**Uzbek Journal of Physics**
**25(1) 1-8, 2023. DOI: https//doi.org/ 10.52304/.v25i1.398** 

# Влияние температуры нагрева на фотолюминесцентные свойства наноструктур оксида цинка, синтезированных в водных растворах

**З.Ш. Шаймарданов[1,2], Ш.З. Уролов[1,3], Р.Р. Жалолов[*,1,2], Б.Н. Рустамова[1], Д.О. Набиев[3]**

[1]Институт ионно-плазменных и лазерных технологий Академии наук Узбекистана, ул. Дурмон йули. 33, 100125, Ташкент, Узбекистан
[2]Национальный университет Узбекистана, ул. Университетская 4, 100174, Ташкент, Узбекистан
[3]Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства, ул. Кори Ниязова, 39, 100000, Ташкент, Узбекистан

Получена 06.09.2022, revised 09.02.2023

* Corresponding author: e-mail: rr_jalolov@iplt.uz, Phone: +998 97 427 27 71

В настоящей работе исследовано влияние температуры отжига на фотолюминесцентные свойства наноструктур оксида цинка, синтезированных в водных растворах при низких температурах. При отжиге нанокристаллов ZnO, синтезированных методом химического осаждения при 200°C в течение 1 часа, концентрация дефектов в их кристаллической структуре минимальна. При отжиге нанокристаллов при температурах выше ~200°C в кристаллической структуре появляются кристаллографические дефекты нового типа. Качество кристалличности нанородов ZnO, синтезированных гидротермальным методом, повышается с увеличением температуры отжига, и становится идеальным при нагревании до ~ 650°C в течение ~1 часа

**Ключевые слова**: нанороды ZnO, нанокристаллы ZnO, фотолюминесценция, дефекты.

In this work, the effect of annealing temperature on the photoluminescence properties of zinc oxide nanostructures synthesized in aqueous solutions at low temperatures was investigated. When the ZnO nanocrystals synthesized by the chemical deposition method are annealed at 200°C for 1 hour, the concentration of defects in their crystal structure is minimal. When nanocrystals are annealed at temperatures higher than ~200°C, a new type of crystallographic defects appear in their crystal structure. The quality of crystallinity of the ZnO nanorods synthesized by the hydrothermal method increases with the annealing temperature. Their quality of crystallinity is perfect when heated at ~650°C for ~1 hour.

**Keywords:** ZnO nanorods, ZnO nanocrystals, photoluminescence, defects.

## I. Введение

Наноструктуры оксида цинка (ZnO) являются перспективным материалом для наноразмерных устройств из-за их превосходной кристалличности и уникальных электрооптических свойств. ZnO – кристаллический материал с прямыми межзонными переходами, проводимостью *n*-типа, большой шириной запрещенной зоны (3.37 эВ при комнатной температуре), высокой энергией связи свободного экситона (60 мэВ) [1, 2]. Синтез наноструктур ZnO с такими свойствами низкоэнергетическими и относительно дешевыми методами является актуальной научной задачей. Соответственно предлагается использовать низкотемпературные методы синтеза наноструктур ZnO. Обычно наноструктуры ZnO подразделяются на нанокристаллы, нанороды, тонкие пленки и наноленты в зависимости от метода синтеза. При синтезе наноструктур ZnO в хи-

мических растворах при низкой температуре широко используют методы гидротермального и химического осаждения [3, 4]. Если гидротермальный метод основан на синтезе нанородов ZnO на основе водных растворов при температуре 80–100°C в герметичном автоклаве под высоким давлением, то метод химического осаждения основан на синтезе нанокристаллов ZnO в стеклянных колбах при температуре 60–65°C в растворах солей цинка в различных спиртах [5, 6]. Качество кристалличности наноструктур ZnO, синтезированных в водных растворах при низкой температуре, относительно уступает качеству образцов, выращенных методом газофазного химического осаждения при высокой температуре [1, 2]. Причиной этого является высокая концентрация различных внедренных и собственных дефектов в кристаллической решетке наноструктур. Если решить проблему внедренных дефектов за счет использования при синтезе наноструктур высокочистых химических реагентов, то снизить концентрацию собственных дефектов можно за счет термической обработки наноструктур после синтеза.

