

Ж.К. Калкозова^{1,2} , Л.В. Гриценко^{1,3*} , Х.А. Абдуллин^{1,2} , А.А. Мархабаева¹ 

¹Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Национальная нанотехнологическая лаборатория открытого типа, г Алматы, Казахстан

²Institute of Applied Science & Information Technology, г. Алматы, Казахстан

³Satbayev University, г. Алматы, Казахстан

*e-mail: l.gritsenko@satbayev.university

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ В РАСТВОРЕ РОСТА НА МОРФОЛОГИЮ СТРУКТУР ОКСИДА ЦИНКА

Поверхностно-активные вещества играют важную роль при синтезе полупроводниковых материалов. Характер роста и кристаллов может быть изменён путём селективной адсорбции поверхностно-активных веществ на поверхности кристаллов, что позволяет управлять их формой. Используя поверхностно-активные вещества и контролируя концентрацию поверхностно-активного вещества в растворе роста, были синтезированы наноструктуры ZnO различной морфологии гидротермальным методом при температуре 95°C. Исследовано влияние присутствия ПАВ в растворе роста на морфологию структур ZnO. В результате исследований была получена корреляция между размером частиц ZnO и концентрацией ПАВ в растворе роста. Изображения сканирующей электронной микроскопии показали, что морфология оксида цинка изменилась со стержневидной на плёночную при добавлении концентрации 5 вес.% и 10 вес.% при ПАВ. Результаты анализа рентгеновской дифракционной спектроскопии (XRD) указали на наличие фазы оксида цинка во всех образцах. Установлено, что диаметр наностержней увеличивается с увеличением концентрации ПАВ. Изучается систематический механизм роста с увеличением концентрации ПАВ. Полученные результаты помогут в выращивании селективного ZnO для многих функциональных применений. Выращенные образцы могут быть использованы в качестве прозрачных проводящих электродов и фотокатализаторов, а также в качестве основы газовых датчиков и электрохимических сенсоров.

Ключевые слова: оксид цинка, наностержни, тонкие плёнки, гидротермальный синтез, морфология, поверхностно-активные вещества.

Ж.К. Калкозова^{1,2}, Л.В. Гриценко^{1,3*}, Х.А. Абдуллин^{1,2}, А.А. Мархабаева¹

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Ашық түрдегі ұлттық нанотехнологиялық зертханасы, Алматы қ., Қазақстан

²Institute of Applied Science & Information Technology, Алматы қ., Қазақстан

³Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан

*e-mail: l.gritsenko@satbayev.university

Өсу ерітіндісіндегі беттік-белсенді заттардың мырыш оксиді құрылымдарының морфологиясына әсері

Беттік-белсенді заттар жартылай өткізгіш материалдарды синтездеу кезінде маңызды рөл атқарады. Кристалдардың өсу сипаты беттік-белсенді заттардың кристалдар бетінде селективті адсорбциялануы арқылы өзгертілуі мүмкін, бұл олардың пішінін басқаруға мүмкіндік береді. Беттік-белсенді заттарды қолдану және өсу ерітіндісіндегі беттік-белсенді заттардың концентрациясын бақылау арқылы морфологиясы әртүрлі ZnO наноқұрылымдары 95°C температурада гидротермалды әдіспен синтезделді. Өсу ерітіндісіндегі ББЗ-дың ZnO құрылымдарының морфологиясына әсері зерттелді. Зерттеулер нәтижесінде ZnO бөлшектерінің өлшемі мен өсу ерітіндісіндегі ББЗ концентрациясы арасындағы корреляция алынды. Сканерлеуші электронды микроскопия кескіндері мырыш оксидінің морфологиясы ББЗ 5 салм.% және 10 салм.% концентрациясын қосқанда стержень тәрізді пішіннен пленка тәрізді пішінге өзгергенін көрсетті. Рентгендік дифракциялық спектроскопия (XRD) талдауының нәтижелері барлық үлгілерде мырыш оксиді фазасының бар екенін көрсетті. Наностержендердің диаметрі ББЗ концентрациясының жоғарылауымен артатыны анықталды. ББЗ

концентрациясының жоғарылауымен жүйелі өсу механизмі зерттелуде. Алынған нәтижелер көптеген функционалды қолданыстар үшін селективті ZnO өсіруге көмектеседі. Өсірілген үлгілер мөлдір өткізгіш электродтар және фотокатализаторлар ретінде, сондай-ақ газ датчиктері мен электрохимиялық сенсорлардың негізі ретінде қолданылуы мүмкін.

Түйін сөздер: мырыш оксиді, наностержендер, жұқа пленкалар, гидротермалды синтез, морфология, беттік-белсенді заттар.

Zh.K. Kalkozova^{1,2}, L.V. Gritsenko^{1,3*}, Kh.A. Abdullin^{1,2}, A.A. Markhabayeva¹

¹Al-Farabi Kazakh National University, National Nanotechnology Laboratory of Open Type, Almaty, Kazakhstan

²Institute of Applied Science & Information Technology, Almaty, Kazakhstan

³Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

*e-mail: l.gritsenko@satbayev.university

Effect of surfactants in the growth solution on the morphology of zinc oxide structures

Surfactants play an important role in the synthesis of semiconductor materials. The growth and crystal behavior can be modified by selective adsorption of surfactants on the crystal surface, which allows controlling their shape. Using surfactants and controlling the surfactant concentration in the growth solution, ZnO nanostructures of various morphologies were synthesized by the hydrothermal method at 95°C. The effect of the surfactant presence in the growth solution on the morphology of the ZnO structures was studied. As a result of the study, a correlation was obtained between the ZnO particle size and the surfactant concentration in the growth solution. Scanning electron microscopy images showed that the morphology of zinc oxide changed from rod-shaped to film-shaped upon adding 5 wt% and 10 wt% surfactant. X-ray diffraction (XRD) spectroscopy results indicated the presence of zinc oxide phase in all samples. It is found that the diameter of nanorods increases with increasing surfactant concentration. The systematic growth mechanism with increasing surfactant concentration is studied. The obtained results will help in growing selective ZnO for many functional applications. The grown samples can be used as transparent conducting electrodes and photocatalysts, as well as the basis for gas sensors and electrochemical sensors.

Keywords: zinc oxide, nanorods, thin films, hydrothermal synthesis, morphology, surfactants.

Введение

В последние десятилетия не ослабевают интерес исследователей к методам синтеза, послеростовым обработкам и характеристикам массивов наностержней оксида цинка [1-4]. Проводятся активные исследования по контролю и манипулированию свойствами наноструктур ZnO, что представляет интерес как для фундаментального изучения, так и для потенциального применения. Наноструктуры ZnO привлекают широкое внимание исследователей ввиду их уникальных свойств и широкому потенциалу применения в современных электронных устройствах, таких как газовые сенсоры [5-7], суперконденсаторы [8-10], солнечные элементы [11, 12], электрохимические и оптоволоконные биосенсоры [13-17], в качестве преобразователей, катализаторов и др. [18-20]. Контролируемый синтез привлекает значительное внимание благодаря возможности управлять физическими и химическими свойствами полупроводниковых наноматериалов, которые определяются их структурными свойствами и морфологией [21-23]. Таким образом, управляемый синтез

наноструктурированного оксида цинка является актуальным направлением исследований в современной физике материалов.

