

УДК 548.5 : 548.535

А. Н. МУРАШКЕВИЧ

**ФОРМИРОВАНИЕ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ
ОКСИДА ЦИНКА ИЗ РАСТВОРОВ***Белорусский государственный технологический университет**(Поступила в редакцию 09.06.2020)*

Синтезирован высокодисперсный оксид цинка, имеющий структуру цинкита, осаждением из растворов нитрата цинка и микроволновым методом с использованием гидротермальной обработки гидроксида цинка, образующегося на первой стадии. Показано, что наиболее технологичным по выходу целевого продукта и продолжительности процесса при сохранении высокой дисперсности продукта ($S_{y0} = 20-50 \text{ м}^2/\text{г}$) является микроволновый метод. С использованием индикаторного метода по адсорбции красителей различного типа из водных растворов установлено, что на поверхности исследуемых образцов преобладают кислотные ($pK = 1,3$), слабосекислотные ($pK = 4,1$) и основные центры Бренстеда ($pK > 7$).

Введение. Оксид цинка – широкозонный полупроводник, обладающий уникальными электрофизическими и оптическими свойствами и относящийся к группе прозрачных проводящих оксидов [1–2]. Материалы на основе оксида цинка могут быть использованы как оптоэлектронные преобразователи, люминесцентные материалы, прозрачные электроды, чувствительные слои газовых и биологических сенсоров, детекторы рентгеновского и гамма-излучений, элементы интегральных устройств [3–4]. Оксид цинка характеризуется высокой чувствительностью электрофизических свойств поверхности к изменению состояния окружающей среды, при этом проявляет стабильность на воздухе, в водных и органических средах. Низкая проводимость не допированного оксида цинка затрудняет его применение в качестве прозрачных электродов и химических сенсоров, приводит к необходимости понижения сопротивления функционального материала, что достигается введением в оксид цинка донорных примесей Ga^{3+} и In^{3+} , которые наиболее часто используются на практике. Значительное внимание уделяется также допированному нанокристаллическому оксиду цинка в связи с возможностью создания миниатюрных газовых сенсоров [5–8].

Нанокристаллы оксида цинка имеют различную морфологию и демонстрируют значительную антибактериальную активность по широкому спектру бактериальных видов, исследованных во многих работах [9–13]. ZnO проявляет значительную антимикробную активность при уменьшении размера частиц до на-

нометрового диапазона. Наноразмерный оксид цинка может взаимодействовать с поверхностью бактерий и/или с ядром бактерии, где он входит внутрь клетки, а затем проявляет различные бактерицидные механизмы [14]. На этом основано использование оксида цинка в качестве компонента лекарственных препаратов, антисептических средств. В виде объемного порошка оксид цинка рассматривают как более дешевую альтернативу оксиду титана при использовании в качестве фотокатализатора [15–17]. Оксид цинка известен как промышленный катализатор синтеза метанола, нанодисперсный оксид цинка оказался эффективным катализатором мультикомпонентного синтеза соединений, широко используемых в косметической и агрохимической областях, в реакциях синтеза бипиридинов, реакции Фриделя–Крафтса. При этом оксид цинка обладает всеми преимуществами гетерогенного катализатора в отличие от традиционных кислот Льюиса. Использование коммерчески доступного оксида цинка позволило разработать методику получения как алифатических, так и ароматических замещенных формаамидов из аминов с выходами 65–99 %. Эффективным оказалось использование оксида цинка и в синтезе пропаргиламинов, причем активность оксида цинка как катализатора связана с наличием как кислотных, так и основных центров поверхности, в синтезе дигидропиридинов [18].

Существует множество методов получения наночастиц ZnO различной формы, среди которых жидкофазные методы представляют наибольший интерес из-за простоты технической реализации, низкой энергозатратности и относительной гибкости выбора как исходных компонентов, так и способов проведения синтеза [19–22].

