

ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ КОМПОЗИТНЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ЦИНКА ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ПАРОВ ОРГАНИЧЕСКИХ РАСТВОРИТЕЛЕЙ

С.С. Налимова¹, З.В. Шомахов², К.В. Герасимова¹, К.Н. Пунегова¹, А.М. Гукетлов²,
Р.М. Калмыков²

¹ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5

²ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет
им. Х.М. Бербекова»

360004, Россия, Кабардино-Балкарская республика, Нальчик, ул. Чернышевского, 173
sskarpova@list.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.678

Аннотация: В работе показаны возможности применения композитных структур $ZnO-Fe$ в качестве газочувствительных слоев для детектирования паров органических растворителей на примере изопропилового спирта. Композитные структуры получены на основе наностержней оксида цинка, синтезированных гидротермальным методом, за счет изменения их состава при выдержке в растворе сульфата железа. Исследование химического состава поверхности проводили с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Показано, что при использовании раствора сульфата железа с концентрацией 0,025 моль/л на поверхности наблюдаются атомы железа и цинка. Повышение концентрации раствора до 0,05 моль/л приводит к осаждению частиц оксида железа на поверхность слоя наностержней. Исследование газочувствительных характеристик проводили при температуре 250°C при воздействии паров изопропилового спирта в диапазоне концентраций от 200 до 1000 млн⁻¹. Установлено, что величина отклика композитных структур $ZnO-Fe$ (0,025) превышает соответствующее значение для наностержней оксида цинка, что может быть обусловлено большим содержанием кислородных вакансий в композитном образце.

Ключевые слова: оксид цинка, газовые сенсоры, композитные наноструктуры, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, органические растворители.

1. Введение

В настоящее время в газовой сенсорике большой интерес представляют хемосорбционные резистивные газовые датчики, так как их способы получения обычно просты, не затратны по времени и не требуют больших финансовых вложений [1]. Сенсоры на металлооксидных полупроводниках характеризуются быстрым откликом и низким энергопотреблением [2, 3]. Одним из широко используемых для создания активных областей таких датчиков металлооксидов является оксид цинка [4]. На данный момент хорошо изучен как сам ZnO , так и возможные процессы его синтеза, но газочувствительные структуры на его основе не удовлетворяют современным требованиям газовой сенсорики, поэтому встает вопрос о возможной модификации таких структур для улучшения сенсорных свойств [5-7].

Так как отклик адсорбционной сенсорной структуры напрямую зависит от удельной площади поверхности активной области, ее увеличение может привести к значительному улучшению сенсорных свойств газовых датчиков. Добиться этого можно путем формирования композитных систем на основе наностержней ZnO за счет их модификации до многокомпонентных оксидов металлов, например, $Zn-Fe-O$. Иерархия в системе на поверхности активной области гарантировано обеспечит увеличение удельной площади поверхности, а синтез такой структуры, так же, как и синтез металлооксида (ZnO), не будет затратен и излишне затруднен.

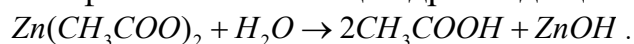
Показано, что использование многокомпонентных систем эффективно для разработки сенсоров различных паров органических растворителей, например ацетона [8-10], спиртов [11], формальдегида [12].

Целью данной работы является синтез наноструктур $Zn-Fe-O$ на основе наностержней оксида цинка, модернизированных в растворе сульфата железа, исследования их химического состава и газочувствительных свойств по отношению к парам органических растворителей на примере изопропилового спирта.

2. Эксперимент

Синтез газочувствительных слоев $ZnO-Fe$ производился на керамических подложках (Al_2O_3) с напыленными встречно-штыревыми контактами $NiCr / Ni / Au$. Толщина электродов и расстояние между ними – 25 мкм. Получение композитной наноструктуры производилось в два этапа: синтез наностержней оксида цинка методом центрифугирования (зародышевый слой) и низкотемпературного гидротермального синтеза [13, 14], синтез композитной системы $Zn-Fe-O$ методом осаждения из раствора семиводного сульфата железа при нормальных условиях.

Для получения зародышевого слоя ZnO , на который в последствие наращиваются наностержни оксида цинка, был изготовлен раствор ацетата цинка с дистиллированной водой. Концентрация $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$ составила 5 ммоль/л, объем растворителя – 50 мл. Для ускорения процесса растворения применялась ультразвуковая ванна. В результате был получен раствор, с дисперсной фазой наночастиц гидроксида цинка:



Для нанесения наночастиц $ZnOH$ на поверхность образца использовался метод центрифугирования, для наилучшего покрытия поверхности процесс производился 3 раза. Время нанесения одного слоя – 15 с, скорость вращения 3000 об/мин. Для получения на поверхности подложки зародышевого слоя оксида цинка был произведен отжиг в муфельной печи при температуре 500°C в течение 15 минут, в результате

которого происходит образование ZnO и H_2O из гидроксида цинка с последующим испарением воды.