Фотолюминесцентная спектроскопия при исследовании оптических свойств наноматериалов является надежным методом с высокой чувствительностью и без повреждения кристаллической структуры образца для определения оптического качества наноматериалов и количества внедренных и собственных дефектов. Известно, что в спектре фотолюминесценции (ФЛ) наноструктур ZnO при комнатной температуре наблюдаются полосы люминесценции, связанные с собственными дефектами ZnO, а также полосы, вызванные рекомбинацией свободных экситонов, максимум которых расположен на длине волны ~380 нм [1, 2]. Максимум полосы излучения, связанной с кристаллографическими дефектами, можно наблюдать в фиолетово-синем (395–460 нм), зеленом (500–525 нм), желто-оранжевом (560–600 нм) и красном (650 нм) диапазонах в видимой области спектра, в зависимости от метода синтеза наноструктур и внешних воздействий, осуществляемых после синтеза [1, 2, 7]. Обычно в спектре ФЛ наноструктур ZnO, синтезированных в водных растворах при низкой температуре, наблюдается оранжевая полоса люминесценции [8-10]. Эта полоса связана с избытком атомов кислорода $O_i$ в кристаллической решетке [9, 10] или с остатками гидроксидной группы [8]. После нагревания наноструктур, синтезированных в водных растворах при высоких температурах, в спектрах ФЛ наблюдается полоса зеленого излучения, максимум которой находится на длине волны ~510–525 нм [7, 9]. Анализ научной литературы показывает, что отсутствуют сведения об оптимальных температурах и продолжитель-ности нагрева, обеспечивающих минимальную концентрацию кристаллографических дефектов в материале при высокотемпературной термообработке наноструктур ZnO. При применении наноструктурных материалов в различных оптоэлектронных устройствах большое практическое значение имеет количество дефектов в их кристаллической структуре. Эти аспекты делают необходимым определение оптимальных температур, обеспечивающих минимальную концентрацию кристаллографических дефектов в кристаллической структуре наноматериалов.

В настоящей работе изучено влияние термообработки наноструктур при высокой температуре на ФЛ свойства наностержней и нанокристаллов ZnO, синтезированных на подложках из кварцевого стекла методами химического осаждения в водных растворах низкотемпературным и гидротермическим методами. В исследованиях по результатам фотолюминесцентной спектроскопии определены оптимальные температуры нагрева, обеспечивающие минимальную концентрацию кристаллографических дефектов в наноструктурах.

## II. Описание объекта и методов исследования

В качестве подложек при синтезе нанокристаллов ZnO использовали пластины кварцевого стекла (10×10×0.5 мм). Сначала подложки очищали поочередно этиловым спиртом, ацетоном и дистиллированной водой в ультразвуковой ванне. После процесса очистки в стеклянной колбе готовили раствор 0.6586 г дигидрата ацетата цинка ($ZnC_4H_6O_4{\cdot}2H_2O$) в метаноле ($CH_4O$) с концентрацией 0.1 М. Раствор интенсивно перемешивали магнитной мешалкой в течение ~15 мин, пока он не стал прозрачной жидкостью. Затем к раствору добавляли 10 мл деионизированной воды и снова интенсивно перемешивали магнитной мешалкой в течение 10 минут. У основания стеклянной колбы горизонтально располагали предварительно очищенные подложки. Затем пробирку плотно закрывали, помещали в термостойкую цилиндрическую емкость, наполненную водой, и синтезировали нанокристаллы ZnO в специальной печи при постоянной температуре 63°C в течение 24 часов. По

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

окончании процесса выращивания колбу охлаждали до комнатной температуры, извлекали из нее подложку с полученными на ней нанокристаллами и сушили на открытом воздухе.

В качестве подложек для выращивания нанородов ZnO гидротермальным методом при низкой температуре также использовали пластины кварцевого стекла (10×10×0.5 мм). Для исследования предварительно очищенные подложки извлекали из 20 мМ раствора дигидрата ацетата цинка в этаноле ($C_2H_6O$) с вертикальной скоростью ~1 мм/мин. Одной из важных особенностей гидротермального метода является формирование нанокристаллических зародышей ZnO на поверхности подложек перед синтезом для выращивания нанородов. Для этого был использован метод погружения. При этом на поверхности подложки образуется тонкая пленка раствора. Для получения на поверхности подложек тонкого однородного слоя подложки погружались в раствор 3 раза. Затем подложки нагревали на открытом воздухе при ~350°C в течение 30 минут. При гидротермальном выращивании нанородов основания нанокристаллов ZnO с наростами помещали на специальный тефлоновый держатель слоем нароста вниз в тефлоновом автоклаве, заполненном 0.25 М раствора гексаметилтетрамина ($C_6H_{12}N_4$) и гексогидрата нитрата цинка ($ZnN_2O_6{\cdot}6H_2O$) в деионизированной воде. После этого автоклав герметично закрывали и синтезировали нанороды ZnO при температуре 90°C в течение 5 часов. По окончании процесса синтеза автоклав охлаждали и подложки с выращенными нанородами извлекали и сушили на открытом воздухе.