Гидротермальная обработка является одним из наиболее перспективных методов получения микро- и нанокристаллических оксидных материалов [23] вследствие возможности направленного изменения морфологии получаемых дисперсных порошков за счет варьирования температурного режима, продолжительности синтеза, а также концентрации и кислотности (pH) обрабатываемых растворов и давления в системе [24–27]. В [28–30] показано, что условия осаждения гидроксида цинка и его последующей гидротермальной обработки (скорость нагрева, температура и продолжительность синтеза) оказывают существенное влияние на морфологию получаемых порошков оксида цинка, в первую очередь, вследствие изменения соотношения скоростей образования и роста зародышей оксида цинка. Показано, что гидротермально-микроволновая обработка является перспективным методом синтеза высокодисперсных порошков ZnO с узким распределением частиц по размерам. Показано, что порошки ZnO, полученные в ходе гидротермальной обработки (ГТО) суспензий гидроксида цинка с различной химической предисторией, характеризуются разной дефектностью и существенно различающейся фотокаталитической активностью [31].

Одним из возможных методов управления морфологией частиц нанокристаллического оксида цинка является использование темплат и структурообразовате-

лей. Так, в [20; 32] показана возможность получения оксида цинка в виде полых и сплошных наностержней из растворов нитрата цинка с использованием в качестве осадителя гексаметилентетрамина. Помимо температуры среды в процессе осаждения на размер и форму наночастиц ZnO оказывают влияние: продолжительность термостатирования, концентрация исходных веществ, тип прекурсора, pH среды. При изменении условий можно получать наночастицы оксида цинка в форме сфер, стержней и цветков с размерами 100–200 нм. В [33] для получения стержнеобразных наночастиц оксида цинка использовали растворы гексагидрата янтарнокислого натрия и гидрата гидразина. Получены стержни и кластеры с типичной шириной около 300 нм, имеющие гексагональную структуру. Морфологию цветка частиц оксида цинка (диаметр 200–300 нм, длина – 2–3 мкм) удалость получить авторам работ [34; 35] путем гидротермальной обработки гидроксида цинка при 100–200 °С в течение 21 ч с введением темплата – цетилтриметиламмония бромида (ЦТАБ).

Несмотря на многочисленность работ по синтезу и исследованию высокодисперсного оксида цинка, в большинстве публикаций отсутствуют количественные характеристики по выходу целевого продукта. Ограничены также сведения о кислотно-основных свойствах поверхности, что чрезвычайно важно при использовании оксида цинка в гетерогенном катализе.

В связи с этим целью настоящей работы являлось установление закономерностей формирования порошков оксида цинка из растворов нитрата цинка с максимальной дисперсностью, исследование их структурно-фазового состояния, кислотно-основных свойств.

Материалы и методы исследования. *Гидротермальный метод (ГТО).* К водному 0,43 М раствору гидроксида натрия по каплям добавляли 0,45 М раствора нитрата цинка. Раствор гидроксида натрия брали в 1–10-кратном мольном избытке от стехиометрии. Образующуюся суспензию перемешивали. Сформированный осадок гидроксида цинка выдерживали в маточном растворе в течение суток, после чего фильтровали и промывали дистиллированной водой. Полученный осадок в автоклаве нагревали до температур 125–135 °С со скоростью 5 град/мин при степени заполнения автоклава 90–95 %, после чего выдерживали в течение 1 ч и быстро охлаждали до комнатной температуры. Образец сушили при температурах 60–120 °С в течение 1–4 ч.

Осаждение гидроксида цинка в присутствии гидрата гидразина. В раствор нитрата цинка при постоянном перемешивании добавляли $N_2H_4 \cdot H_2O$ при мольном соотношении $N_2H_4 \cdot H_2O : Zn(NO_3)_2 = 4-51 : 1$, полученный осадок перемешивали в течение 30 мин. Температуру сушки варьировали в интервале 60–120 °С, продолжительность 1–11 ч. В некоторых синтезах осадок подвергали ГТО при $T = 120-180$ °С и продолжительности 1–14,4 ч.

Микроволновой синтез в присутствии сахарозы. В раствор нитрата цинка добавляли сахарозу при мольном соотношении сахароза : $Zn(NO_3)_2 = 1 : 1,8-3,6$,

полученный раствор был обработан в микроволновой печи при разных по мощности режимах. Далее проводили дополнительную термическую обработку для удаления продуктов термической деструкции сахарозы.

Синтез оксида цинка в присутствии ЦТАБ. К раствору нитрата цинка добавляли ЦТАБ и 2 М раствор NaOH при молярном отношении $\text{NaOH} : \text{Zn}(\text{NO}_3)_2 : \text{ЦТАБ} = 20 : 2 : 1$, полученную суспензию загружали в автоклав и выдерживали при 100°C в течение 3 ч. Полученный продукт отделяли от маточного раствора на центрифуге, промывали дистиллированной водой и этанолом. Затем сушили при 60°C в течение 3 ч.

