

УДК 544.2, 661.847.2

Оригинальная статья

**Управление морфологией и проводимостью гексагональных
наностержней ZnO с помощью термообработки для приложений
газовой сенсорики**

Н.А. Клычков¹, В.В. Симаков¹, И.В. Синёв¹, А.М. Захаревич¹, В.В. Ефанова²
¹ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный
университет им. Н.Г. Чернышевского»

410012, Россия, Саратов, ул. Астраханская, 83

²ФГБОУ ВО «Приволжский государственный университет
путей сообщения»

443066, Россия, Самара, ул. Свободы, 2В

nklychkov@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.649

Аннотация: В работе исследовано влияние температуры отжига (300-500°C) на электрофизические свойства наноструктурированных слоёв оксида цинка (ZnO), синтезированных золь-гель методом. Полученные образцы представляют собой ансамбль гексагональных наностержней. Проведённый количественный анализ морфологии выявил, что кинетика роста стержней в интервале температур от 300°C до 450°C подчиняется аррениусовской зависимости с энергией активации 0,35 эВ, что соответствует механизму, контролируемому поверхностной диффузией. Экспериментальные данные демонстрируют немонотонную зависимость проводимости от температуры отжига с выраженным минимумом при температуре от 350°C до 400°C. Установлено, что отжиг в течение пяти часов при температуре 400°C обеспечивает стабилизацию электронных характеристик с минимальным уровнем дрейфа проводимости 0,19%/ч. Наблюдаемый эффект объясняется конкуренцией двух процессов: уменьшением концентрации объёмных доноров (кислородных вакансий и междоузельных атомов цинка) и увеличением среднего размера кристаллитов при повышении температуры отжига, что приводит к формированию шунтирующих проводящих каналов. Зависимость стационарной проводимости образца ZnO в сухом воздухе от температуры отжига, рассчитанная в рамках модели плоских зон, удовлетворительно описывает экспериментальные данные. Полученные результаты открывают перспективы для направленного синтеза высокочувствительных и стабильных чувствительных элементов хеморезистивных датчиков газа на основе ZnO.

Ключевые слова: оксид цинка, золь-гель синтез, термический отжиг, проводимость, газовый сенсор, наноструктурированные материалы.

Клычков Никита Александрович – аспирант 4 года обучения, институт физики ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского»

Симаков Вячеслав Владимирович – д.т.н., профессор кафедры материаловедения, технологии и управления качеством, ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского»

Синёв Илья Владимирович – к.ф.-м.н., доцент кафедры материаловедения, технологии и управления качеством, ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского»

Захаревич Андрей Михайлович – к.ф.-м.н., заведующий лабораторией диагностики наноматериалов и структур, ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского»

Ефанова Вера Васильевна – д.х.н., доцент, ФГБОУ ВО «Приволжский государственный университет путей сообщения»

Morphology and conductivity control in hexagonal ZnO nanorods through annealing for gas sensor applications

N.A. Klychkov¹, V.V. Simakov¹, I.V. Sinev¹, A.M. Zakharevich¹, V.V. Efanova²

¹*Saratov State University, Saratov, Russia*

²*Volga State Transport University, Samara, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.649

Abstract: This study investigates the influence of the annealing temperature (300-500°C) on the electrophysical properties of nanostructured zinc oxide (ZnO) layers synthesized by a sol-gel method. The obtained samples consist of an ensemble of hexagonal nanorods. Quantitative morphological analysis revealed that the kinetics of the nanorods growth in the temperature range of 300-450°C follows an Arrhenius-type dependence with the activation energy of 0,35 eV, which corresponds to a surface diffusion-controlled mechanism. Experimental data demonstrate a non-monotonic relationship between the conductivity and annealing temperature, with a distinct minimum observed between 350°C and 400°C. It was found that annealing at 400°C for five hours results in stabilization of the electronic properties, yielding a minimal conductivity drift of 0,19 %/h. The observed effect is attributed to a competition between two processes: a decrease in the concentration of bulk donors (oxygen vacancies and zinc interstitials) and an increase in the average crystallite size with rising the annealing temperature, leading to the formation of shunting conductive channels. The dependence of the steady-state conductivity of the ZnO sample in dry air on the annealing temperature, as calculated using a flat-band model, satisfactorily describes the experimental data. The obtained results open prospects for the targeted synthesis of highly sensitive and stable sensing elements for chemical resistive gas sensors based on ZnO.

