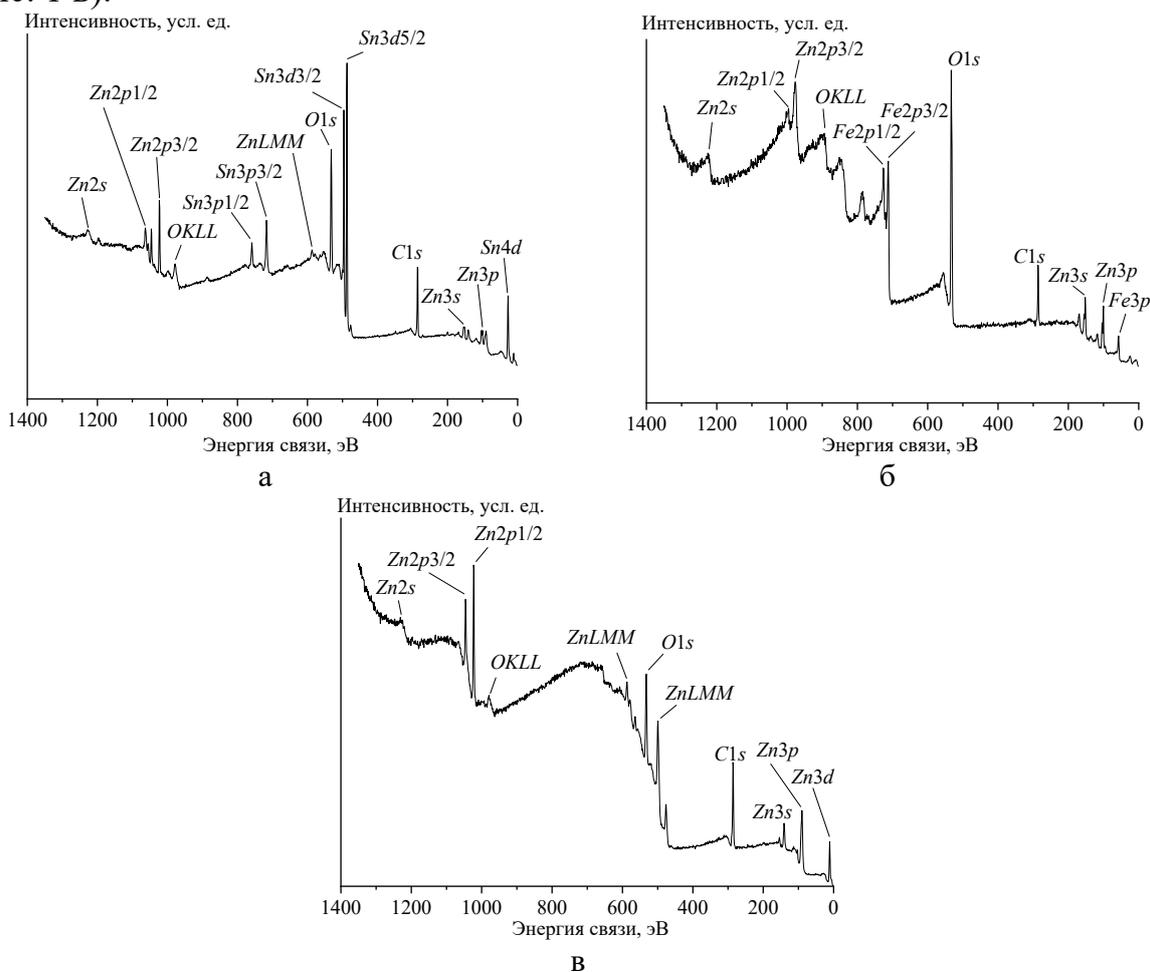


Рис. 1. Обзорные рентгеновские фотоэлектронные спектры образцов: а – $Zn-Sn-O$, б – $Zn-Fe-O$, в – $ZnO(Br)$.