Для выращивания наностержней оксида цинка было изготовлено два раствора: раствор нитрата цинка и раствор гексаметилентетрамина (НМТА) в дистиллированной воде. Концентрация растворяемых веществ составляла 25 ммоль/л, а объем растворителя – 50 мл. После этого растворы перемешивали при помощи магнитной мешалки. Полученный раствор и образцы с нанесенными зародышевыми слоями помещали в автоклав. Условия синтеза: время выдержки – 1 час, температура – 80°C. Затем была произведена сушка образцов с последующим отжигом в муфельной печи при температуре 500°C в течение 15 минут.

Синтез композитной структуры производился на двух идентичных образцах с выращенными наностержнями оксида цинка методом осаждения из раствора в нормальных условиях. Было изготовлено два раствора семиводного сульфата железа в дистиллированной воде с разными концентрациями: 0,05 моль/л и 0,025 моль/л. Объем растворителя для каждого из растворов – 50 мл. Затем подготовленные подложки погружали в растворы. Время синтеза составило 30 мин, формирование композитной структуры проводилось при комнатной температуре (25°C). После была произведена сушка образцов с последующим отжигом в муфельной печи при температуре 500°C в течение 15 минут. Образцы обозначены как $ZnO-Fe$ (0,05) и $ZnO-Fe$ (0,025). Число в скобках соответствует концентрации сульфата железа в растворе, используемым для модификации.

Методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (K-Alpha, Thermo Scientific (США)) был исследован химический состав поверхности исходных наностержней оксида цинка, а также композитных структур с использованием $AlK\alpha$ -излучения с энергией фотона $h\nu=1350$ эВ. Значения энергии связи основных уровней определены относительно уровня $C1s$ с энергией 284,6 эВ.

Для исследования газочувствительных свойств полученных образцов была использована специально разработанная установка [15]. Отклик рассчитывался как отношение сопротивлений образца в атмосфере воздуха и в присутствии паров изопропилового спирта.

3. Результаты и обсуждение

Для анализа влияния концентрации раствора сульфата железа на химический состав поверхности полученных композитных структур был применен метод рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). На рис. 1 и 2 представлены спектры образцов, модернизированных в растворах сульфата железа с концентрациями 0,025 моль/л и 0,05 моль/л

СООТВЕТСТВЕННО.

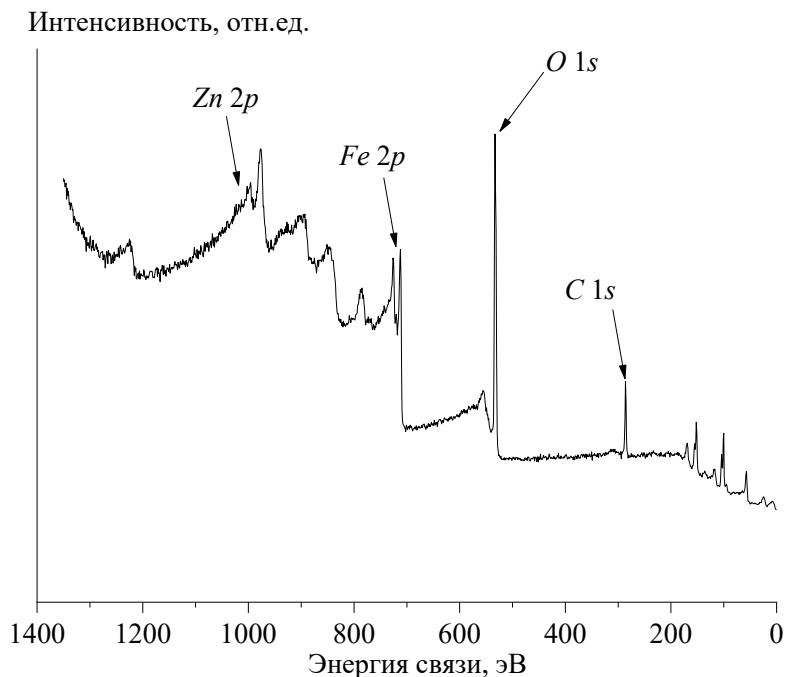


Рис. 1. Обзорный РФЭ спектр образца ZnO-Fe (0,025).