Keywords: zinc oxide, sol-gel synthesis, thermal annealing, electrical conductivity, gas sensor, nanostructured materials.

Nikita A. Klychkov – 4th year postgraduate student, Physics Institute, Saratov State University, ORCID: 0009-0003-7969-3291

Viacheslav V. Simakov – Dr. Sc., Professor, Material Sciences, Technologies and Quality Management Department, Saratov State University, ORCID: 0000-0001-9665-5930

Ilya V. Sinev – Ph. D., Docent, Material Sciences, Technologies and Quality Management Department, Saratov State University, ORCID: 0000-0002-1005-1616

Andrey M. Zakharevich – Ph. D., Head of the Laboratory for Diagnostics of Nanomaterials and Structures, Saratov State University, ORCID: 0000-0002-3813-5870

Vera V. Efanova – Dr. Sc., Professor, Volga State Transport University

Поступила в редакцию/received: 28.06.2025; после рецензирования/reviised: 30.09.2025; принята/accepted 02.10.2025.

1. Введение

Металлооксидные материалы, обладающие полупроводниковыми свойствами, используются для создания элементной базы газовой сенсорики, например, одиночных сенсоров и мультисенсорных матриц для распознавания многокомпонентных газовых смесей и запахов [1, 2]. Оксид цинка – широкозонный полупроводник n-типа, который привлекает особое внимание исследователей для использования в качестве активного слоя сенсоров газа, благодаря сочетанию его электрофизических и химических свойств. Достижения в области нанотехнологий позволили разработать широкий спектр газочувствительных наноструктур оксида цинка [3]. Такие наноструктуры ZnO обладают большой удельной поверхностью, значительно улучшающей их газочувствительные характеристики, что

позволяет им функционировать при температурах, близких к комнатной [4, 5].

Одним из основных инструментов управления свойствами металлооксидных сенсоров газа является термический отжиг. Вариация температуры отжига позволяет управлять степенью кристалличности материала, средним размером зерна и концентрацией доноров в его объёме [6]. В совокупности, эти параметры определяют дисперсность материала. Дисперсность характеризует эффективность взаимодействия поверхности образца с газовой средой.

Как показывают исследования, при низкотемпературном отжиге (200-300°C) формируется высокая концентрация донорных центров, преимущественно кислородных вакансий ($V_o^{+/++}$ – глубокий донор) и междоузельных атомов цинка (Zn_i^+ – мелкий донор), что приводит к повышенной проводимости материала. Однако, при этом сохраняется мелкодисперсная структура образцов, важная для обеспечения высокой газочувствительности. В диапазоне 400-500°C происходит формирование устойчивой структуры, обеспечивающей баланс между степенью кристалличности и концентрацией дефектов. При дальнейшем повышении температуры (выше 600°C) наблюдается спекание зерен и, как следствие, снижение дисперсности слоёв, что негативно отражается на сенсорных характеристиках полупроводниковых датчиков газа [7, 8]. В отличие от предыдущих исследований, сфокусированных на кинетике роста, в данной работе исследуется влияние температуры отжига на проводимость ZnO , что является ключевым фактором для разработки хеморезистивных сенсоров газа с контролируруемыми свойствами.

Целью данной работы является установление взаимосвязи между температурой отжига, морфологией и проводимостью наноструктурированных слоев ZnO , синтезированных золь-гель методом, для применения в качестве чувствительных элементов газовых сенсоров.

