Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

**PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS
OF THE STUDY OF CLUSTERS,
NANOSTRUCTURES AND
NANOMATERIALS**

**FIZIKO-HIMIČESKIE ASPEKTY
IZUČENIÂ KLASTEROV,
NANOSTRUKTUR I NANOMATERIALOV**

выпуск 13

ТВЕРЬ 2021

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в журнале «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

<https://www.physchemaspects.ru>

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]. – Тверь: Издательство Тверского государственного университета, 2021. – Вып. 13. – 956 с.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-47789 от 13.12.2011.

Издание составлено из оригинальных статей, кратких сообщений и обзоров теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Журнал предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

Переводное название: Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials

Транслитерация названия: Fiziko-himičeskie aspekty izučeniâ klasterov, nanostruktur i nanomaterialov

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Print ISSN 2226-4442

Online ISSN 2658-4360

© Коллектив авторов, 2021

© Тверской государственнй университет, 2021

УДК 621.382

Оригинальная статья

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ НАНОСТРУКТУР СИСТЕМЫ Zn–Sn–O

С.С. Налимова¹, З.В. Шомахов², К.Н. Пунегова¹, А.А. Рябко¹, А.И. Максимов¹

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/2021.13.910

Аннотация: Наностержни оксида цинка синтезированы гидротермальным методом. Проведена обработка полученных образцов в водно-спиртовом растворе станната калия и мочевины при 170 °С в течение 30 и 60 минут. В результате получены наноструктуры Zn–Sn–O. Химический состав поверхности образцов ZnO и Zn–Sn–O исследован с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Проанализирована их чувствительность к парам изопропилового спирта (1000 мд) при температурах 120 °С, 180 °С, 250 °С. Показано перераспределение электронной плотности при формировании композитных наноструктур Zn–Sn–O, проявляющееся в химическом сдвиге пиков $O1s$ и $Zn2p$. Это свидетельствует о перестроении химических связей при замещении атомов цинка оловом. Обнаружено, что чувствительность композитных структур к парам изопропилового спирта значительно превышает чувствительность ZnO во всем исследуемом температурном диапазоне. Улучшение газочувствительных свойств связано с наличием в образцах системы Zn–Sn–O поверхностных центров различного типа, принимающих участие в адсорбции и окислении изопропилового спирта.

Ключевые слова: оксид цинка, станнат цинка, газовые сенсоры, наностержни, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия.

1. Введение

Металлооксидные полупроводники представляют большой интерес для газовых сенсоров адсорбционного типа благодаря низкому энергопотреблению, быстрому отклику, простоте изготовления и низкой стоимости [1-3]. Важным вопросом является исследование методов увеличения газочувствительности адсорбционных полупроводниковых сенсоров. Среди них можно выделить создание наноструктурированных материалов, обладающих большим отношением поверхности к объему, а также создание сенсоров на основе многокомпонентных оксидов металлов, в частности, в системе Zn–Sn–O.

В настоящее время тройные оксиды привлекают большое внимание в качестве сенсорных материалов нового типа, поскольку обладают стабильной структурой и отличной чувствительностью при детектировании различных газов [4]. Однако чувствительность многих тройных оксидов металлов слишком низкая для практического применения

из-за малой площади взаимодействия с газом и слабого обмена электронами [5]. Среди тройных оксидов металлов на основе олова $ZnSnO_3$ является типичным многофункциональным полупроводниковым оксидом n -типа со структурой перовскита. Благодаря химической активности и превосходным электронным свойствам $ZnSnO_3$ широко используется для создания газовых сенсоров [6-8]. Получены различные газочувствительные наноструктуры $ZnSnO_3$ в виде наночастиц [9], полых сфер [10], кубических наноструктур [11], нановолокон [12] и наноструктур в виде цветов [13], которые обладают большим отношением поверхности к объему.

Целью работы является синтез наноструктур на основе системы $Zn-Sn-O$ и исследование их чувствительности к парам изопропилового спирта.