Морфологию нанокристаллов и нанородов ZnO исследовали с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) (S-4800, Hitachi). Для исследования влияния температуры нагрева на оптические свойства нанородов ZnO часть образцов нагревали в муфельной печи при температурах 200, 350, 500 и 650°C в течение одного часа. Экспериментальная установка по исследованию фотолюминесценции наноструктур ZnO включала в себя светосильный монохроматор МДР-23, высокочувствительный фотоприемник ФЭУ-79 (300–800 нм) и бокскаринтегратор BCI-280. В качестве источника возбуждения фотолюминесценции использовали $N_2$-лазер ($\lambda$ = 337 нм, $\tau \sim 6$ нс, P ~ 15 кВт, частота повторения - 100 Гц).

## III. Описание и анализ результатов

СЭМ-изображения нанородов ZnO, синтезированных гидротермальным методом, представлены на рис. 1. Из изображений видно, что длина нанородов составляет 1÷1.2 мкм, диаметр около 50÷100 нм; они плотные и почти вертикальны к подложке. На рис. 2 представлены СЭМ-изображения нанокристаллов ZnO, синтезированных методом химического осаждения на поверхности подложек из кварцевого стекла. Как видно из изображений, нанокристаллы имеют форму гексагональной усеченной пирамиды, грани и основания гладкие и плоские, размеры кристаллов составляют около 400÷800 нм.

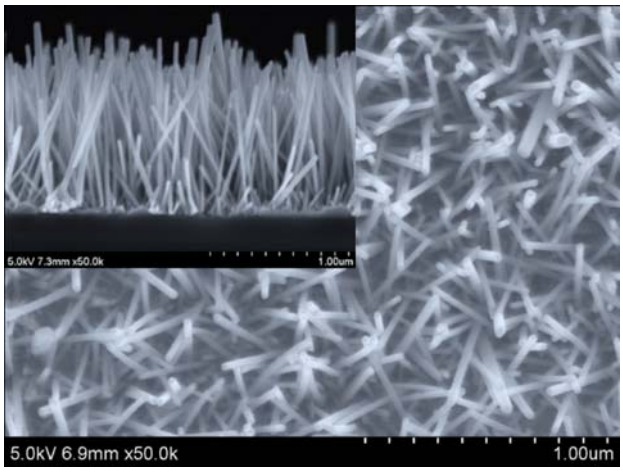



**Рисунок 1.** СЭМ-изображения нанородов ZnO, синтезированных гидротермальным методом.

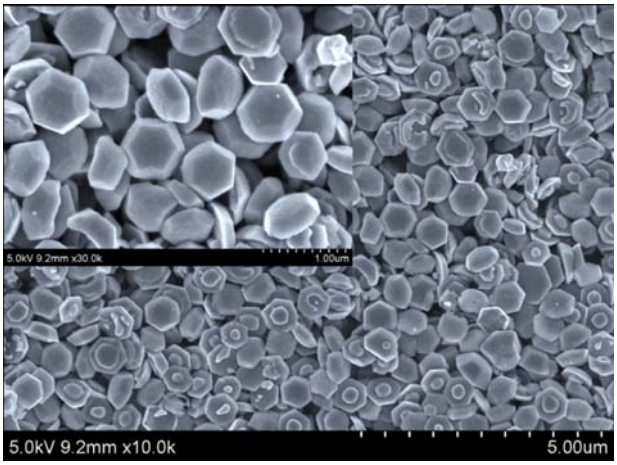



**Рисунок 2.** СЭМ-изображения нанокристаллов ZnO, синтезированных методом химического осаждения.

Под воздействием излучения азотного лазера (337 нм) свежесинтезированные нанороды проявляют сильную люминесценцию. Спектр люми-

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

несценции состоит из двух полос: сильной и узкой при ~381 нм (3.25 эВ) с незначительными отклонениями и широкой с максимумом в районе 570 нм (2.18 эВ) (рис. 3а).