Оксид цинка является широкозонным (3.37 эВ) многофункциональным полупроводником, обладающий большой энергией связи экситона (60 мэВ), отличная химическая и термическая стабильность, уникальные электрические и оптоэлектронные свойства, отличный антибактериальный эффект, адсорбент УФ-излучения, а также нетоксичность. Управление параметрами синтеза позволяет выращивать структуры ZnO различной морфологии: нанопроволоки [24], наностержни [1], наноленты [25, 26], нанодиски [27], сферы [28], цветы [29] и др. Наноструктуры ZnO получают различными методами, такими как золь-гель метод [6, 30], гидротермальный метод [4, 9], микроволновый синтез, сольватермальный метод [11], CVD, MOCVD, лазерная абляция, термическое разложение [31], chemical bath deposition [1] и др. Однако поиски оптимальных параметров

управляемого синтеза наноструктур продолжают. В работах [21, 30, 32] отмечено, что анионные, катионные и неионные поверхностно-активные вещества (ПАВ) могут быть использованы для управления морфологией синтезируемых полупроводниковых материалов. Они обычно используются для управления формой и размером кристалла с целью синтеза высококачественных материалов. Основная роль ПАВ заключается в изменении морфологии материалов посредством сайт-селективной адсорбции на определённом участке материалов во время процесса роста [33, 34]. Различные органические поверхностно-активные вещества успешно использовались многими исследователями для обеспечения направленного роста наноматериалов ZnO более желательно. Однако всё ещё остаётся много нерешённых вопросов о влиянии различных поверхностно-активных веществ на рост ZnO.

В данной работе структуры ZnO были получены гидротермальным синтезом из водного раствора с использованием поверхностно-активных веществ. Изучены их морфология, структурные и оптические свойства. Исследовано влияние концентрации ПАВ на свойства полученных материалов. Анализ полученных материалов был проведён методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), рентгеновской дифракции, УФ-видимой спектроскопией.

Описание эксперимента

Методом золь-гель на кремниевых и стеклянных подложках был получен затравочный слой оксида цинка. Для подготовки золя использовалась 0.4 г ацетата цинка, растворённого в 10 мл спирта. На предварительно очищенные подложки методом центрифугирования был нанесён золь, при этом процесс центрифугирования проводился при оборотах 2000 об/мин, что обеспечивало равномерное распределение золя по поверхности подложки. После нанесения золя подложки подвергались термическому отжигу при температуре 450°C в течение одного часа для формирования затравочного слоя. На затравочных слоях был проведён синтез наностержней оксида цинка (ZnO) гидротермальным методом. Для этого были приготовлены два водных раствора: раствор нитрата цинка $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Sigma-Aldrich, 99% purity) и раствор уротропина $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$ (Sigma-Aldrich, 99% purity) в соотношении 1:1. Каждый раствор помещался на магнитную мешалку и перемешивался в течение 30 минут для обеспечения полной гомогенизации. Затем оба раствора были объединены, и в полученную смесь было добавлено поверхностно-активное вещество (ПАВ). В

качестве ПАВ был использован додецилсульфат натрия ($\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{NaO}_4\text{S}$, Sigma-Aldrich), который добавлялся в ростовой раствор в различных весовых процентах. Для обеспечения полной дисперсии подготовленный раствор перемешивался на магнитной мешалке ещё полчаса. Затем образцы с затравочным слоем помещались вертикально в ростовой раствор и подвергались синтезу на водяной бане при температуре 95°C в течение одного часа. После синтеза образцы подвергались обработке в ультразвуковой ванне в течение 20 минут для удаления примесей и структур, сформировавшихся в объёме. Готовые образцы затем были высушены в сушильном шкафу при температуре 100°C.

Для исследования морфологии синтезированных образцов был использован электронный растровый микроскоп (JEOL, JSM-6490 LA). Рентгеноструктурный анализ полученных материалов был выполнен на дифрактометре PANalytical X'pert MPD PRO. УФ-видимая спектроскопия была проведена на UV/Vis спектрофотометре (PerkinElmer Lambda 35).

Обсуждение полученных результатов

Изучение морфологии всех синтезированных образцов методом электронной микроскопии показало, что оксид цинка при гидротермальном синтезе растёт в виде наностержней длиной порядка нескольких микрометров, диаметром порядка несколько десятков нанометров (рисунок 1). Как видно, стержни смыкаются, образуя однородную плёнку.

Одним весьма эффективным методом управления морфологией синтезируемых гидротермальным методом полупроводниковых наноструктур оксида цинка является добавление в ростовой раствор поверхностно-активных веществ (ПАВ) [21, 30, 32-35].

В качестве ПАВ в данном исследовании был использован додецилсульфат натрия $\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{NaO}_4\text{S}$.

Раствор с высокой концентрацией 50 мМ обычно был использован для получения плёнок ZnO. Было отмечено, что даже небольшое количество ПАВ, добавленного в ростовой раствор 300 мМ, значительно меняет морфологию синтезируемых структур.

На рис. 2 показана морфология плёнки, выращенной из раствора с концентрацией по нитрату цинка 0.3 М, в течение 1 часа при 95°C, с добавлением 1 вес. % ПАВ. Из рисунка видно, что морфология поверхности состоит из пирамид вместо шестигранников.