2. Эксперимент

Газочувствительные слои, представляющие собой массивы наностержней оксида цинка, были получены гидротермальным методом [14-16] на керамических подложках с встречно-штыревыми золотыми электродами, толщина которых и расстояние между ними составляет 25 мкм. Полученные слои подвергали дополнительной обработке для частичного замещения атомов цинка в кристаллической структуре наностержней атомами олова и формирования композитной структуры. Был приготовлен водно-спиртовой раствор (40 % изопропилового спирта и 60 % воды). Станнат калия $K_2SnO_3 \cdot 3H_2O$ и мочевины CH_4N_2O растворяли в 10 мл водно-спиртового раствора. После перемешивания в течение 10 минут образовавшуюся суспензию переносили в автоклав из нержавеющей стали с тефлоновым вкладышем объемом 50 мл и помещали на дно автоклава подложки с наноструктурами оксида цинка. Синтез проводили при температуре 170 °С и в течение 30 и 60 минут. После этого образцы промывали дистиллированной водой, сушили на воздухе и отжигали при 500 °С в течение 15 минут.

Экспериментальные спектры синтезированных композитных образцов и исходных наностержней оксида цинка были получены на рентгеновском фотоэлектронном спектрометре K-Alpha фирмы Thermo Scientific (США). Обзорные спектры, позволяющие определить все присутствующие в образцах элементы, были получены в диапазоне энергий связи от 0 до 1350 эВ. Спектры отдельных элементов были сняты с целью более точного определения положения пиков.

Газочувствительность образцов была исследована при трех различных температурах (120 °С, 180 °С, 250 °С) при детектировании паров изопропилового спирта в качестве целевого газа. Концентрацию паров

изопропилового спирта поддерживали на уровне 1000 ppm, регулируя поток газа-разбавителя и поток газа через барботер с изопропиловым спиртом. Концентрацию паров изопропилового спирта рассчитывали по формуле:

$$C = \frac{P_{gas} \cdot F_{gas}}{P_{atm} (F_{gas} + F_{air})},$$

где P_{gas} , F_{gas} – давление насыщенных паров изопропилового спирта и скорость потока воздуха через барботер; P_{atm} – атмосферное давление (принимается как 760 мм рт. ст.), F_{air} – скорость потока газа-разбавителя (воздуха). Давление паров рассчитывается по уравнению Антуана:

$$P_{gas} = 10^{\frac{A-B}{C+T}},$$

где A , B , C – константы, T – температура жидкости. Напряжение смещения составляло 5 В. Ток регистрировался с помощью пикоамперметра Keithley 6485. Чувствительность образцов определялась по формуле:

$$S = \frac{R_{air}}{R_{gas}},$$

где R_{air} и R_{gas} – сопротивления образца в воздухе и при воздействии детектируемого газа (изопропиловый спирт).

3. Результаты и обсуждение

Проведенные ранее исследования [17, 18] изменения состава наностержней оксида цинка при гидротермальной обработке в водно-спиртовом растворе станната калия и мочевины показали, что после обработки в течение 30 и 60 минут происходит изменение структуры с образованием соединений цинка, олова и кислорода. При обработке в течение 3 часов наностержни оксида цинка растворяются.

По рентгеновским фотоэлектронным спектрам проанализировано перераспределение электронной плотности цинка и кислорода в результате формирования композитных структур. Как видно из рис. 1, спектр основного уровня цинка содержит два пика, соответствующие $Zn2p_{3/2}$ и $Zn2p_{1/2}$. Уменьшение интенсивности пика свидетельствует о замещении атомов цинка в наностержнях оловом. Также при синтезе композитных структур в течение 1 часа происходит сдвиг пиков $Zn2p_{3/2}$ и $Zn2p_{1/2}$ на 0,4 и 0,5 эВ, соответственно, в сторону меньшей энергии связи.

На рис. 2 представлено сравнение спектров уровней кислорода образцов наностержней оксида цинка и синтезированных в течение 30 и 60 минут структур $Zn-Sn-O$. Спектры кислорода всех образцов содержат две составляющие: кислород кристаллической решетки O^{2-} (530,7 эВ для

оксида цинка) и кислород поверхностных гидроксильных групп (532,2 эВ для оксида цинка).

Рис. 1. Спектры остовных уровней цинка ZnO и $Zn-Sn-O$, синтезированного в течение 30 и 60 минут.

Рис. 2. Спектры остовных уровней кислорода ZnO и $Zn-Sn-O$, синтезированного в течение 30 и 60 минут.