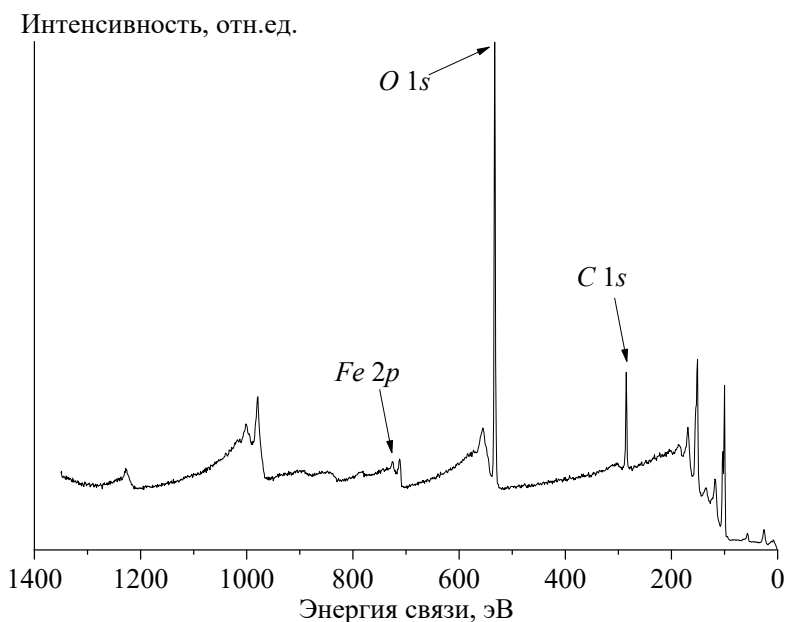


Рис. 2. Обзорный РФЭ спектр образца ZnO-Fe (0,05).

Для образца, синтезированного из раствора сульфата железа большей концентрации (0,05 моль/л) не наблюдается пиков, соответствующих энергиям связи атомов цинка. Это может быть связано с осаждением частиц оксида железа на поверхности параллельно с встраиванием атомов железа в структуру оксида цинка. На спектре образца, синтезированного из раствора сульфата железа меньшей концентрации (0,025 моль/л) наблюдаются пики для кислорода, железа и цинка. Это позволяет сделать вывод о том, что при синтезе происходило формирование композитной

структуры.

Проанализированы пики основных уровней кислорода образца исходных наностержней оксида цинка и $ZnO-Fe$ (0,025), представленные на рис. 3. На спектрах наблюдается два пика, которые соответствуют атомам кислорода кристаллической решетки [16] и вакансиям в подрешетке кислорода [17]. При этом для образца оксида цинка энергия связи кислорода кристаллической решетки составляет 530,8 эВ, а для образца $ZnO-Fe$ (0,025) – 529,9 эВ. Энергия связи, соответствующая кислородным вакансиям, для ZnO составляет 532,3 эВ, для $ZnO-Fe$ (0,025) – 532,1 эВ. Таким образом, видно, что в результате взаимодействия с атомами железа происходит существенное изменение кристаллической решетки, отражающееся в существенном сдвиге энергии связи кислорода кристаллической решетки. В то же время изменение энергии связи, соответствующей кислородным вакансиям, незначительно. При изменении химического состава наностержней оксида цинка и образовании композитной структуры $Zn-Fe-O$ существенно увеличивается содержание кислородных вакансий на поверхности (48 % для образца ZnO и 68 % для образца $ZnO-Fe$ (0,025)).