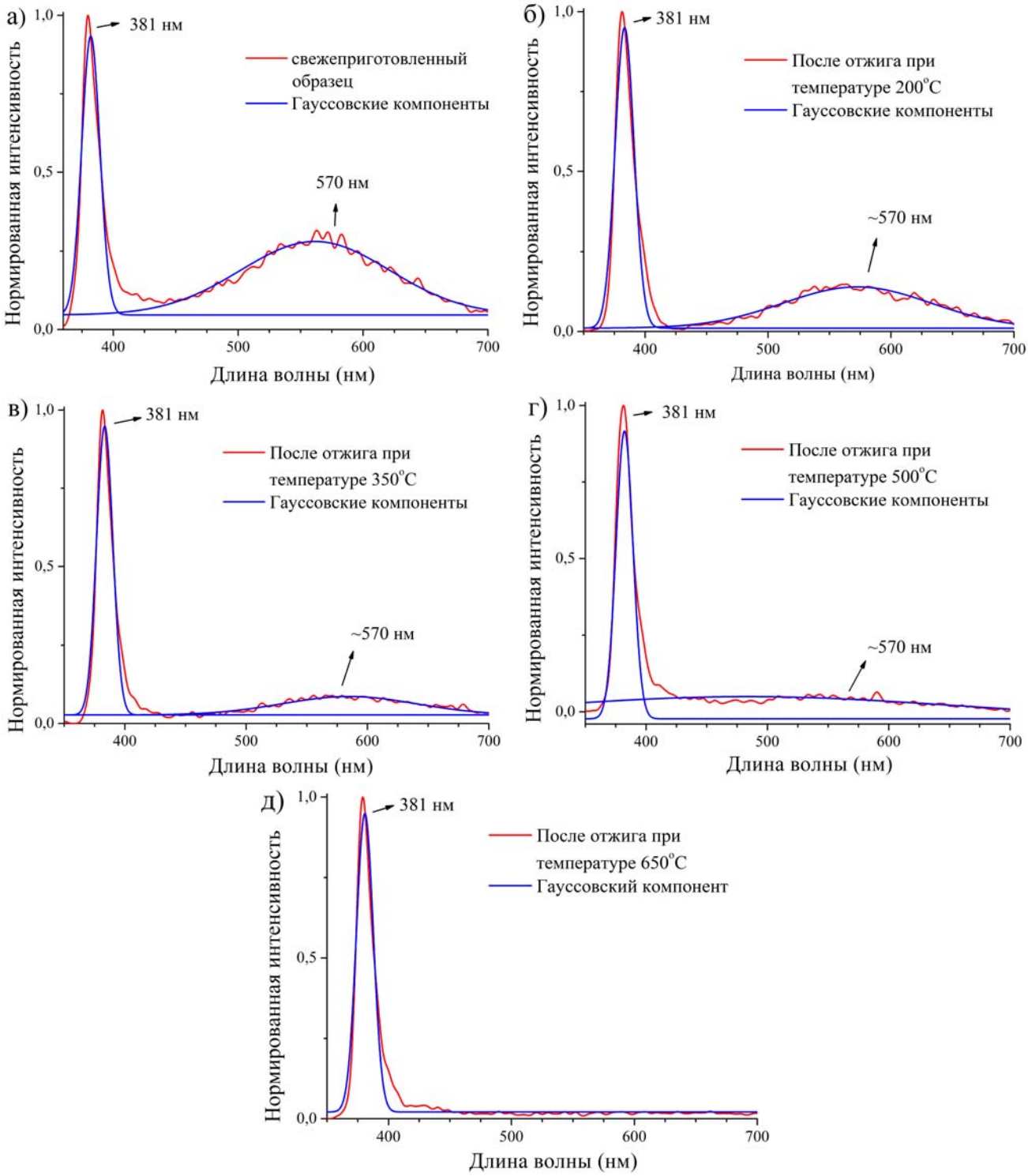



**Рисунок 3.** Спектры ФЛ нанородов ZnO после отжига при различных температурах и их разложение на гауссовы компоненты.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

Анализ литературы показывает, что полоса люминесценции в УФ-диапазоне (380–385 нм), наблюдаемая в спектре ФЛ наноструктур ZnO, отнесена к краевой люминесценции оксида цинка, а именно, свечению свободного экситона [1, 2]. Учитывая, что нанороды были синтезированы без посторонних добавок, широкая полоса люминесценции с максимумом на длине волны 560–570 нм (2.18–2.21 эВ) может быть обусловлена собственными дефектами ZnO или их комплексами. Эта желто-оранжевая полоса наблюдается в спектрах ФЛ наноструктур ZnO, синтезированных в водных растворах при низкой температуре. Предполагается, что эта полоса люминесценции относится к избыточным атомам кислорода ($O_i$) или их комплексам, расположенным между узлами кристаллической решетки [1, 2].