Обнаружено, что при увеличении времени нахождения наностержней оксида цинка в растворе станната калия и мочевины происходит большее изменение химического окружения кислорода, наблюдаемое по сдвигу пиков кислорода в сторону меньшей энергии связи. Также при модифицировании оловом происходит изменение соотношения различных форм кислорода. Так, на поверхности наностержней оксида цинка содержание кислорода в различных

состояниях близко (48 % – кислород кристаллической решетки, 52 % – кислород OH -групп). После их обработки в растворе станната калия и мочевины в течение 30 минут увеличивается содержание кислорода в виде OH -групп (75%) и уменьшается содержание кислорода O^{2-} (25%). Увеличение времени обработки до 60 минут приводит к соотношению, близкому к исходному (58 % – O^{2-} , 42 % – OH -группы).

Исследование взаимодействия образцов с парами изопропилового спирта показало, что при всех температурах чувствительность $Zn-Sn-O$, синтезированного в течение 30 минут, значительно превышает чувствительность ZnO . Значения чувствительности слоя, состоящего из наностержней оксида цинка, составляют 1,4, 1,9 и 2,5, в то время как для слоя $Zn-Sn-O$ они равны 6,3, 6,7 и 15,6 (при 120°C, 180°C и 250°C, соответственно).

Изменение чувствительности образца $Zn-Sn-O$ при подаче паров изопропилового спирта представлено на рис. 3. Подача изопропилового спирта начиналась в момент времени 0 с, подача воздуха – 600 с. При подаче паров изопропилового спирта мы можем наблюдать уменьшение сопротивления, а при подаче воздуха – увеличение, что соответствует процессам при взаимодействии полупроводников n -типа с восстанавливающими газами. Обнаружено, что увеличение температуры от 180°C до 250°C приводит к резкому росту чувствительности. При этом значения чувствительности образца при температурах измерения 120°C и 180°C отличаются незначительно.

Рис. 3. Временные зависимости чувствительности образца $Zn-Sn-O$, синтезированного в течение 30 минут, к парам изопропилового спирта при различных температурах.

Улучшение газочувствительных свойств композитного образца $Zn-Sn-O$ по сравнению с ZnO можно объяснить следующим образом.

Процесс взаимодействия оксида металла с детектируемым газом является многостадийным процессом, включающим как окислительно-восстановительные, так и кислотно-основные каталитические реакции. Поэтому улучшение газочувствительных свойств сенсора достигается при создании материалов, содержащих адсорбционные центры с разными окислительно-восстановительными и кислотно-основными свойствами. Близрасположенные такие центры способны создать новый кооперативный эффект наносистемы – обеспечить раздельное ускорение процессов адсорбции и окисления молекул газа.

4. Заключение

В работе показаны возможности улучшения газочувствительных свойств наностержней оксида цинка при обработке в водно-спиртовом растворе станната калия и мочевины. В результате формируются композитные наноструктуры $Zn-Sn-O$, на поверхности которых находятся центры различного типа, принимающие участие в адсорбции и окислении паров изопропилового спирта. С помощью метода рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии показано, что формирование наноструктур системы $Zn-Sn-O$ сопровождается сдвигом пиков $Zn2p$ и $O1s$, подтверждающим перестроение химических связей в исходных наностержнях оксида цинка.

Библиографический список:

1. **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.
2. **Dimitrov, D.T.** Investigation of the electrical and ethanol-vapour sensing properties of the junctions based on ZnO nanostructured thin film doped with copper / D.T. Dimitrov, N.K. Nikolaev, K.I. Papazova et al. // Applied Surface Science. – 2017. – V. 392. – P. 95-108. DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.08.049.
3. **Krasteva, L.K.** Synthesis and characterization of nanostructured zinc oxide layers for sensor applications / L.K. Krasteva, D.T. Dimitrov D.T., K.I. Papazova et al. // Semiconductors. – 2013. – V. 47. – I. 4. – P. 586-591. DOI: 10.1134/S1063782613040155.
4. **Mayedwa, N.** Green synthesis of zinc tin oxide ($ZnSnO_3$) nanoparticles using Aspalathus Linearis natural extracts: Structural, morphological, optical and electrochemistry study / N. Mongwaketsi, S. Khamlich, K. Kaviyarasu, N. Matinise, M. Maaza // Applied Surface Science. – 2018. – V. 446. – P. 250-257. DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.12.161.
5. **Wang, B.S.** Synthesis and high formaldehyde sensing properties of quasi two-dimensional mesoporous $ZnSnO_3$ nanomaterials / B.S. Wang, J.B. Yu, X.H. Li, J. Yin, M. Chen // RSC Advances. – 2019. – V. 9. – I. 26. – P. 14809-14816. DOI: 10.1039/C9RA01593K.
6. **Yin, Y.** Fabrication, characterization and *n*-propanol sensing properties of perovskite-type $ZnSnO_3$ nanospheres based gas sensor / Y. Yin, Y. Shen, P. Zhou et al. // Applied Surface Science. – 2020. – V. 509. – Art. № 145335. – 10 p. DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.145335.
7. **Levkevich, E.A.** Synthesis, investigation and gas sensitivity of zinc stannate layers / E.A. Levkevich, A.I. Maksimov, S.A. Kirillova, S.S. Nalimova, V.M. Kondrat'ev // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 27-30 January 2020, St. Petersburg and Moscow, Russia,

– New York: IEEE, 2020. – P. 984-986. DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039451.

8. **Levkevich, E.A.** Study of interaction between H_2O molecules and ZTO-ZSH surface / E.A. Levkevich, A.A. Semenova, A.I. Maximov, S.S. Nalimova, S.A. Kirillova, V.A. Moshnikov, M.V. Zhukov // AIP Conference Proceedings. – 2020. – V. 2280. – I. 1. – Art. № 050030. – 5 p. DOI: 10.1063/5.0018936.

9. **Wang, X.** Preparation of transparent amorphous $ZnSnO_3$ cubic nanoparticles and light-induced homostructures: Application in UV sensor and room-temperature gas sensor / X. Wang, M. Xia, H. Li et al. // Applied Surface Science. – 2019. – V. 493. – P. 862-872. DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.07.081.

10. **Feng, G.** Morphology-controlled synthesis of $ZnSnO_3$ hollow spheres and their *n*-butanol gas-sensing performance / G. Feng, Y. Che, C. Song et al. // Ceramics International. – 2021. – V. 47. – I. 2. – P. 2471-2482. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.09.090.

11. **Guo, W.W.** One pot synthesis of hierarchical and porous $ZnSnO_3$ nanocubes and gas sensing properties to formaldehyde / W.W. Guo, B.Y. Zhao, M. Fu, C.J. Wang, R. Peng // Results in Physics. – 2019. – V. 15. – Art. № 102606. – 6 p. DOI: 10.1016/j.rinp.2019.102606.

12. **Chen, Q.** Enhanced acetone sensor based on Au functionalized In-doped $ZnSnO_3$ nanofibers synthesized by electrospinning method, / Q. Chen, Y.H. Wang, M.X. Wang et al. // Journal of Colloid and Interface Science. – 2019. – V. 543. – P. 285-299. DOI: 10.1016/j.jcis.2019.02.055.

13. **Wang, X.Y.** Synthesis of 3D flower-like $ZnSnO_3$ and improvement of ethanol-sensing properties at room temperature based on nano- TiO_2 decoration and UV radiation / X.Y. Wang, B.N. Ding, Y.P. Liu et al. // Sensors and Actuators B. – 2018. – V. 264. – P. 119-127. DOI: 10.1016/j.snb.2018.02.178.

14. **Ryabko, A.A.** Two-stage synthesis of structured microsystems based on zinc-oxide nanorods by ultrasonic spray pyrolysis and the low-temperature hydrothermal method / A.A. Ryabko, A.I. Maximov, V.A. Moshnikov et al. // Semiconductors. – 2020. – V. 54. – I. 11. – P. 1496-1502. DOI: 10.1134/S1063782620110238.

15. **Nalimova, S.S.** Light-activation of gas sensitive layers based on zinc oxide nanowires / S.S. Nalimova, A.A. Ryabko, A.I. Maximov, V.A. Moshnikov // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – V. 1697. – Art. № 012128, 6 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1697/1/012128.

