УДК 621.315.592.4 *Оригинальная статья*

Синтез иерархических структур на основе наностержней оксида цинка и металлоорганических каркасов

С.С. Налимова[1], З.В. Шомахов[2], В.С. Котлярова[1], М.М. Красникова[1], О.Г. Макарова[1], К.Д. Буй[1], А.А. Рыбина[1], С.С. Бузовкин[1]

[1]ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5
[2]ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»
360004, Россия, Кабардино-Балкарская республика, Нальчик, ул. Чернышевского, 173
sskarpova@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.722

Аннотация: В работе рассмотрены подходы к созданию иерархических структур на основе наностержней оксида цинка, модифицированных металлоорганическим каркасом ZIF-8. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения функциональных характеристик газовых сенсоров и фотокатализаторов за счёт увеличения удельной поверхности и числа активных центров. Наностержни *ZnO*, полученные гидротермальным методом, обеспечивают направленный перенос носителей заряда, а оболочка ZIF-8, обладающая высокой пористостью и селективной адсорбционной способностью, выполняет роль фильтра молекул по их размеру. Синтез композитов проводили сольвотермальным методом в средах этанола и диметилформамида и последующей термической обработкой. Методами растровой электронной микроскопии, рентгеновской дифрактометрии и рентгеноспектрального микроанализа исследованы морфология, фазовый состав полученных образцов и распределение элементов в них. Установлено, что отжиг при 500°C приводит к разложению ZIF-8 и формированию только оксидной фазы. Синтез в диметилформамиде и отжиг при 320°C позволяют сохранить обе фазы и получить равномерное покрытие наностержней оболочкой каркаса. Однако при этом наблюдается агрегация частиц и потеря исходной стержневой морфологии. Показана необходимость оптимизации условий синтеза для сохранения индивидуальной формы наностержней и обеспечения доступности активных центров.

Ключевые слова: оксид цинка, ZIF-8, иерархические структуры, сольвотермальный синтез, нанокомпозиты.

Налимова Светлана Сергеевна – к.ф.-м.н., доцент кафедры микро- и наноэлектроники ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
Шомахов Замир Валериевич – к.ф.-м.н., директор института электроники, робототехники и искусственного интеллекта ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»
Котлярова Вера Сергеевна – студент 4 курса кафедры микро- и наноэлектроники ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
Красникова Мария Михайловна – студент 4 курса кафедры микро- и наноэлектроники ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
Макарова Олеся Геннадьевна – студент 4 курса кафедры микро- и наноэлектроники ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
Буй Конг Доан – аспирант 4 года обучения кафедры микро- и наноэлектроники ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
Рыбина Арина Алексеевна – аспирант 1 года обучения кафедры микро- и наноэлектроники ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
Бузовкин Сергей Сергеевич – аспирант 1 года обучения кафедры микро- и наноэлектроники ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

© С.С. Налимова, З.В. Шомахов, В.С. Котлярова, М.М. Красникова, О.Г. Макарова, К.Д. Буй, А.А. Рыбина, С.С. Бузовкин, 2026

Original paper

Synthesis of hierarchical structures based on zinc oxide nanowires and metal-organic frameworks

S.S. Nalimova[1], Z.V. Shomakhov[2], V.S. Kotlyarova[1], M.M. Krasnikova[1], O.G. Makarova[1], C.D. Bui[1], A.A. Rybina[1], S.S. Buzovkin[1]

[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/2026.18.722

Abstract: The paper discusses approaches to creating hierarchical structures based on zinc oxide nanowires modified with metal-organic framework ZIF-8. The study is relevant because it aims to improve functional properties of gas sensors and photocatalysts by increasing their specific surface area and number of active sites. Zinc oxide nanowires produced using the hydrothermal method allow for directional charge carrier transfer, while the ZIF-8 shell with its high porosity and selective adsorption capacity acts as a molecular filter. Synthesis of these composites was conducted using the solvothermal method in ethanol and dimethylformamide solvents, followed by heat treatment. The morphology, phase composition, and elemental distribution of the samples were analyzed using scanning electron microscopy, X-ray diffraction, and energy-dispersive X-ray spectroscopy. It has been found that annealing at 500°C causes the decomposition of ZIF-8 and formation of only the zinc oxide phase. The synthesis in dimethylformamide and annealing at 320°C allow us to preserve both phases and achieve a uniform coating of nanowires with a layer of the framework. However, aggregation of particles and loss of the original nanowire morphology have been observed. It has been shown that it is necessary to optimize the synthesis conditions in order to preserve the individual shape of the nanorods and ensure the availability of the active sites.