Согласно данным, полученным на основе метода First principle (метод расчета электронной структуры по уравнению Шредингера), при переходе $O_i$ из нейтрального состояния в однократное отрицательно заряженное состояние ($O_i^{-1}$) уровень $O_i^{-1}$ локализуется на 0.46 эВ выше максимума валентной зоны. При переходе из однократного отрицательно заряженного состояния в двукратное отрицательно заряженное состояние ($O_i^{-2}$) уровень последнего расположен на ~0.9–1.2 эВ выше максимума валентной зоны [11, 12]. На основании приведенных данных можно сказать, что полоса люминесценции в спектре ФЛ наноструктур ZnO с максимумом на длине волны 560–570 нм является результатом перехода возбужденных электронов в зоне проводимости на соответствующий уровень $O_i^{-2}$. Такая гипотеза была поддержана авторами [13], которые утверждают, что увеличение концентрации дефектов акцепторного типа в тонких пленках ZnO приводит к увеличению интенсивности оранжевой полосы люминесценции.

Соотношение интенсивностей УФ и видимых полос люминесценции в спектре ФЛ широко используется для оценки кристалличности наноразмерных материалов [1, 9]. Это соотношение в спектре ФЛ свежесинтезированных нанородов составляет $I_{381}/I_{570}$ ~3.3.

Известно, что, чем больше это отношение, тем выше кристалличность синтезируемого материала. При этом можно сказать, что синтезированные нанороды имеют относительно совершенную кристаллическую структуру. Исследовано влияние отжига при высокой температуре на свойства ФЛ нанородов ZnO, синтезированных гидротермальным методом. Установлено, что с увеличением температуры нагрева полуширина полосы УФ-люминесценции (~381 нм) в спектре ФЛ наностержней ZnO частично уменьшалась, а интенсивность полосы люминесценции, расположенной в длинноволновой области спектра (~570 нм) монотонно уменьшалась (рис. 3, б-г). Исследования показали, что после отжига нанородов ZnO в муфельной печи при ~650°C полностью исчезает полоса люминесценции на длине волны ~570 нм регистрируемого спектра ФЛ (рис. 3д). При этом наблюдается, что избыточные атомы кислорода, образовавшиеся в кристаллической структуре нанородов в процессе синтеза, покидают кристаллическую решетку, и их концентрация в кристаллической структуре минимальна.

В спектре ФЛ свежесинтезированных нанокристаллов ZnO также наблюдались две полосы люминесценции (рис. 4а), как и в нанородах. Первая – это полоса люминесценции на длине волны ~384 нм (3.23 эВ), связанная с рекомбинацией свободных экситонов ZnO. Вторая полоса люминесценции на длине волны ~560 нм (2.21 эВ) связана с избыточными атомами кислорода, расположенными между узлами кристаллической решетки. Отношение интенсивностей полос люминесценции в УФ и видимом областях в спектре ФЛ свежесинтезированных нанокристаллов ($I_{384}/I_{560}$) равно ~6.6. Это соотношение свидетельствует, что кристалличность нанокристаллов значительно выше, чем у нанородов.

Исследования показали, что после отжига нанокристаллов ZnO в муфельной печи при температуре 200°C в их спектре ФЛ исчезает полоса люминесценции с длиной волны ~560 нм (2.21 эВ) (рис. 4б). Изменения в спектре ФЛ нанокристаллов показывают, что их концентрация становится минимальной в результате ухода из кристаллической решетки избыточных атомов кислорода, образующихся в кристаллической структуре в процессе синтеза. После отжига нанокристаллов в муфельной печи при 350°C в их спектре ФЛ появляется малоинтенсивная полоса зеленого излучения с максимумом на длине волны ~510 нм (2.43 эВ) (рис. 4в), интенсивность которой увеличивается после термообработки при 500°C и 650°C (рис. 4г, 4д).