16. **Bobkov, A.** The multisensor array based on grown-on-chip zinc oxide nanorod network for selective discrimination of alcohol vapors at sub-ppm range / A. Bobkov, V. Moshnikov, A. Varezchnikov et al. // Sensors. – 2019. – V. 19. – I. 19. – Art. № 4265. – 13 p. DOI: 10.3390/s19194265.

17. **Шомахов, З.В.** Анализ изменения состава поверхности при образовании наноструктур стannата цинка / З.В. Шомахов, С.С. Налимова, З.Х. Калажиков, В.А. Мошников // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2020. – Вып. 12. – С. 222-231. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.222.

18. **Nalimova, S.S.** Current state of studies on synthesis and application of zinc stannate (review) / S.S. Nalimova, A.I. Maksimov, L.B. Matyushkin, V.A. Moshnikov // Glass Physics and Chemistry. – 2019. – V. 45. – I. 4. – P. 251-260. DOI: 10.1134/S1087659619040096.

References:

1. 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.

2. Dimitrov D.T., Nikolaev N.K., Papazova K.I. et al. Investigation of the electrical and ethanol-vapour sensing properties of the junctions based on ZnO nanostructured thin film doped with copper, *Applied Surface Science*, 2017, vol. 392, pp. 95-108. DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.08.049.

3. Krasteva L.K., Dimitrov D.T., Papazova K.I. et al. Synthesis and characterization of nanostructured zinc oxide layers for sensor applications, *Semiconductors*, 2013, vol. 47, issue 4, pp. 586-591. DOI: 10.1134/S1063782613040155.

4. Mongwaketsi N., Khamlich S., Kaviyarasu K., Matinise N., Maaza M. Green synthesis of zinc tin oxide ($ZnSnO_3$) nanoparticles using *Aspalathus Linearis* natural extracts: Structural, morphological, optical and electrochemistry study, *Applied Surface Science*, 2018, vol. 446, pp. 250-257. DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.12.161.

5. Wang B.S., Yu J.B., Li X.H., Yin J., Chen M. Synthesis and high formaldehyde sensing properties of quasi two-dimensional mesoporous $ZnSnO_3$ nanomaterials, *RSC Advances*, 2019, vol. 9, issue 26, pp. 14809-14816. DOI: 10.1039/C9RA01593K.