2. Методика эксперимента и образцы

Образцы ZnO синтезировались методом золь-гель технологии с использованием в качестве прекурсора навески хлорида цинка ($ZnCl_2$) массой 1,25 г. Прекурсор растворяли в 12 мл этанола при 80°C и перемешивали в течение 30 минут. Показатель pH системы доводился до значения 5 с помощью добавления водного раствора аммиака (NH_4OH) с концентрацией 25%. После созревания при комнатной температуре в течение 24 часов, сформированный гель наносили на очищенные с помощью ацетона поликорковые подложки методом центрифугирования (800 оборотов в минуту), а затем полученные слои сушили при 80°C в

течение 30 минут. Дальнейшую термическую обработку нанесенных слоёв проводили в температурном диапазоне 300-500°C с шагом 50°C в течение 5 часов на воздухе в трубчатой электропечи. Для измерения электрических свойств на отожженные образцы наносили электроды из хрома с межэлектродным зазором 40 мкм методом термического испарения в вакууме. Измерение электрических характеристик производилось с помощью лабораторного стенда [9].

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Микрофотографии, полученные методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), демонстрирующие морфологические особенности полученных слоев приведены на рис. 1.

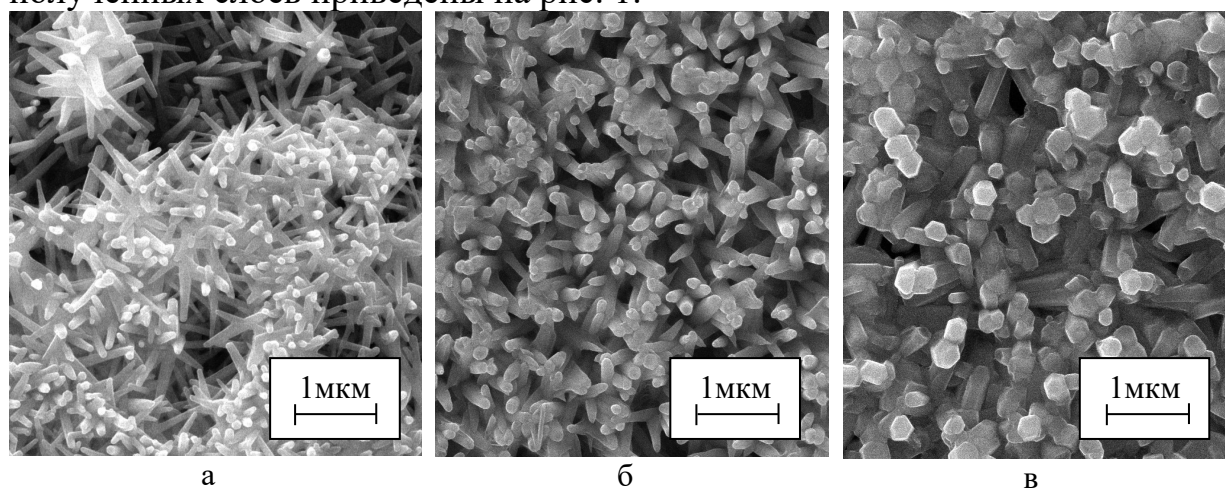


Рис. 1. Микрофотографии образцов ZnO , сформированных при различных температурах отжига, полученные методом СЭМ: а – 350°C, б – 400°C, в – 450°C.

Микрофотографии СЭМ (см. рис. 1) свидетельствуют о формировании развитой трёхмерной морфологии с высоким отношением поверхности к объёму, что способствует увеличению площади поверхности доступной для адсорбции газовых молекул. Ранние исследования показали, что образцы, синтезированные по данной технологии, демонстрируют хеморезистивный отклик на пары этанола, изопропанола и воды при температуре около 30°C, что открывает перспективы создания энергоэффективных газовых сенсоров, не требующих дополнительного нагрева [9, 10].