Keywords: zinc oxide, ZIF-8, hierarchical structures, solvothermal synthesis, nanocomposites.

Svetlana S. Nalimova – Ph. D., Associate Professor, Department of Micro- and Nanoelectronics, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», ORCID: 0000-0003-3065-3961

Zamir V. Shomakhov – Ph. D., Director of the Institute of electronics, robotics and artificial intelligence, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, ORCID: 0000-0001-5738-2626

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

Mariya M. Krasnikova – 4th year student, Department of Micro- and Nanoelectronics, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

Olesya G. Makarova – 4th year student, Department of Micro- and Nanoelectronics, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

Cong Doan Bui – 4th year postgraduate student, Department of Micro- and Nanoelectronics, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», ORCID: 0000-0002-9937-9078

Arina A. Rybina – 1st year postgraduate student, Department of Micro- and Nanoelectronics, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», ORCID: 0000-0002-9937-9078

Sergey S. Buzovkin – 1st year postgraduate student, Department of Micro- and Nanoelectronics, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», ORCID: 0000-0002-9937-9078

Поступила в редакцию/received: 25.07.2026; после рецензирования/revised: 30.08.2026; принята/accepted: 02.09.2026.

1. Введение

Развитие функциональных наноматериалов связано с созданием иерархических структур, в которых направленное управление составом, морфологией и межфазными границами позволяет увеличивать удельную площадь поверхности и количество активных центров [1, 2]. Такие материалы представляют интерес для газовой сенсорики, фотокатализа и других областей, где функциональные свойства определяются преимущественно процессами, протекающими на поверхности [3].

Одним из перспективных материалов для формирования иерархических структур является оксид цинка [4]. Наностержни ZnO обладают развитой поверхностью и обеспечивают направленный перенос носителей заряда. Для их получения широко применяется гидротермальный метод, преимуществами которого являются простота реализации, экономическая эффективность и возможность управления геометрическими параметрами формируемых наноструктур [5, 6]. Перспективным направлением модификации наностержней ZnO является их объединение с металлоорганическими каркасами (MOF – metal-organic framework). Большинство металлоорганических каркасов обладает относительно низкой электрической проводимостью, что ограничивает их самостоятельное применение в резистивных сенсорных системах [7]. Формирование композитов ZnO/MOF позволяет объединить электрофизические свойства и механическую устойчивость оксидного каркаса с развитой пористостью и селективными адсорбционными свойствами металлоорганической фазы [8]. При этом MOF-компонент может выполнять функцию молекулярного фильтра, а наностержни ZnO – обеспечивать перенос носителей заряда [9].

Одним из наиболее изученных металлоорганических каркасов является ZIF-8 – цеолитоподобная имидазолатная структура, образованная ионами Zn^{2+} и 2-метилимидазольными лигандами [10]. Оксид цинка может одновременно выступать основой композита и источником ионов Zn^{2+} для роста ZIF-8. При частичном растворении поверхности ZnO и её взаимодействии с органическим лигандом происходит образование пористой оболочки ZIF-8. В результате формируется иерархическая структура типа «ядро-оболочка», обладающая увеличенной площадью поверхности и большим количеством доступных активных центров.

Целью настоящей работы является разработка методов синтеза иерархических структур на основе наностержней оксида цинка и металлоорганических каркасов, а также исследование особенностей их формирования, кристаллической структуры и морфологии.

2. Эксперимент

Получение образцов проводили двумя способами: в среде диметилформамида (ДМФА) и в среде этанола. В качестве источника цинка использовали оксид цинка ZnO, а в качестве органического лиганда – 2-метилимидазол $C_4H_6N_2$.