Удельную поверхность ($S_{\text{уд}}$) измеряли адсорбционным методом, используя в качестве адсорбата фенол (в виде раствора в *n*-гептане). Исследование морфологии и элементного состава частиц оксида цинка проводили на растровом электронном микроскопе марки Chitachi РЭМ 5–4800 при ускоряющем напряжении 5 кВ. Рентгенофазовый анализ (РФА) выполнен на дифрактометре ДРОН-3 (излучение Cu-K_α , Ni-фильтр) при комнатной температуре в диапазоне углов $2\Theta = 11\text{--}70$ со скоростью 2 град/мин. Размер кристаллитов оценивали по уравнению Шеррера.

Исследование кислотно-основных свойств поверхности синтезированных образцов проводили индикаторным методом по адсорбции красителей различного типа из водных растворов. Поскольку протонодонорная способность OH групп различных типов на поверхности одного и того же материала неодинакова, была использована серия из 9 индикаторов с различными значениями рК (1,3–9,6), каждый из которых позволяет фрагментарно оценить содержание реакционных групп на поверхности в довольно узком интервале кислотности. Изучение спектральных характеристик индикаторов, а также количественное определение красителя проводили спектрофотометрическим методом на спектрофотометрах «КФК-3» или Metertech SP 8001 при толщине кюветы 1 см. Сорбцию проводили из 10^{-4} М растворов индикаторов. Точную навеску высушенного образца около 0,02 г (выбранную исходя из минимальной ошибки при количественных определениях и технических возможностей прибора) помещали в пробирку, приливали 5 мл раствора красителя и перемешивали в течение 2 ч для установления адсорбционного равновесия. Значение оптической плотности измеряли при длине волны λ , соответствующей максимуму поглощения индикатора. Разделение образца и раствора красителя проводили на центрифуге. Концентрацию кислотно-основных центров рассчитывали в мкмоль/г.

Использованные индикаторы позволяют установить наличие в исследованных образцах кислотных и основных центров Бренстеда умеренной силы и слабых кислотных.

Результаты и их обсуждение. В табл. 1 приведены условия получения оксида цинка через стадию осаждения гидроксида цинка гидроксидом натрия, удельная поверхность и выход продукта по сравнению с теоретическим.

Таблица 1. Свойства оксида цинка, полученного осаждением из раствора $Zn(NO_3)_2$ гидроксидом натрия

№ образца	$nNaOH : nZn(NO_3)_2$	Температура, °С и продолжительность (ч)		$S, м^2/г$	Выход, %
		ГТО	сушки		
1	10 : 1	135 (1,5)	120 (1)	9	46
2			120 (1)	12	64
3			125 (1)	45	68
4	2 : 1	125 (1)	120 (11,3)	46	40
5			60 (4)	59	48
6			60 (4)	58	60
7*	4 : 1		60 (4)	25	64
8**	4 : 1		120 (2)	40	65

Примечание: * – синтез в присутствии *D*-винной кислоты; ** – синтез в присутствии *L*-пролина.

Согласно данным табл. 1 $S_{уд}$ синтезируемых порошков оксида цинка существенно зависит от мольного соотношения исходных компонентов. При уменьшении количества гидроксида натрия в растворе и прочих равных или близких условиях значения $S_{уд}$ возрастают от 9–12 до 45–59 $м^2/г$. В синтезах 7, 8 табл. 1 в автоклав добавляли *D*-винную кислоту и *L*-пролин для формирования отпечатка на поверхности частиц оксида цинка. Последовательность превращений в данном случае состояла в образовании на первой стадии гидроксида цинка, который затем при гидротермальной обработке кристаллизовался и превращался в оксид цинка.

Заметное уменьшение $S_{уд}$ оксида цинка в синтезе 7 может быть связано с негативным влиянием *D*-винной кислоты на процессы кристаллизации и последующей дегидратации гидроксида цинка. В целом выход продукта в данном методе невысок из-за растворимости гидроксида цинка в растворе NaOH.

Согласно данным табл. 2 замена гидроксида натрия на гидрат гиразина позволила увеличить выход продукта до 70–96 % при некотором снижении дисперсности образцов. ГТО образцов не выявила какие-либо преимущества по выходу продукта и его дисперсности. Последовательность превращений в данном случае аналогична вышеописанному методу с использованием гидроксида натрия.