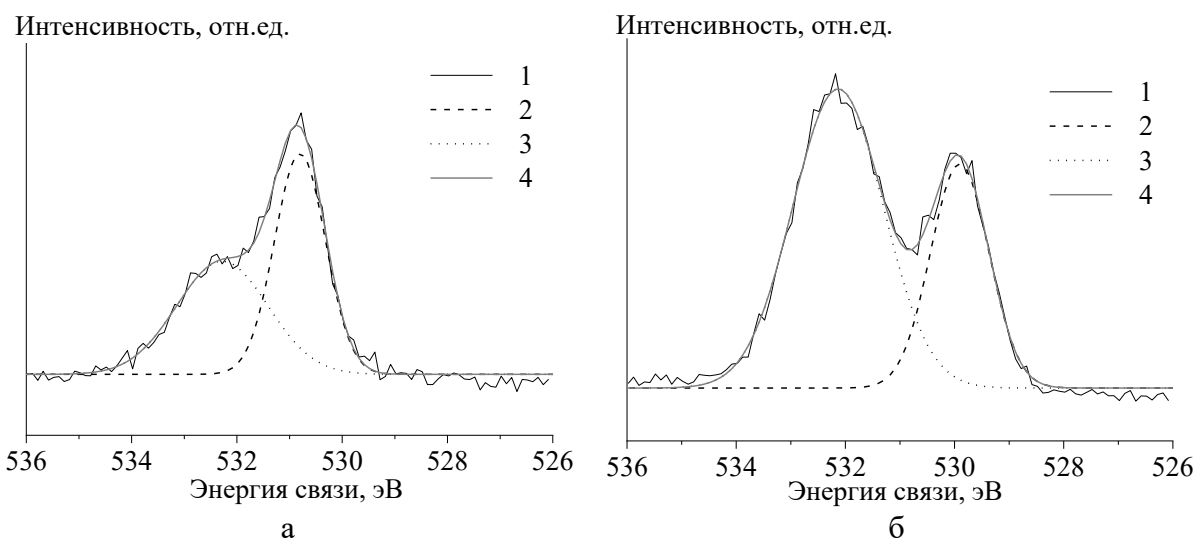


Рис. 3. Спектры основных уровней кислорода в образцах: а – ZnO , б – $ZnO-Fe$ (0,025); 1 – экспериментальные данные, 2 – $O1s$ кристаллическая решетка, 3 – $O1s$ вакансии кислорода, 4 – аппроксимация данных.

Для исследования был выбран образец $ZnO-Fe$ (0,025), модифицированный в растворе сульфата железа с концентрацией 0,025 моль/л, на поверхности которого по данным РФЭС наблюдается как железо, так и цинк. На рис. 4 приведена зависимость отклика образца от концентрации паров изопропилового спирта. Значение сенсорного отклика почти линейно увеличивается с увеличением концентрации изопропилового спирта в диапазоне 200 – 1000 $млн^{-1}$ (коэффициент

линейности ($R^2 = 0,946$).

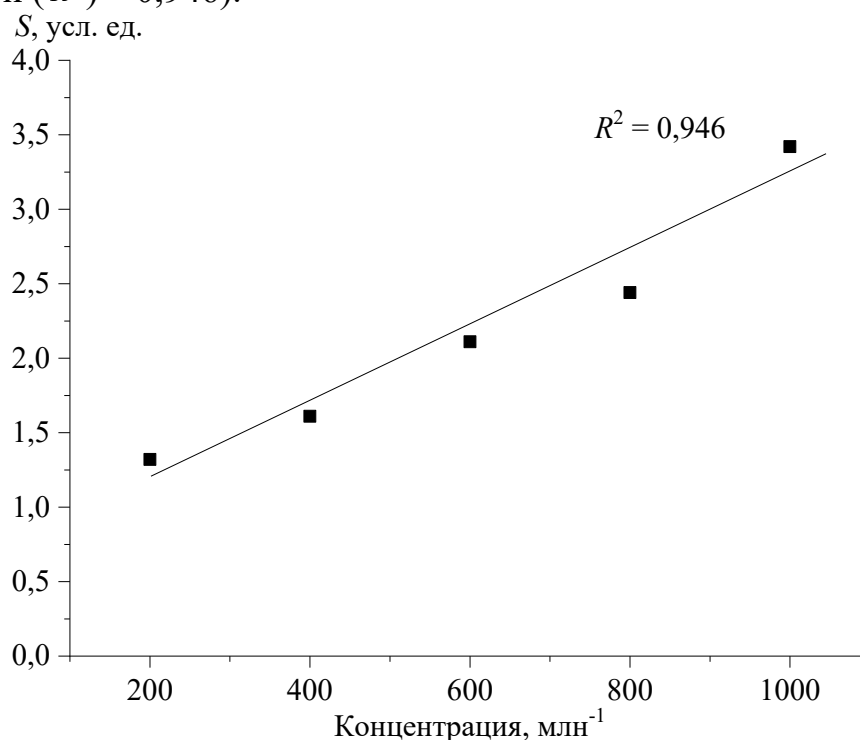


Рис. 4. Зависимость сенсорного сигнала от концентрации C_3H_7OH .