Синтез ZIF-8 в среде ДМФА проводили при следующих условиях. Для приготовления реакционной смеси использовали 2-метилимидазол с концентрацией 0,081 моль/л и предварительно синтезированные гидротермальным методом [11] наностержни ZnO с концентрацией 0,049 моль/л. Для создания раствора для синтеза смешивали 48 мл

диметилформамида и 12 мл дистиллированной воды. К раствору 2-метилимидазола добавляли необходимое количество порошка оксида цинка и перемешивали в течение 30 минут. Затем реакционную смесь помещали в автоклав и выдерживали в термостате в течение 20 часов при температуре 70°C. Следующим этапом была промывка образца дистиллированной водой и сушка, после чего порошок подвергали термической обработке при температуре 320°C в течение 1 часа.

Синтез ZIF-8 в среде этанола проводили при двух различных температурах (50°C и 70°C). 3,09 моль/л 2-метилимидазола растворяли в этаноле, затем добавляли ZnO (0,655 моль/л). Полученную реакционную смесь перемешивали на магнитной мешалке при заданной температуре в течение 4 часов, при этом скорость вращения мешалки составляла 300-500 об/мин. Затем полученный порошок промывали дистиллированной водой, сшили на воздухе и подвергали термической обработке при температуре 500°C в течение 1 часа.

Морфология поверхности образцов была исследована с помощью растровой электронной микроскопии, элементный состав – методом рентгеноспектрального микроанализа (Tescan VEGA3LMH, Tescan, Чехия). Фазовый состав образцов изучали методом рентгеновской дифрактометрии (ДРОН-6, НПП «Буревестник», Россия).

3. Результаты и обсуждение

Образование координационной структуры ZIF-8 можно условно представить следующими стадиями:

$$C_4H_6N_2 \leftrightarrow C_4H_5N_2^- + H^+$$

$$ZnO + 2H^+ \rightarrow Zn^{2+} + H_2O$$

$$Zn^{2+} + 2C_4H_5N_2^- \rightarrow Zn(C_4H_5N_2)_2$$

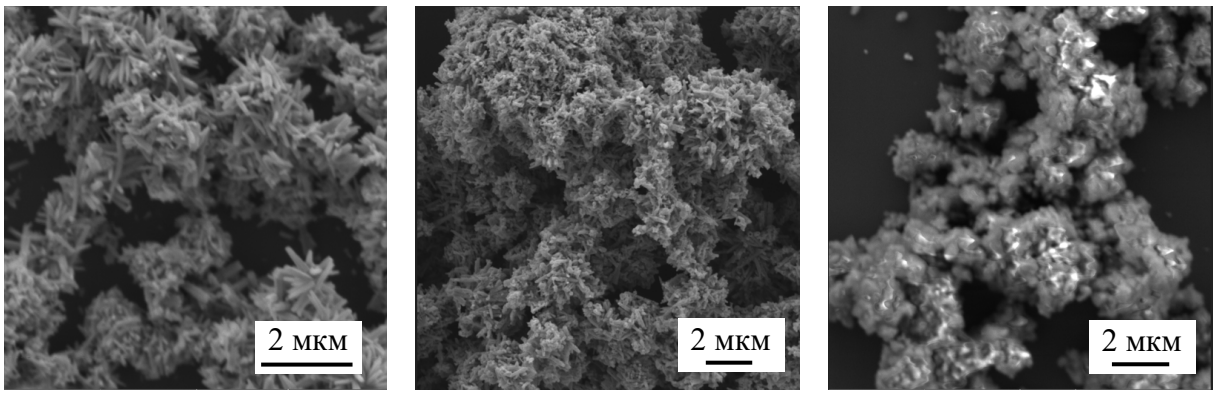
Суммарное уравнение реакции:

$$ZnO + 2C_4H_6N_2 \rightarrow Zn(C_4H_5N_2)_2 + H_2O$$

где $Zn(C_4H_5N_2)_2$ – условная формула структурного звена координационной решётки ZIF-8.