Проведено исследование образцов, проявивших наилучшие свойства при детектировании паров изопропилового спирта, к парам ацетона с концентрацией 1500 ppm и метилового спирта с концентрацией 1000 ppm. Результаты обобщены на рис. 3. Максимальный отклик образцы проявляют к парам изопропилового спирта. Также образец $ZnO(Br)$ практически не изменяет свое сопротивление при взаимодействии с парами метанола.

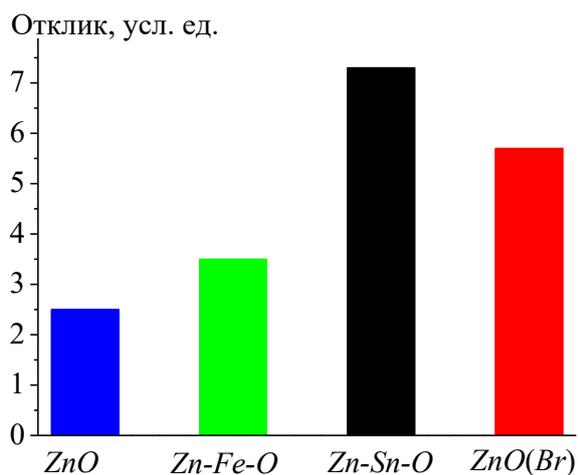


Рис. 2. Сенсорные свойства образцов.

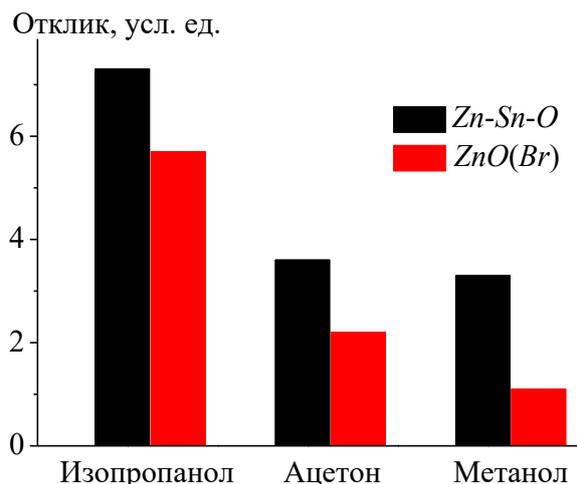


Рис. 3. Отклик образцов к парам разных летучих органических соединений.

Отклик образца тройной оксидной системы $Zn-Sn-O$ к парам изопропанола (1000 мд) был проанализирован при меньших температурах. При $150^{\circ}C$ его значение было 1,5, а при $300^{\circ}C$ – 8,2. С ростом температуры наблюдается увеличение отклика вследствие образования большего числа электронов в результате реакции. При этом увеличение рабочей температуры приводит к увеличению потребляемой мощности сенсора, что ограничивает его применение. Поэтому в настоящее время развиваются способы достижения высокого отклика при меньших рабочих температурах.

Создание тройных оксидных систем является эффективным способом увеличения отклика полупроводниковых газовых сенсоров. Основное влияние оказывает наличие адсорбционных центров различной природы. В гетеропереходе, образованном двумя различными оксидами, на поверхности полупроводников и границе их раздела образуется большое число кислородных вакансий. Это обеспечивает увеличение числа активных центров для протекания реакций, формирующих сенсорный отклик, что и приводит к улучшению сенсорных характеристик таких многокомпонентных оксидных материалов. Композитные оксиды металлов часто представляют собой мезопористые структуры, способствующие адсорбции и десорбции молекул газа. Кроме того,

гетеропереход обеспечивает перенос электронов между компонентами, что также может привести к улучшению сенсорных характеристик.