Следует отметить, что величина сенсорного отклика образца $ZnO-Fe$ ($0,025$) к 1000 млн⁻¹ изопропилового спирта составляет $3,42$, в то время как для образца исходных наностержней оксида цинка это значение – $2,5$. Улучшение сенсорных свойств может быть связано с влиянием кислородных вакансий на процессы взаимодействия поверхности слоя с молекулами изопропилового спирта. Наличие вакансий в подрешетке кислорода приводит к модуляции электронных и поверхностных свойств оксидов металлов, что способствует улучшению газочувствительных характеристик хеморезистивных сенсоров. Обладая большим количеством локализованных электронов, они обычно выступают в качестве доноров электронов и определяют плотность носителей заряда (объемное сопротивление) полупроводниковых материалов, особенно в оксидах металлов n -типа. На границе раздела фаз наличие кислородных вакансий будет способствовать адсорбции молекул O_2 и увеличению содержания хемосорбированных форм кислорода на поверхности. Кроме того, кислородные вакансии могут быть активными центрами адсорбции молекул детектируемого газа [18].

На графике, представленном на рис. 5, показано изменение сопротивления образца при воздействии паров изопропилового спирта и воздуха при температуре $T = 250^\circ C$. Видно, что сопротивление восстанавливается до первоначального значения в течение 270 с. Время отклика составляет 90 с, что говорит о невысоком быстродействии

полученной структуры.

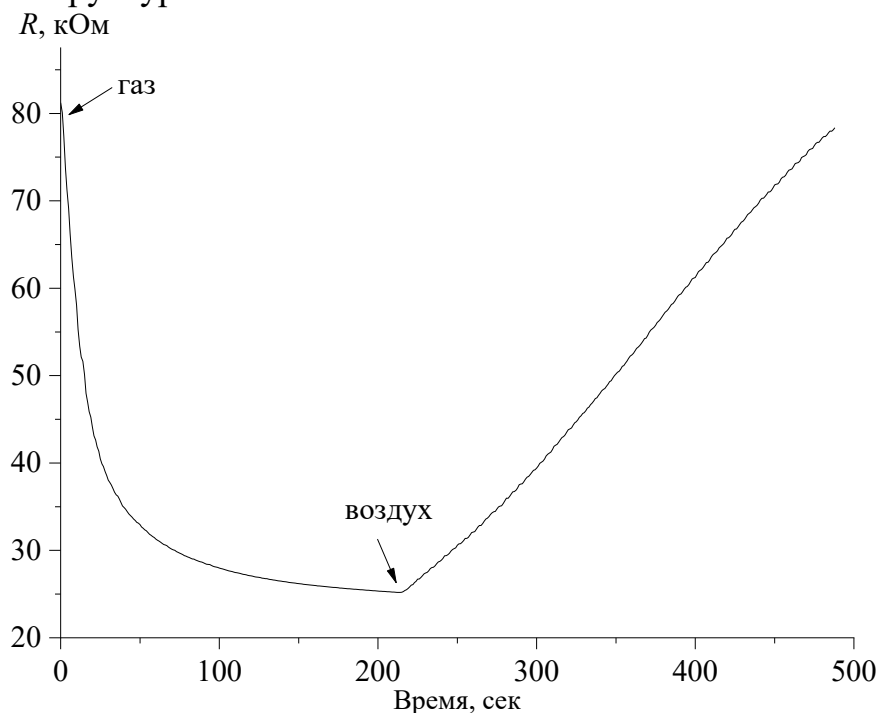


Рис. 5. Газочувствительная характеристика образца $ZnO-Fe$ (0,025) при концентрации газа 1000 млн^{-1} .

Таким образом, требуются дополнительные исследования, направленные на дополнительное улучшение сенсорных характеристик композитных наноструктур $ZnO-Fe_2O_3$.

4. Заключение

В работе получены композитные структуры $ZnO-Fe$ на основе наностержней оксида цинка с дальнейшей их модификацией в растворе соли железа. Показана эффективность применения полученных структур для детектирования паров органических растворителей на примере изопропилового спирта при рабочей температуре 250°C . Показано, что увеличение сенсорного отклика композитных структур может быть связано с формированием дополнительных кислородных вакансий в результате образования композитных структур.

Библиографический список:

1. Gardon, M. A review on fabrication, sensing mechanisms and performance of metal oxide gas sensors / M. Gardon, J.M. Guilemany // Journal of Material Science: Materials in Electronics. – 2013. – V. 24. – I. 5. – P. 1410–1421. DOI: 10.1007/s10854-012-0974-4.
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. Comini, E. Metal oxide nano-crystals for gas sensing / E. Comini // Analytica Chimica Acta. – 2006. – V. 568. – I. 1-2. – P. 28-40. DOI: 10.1016/j.aca.2005.10.069.