Результаты исследования исходных наностержней оксида цинка, а также структур, модифицированных в растворе 2-метилимидазола, методом электронной микроскопии представлены на рис. 1. После синтеза ZIF в среде этанола при 50°C поверхность наностержней оксида цинка не изменяется, следовательно, данная температура не достаточна для образования ZIF-8. При увеличении температуры синтеза происходит незначительное изменение морфологии наностержней (см. рис. 1 б) с возможным образованием тонкой оболочки на их поверхности, при этом агрегация минимальна. Анализ влияния формирования оболочки ZIF на

поверхности наностержней ZnO в среде ДМФА (см. рис. 1 в) показал, что стержневая форма оксида цинка не сохраняется, происходит рост оболочки и формирование агрегатов, что может быть связано с высокой концентрацией 2-метилимидазола и отсутствием перемешивания при синтезе.



а б в

Рис. 1. РЭМ-изображения синтезированных порошков: а – наностержни ZnO, б – наностержни ZnO после обработки в среде этанола, в – наностержни ZnO после обработки в среде ДМФА.

Результаты фазового анализа полученных структур показали, что образец, модифицированный оболочкой цеолитного имидазолатного каркаса в среде этанола при 70°C, содержит только фазу оксида цинка (см. рис. 2 а). Все рефлексы на рентгендифрактограмме соответствуют кристаллографическим плоскостям гексагональной структуры вюрцита (PDF 01-078-3323) [12]. Данный результат обусловлен выбором слишком высокой температуры отжига. Известно, что ZIF-8 при температурах выше 400°C в атмосфере воздуха разлагается с образованием оксида цинка [13]. Это направление широко используется для получения оксидов металлов, в том числе ZnO, из металлоогранических каркасов. Полученные оксидные наноструктуры отличаются структурным разнообразием, высокой удельной поверхностью, управляемой пористостью и показывают превосходные характеристики в таких областях, как сенсорика, суперконденсаторы, фотокатализ. Фазовый анализ образца, модифицированного ZIF в среде ДМФА показал наличие фазы ZnO [12] и ZIF-8 [14], каждая из которых обладает высокой степенью кристалличности и ярко выраженными рефлексами (см. рис. 2 б). Таким образом, при 320°C сохраняется фаза ZIF-8, а выбранные условия обработки способствуют лишь частичному растворению наностержней оксида цинка на их поверхности.

Равномерность распределения элементов по поверхности образце ZnO/ZIF-8, синтезированного в среде ДМФА, была оценена по результатам рентгеноструктрного микроанализа. На рис. 3 приведены карты распределения Zn, O и N, которые демонстрируют однородное распределение их по всей площади сканирования.