Преыдушие исследования показали, что в образцах тройных оксидных систем при модифицировании как железом, так и оловом, происходит значительное изменение содержания кислорода в различных связанных состояниях с увеличением доли кислорода в виде адсорбированных гидроксильных групп [19], диапазон энергий связи которых близок к кислородным вакансиям. Такой же эффект наблюдается в наностержнях оксида цинка, полученных гидротермальным методом в присутствии бромида натрия в исходном растворе [20]. Кислородные вакансии являются локальными дефектными центрами, участвующие в хемисорбции кислорода. Таким образом, увеличение концентрации данных дефектов приводит к большей концентрации адсорбированных ионов O^- на поверхности сенсорного слоя, следовательно, к большей толщине области обедненного заряда. Это, в свою очередь, способствует большей модуляции сопротивления в результате окисления восстанавливающих газов на поверхности сенсорного слоя.

Для повышения поверхностной активности в реакциях с молекулами изопропилового спирта образуются структуры сложного состава. Поверхность таких структур содержит ионы цинка, а также ионы другого типа [21]. В наших экспериментах такие структуры проявляют более высокую чувствительность к парам восстанавливающих газов, так как свойства центров дополняют друг друга, а адсорбционная способность и каталитическая активность поверхности увеличиваются.

При модификации наностержней оксида цинка оловом и железом возможно образование гетеропереходов. Рассмотрим этот эффект на примере структуры, модифицированной оловом. В результате пост-обработки на поверхности наностержней образуется оболочка из тройного оксида системы $Zn-Sn-O$. Методом дифракции обратно-рассеянных электронов показано, что при выбранных условиях синтеза образуется Zn_2SnO_4 со структурой обратной шпинели [22]. Следовательно, в сенсорный отклик вносит вклад гетеропереход ZnO/Zn_2SnO_4 . Величина работы выхода для оксида цинка составляет 5,3 эВ, а для Zn_2SnO_4 – 4,9 эВ [23]. Термодинамическое равновесие достигается за счет перехода электронов стannата цинка в зону проводимости оксида цинка. Следовательно, на интерфейсе со стороны стannата цинка образуется обедненный электронами слой, который также будет уменьшаться при взаимодействии материала с восстанавливающими газами.

4. Заключение

Таким образом, в данной работе предложены подходы, позволяющие

значительно улучшить газочувствительные характеристики металлооксидных полупроводниковых газовых сенсоров. Разработаны подходы к увеличению сенсорного отклика и быстродействия, заключающиеся в создании на поверхности слоя адсорбционных центров различных типов.

Библиографический список:

1. **Wang, C.** Review of recent progress on graphene-based composite gas sensors / C. Wang, Y. Wang, Z. Yang, N. Hu // *Ceramics International*. – 2021. – V. 47. – I. 12. – P. 16367-16384. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.02.144.
2. **Moshnikov, V.A.** Hierarchical nanostructured semiconductor porous materials for gas sensors / V.A. Moshnikov, I.E. Gracheva, V.V. Kuznezov et al. // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2010. – V. 356. – I. 37-40. – P. 2020-2025. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2010.06.030.
3. **Мошников, В.А.** Золь-гель технология микро- и нанокомпозитов / В.А. Мошников, Ю.М. Таиров, Т.В. Хамова, О.А. Шилова. – СПб: Лань, 2013. – 304 с.
4. **Налимова, С.С.** Управление функциональным составом поверхности и улучшение газочувствительных свойств металлооксидных сенсоров посредством электронно-лучевой обработки / С.С. Налимова, С.В. Мякин, В.А. Мошников // *Физика и химия стекла*. – 2016. – Т. 42. – № 6. – С. 773-780.
5. **Cao, S.** TiO₂ nanostructures with different crystal phases for sensitive acetone gas sensors / S. Cao, N. Sui, P. Zhang et al. // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2022. – V. 607. – Part 1. – P. 357-366. DOI: 10.1016/j.jcis.2021.08.215.
6. **Nalimova, S.S.** Investigation of the vapor-sensitive properties of zinc oxide layers by impedance spectroscopy / S.S. Nalimova, I.E. Kononova, V.A. Moshnikov et al. // *Bulgarian Chemical Communications*. – 2017. – V. 49. – № 1. – P. 121-126.
7. **Bobkov, A.A.** Study of gas-sensitive properties of zinc oxide nanorod array at room temperature / A.A. Bobkov, D.S. Mazing, A.A. Ryabko et al. // *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics*, 22-23 October 2018, Saint Petersburg. – 2018. – P. 219-221. DOI: 10.1109/EEEPolytech.2018.8564407.
8. **Lei, Z.** Pt-doped α -Fe₂O₃ mesoporous microspheres with low-temperature ultra-sensitive properties for gas sensors in diabetes detection / Z. Lei, P. Cheng, Y. Wang et al. // *Applied Surface Science*. – 2023. – V. 607. – Art. № 154558. – 13 p. DOI: 10.1016/j.apsusc.2022.154558.
9. **Tong, P.V.** Porous In₂O₃ nanorods fabricated by hydrothermal method for an effective CO gas sensor / P.V. Tong, L.H. Minh, N.V. Duy, C.M. Hung // *Materials Research Bulletin*. – 2021. – V. 137. – Art. № 111179. – 9 p. DOI: 10.1016/j.materresbull.2020.111179.
10. **Yang, X.** One step synthesis of branched SnO₂/ZnO heterostructures and their enhanced gas-sensing properties / X. Yang, S. Zhang, Q. Yu et al. // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2019. – V. 281. – P. 415-423. DOI: 10.1016/j.snb.2018.10.138.
11. **Li, S.** Metal-organic frameworks-derived bamboo-like CuO/In₂O₃ Heterostructure for high-performance H₂S gas sensor with low operating temperature / S. Li, L. Xie, M. He et al. // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2020. – V. 310. – Art. № 127828. – 10 p. DOI: 10.1016/j.snb.2020.127828.
12. **Wang, C.** In-situ generated TiO₂/ α -Fe₂O₃ heterojunction arrays for batch manufacturing of conductometric acetone gas sensors / C. Wang, Y. Wang, P. Cheng et al. // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2021. – V. 340. – Art. № 129926. – 11 p. DOI: 10.1016/j.snb.2021.129926.
13. **Ryabko, A.A.** Investigation of the gas sensitivity of nanostructured layers based on zinc oxide nanorods under ultraviolet irradiation / A.A. Ryabko, S.S. Nalimova, A.I. Maximov, V.A. Moshnikov // *Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*, 26-29 January 2021, Saint Petersburg. – 2021. – P. 1180-1183. DOI: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396166.
14. **Налимова, С.С.** Исследование формирования слоев стannата цинка методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии / С.С. Налимова, З.В. Шомахов, В.А. Мошников и др. // *Журнал технической физики*. – 2020. – Т. 90. – № 7. – С. 1132-1135. DOI: 10.21883/JTF.2020.07.49447.276-19.
15. **Aubekerov, K.** Synthesis and study of gas sensitive ZnFe₂O₄-modified ZnO nanowires / K. Aubekerov, K.N. Punegova, S.S. Nalimova et al. // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2022. – V. 2227. – Art. № 012014. – 4 p. DOI: 10.1088/1742-6596/2227/1/012014.
16. **Налимова, С.С.** Газочувствительные композитные наноструктуры на основе оксида цинка для