4. **Jiang, B.** Hierarchical mesoporous zinc oxide microspheres for ethanol gas sensor / B. Jiang, J. Lu, W. Han et al. // *Sensors and Actuators: B. Chemical*. – 2022. – V. 357. – Art. № 131333. – 11 p. DOI: 10.1016/j.snb.2021.131333.
5. **Рябко, А.А.** Сенсibilизация наностержней ZnO коллоидными квантовыми точками AgInS₂ для адсорбционных газовых сенсоров с фотоактивацией / А.А. Рябко, С.С. Налимова, Д.С. Мазинг и др. // *Журнал технической физики*. – 2022. – Т. 92. – Вып. 6. – С. 845-851. DOI: 10.21883/JTF.2022.06.52514.15-22.
6. **Bobkov, A.** Impedance spectroscopy of hierarchical porous nanomaterials based on por-Si, por-Si incorporated by Ni and metal oxides for gas sensors / A. Bobkov, V. Luchinin, V. Moshnikov, S. Nalimova, Y. Spivak // *Sensors*. – 2022. – V. 22. – I. 4. – Art. № 1530 – 14 p. DOI: 10.3390/s22041530.
7. **Zhang, D.** Metal-organic frameworks-derived hollow zinc oxide/cobalt oxide nanoheterostructure for highly sensitive acetone sensing / D. Zhang, Z. Yang, Z. Wu, G. Dong // *Sensors and Actuators: B. Chemical*. – 2019. – V. 283. – P. 42-51. DOI: 10.1016/j.snb.2018.11.133.
8. **Sun, S.** W₁₈O₄₉/Ti₃C₂T_x Mxene nanocomposites for highly sensitive acetone gas sensor with low detection limit / S. Sun, M. Wang, X. Chang et al. // *Sensors and Actuators: B. Chemical*. – 2020. – V. 304. – Art. № 127274. – 12 p. DOI: 10.1016/j.snb.2019.127274.
9. **Lee, J.E.** ZnO-CuO Core-Hollow Cube Nanostructures for Highly Sensitive Acetone Gas Sensors at the ppb Level / J.E. Lee, C.K. Lim, H.J. Park et al. // *ACS Applied Materials & Interfaces*. – 2020. – V. 12. – I. 31. – P. 35688-35697. DOI: 10.1021/acsami.0c08593.
10. **Wu, K.** Synthesis and acetone sensing properties of ZnFe₂O₄/rGO gas sensors / K. Wu, Y. Luo, Y. Li, C. Zhang // *The Beilstein Journal of Nanotechnology*. – 2019. – V. 10. – P. 2516-2526. DOI: 10.3762/bjnano.10.242.
11. **Liu, X.** Template-free synthesis of rGO decorated hollow Co₃O₄ nano/microspheres for ethanol gas sensor / X. Liu, J. Liu, Q. Liu et al. // *Ceramics International*. – 2018. – V. 44. – I. 17. – P. 21091-21098. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.08.146.
12. **Yin, F.** Sn₃O₄/rGO heterostructure as a material for formaldehyde gas sensor with a wide detecting range and low operating temperature / F. Yin, Y. Li, W. Yue et al. // *Sensors and Actuators: B. Chemical*. – 2020. – V. 312. – Art. № 127954. – 10 p. DOI: 10.1016/j.snb.2020.127954.
13. **Рябко, А.А.** Газочувствительность наноструктурированных покрытий на основе наностержней оксида цинка при комбинированной активации / А.А. Рябко, А.А. Бобков, С.С. Налимова и др. // *Журнал технической физики*. – 2022. – Т. 92. – Вып. 5. – С. 758-764. DOI: 10.21883/JTF.2022.05.52382.314-21.
14. **Рябко, А.А.** Эффект интерфейсного легирования системы наностержней оксида цинка / А.А. Рябко, Д.С. Мазинг, А.А. Бобков и др. // *Физика твердого тела*. – 2022. – Т. 64. – № 11. – С. 1681-1689. DOI: 10.21883/FTT.2022.11.53320.408.
15. **Anikina, M.A.** Synthesis and study of zinc oxide nanorods for semiconductor adsorption gas sensors / M.A. Anikina, A.A. Ryabko, S.S. Nalimova, A.I. Maximov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – V. 1851. – Art. № 012010. – 5 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1851/1/012010.
16. **Jing, L.** The surface properties and photocatalytic activities of ZnO ultrafine particles / L. Jing, Z. Xu, X. Sun, J. Shang, W. Cai // *Applied Surface Science*. – 2001. – V. 180. – I. 3-4. – P. 308-314. DOI: 10.1016/S0169-4332(01)00365-8.
17. **Xie, F.** Highly sensitive electrochemical detection of Hg(II) promoted by oxygen vacancies of plasma-treated ZnO: XPS and DFT calculation analysis / F. Xie, M. Yang, Z.-Y. Song et al. // *Electrochimica Acta*. – 2022. – V. 426. – Art. № 140757. – 9 p. DOI: 10.1016/j.electacta.2022.140757.
18. **Zhang, B.** Visible light-induced room-temperature formaldehyde gas sensor based on porous three-dimensional ZnO nanorod clusters with rich oxygen vacancies / B. Zhang, J. Wang, Q. Wei et al. // *ACS Omega*. – 2022. – V. 7. – I. 26. – P. 22861-22871. DOI: 10.1021/acsomega.2c02613.