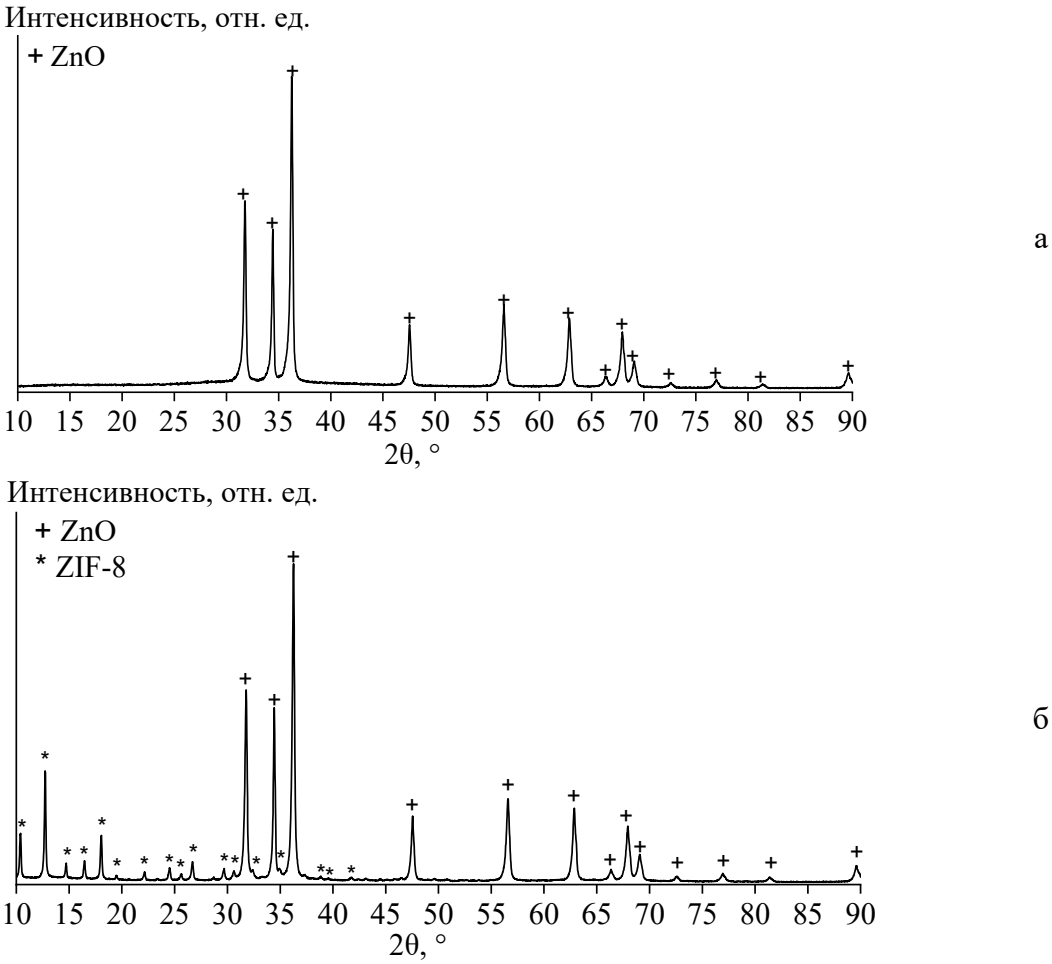


Рис. 2. Дифрактограммы образцов, синтезированных в среде: а – этанола, б – ДМФА.

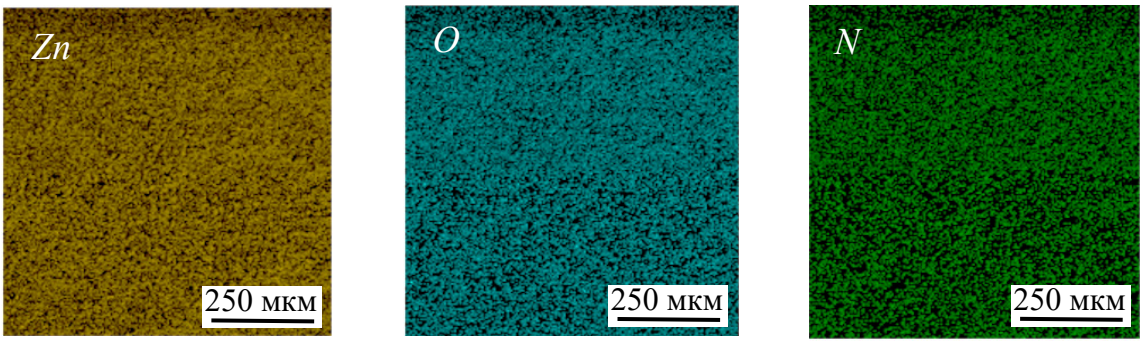


Рис. 3. Карты распределения элементов образца *ZnO* /ZIF-8: а – *Zn* , б – *O* , в – *N* .

Равномерное распределение азота свидетельствует об образовании оболочки ZIF на всей поверхности наностержней *ZnO* при выбранных условиях синтеза. Однако для предотвращения образования агрегатов следует уменьшить концентрацию 2-метилимидазола в растворе. Сохранение исходной морфологии наностержней важно для применения в сенсорике, так как при этом обеспечивается доступ газообразных молекул к реакционно-активным центрам.

3. Заключение

В работе исследованы условия формирования иерархических структур на основе наностержней *ZnO* и ZIF-8. Показано, что природа растворителя, температура синтеза и режим отжига определяют фазовый состав и морфологию полученных материалов. Таким образом, подтверждена принципиальная возможность формирования композитов *ZnO*/ZIF-8, но для практического применения требуется дальнейшая оптимизация условий синтеза с целью сохранения индивидуальной формы наностержней и повышения доступности активных центров.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 26-29-20111, https://rscf.ru/project/26-29-20111/ и гранта Санкт-Петербургского научного фонда в соответствии с договором от 10 июня 2026 года № 26-29-20111.