Таблица 2. Свойства оксида цинка, полученного осаждением гидразином из раствора $Zn(NO_3)_2$

№ образца	Мольное соотношение $N_2H_4 \cdot H_2O : Zn(NO_3)_2$	Температура, °С и продолжительность (в ч)		$S, м^2/г$	Выход, %
		ГТО	сушки		
1	51 : 1	180 (14,4)	100 (7,6)	11	70
2	4 : 1*	–	120 (7,6)	52	75
3а	4 : 1	–	120 (11)	22	81
3б			60 (11)	24	89

Окончание табл. 2

№ образца	Мольное соотношение $N_2H_4 \cdot H_2O : Zn(NO_3)_2$	Температура, °С и продолжительность (в ч)		S, м ² /г	Выход, %
		ГТО	сушки		
4а	4 : 1*	120 (1)	60 (1,6)	15	89
4б			60 (1)	23	73
5а	4 : 1*	125 (1)	100 (10)	31	96
5б			100 (3)	23	72

Примечание: * – полученная суспензия перемешивалась в течение 30 мин.

Результаты, приведенные в табл. 3, свидетельствуют о благотворном влиянии не только присутствия ЦТАБ, но и уменьшения количества твердой фазы на стадии ГТО на величину удельной поверхности оксида цинка.

Таблица 3. Свойства оксида цинка, полученного осаждением из раствора $Zn(NO_3)_2$ с введением темплата

№ образца	Мольное соотношение $NaOH : Zn(NO_3)_2 : ЦТАБ$	Температура, °С и продолжительность (в ч)		S, м ² /г	Выход, %
		ГТО	сушки		
1	20 : 2 : 1 Т : Ж = 1,2 : 98,8*	100 (3)	60 (3)	78	56
2	20 : 2 : 1 Т : Ж = 7,5 : 92,5*		60 (3)	59	57
3			100 (2)	52	82
4			100 (2)	37	78
			500 (3)	11	
5			60 (3)	32	65
6		60 (3)	46	59	

Примечание: * – отношение твердой и жидкой фаз в автоклаве.

На удельную поверхность образцов, полученных микроволновым методом, существенное влияние оказывают мольное соотношение исходных компонентов, мощность СВЧ-обработки, температура обработки на заключительной стадии (табл. 4).

Таблица 4. Свойства оксида цинка, полученного микроволновым методом

№ образца	сахароза : $nZn(NO_3)_2$	Условия обработки		S, м ² /г	Выход, %
		Мощность СВЧ, Вт	Температура, °С		
1	1 : 1,8	P-810 (0,12)*	600 (1,5)	56	74
2		P-720 (0,6)	600 (1,5)	16	93
3		P-630 (0,13)	600(1,5)	17	60
4		P-720 (0,13)	600(1,5)	16	93
5а		P-810 (0,08)	600 (0,5)	12	
5б		300 (0,5) 400 (0,5)	143**	93	
6	1 : 2,7	P-630 (0,13)	600(1,5)	25	93

Окончание табл. 4

№ образца	сахароза : $n\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$	Условия обработки		S, м ² /г	Выход, %
		Мощность СВЧ, Вт	Температура, °С		
7	1 : 3,6	P-630 (0,6)	600 (1,6)	45	89
8		P-630 (0,6); P-810 (0,35)	300 (0,5); 400(0,5)	46	83
9		P-630 (0,6); P-810 (0,35)	300 (0,5); 400(0,5)	46	88
10		P-630 (0,13)	500 (1); 600(0,5)	28	92
11		P-720 (0,13)	500 (1); 600(0,5)	17	90
12		P-810 (0,6; 0,35)	500 (0,5); 600 (0,5)	12	93

Примечания: * – в скобках указана продолжительность обработки в ч; ** – образец был черным из-за наличия продуктов деструкции сахарозы.

Данный метод характеризуется высоким выходом целевого продукта (74–93 %) и заметно меньшей продолжительностью процесса синтеза, включая стадии СВЧ обработки и последующего дополнительного прогрева образцов при температурах 300–600 °С.

Согласно данным рентгенофазового и элементного анализов, образцы оксида цинка, полученные осаждением из растворов и микроволновым методом, представляют стехиометрический оксид цинка, имеющий структуру цинкита. С использованием полученных рентгенограмм рассчитаны размеры кристаллитов синтезируемых порошков оксида цинка (рис. 1).