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

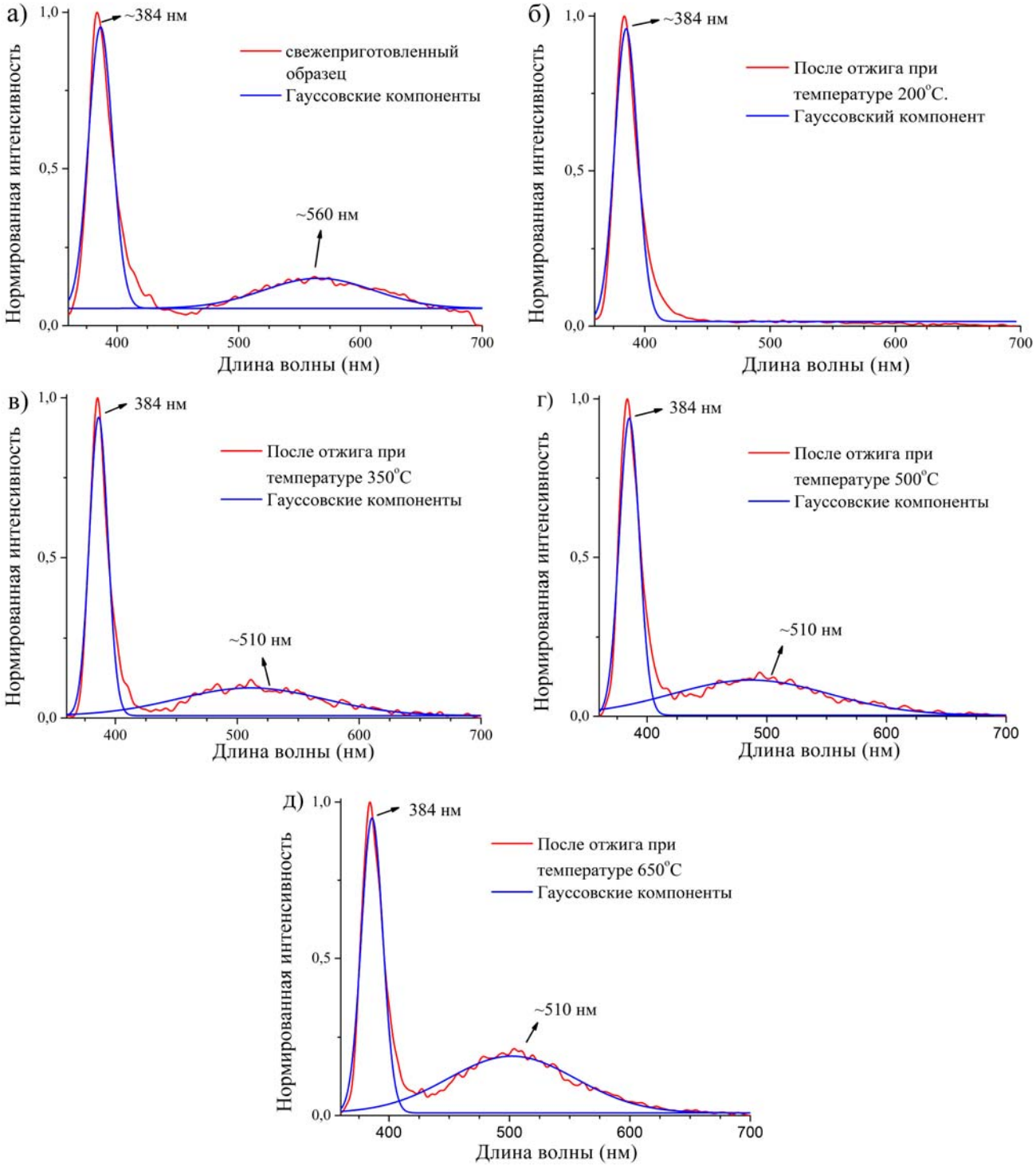



**Рисунок 4.** Спектры ФЛ нанокристаллов ZnO после отжига при различных температурах и их разложение на гауссовы компоненты.

Существует несколько гипотез появления зеленой полосы люминесценции, наблюдаемой в спектре ФЛ наноструктур ZnO. В работе [14] исследованы оптические свойства частиц ZnO методами электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) и фотолюминесцентной