- детектирования паров органических растворителей / С.С. Налимова, З.В. Шомахов, К.В. Герасимова и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2022. – Вып. 14. – С. 678-687. DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.678.
17. **Шомахов, З.В.** Наноструктуры станната цинка для газовых сенсоров с высоким быстродействием / З.В. Шомахов, С.С. Налимова, Б.З. Шурдумов и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2022. – Вып. 14. – С. 726-735. DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.726.
18. **Nalimova, S.** Sacrificial doping as an approach to controlling the energy properties of adsorption sites in gas-sensitive ZnO nanowires / S. Nalimova, Z. Shomakhov, A. Bobkov, V. Moshnikov // *Micro*. – 2023. – V. 3. – I. 2. – P. 591-601. DOI: 10.3390/micro3020040.
19. **Aubekero, K.** Enhanced gas sensing performances of ZnO-based composite nanostructures / K. Aubekero, A.M. Guketlov, A.Yu. Gagarina et al. // *Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*, 25-28 January 2022, Saint Petersburg. – 2022. – P. 934-937. DOI: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755838.
20. **Shomakhov, Z.V.** X-Ray photoelectron spectroscopy of the surface layers of faceted zinc-oxide nanorods / Z.V. Shomakhov, S.S. Nalimova, A.A. Bobkov, V.A. Moshnikov // *Semiconductors*. – 2022. – V. 56. – I. 13. – P. 450-454. DOI: 10.1134/S1063782622130097.
21. **Налимова, С.С.** Исследование влияния кислотно-основных свойств поверхности оксидов ZnO, Fe₂O₃ и ZnFe₂O₄ на их газочувствительность по отношению к парам этанола / С.С. Налимова, В.А. Мошников, А.И. Максимов, С.В. Мякин, Н.Е. Казанцева // *Физика и техника полупроводников*. – 2013. – Т. 47. – № 8. – С. 1022-1026.
22. **Шомахов, З.В.** Изменение энергетики поверхностных адсорбционных центров ZnO при легировании оловом / З.В. Шомахов, С.С. Налимова, В.М. Кондратьев и др. // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. – 2023. – № 8. – С. 58-63. DOI: 10.31857/S1028096023080137.
23. **Wang, T.** Construction of Zn₂SnO₄ decorated ZnO nanoparticles for sensing triethylamine with dramatically enhanced performance / X. Wang, Y. Wang, G. Yi et al. // *Materials Science in Semiconductor Processing*. – 2022. – V. 140. – Art. № 106403. – 8 p. DOI: 10.1016/j.mssp.2021.106403.

References

1. Wang C., Wang Y., Yang Z., Hu N. Review of recent progress on graphene-based composite gas sensors, *Ceramics International*, 2021, vol. 47, issue 12, pp. 16367-16384. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.02.144.
2. Moshnikov V.A., Gracheva I.E., Kuznezov V.V. et al. Hierarchical nanostructured semiconductor porous materials for gas sensors, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2010, vol. 356, issue 37-40, pp. 2020-2025. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2010.06.030.
3. Moshnikov V.A., Tairov Yu.M., Khamova T.M., Shilova O.A. *Zol'-gel' tekhnologiya mikro- I nanokompozitov* [Sol-gel technology of micro- and nanocomposites], Saint Petersburg, Lan', 2013, 304 pp. (In Russian).
4. Nalimova S.S., Moshnikov V.A., Myakin S.V. Controlling surface functional composition and improving the gas-sensing properties of metal oxide sensors by electron beam processing, *Glass Physics and Chemistry*, 2016, vol. 42, issue 6, pp. 597-601. DOI: 10.1134/S1087659616060171.
5. Cao S., Sui N., Zhang P. et al. TiO₂ nanostructures with different crystal phases for sensitive acetone gas sensors, *Journal of Colloid and Interface Science*, 2022, vol. 607, part 1, pp. 357-366. DOI: 10.1016/j.jcis.2021.08.215.
6. Nalimova S.S., Kononova I.E., Moshnikov V.A. et al. Investigation of the vapor-sensitive properties of zinc oxide layers by impedance spectroscopy, *Bulgarian Chemical Communications*, 2017, vol. 49, no. 1, pp. 121-126.
7. Bobkov A.A., Mazing D.S., Ryabko A.A. et al. Study of gas-sensitive properties of zinc oxide nanorod array at room temperature, *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics*, 22-23 October 2018, Saint Petersburg, 2018, pp. 219-221. DOI: 10.1109/EEExPolytech.2018.8564407.
8. Lei Z., Cheng P., Wang Y. et al. Pt-doped α -Fe₂O₃ mesoporous microspheres with low-temperature ultra-sensitive properties for gas sensors in diabetes detection, *Applied Surface Science*, 2023, vol. 607, art. no. 154558, 13 pp. DOI: 10.1016/j.apsusc.2022.154558.
9. Tong P.V., Minh L.H., Duy N.V., Hung C.M. Porous In₂O₃ nanorods fabricated by hydrothermal method for an effective CO gas sensor, *Materials Research Bulletin*, 2021, vol. 137, art. no 111179, 9 pp. DOI: 10.1016/j.materresbull.2020.111179.
10. Yang X., Zhang S., Yu Q. et al. One step synthesis of branched SnO₂/ZnO heterostructures and their enhanced gas-sensing properties, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, vol. 281, pp. 415-423. DOI:

10.1016/j.snb.2018.10.138.

11. Li S., Xie L., He M. et al. Metal-organic frameworks-derived bamboo-like CuO/In₂O₃ heterostructure for high-performance H₂S gas sensor with low operating temperature, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2020, vol. 310, art. no. 127828, 10 pp. DOI: 10.1016/j.snb.2020.127828.

12. Wang C., Wang Y., Cheng P. et al. In-situ generated TiO₂/α-Fe₂O₃ heterojunction arrays for batch manufacturing of conductometric acetone gas sensors, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2021, vol. 340, art. no. 129926, 11 pp. DOI: 10.1016/j.snb.2021.129926.

13. Ryabko A.A., Nalimova S.S., Maximov A.I., Moshnikov V.A. Investigation of the gas sensitivity of nanostructured layers based on zinc oxide nanorods under ultraviolet irradiation, *Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*, 26-29 January 2021, Saint Petersburg, 2021, pp. 1180-1183. DOI: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396166.

14. Nalimova S.S., Moshnikov V.A., Bobkov A.A. et al. An X-ray photoelectron spectroscopy study of zinc stannate layer formation, *Technical Physics*, 2020, vol. 65, issue 7, pp. 1087-1090. DOI: 10.1134/S1063784220070142.

15. Aubekerov K., Punegova K.N., Nalimova S.S. et al. Synthesis and study of gas sensitive ZnFe₂O₄-modified ZnO nanowires, *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, vol. 2227, art. № 012014, 4 p. DOI: 10.1088/1742-6596/2227/1/012014.

16. Nalimova S.S., Shomakhov Z.V., Gerasimova K.V. et al. Gazochuvstvitel'nye kompozitnye nanostruktury na osnove oksida tsinka dlya detektirovaniya parov organicheskikh rastvoritelei [Gas-sensitive composite nanostructures based on zinc oxide for detecting organic solvent vapors], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2022, issue 14, pp. 678-687. DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.678. (In Russian).

17. Shomakhov Z.V., Nalimova S.S., Shurdumov B.Z. et al. Nanostrukturi stannata tsinka dlya gavovykh sensorov s vysokim bystrodeistviem [Zinc stannate nanostructures for fast response gas sensors], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2022, issue 14, pp. 726-735. DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.726. (In Russian).

18. Nalimova S., Shomakhov Z., Bobkov A., Moshnikov V. Sacrificial doping as an approach to controlling the energy properties of adsorption sites in gas-sensitive ZnO nanowires, *Micro*, 2023, vol. 3, issue 2, pp. 591-601. DOI: 10.3390/micro3020040.

19. Aubekerov K., Guketlov A.M., Gagarina A.Yu. et al. Enhanced gas sensing performances of ZnO-based composite nanostructures, *Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*, 25-28 January 2022, Saint Petersburg, 2022, pp. 934-937. DOI: 10.1109/EIConRus54750.2022.9755838.

20. Shomakhov Z.V., Nalimova S.S., Bobkov A.A., Moshnikov V.A. X-Ray Photoelectron Spectroscopy of the Surface Layers of Faceted Zinc-Oxide Nanorods, *Semiconductors*, 2022, vol. 56, issue 13, pp. 450-454. DOI: 10.1134/S1063782622130097.