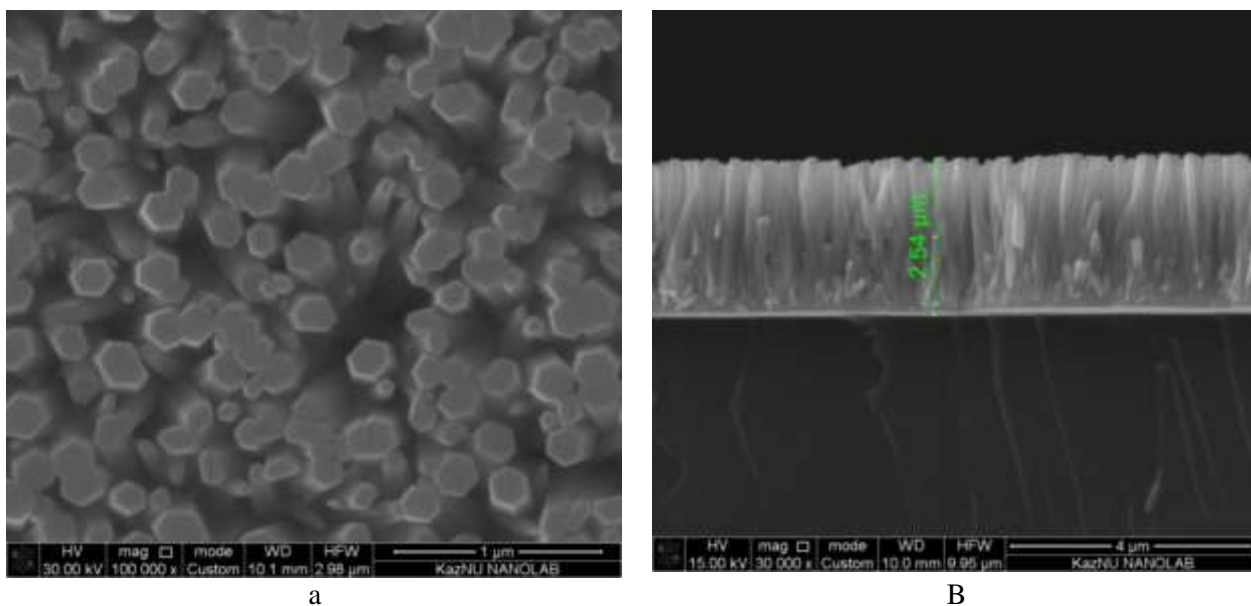


Рисунок 1 – SEM слоя ZnO, полученного при синтезе из раствора 50 мМ, длительность 1 час;
а – вид сверху, b – вид сбоку

Заметим, что получение нанотекстур ZnO в форме треугольных пирамид актуально для применения в солнечных элементах, поскольку коэффициент использования света в таких структурах выше за счёт перепоглощения света, отражённого от наклонных плоскостей пирамид. Было отмечено, что даже небольшое количество ПАВ, добавленного в ростовой раствор 50 мМ,

значительно меняет морфологию синтезируемых структур. На рисунке 2 показана морфология плёнки, выращенной из раствора с концентрацией по нитрату цинка 50мМ, в течение 1 часа при 95°C, с добавлением 1 вес. % ПАВ.

Из рисунка видно, что морфология поверхности состоит из пирамид вместо шестигранников.

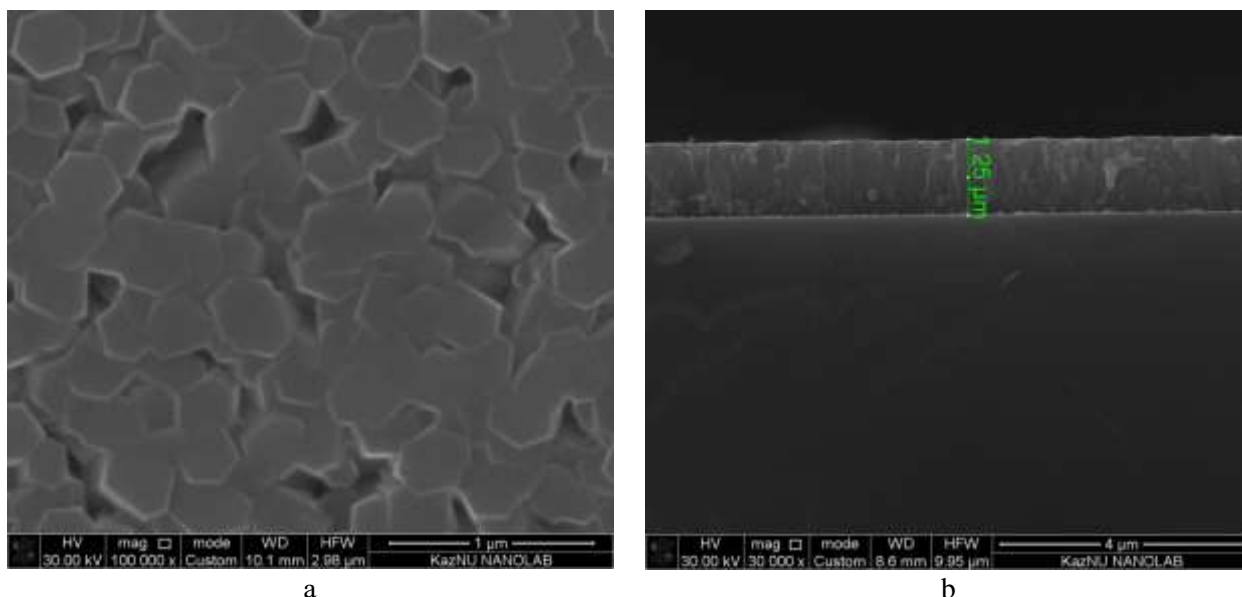


Рисунок 2 – SEM плёнки ZnO, полученной при синтезе из раствора 50 мМ при добавлении 5 вес.% ПАВ, длительность синтеза 1 час; а – вид сверху, b – вид сбоку

Как показали результаты сканирующей электронной микроскопии, из раствора 50 мМ за время 1 час формируются стержни диаметром в среднем 90 нм и длиной порядка 2.5 μ (рисунок

1). Аналогичные исследования были проведены при добавлении различных концентраций ПАВ в ростовой раствор, содержащий 15мМ базовых компонентов раствора (рисунки 4, 5).

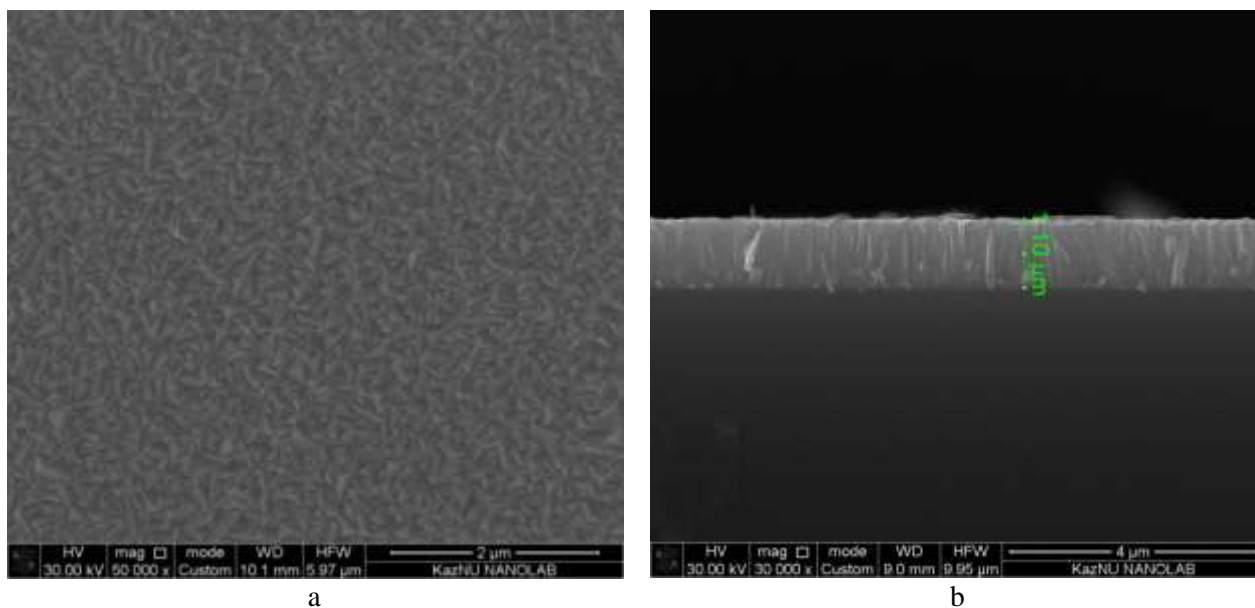


Рисунок 3 – SEM плёнки ZnO, полученной при синтезе из раствора 50 мМ при добавлении 10 вес.% ПАВ, длительность синтеза 1 час; а – вид сверху, б – вид сбоку