Статистическая обработка данных включала оценку среднего радиуса описанной окружности R и средней длины стержней L (см. рис. 2). Геометрические параметры стержней определялись с помощью пакета Gwyddion [11]. Проверка гипотезы о нормальности распределения осуществлялась с применением критерия χ^2 . Проведённый анализ показал, что средний радиус стержней подчиняется аррениусовской

зависимости от температуры в интервале 300-450°C (см. рис. 2 а).

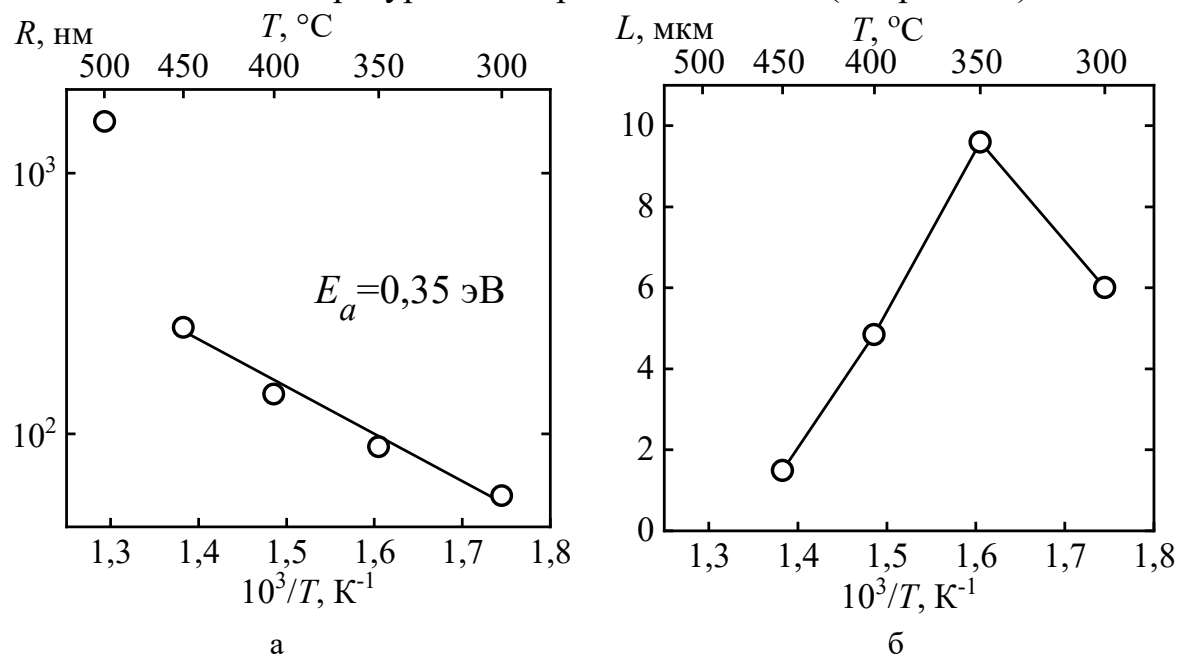


Рис. 2. Количественный анализ геометрии наностержней ZnO отожжённых при различных температурах: а – средний радиус описанной окружности гексагонального сечения, б – средняя длина стержня.

Предполагается, что рассчитанная энергия активации (0,35 эВ) соответствует механизму роста, контролируемому поверхностной диффузией, что согласуется с теоретическими моделями, описывающими анизотропный рост ZnO наностержней [12, 13]. При 500°C наблюдалось отклонение от аррениусовской зависимости, а в микроструктуре фиксировались крупные агломераты, что свидетельствует о переходе к спеканию как доминирующему механизму роста при повышенных температурах. Анализ данных, представленных на рис. 3 б, выявил немонотонный характер зависимости средней длины стержней от температуры отжига. Температура 350°C соответствует локальному максимуму на кривой зависимости длины от температуры, что указывает на наиболее выраженную анизотропию роста кристаллитов в данных условиях.