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

спектроскопии. При исследовании в спектре ФЛ образцов наблюдалась зеленая полоса люминесценции на длине волны ~510 нм (2.43 эВ). По результатам исследования авторы связали эту полосу люминесценции с однократной положительно заряженной кислородной вакансией ($V_O^+$) [14]. Результаты, согласующиеся с этой теорией, представлены и в работе [15], в которой оптические свойства наноструктур ZnO также изучали методами ЭПР и фотолюминесцентной спектроскопии. Авторы сообщают, что в спектре ЭПР наблюдали пик G ~1.96 и зеленую полосу люминесценции, расположенную на длине волны ~506 нм (2.45 эВ) в спектре ФЛ. Авторы пришли к выводу, что эта зеленая полоса люминесценции наблюдается в спектре ФЛ наноструктур ZnO, синтезированных в средах с небольшим количеством атомов кислорода или термообработанных при высоких температурах, и что это излучение связано с кислородными вакансиями ($V_O$) [15]. По результатам First principle метода при переходе глубоких донорных уровней $V_O$ из нейтрального состояния в двукратное положительно заряженное состояние ($V_O^{2+}$) уровень последнего находится на 0.2–1.2 эВ ниже минимума зоны проводимости [11, 16-18]. Механизм появления зеленой полосы люминесценции обусловлен переходом электрона из минимума зоны проводимости на уровень $V_O^{2+}$ в запрещенной зоне [19]. Принимая это во внимание, можно сказать, что полоса зеленого излучения, расположенная при ~510 нм (2.43 эВ) спектра ФЛ нанокристаллов ZnO, связана с $V_O$ или их комплексами.

## IV. Заключение

В проведенных исследованиях нанокристаллы ZnO в форме гексагональных усеченных пирамид размерами 400–800 нм выращивали на поверхности пластин кварцевого стекла методом химического осаждения. Нанороды ZnO длиной 1–1.2 мм и диаметром 50–100 нм синтезировали низкотемпературным гидротермальным методом. В спектрах ФЛ свежесинтезированных образцов наблюдается полоса излучения, расположенная на длине волны 560–570 нм. Эта полоса люминесценции связана с избыточными атомами кислорода, образовавшимися в кристаллической решетке образцов в процессе синтеза. Установлено, что путем термообработки образцов в муфельной печи можно регулировать концентрацию избыточных атомов кислорода в кристаллической структуре. Термическая обработка нанокристаллов ZnO, выращенных методом химического осаждения, в муфельной печи при 200°C в течение 1 часа, приводит к минимальной концентрации дефектов в кристаллической структуре. Повышение температуры нагрева от ~200°C приводит к появлению в кристаллической структуре дефектов, связанных с кислородными вакансиями. В результате термической обработки гидротермально выращенных нанородов ZnO при ~650°C в течение ~1 часа количество дефектов в их кристаллической структуре оказалось минимальным.

## Метаданные

### Effect of annealing temperature on photoluminescent properties of zinc oxide nanostructures synthesized in aqueous solutions

**Z.Sh. Shaymardanov[1,2], Sh.Z. Urolov[1,3], R.R. Jalolov[1,2], B.N. Rustamova[1], D.O. Nabiyev[3]**

[1]Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies of Uzbekistan Academy of Sciences, Durmon yuli str. 33, 100125, Tashkent, Uzbekistan

[2]National University of Uzbekistan, University str. 4, 100174, Tashkent, Uzbekistan

[3]Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers, Kori Niyazov str. 39, 100000, Tashkent, Uzbekistan

In this work, the effect of annealing temperature on the photoluminescence properties of zinc oxide nanostructures synthesized in aqueous solutions at low temperatures was investigated. When the ZnO nanocrystals synthesized by the chemical bath deposition method are annealed at 200°C for 1 hour, the concentration of defects in their crystal structure is minimal. When nanocrystals are annealed at temperatures higher than ~200°C, new type of crystallographic defects appears in their crystal structure. The quality of crystallinity of the ZnO nanorods synthesized by the hydrothermal method increases with the annealing treatment temperature. Their quality of crystallinity is perfect when heated at ~650°C for ~1 hour.

**Keywords:** ZnO nanorods, ZnO nanocrystals, photoluminescence, defects, thermal annealing.

## Литература (References)

[1] Ü. Özgür, Ya.I. Alivov, C. Liu, A. Teke, M.A. Reshchikov, S. Doğan, V. Avrutin, S.J. Cho, H. Morkoç. Journal of Applied Physics **98**, 041301 (2005). https://doi.org/10.1063/1.1992666