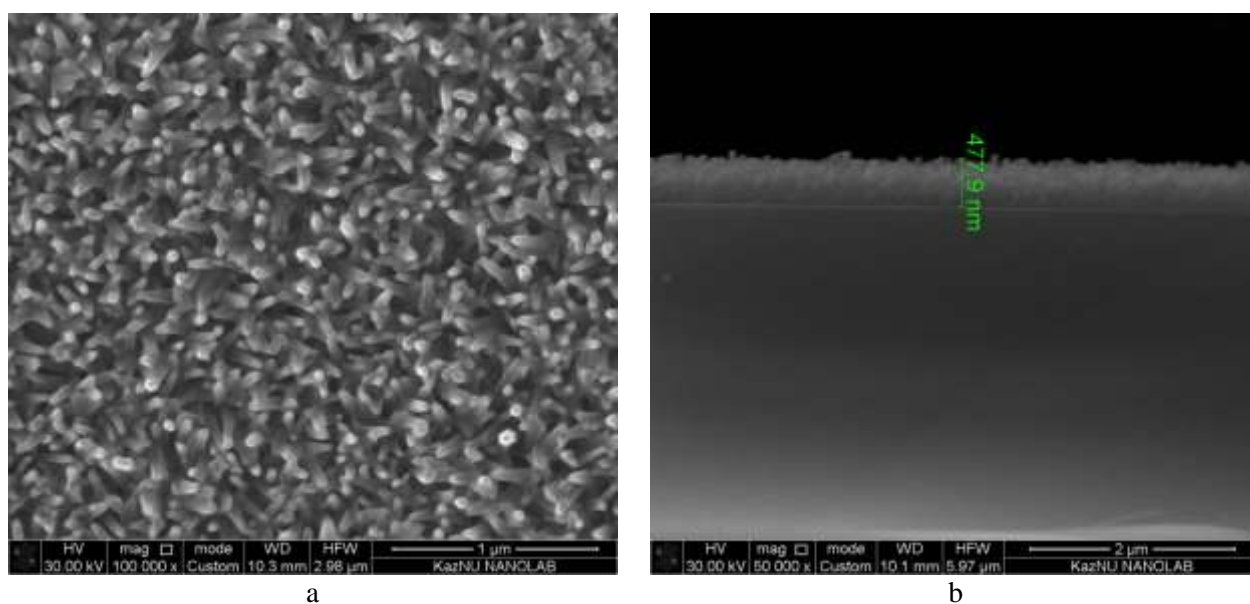


Рисунок 4 – SEM плёнки ZnO, полученной при синтезе из раствора 15мМ при добавлении 5 вес.% ПАВ, длительность синтеза 1 час; а – вид сверху, б – вид сбоку

Добавление ПАВ кардинально изменяет механизм роста наностержней ZnO, как показано на рисунках 2-5. Видно, что вместо массива наностержней формируется плёнка с размерами отдельных шестигранников около 200 нм. Морфология поверхности плёнок, составленная из пирамид вместо шестигранников весьма необычна для плёнок, полученных гидротермальным синтезом, так как плёнки

получаются путём разрастания вширь и смыкания шестигранных стержней. Стержни, в свою очередь, растут вдоль направления преимущественного роста (002) оксида цинка. Изменение морфологии полученных плёнок по сравнению с плёнками, получаемыми в обычном гидротермальном синтезе, свидетельствует, что небольшие добавки ПАВ приводят к смене направления преимущественного роста.

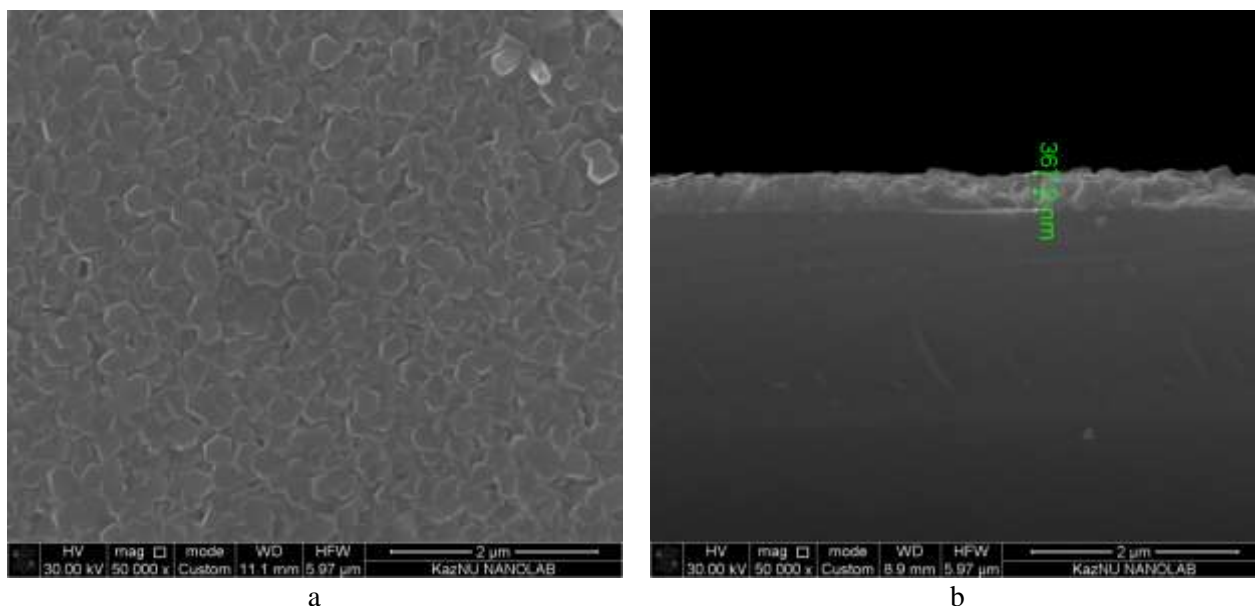


Рисунок 5 – SEM плёнки ZnO, полученной при синтезе из раствора 15мМ при добавлении 10 вес.% ПАВ, длительность синтеза 1 час; а – вид сверху, b – вид сбоку

Поэтому были проведены рентгенструктурные (XRD) измерения. Все рассматриваемые образцы были исследованы методом рентгеноструктурного анализа (XRD) при одинаковых условиях. По данным XRD дифракционные пики, расположенные при $31,76^\circ$, $34,42^\circ$, $36,25^\circ$, $47,53^\circ$, $56,59^\circ$, $67,94^\circ$ и $69,08^\circ$, индексированы как гексагональные фазы вюрцита ZnO (JCPDS № 01-075-9742). XRD результаты для образца ZnO, полученного при синтезе из раствора 50мМ при добавлении 10 вес.%. ПАВ приведены на рисунке 6. Для сравнения показан также образец поликристаллического порошкового ZnO.