Наблюдаемый немонотонный характер зависимости длины стержней от температуры отжига, по-видимому, обусловлен конкуренцией роста кристаллитов за счет рекристаллизации в низкотемпературной области (300-350°C) и их спеканием, направленной на минимизацию поверхностной энергии, в высокотемпературной области (350-450°C). Такое поведение согласуется с литературными данными по ZnO [14], где аналогичные эффекты связывались с изменением доминирующего механизма проводимости. Кроме того, критическая роль поверхностной диффузии и её экспоненциальное увеличение при высоких температурах,

ведущее к анизотропному росту, была подробно показана в работе [13].

Исследование влияния термообработки на проводимость слоёв ZnO позволило установить, что при температуре отжига 400°C происходит стабилизация проводимости с минимальным уровнем дрейфа 0,19%/ч (см. рис. 3).

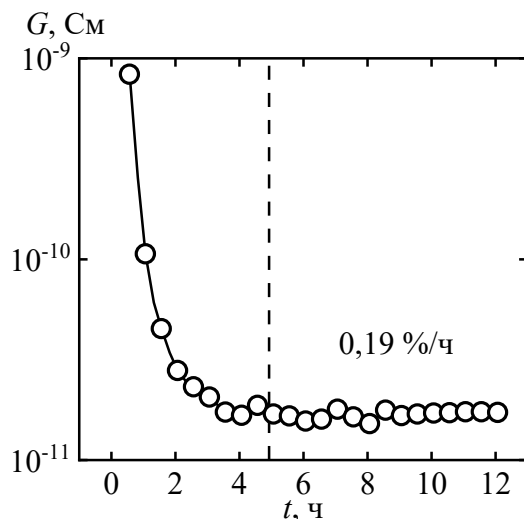


Рис. 3. Динамика изменения проводимости образца во времени при отжиге 400°C.

Анализ кинетики процесса выявил наличие быстрой и медленной стадий релаксации, что соответствует последовательному завершению поверхностной и объемной рекристаллизации. Зависимость стационарной проводимости от температуры отжига демонстрирует немонотонный характер с минимумом в диапазоне температур от 350°C до 400°C (см. рис. 4).

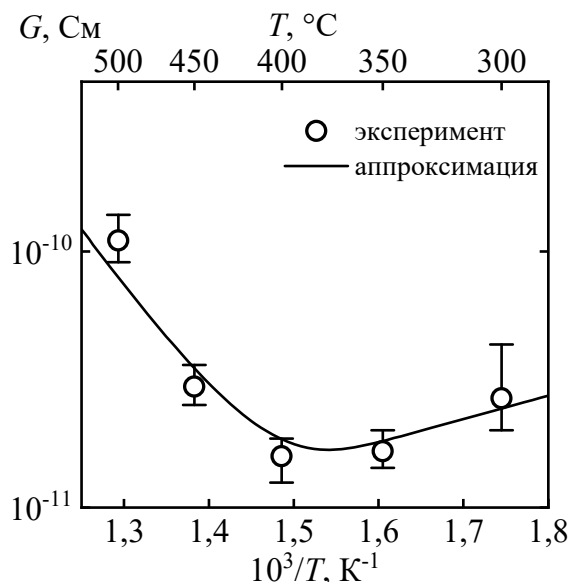


Рис. 4. Зависимость проводимости образцов от температуры отжига (время для каждой температуры фиксировано – 5 часов).

Длительность отжига (5 часов) была унифицирована для всего

температурного диапазона (300-500°C), обеспечивая одинаковые условия экспериментов.

В условиях адсорбционно-десорбционного равновесия (стационарный режим) в атмосфере газа-окислителя наблюдаемый минимум проводимости объясняется конкуренцией нескольких процессов. При температуре, соответствующей локальному минимуму проводимости, устанавливается оптимальное соотношение между процессами захвата электронов из зоны проводимости адсорбированными ионами кислорода

$$O_{2(vap)} + e^- = O_{2(ads)} \quad (1)$$

инжекцией электронов в зону проводимости с междоузельных атомов цинка Zn_i^+ , а также образованием шунтирующих проводящих каналов в процессе роста зерна.