21. Karpova S.S., Moshnikov V.A., Maksimov A.I. et al. Study of the effect of the acid-base surface properties of ZnO, Fe₂O₃ and ZnFe₂O₄ oxides on their gas sensitivity to ethanol vapor, *Semiconductors*, 2013, vol. 47, issue 8, pp. 1026-1030. DOI: 10.1134/S1063782613080095.

22. Shomakhov Z.V., Nalimova S.S., Kondratev V.M. et al. Changes in the energy of surface adsorption sites of ZnO doped with Sn, *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2023, vol. 17, issue 4, pp. 898-902. DOI: 10.1134/S1027451023040316.

23. Wang X., Wang Y., Yi G. et al. Construction of Zn₂SnO₄ decorated ZnO nanoparticles for sensing triethylamine with dramatically enhanced performance, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2022, vol. 140, art. no. 106403, 8 p. DOI: 10.1016/j.mssp.2021.106403.

Original paper

IMPROVING THE SENSOR CHARACTERISTICS OF BINARY AND TERNARY OXIDE NANOSYSTEMS

Z.V. Shomakhov¹, S.S. Nalimova², A.A. Rybina², S.S. Buzovkin², Z.H. Kalazhokov¹,
V.A. Moshnikov²

¹*Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik, Russia*

²*Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint Petersburg, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.879

Abstract: Currently, adsorption gas sensors are of great interest for environmental monitoring. The approaches to improving their properties include synthesis of nanostructured materials of various

shapes and modification of the metal oxide chemical composition. The aim of this work is to develop ways to improve the sensor properties of zinc oxide nanowires by changing the surface structure during processing in solutions of tin and iron compounds, as well as adding special precursors during their synthesis. The layers consisting of zinc oxide nanowires were produced by hydrothermal method. Ternary *Zn-Sn-O* and *Zn-Fe-O* nanosystems were synthesized as a result of processing of zinc oxide nanowires in solutions containing potassium stannate and iron sulfate, respectively. *ZnO* nanowires were also synthesized in a solution containing sodium bromide in addition to the general precursors. The surface chemical composition was analyzed using X-ray photoelectron spectroscopy. Sensor properties were investigated by detecting acetone, isopropanol and methanol vapors. It was shown that the sensor response of the produced samples exceeds the response of the initial zinc oxide nanowires. The samples of *Zn-Sn-O* ternary oxide system have the best response. The improvement of the sensor response may be associated with an increase in the content of adsorbed oxygen ions on the surface of the samples, the presence of metal cations with different properties as well as the formation of heterostructures.

Keywords: gas sensors, metal oxides, nanomaterials, zinc oxide, X-ray photoelectron spectroscopy, adsorption centers.

Шомахов Замир Валериевич – к.ф.-м.н., доцент кафедры электроники и информационных технологий ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

Налимова Светлана Сергеевна – к.ф.-м.н., доцент кафедры микро- и нанoeлектроники ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Рыбина Арина Алексеевна – студент 4 курса кафедры микро- и нанoeлектроники ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Бузовкин Сергей Сергеевич – студент 4 курса кафедры микро- и нанoeлектроники ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Калажиков Замир Хамидбиевич – к.ф.-м.н., доцент кафедры физики наносистем ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

Мошиников Вячеслав Алексеевич – д.ф.-м.н., профессор кафедры микро- и нанoeлектроники ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Zamir V. Shomakhov – Ph. D., Docent, Department of Electronics and Information Technologies, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov

Svetlana S. Nalimova – Ph. D., Docent, Micro- and Nanoelectronics Department, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

Arina A. Rybina – 4th year student, Micro- and Nanoelectronics Department, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

Sergey S. Buzovkin – 4th year student, Micro- and Nanoelectronics Department, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

Zamir Kh. Kalazhikov – Ph. D., Docent, Department of Nanosystems Physics, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov

Vyacheslav A. Moshnikov – Dr. Sc., Professor, Micro- and Nanoelectronics Department, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

Поступила в редакцию/received: 01.09.2023; после рецензирования/ revised: 09.10.2023; принята/accepted: 12.10.2023.