Библиографический список:

1. **Nalimova, S.S.** Investigation of hierarchical gas-sensing $ZnFe_2O_4$ nanostructures / S.S. Nalimova, Z.V. Shomakhov, V.M. Kondratev et al. // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2023. – V. 17. – I. S1. – P. S416-S422. DOI: 10.1134/S1027451023070376.
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. **Perumal, V.** Hierarchical nanorods of graphene oxide decorated SnO_2 with high photocatalytic performance for energy conversion applications / V. Perumal, A. Sabarinathan, M. Chandrasekar et al. // Fuel. – 2022. – V. 324. – Part B. – Art. № 124599. – 9 p. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.124599.
4. **Madbouly, A.** Rapid CO detection using MWCNTs/SnO_2 hierarchical structure: Synthesis, characterization, and RT gas sensing features / A. Madbouly, A. Elzwawy, M. Morsy // Ceramics International. – 2024. – V. 50. – I. 14. – P. 25473-25483. DOI: 10.1016/j.ceramint.2024.04.280.
5. **Рябко, А.А.** Архитектоника покрытий из наностержней оксида цинка для адсорбционных газовых сенсоров / А.А. Рябко, С.С. Налимова, Н.В. Пермяков и др. // Журнал технической физики. – 2023. – Т. 93. – № 10. – С. 1494-1502. DOI: 10.61011/JTF.2023.10.56288.148-23.
6. **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.
7. **Stock, N.** Synthesis of metal-organic frameworks (MOFs): routes to various MOF topologies, morphologies, and composites / N. Stock, S. Biswas // Chemical Reviews. – 2012. – V. 112. – I. 2. – P. 933-969. DOI: 10.1021/cr200304e.
8. **Zhang, Y.** Highly selective gas sensors for formaldehyde detection based on ZnO@ZIF-8 core-shell heterostructures / Y. Zhang, M. Wang, X. San et al. // Sensors and Actuators B. – 2024. – V. 398. – Art. № 134689. – 10 p. DOI: 10.1016/j.snb.2023.134689.
9. **Murugesan, T.** Fabrication of large-area Au nanoparticle decorated ZnO@ZIF-8 core-shell heterostructure nanorods for ppb-level NO_2 gas sensing at room temperature / T. Murugesan, R.R. Kumar, A. Ranjan et al. // Sensors and Actuators B. – 2024. – V. 402. – Art. № 135106. – 10 p. DOI: 10.1016/j.snb.2023.135106.
10. **Tran, T.V.** Synthesis methods, structure, and recent trends of ZIF-8-based materials in the biomedical field / T.V. Tran, H.H. Dang, H. Nguyen et al. / Nanoscale Advances. – 2025. – V. 7. – I. 13. – P. 3941-3960. DOI: 10.1039/d4na01015a.
11. **Пат. 2806670 Российская Федерация, МПК G01N27/12, B82Y30/00, B82Y40/00.** Хеморезистивный газовый сенсор и способ его изготовления / Налимова С.С., Гагарина А.Ю., Спивак Ю.М. и др.; заявитель и правообладатель: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)». – № 2023113274; заявл. 23.05.2023; опубл. 02.11.2023, Бюл. № 31. – 16 с.
12. **Posachayanan, N.** Highly-efficient recovery of silver from industrial cyanide-based plating effluent on TiO2/activated carbon composites / N. Posachayanan, P. Liwetpitaya, A. Thoumrungroj et al. // Chemosphere.