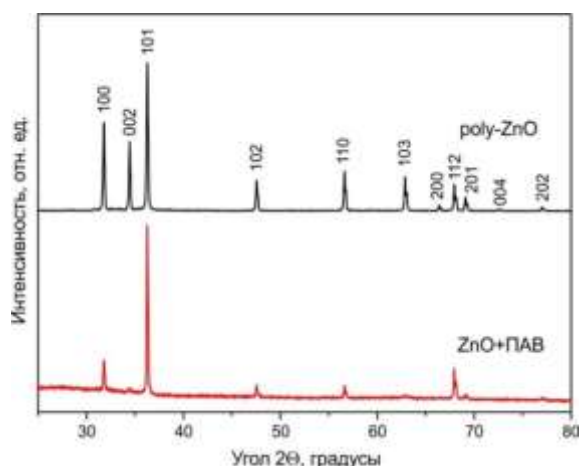


Рисунок 6 – XRD результаты для образца ZnO, полученного при синтезе из раствора 50 мМ при добавлении 10 вес.%. ПАВ

Видно, что в отличие от обычного случая с преобладанием рефлекса (002), который всегда наблюдается в образцах, выращенных гидротермальным методом, в данном случае преобладает рефлекс (101), а рефлекс (002) почти отсутствует. Для выяснения причин такого действия ПАВ на изменение направления преимущественного роста и получения толстых плёнок, растущих в направлении (101), требуются дальнейшие исследования.

На рисунке 7 приведены спектры пропускания этих плёнок ZnO без ПАВ, а также с 5 вес.%. ПАВ и 10 вес.%. ПАВ.

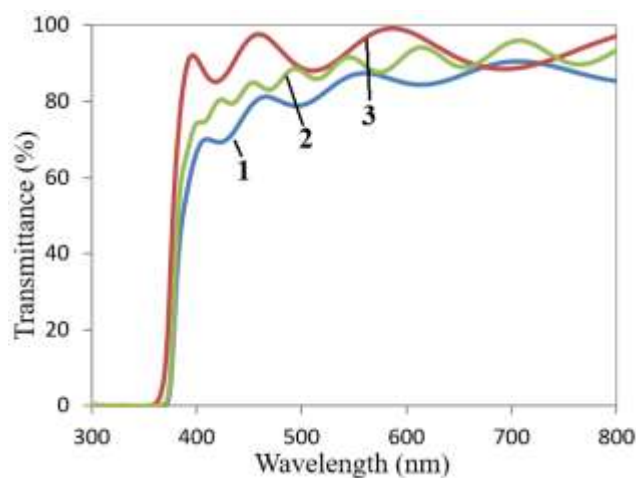


Рисунок 7 – Спектры пропускания плёнок ZnO на стеклянных подложках, выращенные в растворе с концентрацией 50 мМ: 1 - без ПАВ, 2 - 5 вес.%. ПАВ, 3 - 10 вес.%. ПАВ

Полученные плёнки ZnO на стеклянных подложках, выращенные в растворе с концентрацией 50 мМ, имеют высокую прозрачность и однородность. На спектрах видна интерференционная картина, что говорит о высокой однородности плёнок, при этом средний коэффициент пропускания в видимой области достигает ~90 %.

Заключение

Наноструктурированные образцы ZnO были синтезированы экономичным гидротермальным методом. Изучены морфология, структурные и оптические свойства полученных образцов. Результаты исследования синтезированных образцов методом показали, что добавление органических поверхностно-активных веществ в раствор для роста позволяет влиять на морфологические и структурные свойства материалов. Добавление ПАВ (додецилсульфат

натрия) в ростовой раствор вызывает сильное изменение не только морфологии плёнок, но и наностержней. Замечено, что увеличение содержания ПАВ в растворе роста влечёт увеличение поперечного размера наностержней с одновременным уменьшением их длины. Таким образом, разработаны методы управляемого изменения морфологии синтезируемых плёнок и массивов наностержней ZnO путём изменения состава ростового раствора при добавлении поверхностно-активных веществ. Полученные образцы оксида цинка перспективны для применения в качестве основы оптоэлектронных устройств, электрохимических биосенсоров и в других приложениях.

Благодарность

Работа была выполнена в рамках Гранта № AP23488569 Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

Литература

- 1 Thi L.T., Thi L.N.V., Hung-Anh T.V., Quoc V.H., Anh T.D., Viet H.N., Huu T.N. Enhanced photocatalytic activity of ZnO nanorods grown from atmospheric pressure spatial atomic layer deposition-derived seeds via chemical bath deposition synthesis // *Optical Materials*. – 2025. – Vol. 161. – P.116808.
- 2 Ramadevi S.P., Lavanya T., Kuppusamy T., Jayalakshmi V. Novel self-powered UV photodetectors based on nematic liquid crystal integrated with ZnO nanorods // *Journal of Molecular Liquids*. – 2025. – Vol. 425. – P.127127.
- 3 Prabhu S., Pavan P.-G., Komatireddy D.-R., Cristian H.-C., Aravindhan S., Ramalinga V.-M., Siva Ch. Synthesis of isolated ZnO nanorods on introducing g-C₃N₄ for improved photoelectrocatalytic methanol production by CO₂ reduction // *Inorganic Chemistry Communications*. – 2024. – Vol. 170(2). – P.113313.
- 4 Abdullin K.A., Cicero G., Gritsenko L.V., Kumeikov S.E., Markhabaeva A.A. Effect of annealing and hydrogen plasma treatment on the luminescence and persistent photoconductivity of polycrystalline ZnO films // *Journal of Applied Physics*. – 2017. – Vol. 121(24). – P. 245303-1 –245303-6.
- 5 Liu Y.-H., Young S.-J., Ji L.-W., Chu Y.-L., Chang S.-J. High-sensitive ethanol gas sensor using Ag modified ZnO nanosheets // *Talanta Open*. – 2024. – Vol.10. – P.100386.
- 6 Pronin I.A., Plugin I.A., Kolosov D.A., Karmanov A.A., Yakushova N.D., Varezhnikov A.S., Komolov A.S., Lazneva E.F., Koroleva A.V., Moshnikov V.A., Kondratev V.M., Glukhova O.E., Korotcenkov G., Sysoev V.V. Sol-gel derived ZnO film as a gas sensor: Influence of UV processing versus a thermal annealing // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2024. – Vol. 377. – P.115707.
- 7 Meng F., Li G., Ji H., Yuan Z. Investigation on oxygen vacancy regulation mechanism of ZnO gas sensors under temperature modulation mode to distinguish alcohol homologue gases // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2025. – Vol.423. – P.136747.
- 8 Zhou R., Lam K.H. ZnO@Ni symmetric supercapacitors in application of sustainable energy storage // *Journal of Energy Storage*. – 2025. – Vol.107. – P.114991.
- 9 Abdullin K., Gabdullin M., Kalkozova Z., Kudryashov V., Mirzaeian M., Yelemessov K., Baskanbayeva D., Serikkanov A. Enhancing the Electrochemical Performance of ZnO-Co₃O₄ and Zn-Co-O Supercapacitor Electrodes Due to the In Situ Electrochemical Etching Process and the Formation of Co₃O₄ Nanoparticles // *Energies*. – 2024. – Vol.17. – P.1888.
- 10 Aiswarya R., Kalaivani T. Facile synthesis of highly porous hierarchical ZnO nano-flowers array over graphene oxide nanocomposite for high performance supercapacitor applications // *Electrochimica Acta*. – 2025. – Vol.515. – P.145676.
- 11 Deepa G., Balasundaram O.N. Society based photovoltaic application of dye sensitized solar cell of Indium doped ZnO photoanode using cactus fruit via solvothermal method // *Optical Materials*. – 2024. – Vol. 157(1). – P.116138.
- 12 Mufti N., Ardilla O.D., Yuliana E.S., Wulandari R.F., Taufiq A., Setiyanto H., Aziz M., Salim A.A., Suryana R., Septina W. Improved performance of a SWCNT/ZnO nanostructure-integrated silicon thin-film solar cell: role of annealing temperature // *Materials Advances*. – 2024. – Vol. 5(22). – P.9018-9031.