Для теоретического описания изменения проводимости в зависимости от температуры отжига в образцах ZnO использовалось двухфазное приближение:

$$N_D(T) = N_0 \cdot \alpha(T) + n(T) \cdot (1 - \alpha(T)), \quad (2)$$

где N_0 – концентрация дефектов в аморфной фазе, $\alpha(T) = \exp(-t/\tau(T))$ – доля аморфной фазы, t – время отжига, $\tau(T) = \tau_0 \cdot \exp(-Q/k_bT)$ – постоянная времени отжига, Q – энергия активации отжига, T – температура отжига, k_b – постоянная Больцмана, $n(T) = n_0 \cdot \exp(-W_d/k_bT)$ – концентрация дефектов в кристаллической фазе, W_d – энергия активации дефекта.

Количество заряда, заключенного в объёме зерна зависит от концентрации доноров и характерного размера зерна (см. рис. 4)

$$Q_V(T) = N_D(T) \cdot d^3(T), \quad (3)$$

где $d(T) = d_0 \cdot \exp(-E_a/k_bT)$ – характерный размер зерна, E_a – энергия активации роста зерна.

Проводимость рассчитывалась в приближении модели плоских зон, в рамках которой пренебрегают влиянием межкристаллитных потенциальных барьеров ($e\varphi \ll k_bT$) [15]

$$G = q \cdot \mu \cdot n, \quad (4)$$

где q – заряд электрона, $\mu = const$ – подвижность электронов, $n \propto N_D(T)$ – концентрация электронов в зоне проводимости.

4. Заключение

Проведенное исследование позволило выявить взаимосвязь между температурой отжига, морфологией и проводимостью наноструктурированных слоёв на основе ZnO . Экспериментально показано, что варьирование температуры отжига в диапазоне температур от 300°C до 500°C позволяет управлять как геометрией синтезируемых

структур, так и их проводимостью. Количественный анализ морфологии выявил, что рост наностержней в интервале 300-450°C подчиняется аррениусовской зависимости с энергией активации 0,35 эВ, что соответствует механизму, контролируемому поверхностной диффузией. Ключевым результатом работы является обнаружение немонотонной зависимости проводимости от температуры отжига с выраженным минимумом в области температур от 350 до 400°C. Наблюдаемый эффект объясняется уменьшением концентрации объёмных доноров и увеличением среднего размера кристаллитов при повышении температуры отжига, что приводит к формированию шунтирующих проводящих каналов. Теоретическое описание зависимости стационарной проводимости от температуры отжига в рамках модели плоских зон удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными. Полученные результаты открывают перспективы для направленного синтеза элементов хеморезистивных датчиков газа на основе ZnO с заданными свойствами.

Библиографический список:

1. **Смирнов, А.В.** Отклик газочувствительной микросистемы на запах перегретой изоляции электрического кабеля / А.В. Смирнов, А.И. Гребенников, А.Н. Грибов и др. // Нано-и микросистемная техника. – 2014. – Вып. 2. – С. 53-56.
2. **Синёв, И.В.** Влияние освещения на распознавательную способность мультисенсорных микросистем на основе нитевидных нанокристаллов диоксида олова / И.В. Синёв, Н.А. Клычков, Д.А. Тимошенко, В.В. Симаков // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2020. – Вып. 12. – С. 713-721. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.713.
3. **Wang, Y.** Controllable synthesis of ZnO nanoflowers and their morphology-dependent photocatalytic activities / Y. Wang, X. Li, N. Wang et al. // Separation and Purification Technology. – 2008, – V. 62. – I. 3. – P. 727–732. DOI: 10.1016/j.seppur.2008.03.035.
4. **Gupta, S.K.** Development of gas sensors using ZnO nanostructures / S.K. Gupta, A. Joshi, M. Kaur // Journal of Chemical Sciences. – 2010, – V. 122. – I. 1. P. 57-62. DOI:10.1007/s12039-010-0006-y.
5. **Fan, S.W.** Nanopatterned polycrystalline ZnO for room temperature gas sensing / S.W. Fan, A.K. Srivastava, V.P. Dravid // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2010. – V. 144. – I. 1. P. 159-163. DOI: 10.1016/j.snb.2009.10.054.
6. **Gurylev, V.** Defect engineering of ZnO: Review on oxygen and zinc vacancies / V. Gurylev, T.P. Perng // Journal of the European Ceramic Society. – 2021. – V. 41. – I. 10. – P. 4977-4996. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2021.03.031.
7. **Fang, Z.B.** Influence of post-annealing treatment on the structure properties of ZnO films / Z.B. Fang, Z.J. Yan, Y.S. Tan et al. // Applied Surface Science. – 2005. – V. 241. – I. 3-4. – P. 303-308. DOI: 10.1016/j.apsusc.2004.07.056.
8. **Lee, J.** Precise control of surface oxygen vacancies in ZnO nanoparticles for extremely high acetone sensing response / J. Lee, Y. Choi, B.J. Park et al. // Journal of Advanced Ceramics. – 2022. – V. 11. – I. 5. – P. 769-783. DOI: 10.1007/s40145-022-0570-x.
9. **Клычков, Н.А.** Влияние паров воды на проводимость и отклик к парам этанола газочувствительных наноструктурированных слоёв ZnO при комнатной температуре / Н.А. Клычков, В.В. Симаков, И.В. Синёв, В.В. Ефанова, А.М. Захаревич // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2024. – Вып. 16. – С. 891-905. DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.891.
10. **Клычков, Н.А.** Влияние глубоких поверхностных акцепторных состояний на температурную зависимость проводимости слоёв оксида цинка / Н.А. Клычков, В.В. Симаков, И.В. Синёв // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2024. – Вып. 16. – С. 906-921. DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.906.
11. Gwyddion – Free SPM (AFM, SNOM/NSOM, STM, MFM, ...) data analysis software. – Режим доступа:

www.url: <http://gwyddion.net>. – 15.07.2025.

12. **Borah, M.** Theoretical insights into growth mechanisms of ZnO nanorods / M. Borah // *Journal of Nanoscience and Technology*. – 2025. – V. 10. – I. 2. – P. 995-998. DOI: 10.30799/inst.357.25100201.
13. **Nandi, R.** The mechanism of growth of ZnO nanorods by reactive sputtering / R. Nandi, S.S. Major // *Applied Surface Science*. – 2017. – V. 399. – P. 305-312. DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.12.097.
14. **Kim, D.S.** Surface-diffusion induced growth of ZnO nanowires / D.S. Kim, U. Gösele, M. Zacharias // *Journal of Crystal Growth*. – 2009. – V. 311. – I. 11. – P. 3216-3219. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2009.03.026.
15. **Simakov, V.** Gas identification by quantitative analysis of conductivity-vs-concentration dependence for SnO₂ sensors / V. Simakov, A. Voroshilov, A. Grebennikov, et al. // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2009. – V. 137. – I. 2. – P. 456-461. DOI: 10.1016/j.snb.2009.01.005.

References:

1. Smirnov A.V., Grebennikov A.I., Gribov A.N. et al. Otklik gazochuvstvitel'noj mikrosistemy` na zapax peregretoj izolyacii e`lektricheskogo kabelya [Response of a gas-sensitive microsystem to the smell of overheated electrical cable insulation], *Nano-i mikrosistemnaya tekhnika [Nano- and Microsystems Technology]*, 2014, no. 2, pp. 53-56. (In Russian).
2. Sinev I.V., Klychkov N.A., Timoshenko D.A., Simakov V.V. Vliyanie osveshcheniya na raspoznavatelnyuyu sposobnost multisensornikh mikrosistem na osnove nitevidnykh nanokristallov dioksida olova [Illumination effect on recognition ability of multisensor microsystems based on tin oxide nanowhiskers], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2020, issue 12, pp. 713-721. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.713.
3. Wang Y., Li X., Wang N. et al. Controllable synthesis of ZnO nanoflowers and their morphology-dependent photocatalytic activities, *Separation and Purification Technology*, 2008, vol. 62, issue 3, pp. 727-732. DOI: 10.1016/j.seppur.2008.03.035.
4. Gupta S.K., Joshi A., Kaur M. Development of gas sensors using ZnO nanostructures, *Journal of Chemical Sciences*, 2010, vol. 122, issue 1, pp. 57-62. DOI: 10.1007/s12039-010-0006-y.
5. Fan S.W., Srivastava A.K., Dravid V.P. Nanopatterned polycrystalline ZnO for room temperature gas sensing, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2010, vol. 144, issue 1, pp. 159-163. DOI: 10.1016/j.snb.2009.10.054.
6. Gurylev V., Perng T.P. Defect engineering of ZnO: Review on oxygen and zinc vacancies, *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, vol. 41, issue 10, pp. 4977-4996. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2021.03.031.
7. Fang Z.B., Yan Z.J., Tan Y.S. et al. Influence of post-annealing treatment on the structure properties of ZnO films, *Applied Surface Science*, 2005, vol. 241, issues 3-4, pp. 303-308. DOI: 10.1016/j.apsusc.2004.07.056.
8. Lee J., Choi Y., Park B.J. et al. Precise control of surface oxygen vacancies in ZnO nanoparticles for extremely high acetone sensing response, *Journal of Advanced Ceramics*, 2022, vol. 11, issue 5, pp. 769-783. DOI: 10.1007/s40145-022-0570-x.
9. Klychkov N.A., Simakov V.V., Sinev I.V., Efanova V.V., Zakharevich A.M. Vliyanie parov vodi na provodimost i otklik k param etanola gazochuvstvitelnykh nanostrukturirovannykh sloyov ZnO pri komnatnoi temperature [The effect of water vapor on the conductivity and response of gas-sensitive nanostructured ZnO layers to ethanol vapors at room temperature], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physicochemical Aspects of the Study of Clusters, Nanostructures and Nanomaterials]*, 2024, issue 16, pp. 891-905. DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.891. (In Russian)
10. Klychkov N.A., Simakov V.V., Sinev I.V. Vliyanie glubokikh poverkhnostnykh aktseptornykh sostoyanii na temperaturnuyu zavisimost provodimosti sloyov oksida tsinka [The effect of deep surface acceptor states on the temperature-dependent conductivity of zinc oxide nanoparticles], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physicochemical Aspects of the Study of Clusters, Nanostructures and Nanomaterials]*, 2024, issue 16, pp. 906-921. DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.906. (In Russian)
11. Gwyddion – Free SPM (AFM, SNOM/NSOM, STM, MFM, ...) data analysis software. Available at: [www.url: http://gwyddion.net](http://gwyddion.net) (accessed 15.07.2025).
12. Borah M. Theoretical insights into growth mechanisms of ZnO nanorods, *Journal of Nanoscience and Technology*, 2025, vol. 10, issue 2, pp. 995-998. DOI: 10.30799/inst.357.25100201.
13. Nandi R., Major S.S. The mechanism of growth of ZnO nanorods by reactive sputtering, *Applied Surface Science*, 2017, vol. 399, pp. 305-312. DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.12.097.
14. Kim D.S., Gösele U., Zacharias M. Surface-diffusion induced growth of ZnO nanowires, *Journal of Crystal Growth*, 2009, vol. 311, issue 11, pp. 3216-3219. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2009.03.026.
15. Simakov V., Voroshilov A., Grebennikov A. et al. Gas identification by quantitative analysis of conductivity-vs-concentration dependence for SnO₂ sensors, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2009, vol. 137, issue 2, pp. 456-461. DOI: 10.1016/j.snb.2009.01.005.