– 2024. – V. 367. – Art. № 143614. – 10 p. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2024.143614.
13. **Yin, H.** Thermal stability of ZIF-8 under oxidative and inert environments: A practical perspective on using ZIF-8 as a catalyst support / H. Yin, H. Kim, J. Choi, A.C.K. Yip // Chemical Engineering Journal. – 2015. – V. 278. – P. 293-300. DOI: 10.1016/j.cej.2014.08.075.
14. **Balderas-Xicohtencatl, R.** ZIF-8 pellets as a robust material for hydrogen cryo-adsorption tanks / R. Balderas-Xicohtencat, J.A. Villajos, J. Casabán et al. // ACS Applied Energy Materials. – 2023. – V. 6. – I. 18. – P. 9145-915. DOI: 10.1021/acsaem.2c03719.

References:

1. Nalimova S.S., Shomakhov Z.V., Kondratev V.M. et al. Investigation of hierarchical gas-sensing $ZnFe_2O_4$ nanostructures, *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2023, vol. 17, issue S1, pp. S416-S422. DOI: 10.1134/S1027451023070376.
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. Perumal V., Sabarinathan A., Chandrasekar M. et al. Hierarchical nanorods of graphene oxide decorated SnO_2 with high photocatalytic performance for energy conversion applications, *Fuel*, 2022, vol. 324, part B, art. no. 124599, 9 p. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.124599.
4. Madbouly A., Elzwawy A., Morsy M. Rapid CO detection using MWCNTs/SnO_2 hierarchical structure: Synthesis, characterization, and RT gas sensing features, *Ceramics International*, 2024, vol. 50, issue 14, pp. 25473-25483. DOI: 10.1016/j.ceramint.2024.04.280.
5. Ryabko A.A., Nalimova S.S., Permyakov N.V. et al. Architectonics of zinc oxide nanorod coatings for adsorption gas sensors, *Technical Physics*, 2024, vol. 69, issue 7, pp. 2103-2110. DOI: 10.1134/S1063784224070387.
6. 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.
7. Stock N., Biswas S. Synthesis of metal-organic frameworks (MOFs): routes to various MOF topologies, morphologies, and composites, *Chemical Reviews*, 2012, vol. 112, issue 2, pp. 933-969. DOI: 10.1021/cr200304e.
8. Zhang Y., Wang M., San X. et al. Highly selective gas sensors for formaldehyde detection based on ZnO@ZIF-8 core-shell heterostructures, *Sensors and Actuators B*, 2024, vol. 398, art. no. 134689, 10 p. DOI: 10.1016/j.snb.2023.134689.
9. Murugesan T., Kumar R.R., Ranjan A. et al. Fabrication of large-area Au nanoparticle decorated ZnO@ZIF-8 core-shell heterostructure nanorods for ppb-level NO2 gas sensing at room temperature, *Sensors and Actuators B*, 2024, vol. 402, art. no. 135106, 10 p. DOI: 10.1016/j.snb.2023.135106.
10. Tran T.V., Dang H.H., Nguyen H. et al. Synthesis methods, structure, and recent trends of ZIF-8-based materials in the biomedical field, *Nanoscale Advances*, 2025, vol. 7, issue 13, pp. 3941-3960. DOI: 10.1039/d4na01015a.
11. Nalimova S.S., Gagarina A.Yu., Spivak Yu.M. et al. Hemorezistivnyj gazovyj sensor i sposob ego izgotovleniya [Chemoresistive gas sensor and its manufacturing method]. Patent RF, no. 2806670, 2023. (In Russian).
12. Posachayanan N., Liwetpitaya P., Thoumrungroj A. et al. Highly-efficient recovery of silver from industrial cyanide-based plating effluent on TiO_2/activated carbon composites, *Chemosphere*, 2024, vol. 367, art. no. 143614, 10 p. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2024.143614.
13. Yin H., Kim H., Choi J., Yip A.C.K. Thermal stability of ZIF-8 under oxidative and inert environments: A practical perspective on using ZIF-8 as a catalyst support, *Chemical Engineering Journal*, 2015, vol. 278, pp. 293-300. DOI: 10.1016/j.cej.2014.08.075.
14. Balderas-Xicohtencat R., Villajos J.A., Casabán J. et al. ZIF-8 pellets as a robust material for hydrogen cryo-adsorption tanks, *ACS Applied Energy Materials*, 2023, vol. 6, no. 18, pp. 9145-915. DOI: 10.1021/acsaem.2c03719.