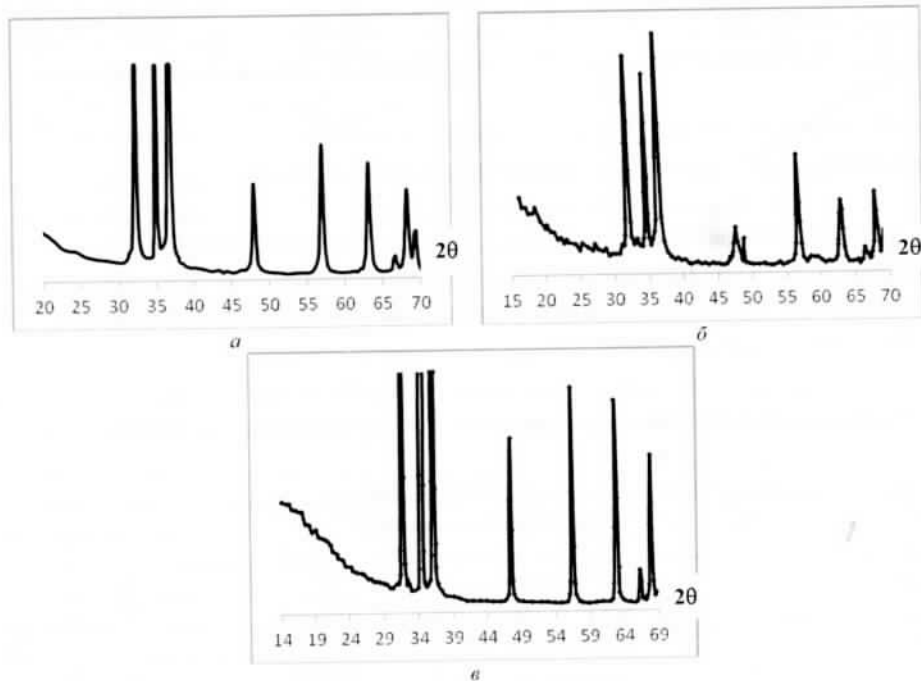


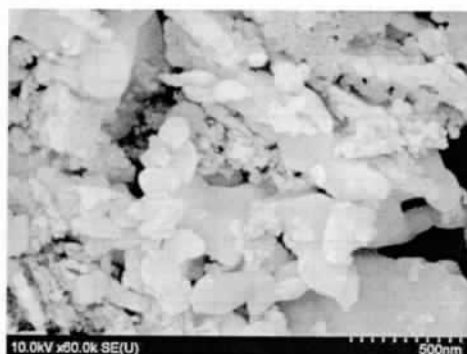
Рис. 1. Рентгенограммы образцов оксида цинка: а) 6 табл. 1; б) 5 табл. 2; в) 8 табл. 4

Более высокие значения размеров кристаллитов, полученные по данным адсорбционных измерений, свидетельствуют о некоторой степени агрегированности образцов (табл. 5).

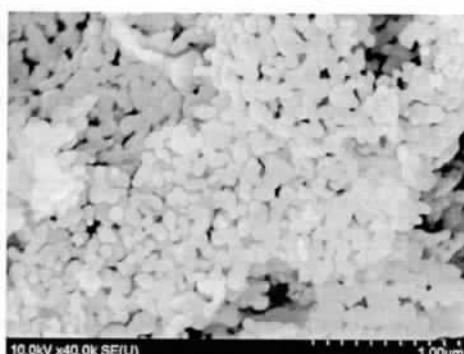
Т а б л и ц а 5. Параметры микроструктуры порошков ZnO

Образец	Условия обработки $T, ^\circ\text{C}$; продолжительность (τ)	Размер кристаллитов, нм		$S, \text{ м}^2/\text{г}$
		по РФА	по $S_{\text{вз}}$	
ZnO (6, табл. 1)	ГТО 125 (1); сушка – 60 (2)	17	46	23
ZnO (5а, табл. 2)	Сушка 100 (10)	22	34	31
ZnO (5б, табл. 2)	ГТО 125 (1); сушка – 100 (3ч)	15	46	23
ZnO (3б, табл. 2)	Сушка – 60 (11)	24	44	24
ZnO (8, табл. 4)	300 (0,5) 400 (0,5)	–	23	46