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

[2] A.B. Djurišić, A.M.C. Ng, X.Y. Chen. Progress in Quantum Electronics **34**, 191-259 (2010). https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2010.04.001
[3] M. Andres Verges, A. Mifsud, and C.J. Serna. J. Chem. Soc. Faraday Trans. **86** No.6, 959-963(1990). https://doi.org/10.1039/FT9908600959
[4] H. Wang, Ch. Xie, D. Zeng. Journal of Crystal Growth **277**, 372-377 (2005). https://doi:10.1016/j.jcrysgro.2005.01.068
[5] M. Guo, P. Diao, and S. Cai. Journal of Solid State Chemistry **178**, 1864-1873 (2005). http://dx.doi.org/10.1016/j.jssc.2005.03.031
[6] S. Boubenia, A.S. Dahiya, G. Poulin-Vittrant, F. Morini, K. Nadaud, and D. Alquier. Scientific Reports **7**, 15187 (2017). https://doi.org/10.1038/s41598-017-15447-w
[7] S. Kurbanov, G. Panin, T.W. Kim, and T.W. Kang. Japanese Journal of Applied Physics **46**, No.7A, 4172- 4174 (2007). http://dx.doi.org/10.1143/JJAP.46.4172
[8] J. Qiu, X. Li, W. He, S.-J. Park, H.-K. Kim, Y.-H. Hwang, J.-H. Lee, Y.-D. Kim. Nanotechnology **20**, No.15, 155603 (2009). https://doi.org/10.1088/0957-4484/20/15/155603
[9] K.H. Tam, C.K. Cheung, Y.H. Leung, A.B. Djurišić, C.C. Ling, C.D. Beling, S. Fung, W.M. Kwok, W.K. Chan, D.L. Phillips, L. Ding, W.K. Ge. J. Phys. Chem. B **110**, No.42, 20865-71 (2006). https://doi.org/10.1021/jp063239w
[10] S.S. Kurbanov, H.C. Jeon, Z.Sh. Shaymardanov, R.Y. Rakhimov, T.W. Kang. Journal of Luminescence **170**, 168-173 (2016). http://dx.doi.org/10.1016/j.jlumin.2015.10.063
[11] A. Janotti, C.G. Van de Walle. Physical Review B **76**, 165202 (2007). https://doi.org/10.1103/PhysRevB.76.165202
[12] P.S. Xu, Y.M. Sun, C.S. Shi, F.Q. Xu, H.B. Pan. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B **199**, 286-290 (2003).https://doi.org/10.1016/S0168-583X(02)01425-8
[13] Y.J. Lin, C.L. Tsai, Y.M. Lu, and C.J. Liu. Journal of Applied Physics **99**, 093501 (2006). https://doi.org/10.1063/1.2193649
[14] K. Vanheusden, C.H. Seager, W.L. Warren, D.R. Tallant, and J.A. Voigt. Applied Physics Letters **68**, 403-405 (1996). https://doi.org/10.1063/1.116699
[15] F.H. Leiter, H.R. Alves, A. Hofstaetter, D.M. Hofmann, B.K. Meyer. Phys. Stat. Sol. (b) **226**, No.1, R4-R5 (2001). http://dx.doi.org/10.1002/1521-3951(200107)226:1%3cR4::AID-PSSB99994%3e3.0.CO;2-F

## Сувли эритмаларда синтез қилинган рух оксиди наноструктураларининг фотолюминесценция хоссаларига қиздириш ҳароратининг таъсири

**З.Ш. Шаймарданов[1,2], Ш.З. Уролов[1,3], Р.Р. Жалолов[1,2], Б.Н. Рустамова[1], Д.О. Набиев[3]**

[1]Ион-плазма ва лазер технологиялари институти, ЎзР ФА, Дўрмон йўли кўч., 33, 100125, Тошкент, Ўзбекистон
[2]Ўзбекистон Миллий Университети, Университет кўчаси 4, 100174, Тошкент, Ўзбекистон
[3]Тошкент ирригация ва қишлоқ хўжалигини механизациялаш муҳандислари институти, Қори Нийозий кўч., 39, 100000, Тошкент, Ўзбекистон

Ушбу ишда паст ҳароратда сувли эритмаларда синтез қилинган рух оксиди нано структураларининг фотолюминесценция хоссаларига қиздириш ҳарора-тининг таъсири тадқиқ қилинган. Кимёвий чўктириш усулида синтез қилинган ZnO нанокристаллари 200°C да 1 соат давомида қиздирилганда, уларнинг кристалл структурасидаги дефектлар концентрацияси минимал бўлади. Нанокристалларга ~200°C дан юқори ҳароратларда термоишлов берилганда эса уларнинг кристалл структурасида янги турдаги кристаллографик дефектлар пайдо бўлади. Гидротермал усулда синтез қилинган ZnO нанородларига термоишлов бериш ҳароратининг ортиб бориши билан уларнинг кристалллик сифати ортиб боради ва ~650°C да ~1 соат давомида қиздирилганда уларнинг кристаллик даражаси мукаммал бўлади.

**Калит сўзлар:** ZnO нанородлари, ZnO нанокристаллари, фотолюминесценция, нуқсонлар.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.