6. Yin Y., Shen Y., Zhou P. et al. Fabrication, characterization and *n*-propanol sensing properties of perovskite-

- type $ZnSnO_3$ nanospheres based gas sensor, *Applied Surface Science*, 2020, vol. 509, art. no. 145335, 10 p. DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.145335.
7. Levkevich E.A., Maksimov A.I., Kirillova S.A., Nalimova S.S., Kondrat'ev V.M. Synthesis, investigation and gas sensitivity of zinc stannate layers, *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 27-30 January 2020, St. Petersburg and Moscow, Russia, New York, IEEE, 2020, pp. 984-986. DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039451.
8. Levkevich E.A., Semenova A.A., Maximov A.I. et al. Study of interaction between H_2O molecules and ZTO-ZSH surface, *AIP Conference Proceedings*, 2020, vol. 2280, issue 1. art. no. 050030, 5 p. DOI: 10.1063/5.0018936.
9. Wang X., Xia M., Li H. et al. Preparation of transparent amorphous $ZnSnO_3$ cubic nanoparticles and light-induced homostructures: Application in UV sensor and room-temperature gas sensor, *Applied Surface Science*, 2019, vol. 493, pp. 862-872. DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.07.081.
10. Feng G., Che Y., Song C., Xiao J., Fan X., Sun S., Huang G., Ma Y. Morphology-controlled synthesis of $ZnSnO_3$ hollow spheres and their *n*-butanol gas-sensing performance, *Ceramics International*, 2021, vol. 47, issue 2, pp. 2471-2482. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.09.090.
11. Guo W.W., Zhao B.Y., Fu M., Wang C.J., Peng R. One pot synthesis of hierarchical and porous $ZnSnO_3$ nanocubes and gas sensing properties to formaldehyde, *Results in Physics*, 2019, vol. 15, art. no. 102606, 6 p. DOI: 10.1016/j.rinp.2019.102606.
12. Chen Q., Wang Y.H., Wang M.X. et al. Enhanced acetone sensor based on Au functionalized In-doped $ZnSnO_3$ nanofibers synthesized by electrospinning method, *Journal of Colloid and Interface Science*, 2019, vol. 543, pp. 285-299. DOI: 10.1016/j.jcis.2019.02.055.
13. Wang X.Y., Ding B.N., Liu Y.P. et al. Synthesis of 3D flower-like $ZnSnO_3$ and improvement of ethanol-sensing properties at room temperature based on nano- TiO_2 decoration and UV radiation, *Sensors and Actuators B*, 2018, vol. 264, pp. 119-127. DOI: 10.1016/j.snb.2018.02.178.
14. Ryabko A.A., Maximov A.I., Moshnikov V.A. et al. Two-stage synthesis of structured microsystems based on zinc-oxide nanorods by ultrasonic spray pyrolysis and the low-temperature hydrothermal method, *Semiconductors*, 2020, vol. 54, issue 11, pp. 1496-1502. DOI: 10.1134/S1063782620110238.
15. Nalimova S.S., Ryabko A.A., Maximov A.I., Moshnikov V.A. Light-activation of gas sensitive layers based on zinc oxide nanowires, *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1697, art. no. 012128, 6 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1697/1/012128.
16. Bobkov A., Moshnikov V., Varezchnikov A. et al. The multisensor array based on grown-on-chip zinc oxide nanorod network for selective discrimination of alcohol vapors at sub-ppm range, *Sensors*, 2019, vol. 19, issue 19, art. no. 4265, 13 p. DOI: 10.3390/s19194265.
17. Shomakhov Z.V., Nalimova S.S., Kalazhokov Z.Kh., Moshnikov V.A. Analiz izmeneniya sostava poverkhnosti pri obrazovanii nanostruktur stannata tsinka [Analysis of changes in the surface composition during formation of zinc stannate nanostructures], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2020, issue. 12, pp. 222-231. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.222. (In Russian).
18. Nalimova S.S., Maksimov A.I., Matyushkin L.B., Moshnikov V.A. Current state of studies on synthesis and application of zinc stannate (review), *Glass Physics and Chemistry*, 2019, vol. 45, issue 4, pp. 251-260. DOI: 10.1134/S1087659619040096.

Original paper

SYNTHESIS AND STUDY OF GAS-SENSITIVE NANOSTRUCTURES OF THE Zn–Sn–O SYSTEM

S.S. Nalimova¹, Z.V. Shomakhov², K.N. Punegova¹, A.A. Ryabko¹, A.I. Maximov¹

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/2021.13.910

Abstract: Zinc oxide nanorods were synthesized by the hydrothermal method. The obtained samples were processed in an aqueous-alcohol solution of potassium stannate and urea at 170 °C during different times. As a result, Zn–Sn–O nanostructures were obtained. The surface chemical composition of ZnO and Zn–Sn–O was studied using the X-ray photoelectron spectroscopy. Its

sensitivity to vapors of isopropyl alcohol (1000 ppm) at 120 °C, 180 °C, 250 °C was analyzed. The electron density redistribution during the $Zn-Sn-O$ composite nanostructures formation manifests itself in the chemical shift of the $O1s$ and $Zn2p$ peaks. It confirms the rearrangement of chemical bonds when zinc atoms are replaced by tin ones. It was found that the sensitivity of composite structures to isopropyl alcohol vapors significantly exceeds that of ZnO in the entire temperature range under study. The improvement of gas-sensitive properties is associated with the presence of various types of surface centers in the $Zn-Sn-O$ samples that participate in the adsorption and oxidation of isopropyl alcohol.

Keywords: zinc oxide, zinc stannate, gas sensors, nanorods, X-ray photoelectron spectroscopy.

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)»

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

Пунегова Ксения Николаевна – магистрант кафедры микро- и нанoeлектроники ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Рябко Андрей Андреевич – младший научный сотрудник кафедры микро- и нанoeлектроники ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

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

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

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

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

Andrey A. Ryabko – Junior Researcher, Micro- and Nanoelectronics Department, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

Aleksandr I. Maximov – Ph. D., Docent of Micro- and Nanoelectronics Department, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

Поступила в редакцию/received: 06.09.2021; после рецензирования/revised: 07.10.2021; принята/accepted 10.10.2021.