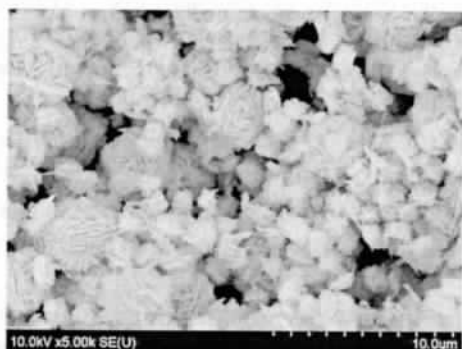
Согласно данным рис. 2, *а* оксид цинка, полученный микроволновым методом в присутствии сахарозы, характеризуется высокой степенью полидисперсности. Размер кристаллитов изменяется в интервале 50–250 нм. Образец оксида



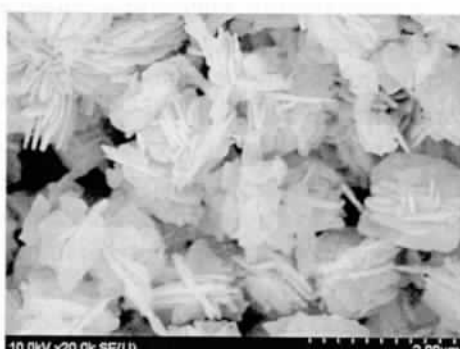
а



б



в



г

Рис. 2. Микрофотографии образцов ZnO: *а* – 9, табл. 4; *б* – 5б, табл. 4; *в*, *г* – 3, табл. 3

цинка 5б (табл. 4), в котором было более высокое исходное количество сахарозы, после прокалики при 300–400 °С имел заметно более высокую дисперсность ($S_{уд} = 143 \text{ м}^2/\text{г}$), однако в нем присутствовали продукты термической деструкции сахарозы. После дополнительной прокалики при 600 °С в течение 1 ч, как это видно на рис. 2, б, размер кристаллитов стал более однородным и равным 50–70 нм. Образец оксида цинка, синтезированный в присутствии ЦТАБ, рис. 2, в, характеризуется набором скоплений кристаллитов с размерами 2,0–2,5 мкм, кристаллиты имеют преимущественно плоскую форму толщиной 45–50 нм (рис. 2, г).

В табл. 6 представлены результаты исследования кислотно-основных свойств двух образцов оксида цинка, отличающихся температурой обработки на заключительной стадии синтеза.

Т а б л и ц а 6. Кислотно-основные свойства оксида цинка, полученного в присутствии ЦТАБ

№ опыта	Название индикатора	Формула	pK	λ , нм	C, мкмоль/г	
					60 °С	500 °С
1	Бриллиантовый зеленый	$C_{27}H_{34}O_4N_3S$	1,3	630	13,40	10,30
2	Фуксин основной	$C_{20}H_{20}N_3Cl \cdot 4H_2O$	2,1	555	0,54	0,58
3	Метиловый оранжевый	$C_{14}H_{14}N_4O_3SNa$	3,46	477	1,82	1,04
4	Бромфеноловый синий	$C_{19}H_{10}Br_4O_5S$	4,1	439	14,50	16,50
5	Метиловый красный водорастворимый	$C_{15}H_{14}O_2N_3Na$	5,0	430	2,44	1,95
6	Бромкрезоловый пурпурный	$C_{21}H_{15}O_5Br_2SNa$	6,4	431	10,90	12,60
7	Бромтимоловый синий	$C_{27}H_{28}Br_2O_5S$	7,3	431	12,50	11,10
8	Феноловый красный	$C_{19}H_{14}O_5S$	8,0	431	4,99	5,50
9	Фенолфталеин	$C_{20}H_{14}O_4$	9,6	553	2,20	3,94
Итого					63,29	63,51

Согласно данным табл. 6 исследованные образцы имеют близкие значения общей концентрации кислотно-основных центров (в исследованном интервале pK) и характеризуются определенной аналогией в характере распределения их по природе кислотно-основных центров, что вполне ожидаемо с учетом высокой степени кристалличности образцов.

Заключение. Таким образом, найдены условия получения оксида цинка, имеющего структуру цинкита, с развитой удельной поверхностью (50–70 м²/г) и развитым гидратно-гидроксильным покровом. По технологическим показателям – выходу целевого продукта и продолжительности – предпочтителен микроволновой метод синтеза.