References:

1. Gardon M., Guilemany J.M. A review on fabrication, sensing mechanisms and performance of metal oxide gas sensors, *Journal of Material Science: Materials in Electronics*, 2013, vol. 24, issue 5, pp. 1410-1421. DOI: 10.1007/s10854-012-0974-4.
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. Comini E. Metal oxide nano-crystals for gas sensing, *Analytica Chimica Acta*, 2006, vol. 568, issue 1-2, pp. 28-40. DOI: 10.1016/j.aca.2005.10.069.
4. Jiang B., Lu J., Han W. et al. Hierarchical mesoporous zinc oxide microspheres for ethanol gas sensor,

- Sensors and Actuators: B. Chemical*, 2022, vol. 357, art. № 131333, 11 p. DOI: 10.1016/j.snb.2021.131333.
5. Ryabko A.A., Nalimova S.S., Mazing D.S. et al. Sensibilizatsiya nanosterzhnej zno kolloidnymi kvantovymi tochkami AgInS₂ dlya adsorbtsionnykh gazovykh sensorov s fotoaktivatsiej [Sensitization of zno nanorods by AgInS₂ colloidal quantum dots for adsorption gas sensors with light activation], *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki [Technical Physics]*, 2022, vol. 92, issue 6, pp. 845-851. DOI: 10.21883/JTF.2022.06.52514.15-22. (In Russian).
6. Bobkov A., Luchinin V., Moshnikov V., Nalimova S., Spivak Y. Impedance spectroscopy of hierarchical porous nanomaterials based on por-Si, por-Si incorporated by Ni and metal oxides for gas sensors, *Sensors*, 2022, vol. 22, issue4, art. № 1530, 14 p. DOI: 10.3390/s22041530.
7. Zhang D., Yang Z., Wu Z., Dong G. Metal-organic frameworks-derived hollow zinc oxide/cobalt oxide nanoheterostructure for highly sensitive acetone sensing, *Sensors and Actuators: B. Chemical*, 2019, vol. 283, pp. 42-51. DOI: 10.1016/j.snb.2018.11.133.
8. Sun S., Wang M., Chang X. et al. W₁₈O₄₉/Ti₃C₂T_x Mxene nanocomposites for highly sensitive acetone gas sensor with low detection limit, *Sensors and Actuators: B. Chemical*, 2020, vol. 304, art. № 127274, 12 p. DOI: 10.1016/j.snb.2019.127274.
9. Lee J.E., Lim C.K., Park H.J. et al. ZnO–CuO core-hollow cube nanostructures for highly sensitive acetone gas sensors at the ppb level, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, vol. 12, issue31, pp. 35688-35697. DOI: 10.1021/acsami.0c08593.
10. Wu K., Luo Y., Li Y., Zhang C. Synthesis and acetone sensing properties of ZnFe₂O₄/rGO gas sensors, *The Beilstein Journal of Nanotechnology*, 2019, vol. 10, pp. 2516–2526. DOI: 10.3762/bjnano.10.242.
11. Liu X., Liu J., Liu Q. et al. Template-free synthesis of rGO decorated hollow Co₃O₄ nano/microspheres for ethanol gas sensor, *Ceramics International*, 2018, vol. 44, issue 17, pp. 21091-21098. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.08.146>.
12. Yin F., Li Y., Yue W. et al. Sn₃O₄/rGO heterostructure as a material for formaldehyde gas sensor with a wide detecting range and low operating temperature, *Sensors and Actuators: B. Chemical*, 2020, vol. 312, art. no. 127954, 10 p. DOI: 10.1016/j.snb.2020.127954.
13. Ryabko A.A., Bobkov A.A., Nalimova S.S. et al. Gazochuvstvitel'nost' nanostrukturirovannykh pokrytij na osnove nanosterzhnej oksida tsinka pri kombinirovannoj aktivatsii [Gas sensitivity of nanostructured coatings based on zinc oxide nanorods under combined activation], *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki [Technical Physics]*, 2022, vol. 92, issue 5, pp. 758-764. DOI: 10.21883/JTF.2022.05.52382.314-21. (In Russian).
14. Ryabko A.A., Mazing D.S., Bobkov A.A. et al. Effekt interfejsnogo legirovaniya sistemy nanosterzhnej oksida tsinka [The effect of interface alloying of the zinc oxide nanorods system], *Fizika tverdogo tela [Physics of Solid State]*, 2022, vol. 64, issue 11, pp. 1681-1689. DOI: 10.21883/FTT.2022.11.53320.408. (In Russian).
15. Anikina M.A., Ryabko A.A., Nalimova S.S., Maximov A.I. Synthesis and study of zinc oxide nanorods for semiconductor adsorption gas sensors, *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1851, art. no. 012010, 5 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1851/1/012010.
16. Jing L., Xu Z., Sun X., Shang J., Cai W. The surface properties and photocatalytic activities of ZnO ultrafine particles, *Applied Surface Science*, 2001, vol. 180, issue 3-4, pp. 308-314. DOI: 10.1016/S0169-4332(01)00365-8.
17. Xie F., Yang M., Song Z.-Y. et al. Highly sensitive electrochemical detection of Hg(II) promoted by oxygen vacancies of plasma-treated ZnO: XPS and DFT calculation analysis, *Electrochimica Acta*, 2022, vol. 426, art. № 140757, 9 p. DOI: 10.1016/j.electacta.2022.140757.
18. Zhang B., Wang J., Wei Q. et al. visible light-induced room-temperature formaldehyde gas sensor based on porous three-dimensional ZnO nanorod clusters with rich oxygen vacancies, *ACS Omega*, 2022, vol. 7, issue 26, pp. 22861-22871. DOI: 10.1021/acsomega.2c02613.