- 13 Cheng L., Guo R., Zheng W., He K., Geng Y., Liu L., Ai Q., He Y., Zhang Y.N., Zhao Y. ZnO-Nafion assisted optical fiber dual-SPR biosensor for simultaneous detection of urea and uric acid concentrations // *Biosensors and Bioelectronics*. – 2025. – Vol. 271. – P. 117076.
- 14 Tolubayeva D.B., Gritsenko L.V., Kedruk Y.Y., Aitzhanov M.B., Nemkayeva R.R., Abdullin K.A. Effect of hydrogen plasma treatment on the sensitivity of ZnO based electrochemical non-enzymatic biosensor // *Biosensors*. – 2023. – Vol.13. – P.793.
- 15 Liu Y., Xiao Y., Zhang Y., Gao X., Wang H., Niu B., Li W. ZnO-rGO-based electrochemical biosensor for the detection of organophosphorus pesticides // *Bioelectrochemistry*. – 2024. – Vol. 156. – P. 108599.
- 16 Paltusheva Z., Gritsenko L., Kedruk Y., Abdullin K., Aitzhanov M., Kalkozova Z. Electrochemical sensor for ascorbic acid based on zinc oxide nanostructures // *Recent Contributions to Physics*. – 2023. – Vol. 86 (3). – P. 49–56.
- 17 Bakranova D., Seitov B., Bakranov N. Photocatalytic and Glucose Sensing Properties of ZnO-Based Nanocoating // *ChemEngineering*. – 2023. – Vol.7. – P.22.
- 18 Kedruk Y.Y., Contestabile A., Zeng J., Fontana M., Laurenti M., Gritsenko L.V., Cicero G., Pirri C.F., Abdullin K.A. Morphology Effects on Electro- and Photo-Catalytic Properties of Zinc Oxide Nanostructures // *Nanomaterials*. – 2023. – Vol. 13. – P. 2527.
- 19 Markhabayeva A.A., Kalkozova Z.K., Nemkayeva R., Yerlanuly Y., Anarova A.S., Tulegenova M.A., Tulegenova A.T., Abdullin K.A. Construction of a ZnO heterogeneous structure using Co₃O₄ as a co-catalyst to enhance photoelectrochemical performance // *Materials*. – 2024. –Vol. 17. – P.146.
- 20 Bakranov N., Kuli Z., Nagel D., Bakranova D. Nanomaterials engineering for enhanced low energy nuclear reactions: a comprehensive review and future prospects // *Frontiers in Materials*. –2024. – Vol.11.
- 21 Sudapalli A.M., Shimpi N.G. 3D ZnO sunstar rose nanoflowers morphology with surfactant-assisted reflux exhibit excellent optical properties and photocatalytic activity against hazardous organic dyes // *Optical Materials*. – 2023. – Vol. 136. – P.113391.
- 22 Perhația I., Mureșan L.E., Belcovici A., Popa A., Borodi G., Mesaroș A., Tudoran L.-B. Influence of different additives on the morphology, defect state and luminescence of ZnO nanoparticles // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2024. –Vol. 684. – P.133102.
- 23 Gritsenko L., Tolubayeva D. (2022). Effect of the morphology of zinc oxide layers on the electrochemical properties of biosensors // *Recent Contributions to Physics*. – 2022. – Vol. 83 (4). – P. 29–37.
- 24 Ftahi W., AL-Shaeri N., Yang Y., Ahmed S.A., Tang Y., Liu Q., Ni Y. Investigating the temperature and Al doping effect on the O₂ adsorption Process on ZnO nanowire surface: A ReaxFF-MD approach // *Computational Materials Science*. – 2025. – Vol.252. – P.113774.
- 25 Shahriyari A., Bagherzadeh-Nobari Sh., Yousefzad M., Manavizadeh N., Pourfarzad H., GolshanBafghi Z., Ahmadi H., Gholipour F. High-sensitivity creatine detection using doped ZnO nanoribbon biosensors: A density functional theory approach // *Sensing and Bio-Sensing Research*. – 2025. – Vol. 100767.
- 26 Yang T.-Y., Yu G.-X., Liu J., Li X., Chen L., Guo Z. Bimetallic Au-Pt nanoparticle-supported ZnO porous nanobelts for selective gas sensing enhancement to benzene // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2025. – Vol.426. – P.137125.
- 27 Agale P., Salve V., Mardikar S., Patange S., More P. Synthesis and characterization of hierarchical Sr-doped ZnO hexagonal nanodisks as an efficient photocatalyst for the degradation of methylene blue dye under sunlight irradiation // *Applied Surface Science*. – 2024. – Vol. 672. –P. 160795.
- 28 Wang X., Chen Q., Yang D., Li Y., Yin D., Ni B., Lu W., Sun G., Feng M. Ag doped ZnO hollow nanosphere as a photocatalyst for enhanced performance in photo-assisted Li-O₂ batteries // *Surfaces and Interfaces*. – 2025. – Vol. 56. – P. 105679.
- 29 Swarupa O.K., Sahu S., Sahoo S., Sahoo P.K., Pradhan A.K., Sarkar J.K., Datta P.K., Das S.-K. Growth of high-density Zinc Oxide (ZnO) nanoflowers in all aqueous two-step method and their application in second harmonic generation of femtosecond laser // *Optical Materials*. – 2024. –Vol. 157(2). – P. 116240.
- 30 Soli J., Kachbouri S., Elaloui E., Charnay C. Role of surfactant type on morphological, textural, optical, and photocatalytic properties of ZnO nanoparticles obtained by modified sol–gel // *J Sol-Gel Sci Technol*. – 2021. – Vol. 100. – P.271–285.
- 31 Maraeva E.V., Permiakov N.V., Kedruk Y.Y., Gritsenko L.V., Abdullin K.A. Creating a virtual device for processing the results of sorption measurements in the study of zinc oxide nanorods // *Chimica Techno Acta*. – 2020. – Vol. 7. – P. 154–158.
- 32 Baby B., Devi M.D.S., Subramani T., Perumalsamy V., Muthusamy P., Umamaheswaran S. HMT Surfactant Assisted Synthesis of ZnO Nanoparticles for Effect on Photocatalytic and Antibacterial Activities: An Impact Evidence of Strong Morphology // *J Inorg Organomet Polym*. – 2024.
- 33 Peng L., Zhang H.-Y., Li Z.-J., Zhang J. Effect of surfactants on morphology, structure and photoluminescence properties of Eu-doped ZnO microsphere // *Optoelectronics Letters*. – 2020. –Vol. 16. – P.293-297.
- 34 Valtsifer V.A., Sivtseva A.V., Kondrashova N.B., Shamsutdinov A.S., Averkina A.S., Valtsifer I.V., Feklistova I.N., Strelnikov V.N. Influence of Synthesis Conditions on the Properties of Zinc Oxide Obtained in the Presence of Nonionic Structure-Forming Compounds // *Nanomaterials*. – 2023. – Vol. 13. – P.2537.
- 35 Du J., Liu Q., Jiang W., Qiu H., Zhang Y., He W. Effect of surfactants on the morphology of ZnCo₂O₄ nanoflowers prepared by hydrothermal method // *Solid State Sciences*. – 2025. –Vol. 160. – P.107808.

References

- 1 L.T. Thi, L.N.V. Thi, T.V. Hung-Anh, V.H. Quoc, T.D. Anh, H.N. Viet, T.N. Huu, *Optical Materials*, 161, P.116808 (2025). DOI: [10.1016/j.optmat.2025.116808](https://doi.org/10.1016/j.optmat.2025.116808)
- 2 S.P. Ramadevi, T. Lavanya, T. Kuppusamy, V. Jayalakshmi, *Journal of Molecular Liquids*, 425, P.127127 (2025). DOI: [10.1016/j.molliq.2025.127127](https://doi.org/10.1016/j.molliq.2025.127127)
- 3 S. Prabhu, P.-G. Pavan, D.-R. Komatireddy, H.-C. Cristian, S. Aravindhan, V.-M. Ramalinga, Ch. Siva, *Inorganic Chemistry Communications*, 170(2), P.113313 (2024). DOI: [10.1016/j.inoche.2024.113313](https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.113313)
- 4 K.A. Abdullin, G. Cicero, L.V. Gritsenko, S.E. Kumeikov, A.A. Markhabaeva, *Journal of Applied Physics*, 121(24), P. 245303-1 –245303-6 (2017). <https://doi.org/10.1063/1.4989826>
- 5 Y.-H. Liu, S.-J. Young, L.-W. Ji, Y.-L. Chu, S.-J. Chang, *Talanta Open*, 10, P.100386 (2024). DOI: [10.1016/j.talo.2024.100386](https://doi.org/10.1016/j.talo.2024.100386)
- 6 I.A. Pronin, I.A. Plugin, D.A. Kolosov, A.A. Karmanov, N.D. Yakushova, A.S. Varezchnikov, A.S. Komolov, E.F. Lazneva, A.V. Koroleva, V.A. Moshnikov, V.M. Kondratev, O.E. Glukhova, G. Korotcenkov, V.V. Sysoev, *Sensors and Actuators A: Physical*, 377, P.115707 (2024). DOI: [10.1016/j.sna.2024.115707](https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115707)
- 7 F. Meng, G. Li, H. Ji, Z. Yuan, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 423, P.136747 (2025). DOI: [10.1016/j.snb.2024.136747](https://doi.org/10.1016/j.snb.2024.136747)
- 8 R. Zhou, K.-H. Lam, *Journal of Energy Storage*, 107, P.114991 (2025). DOI: [10.1016/j.est.2024.114991](https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114991)
- 9 K. Abdullin, M. Gabdullin, Z. Kalkozova, V. Kudryashov, M. Mirzaeian, K. Yelemessov, D. Baskanbayeva, A. Serikkanov, *Energies*, 17, P. 1888 (2024). DOI: [10.3390/en17081888](https://doi.org/10.3390/en17081888)
- 10 R. Aiswarya, T. Kalaivani, *Electrochimica Acta*, 515, P.145676 (2025). DOI: [10.1016/j.electacta.2025.145676](https://doi.org/10.1016/j.electacta.2025.145676)
- 11 G. Deepa, O.N. Balasundaram, *Optical Materials*, 157 (1), P.116138 (2024). DOI: [10.1016/j.optmat.2024.116138](https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.116138)
- 12 N. Mufti, O.D. Ardilla, E.S. Yuliana, R.F. Wulandari, A. Taufiq, H. Setiyanto, M. Aziz, A.A. Salim, R. Suryana, W. Septina, *Materials Advances*, 5(22), P.9018-9031 (2024). DOI: [10.1039/d4ma00726c](https://doi.org/10.1039/d4ma00726c)
- 13 L. Cheng, R. Guo, W. Zheng, K. He, Y. Geng, L. Liu, Q. Ai, Y. He, Y.N. Zhang, Y. Zhao, *Biosensors and Bioelectronics*, 271, P. 117076 (2025). DOI: [10.1016/j.bios.2024.117076](https://doi.org/10.1016/j.bios.2024.117076)
- 14 D.B. Tolubayeva, L.V. Gritsenko, Y.Y. Kedruk, M.B. Aitzhanov, R.R. Nemkayeva, K.A. Abdullin, *Biosensors*, 13, P.793 (2023). DOI: [10.3390/bios13080793](https://doi.org/10.3390/bios13080793)
- 15 Y. Liu, Y. Xiao, Y. Zhang, X. Gao, H. Wang, B. Niu, W. Li, *Bioelectrochemistry*, 156, P.108599 (2024). DOI: [10.1016/j.bioelechem.2023.108599](https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2023.108599)
- 16 Z. Paltusheva, L. Gritsenko, Y. Kedruk, K. Abdullin, M. Aitzhanov, Z. Kalkozova, *Recent Contributions to Physics (Rec.Contr.Phys.)*, 86, P. 49–56 (2023). DOI: [10.26577/RCPH.2023.v86.i3.06](https://doi.org/10.26577/RCPH.2023.v86.i3.06)
- 17 D. Bakranova, B. Seitov, N. Bakranov, *ChemEngineering*, 7, P. 22 (2023). DOI: [10.3390/chemengineering7020022](https://doi.org/10.3390/chemengineering7020022)
- 18 Y.Y. Kedruk, A. Contestabile, J. Zeng, M. Fontana, M. Laurenti, L.V. Gritsenko, G. Cicero, C.F. Pirri, K.A. Abdullin, *Nanomaterials*, 13, P. 2527 (2023). DOI: <https://doi.org/10.3390/nano13182527>
- 19 A.A. Markhabayeva, Z.K. Kalkozova, R. Nemkayeva, Y. Yerlanuly, A.S. Anarova, M.A. Tulegenova, A.T. Tulegenova, K.A. Abdullin, *Materials*, 17, P.146 (2024). DOI: [10.3390/ma17010146](https://doi.org/10.3390/ma17010146)
- 20 N. Bakranov, Z. Kuli, D. Nagel, D. Bakranova, *Frontiers in Materials*, 11, (2024). DOI: [10.3389/fmats.2024.1500487](https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1500487)
- 21 A.M. Sudapalli, N.G. Shimpi, *Optical Materials*, 136, P.113391 (2023). DOI: [10.1016/j.optmat.2022.113391](https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.113391)
- 22 I. Perhația, L.E. Mureșan, A. Belcoviçi, A. Popa, G. Borod, A. Mesaroș, L.B. Tudoran, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 684, P.133102 (2024). DOI: [10.1016/j.colsurfa.2023.133102](https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.133102)
- 23 L. Gritsenko, D. Tolubayeva, *Recent Contributions to Physics (Rec.Contr.Phys.)*, 83, P. 29–37 (2022). DOI: [10.26577/RCPH.2022.v83.i4.04](https://doi.org/10.26577/RCPH.2022.v83.i4.04)
- 24 W. Ftahi, N. AL-Shaeri, Y. Yang, S.A. Ahmed, Y. Tang, Q. Liu, Y. Ni, *Computational Materials Science*, 252, P.113774 (2025). DOI: [10.1016/j.commatsci.2025.113774](https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2025.113774)
- 25 A. Shahriyari, Sh. Bagherzadeh-Nobari, M. Yousefizad, N. Manavizadeh, H. Pourfarzad, Z. GolshanBafghi, H. Ahmadi, F. Gholipour, *Sensing and Bio-Sensing Research*, 100767, (2025). DOI: [10.1016/j.sbsr.2025.100767](https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2025.100767)
- 26 T.-Y. Yang, G.-X. Yu, J. Liu, X. Li, L. Chen, Z. Guo, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 426, P.137125 (2025). DOI: [10.1016/j.snb.2024.137125](https://doi.org/10.1016/j.snb.2024.137125)
- 27 P. Agale, V. Salve, S. Mardikar, S. Patange, P. More, *Applied Surface Science*, 672, P.160795 (2024). DOI: [10.1016/j.apsusc.2024.160795](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.160795)
- 28 X. Wang, Q. Chen, D. Yang, Y. Li, D. Yin, B. Ni, W. Lu, G. Sun, M.Feng, *Surfaces and Interfaces*, 56, P.105679 (2025). DOI: [10.1016/j.surfin.2024.105679](https://doi.org/10.1016/j.surfin.2024.105679)
- 29 O.K. Swarupa, S. Sahu, S. Sahoo, P.K. Sahoo, A.K. Pradhan, J.K. Sarkar, P.K. Datta, S.K. Das, *Optical Materials*, 157 (2), P.116240 (2024). DOI: [10.1016/j.optmat.2024.116240](https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.116240)
- 30 J. Soli, S. Kachbouri, E. Elaloui, C. Charnay, *J Sol-Gel Sci Technol*, 100, P.271-285 (2021). DOI: [10.1007/s10971-021-05653-4](https://doi.org/10.1007/s10971-021-05653-4)
- 31 E.V. Maraeva, N.V. Permiakov, Y.Y. Kedruk, L.V. Gritsenko, K.A. Abdullin, *Chimica Techno Acta*, 7 (4), P. 154-158 (2020). DOI: [10.15826/chimtech.2020.7.4.03](https://doi.org/10.15826/chimtech.2020.7.4.03)