Original paper

**GAS-SENSITIVE COMPOSITE NANOSTRUCTURES BASED ON ZINC OXIDE FOR
DETECTING ORGANIC SOLVENT VAPORS**

S.S. Nalimova¹, Z.V. Shomakhov², K.V. Gerasimova¹, K.N. Punegova¹, A.M. Guketlov²,
R.M. Kalmykov²

¹*Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint Petersburg, Russia*

²*Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.678

Abstract: The paper shows the possibilities of using ZnO-Fe composite structures as gas-sensitive layers for detecting organic solvent vapors exemplifying on isopropyl alcohol. Composite structures

were formed based on zinc oxide nanorods synthesized by the hydrothermal method, due to changes in their composition in a ferrous sulfate solution. The chemical composition of the surface was studied using X-ray photoelectron spectroscopy. It is shown that when using a ferrous sulfate solution with a concentration of 0,025 mol/l, iron and zinc atoms are observed on the surface. An increase in the concentration of the solution to 0,05 mol/l leads to the deposition of iron oxide particles on the surface of the nanorods. The study of some gas-sensitive characteristics was carried out at 250°C when exposed to isopropyl alcohol vapors in the concentration range from 200 to 1000 ppm. It was found that the response value of composite structures *ZnO-Fe* (0,025) exceeds the corresponding value for the zinc oxide nanorods, that may be due to the high content of oxygen vacancies in the composite sample.

Keywords: zinc oxide, gas sensors, composite nanostructures, X-ray photoelectron spectroscopy, organic solvent.

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

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

Герасимова Ксения Валерьевна – студент 1 курса магистратуры кафедры микро- и наноэлектроники ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Пунегова Ксения Николаевна – студент 2 курса магистратуры кафедры микро- и наноэлектроники ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Гукетлов Аслан Мухамедович – студент 4 курса Института информатики, электроники и робототехники ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

Калмыков Рустам Мухамедович – к.ф.-м.н., доцент кафедры электроники и цифровых информационных технологий ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

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

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

Ksenia V. Gerasimova – 1st year undergraduate student, Micro- and Nanoelectronics Department, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

Ksenia N. Punegova – 2nd year undergraduate student, Micro- and Nanoelectronics Department, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

Aslan M. Guketlov – 4th year student, Institute of Informatics, Electronics and Robotics, Kabardino-Balkarian State University

Rustam M. Kalmykov – Ph. D., Associate Professor of the Department of Electronics and Digital Information Technologies of Kabardino-Balkarian State University

Поступила в редакцию/received: 05.09.2022; после рецензирования/reviced: 01.10.2022; принята/accepcted 07.10.2022.