32 B. Baby, M.D.S. Devi, T. Subramani, V. Perumalsamy, P. Muthusamy, S. Umamaheswaran, J Inorg Organomet Polym, (2024). DOI: 10.1007/s10904-024-03407-7

33 L. Peng, H.-Y. Zhang, Z.-J. Li, J. Zhang, Optoelectronics Letters, **16**, P. 293-297 (2020). DOI: [10.1007/s11801-020-9126-x](https://doi.org/10.1007/s11801-020-9126-x)

34 V.A. Valtsifer, A.V. Sivtseva, N.B. Kondrashova, A.S. Shamsutdinov, A.S. Averkina, I.V. Valtsifer, I.N. Feklistova, V.N. Strelnikov, Nanomaterials, **13**, P. 2537 (2023). DOI: 10.3390/nano13182537

35 J. Du, Q. Liu, W. Jiang, H. Qiu, Y. Zhang, W. He, Solid State Sciences, **160**, P.107808 (2025). DOI: 10.1016/j.solidstatesciences.2024.107808

История статьи:

Поступила 27 февраля 2025

Принята 11 марта 2025

Мақала тарихы:

Түсті – 27.02.2025

Қабылданды – 11.03.2025

Информация об авторах:

1. **Жанар Каниевна Калкозова** – к.ф.-м.н., ассоц. профессор, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан, e-mail: zhanar.kalkozova@kaznu.edu.kz

2. **Леся Владимировна Гриценко** (автор-корреспондент) – PhD, ассоц. проф. Satbayev University, г. Алматы, Казахстан, e-mail: gritsenko@satbayev.university

3. **Хабибулла Абдуллаевич Абдуллин** – д.ф.-м.н., проф., Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан.

4. **Айымкул Алихановна Мархабаева** – PhD, ст.преподаватель, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан; e-mail: aiko.marx87@gmail.com

Авторлар туралы мәлімет:

1. **Жанар Каниевна Калкозова** – ф.-м.ғ.к, қауым. профессор, Өл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: zhanar.kalkozova@kaznu.edu.kz

2. **Леся Владимировна Гриценко** (автор-корреспондент) – PhD, қауым. профессор. Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан, e-mail: gritsenko@satbayev.university

3. **Хабибулла Абдуллаевич Абдуллин** – ф.-м.ғ.к, проф., Өл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан.

4. **Айымкул Алихановна Мархабаева** – PhD, ст.преподаватель, Өл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: aiko.marx87@gmail.com