Автор выражает благодарность сотруднице ОАО «Минский НИИ радиоматериалов» А. И. Кудрявцевой за помощь при выполнении синтеза и исследований образцов оксида цинка.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № X18P-032).

Литература

1. *Ellmer K.* // Handbook of transparent conductors / eds by D. S. Ginley, H. Hosono, D. C. Paine. New York: Springer, 2010. P. 193–263.
2. *Özgül Ü., Alivov Ya. I., Liu C.* et al. // J. Appl. Phys. 2005. Vol. 98. P. 041301 (103 p.).
3. *Ан В. В.* Закономерности получения наноструктурных оксидов и халькогенидов металлов (Cu, Zn, Sn, Mo, W) и материалы на их основе для триботехники и фотовольтаики: дис. ... д-ра хим. наук. Томск, 2019. – 303 с.
4. *Minami T., Tsukada S., Minamino Y., Miyata T.* // Journal Vacuum Science of Technology. 2005. N 23. P. 1128–1133.
5. *Воробьева Н. А.* Нанокристаллический ZnO(M) (M = Ga, In) для газовых сенсоров и прозрачных электродов: дис. ... канд. хим. наук. М., 2015. – 180 с.
6. *Liu Y., Li Y., Zeng H.* // Journal of Nanomaterials. 2013. Vol. 2013. P. 1–9.
7. *Schmidt-Mende L., MacManus-Dricoll J.* // Materials Today. 2007. Vol. 10, N 5. P. 40–48.
8. *Xu Sheng, Wang Zhong Lin* // Nano Res. 2011. N 4(11). P. 1013–1098.
9. *Pasquet J.* et al. // Int. J. Pharm. 2014. Vol. 460, N 1. P. 92–100.
10. *Raghupathi K. R., Koodali R. T., Manna A. S.* // Langmuir. 2011. Vol. 27, N 7. P. 4020–4028.
11. *Brayner R., Ferrari-Iliou R., Brivois N.* et al. // Nano Lett. 2006. Vol. 6, N 4. P. 866–870.
12. *Jalal R., Goharshadi E.K., Abareshi M., Moosavi M.* // Mater. Chem. Phys. 2010. Vol. 121, N 1–2. P. 198–201.
13. *Jones N., Ray B., Ranjit K. T., Manna A. C.* // FEMS Microbiol Lett. 2008. Vol. 279, N 1. P. 71–76.
14. *Padmavathy N., Vijayaraghavan R.* // Sci. Technol. Adv. Mater. 2008. Vol. 9, N 3. P. 035004–035012.
15. *Sakthivel S., Neppolian B., Shankar M. V.* et al. // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2003. Vol. 77. P. 65–72.
16. *Lizama C., Freer J., Baerza J.* et al. // Catalysis Today. 2002. Vol. 76. P. 235–245.
17. *Akyol A., Yatmaz H. C., Bayramoglu M.* // Appl. Catalysis B: Envir. 2004. Vol. 54. P. 19–25.
18. *Титова Ю. А., Федорова О. В., Русинов Г. Л., Чарушин В. Н.* // Успехи химии. 2015. Т. 84, № 12. С. 1294–1315.
19. *Цзан С., Авдеева А. В., Мурадова А. Г., Юртов Е. В.* // Химическая технология. 2014. Т. 15. Вып. 12. С. 715–722.
20. *Авдеева А. В., Цзан С., Мурадова А. Г., Юртов Е. В.* // Известия вузов. Электроника. 2016. Т. 21, № 2. С. 152–156.
21. *Segovia M., Sotomayor C., Gonza Lez G., Benavente E.* // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2012. Vol. 555. P. 40–50.
22. *Khusaimi Z., Amizam S., Matat M. H.* et al. // Synthesis and Reactivity in Inorganic, Metal-Organic, and Nano-Metal Chemistry. 2010. Vol. 40. P. 190–194.
23. *Byrappa K., Yoshimura M.* Handbook of Hydrothermal Technology. Technology for Crystal Growth and Materials Processing. N. Y.: William Andrew Publishing, 2000. – 870 p.
24. *Lu C. H., Yeh C. H.* // Ceram. Int. 2000. Vol. 26. P. 351–358.
25. *Cheng H. M., Wu L. J., Ma J. M.* et al. // J. Europ. Ceram. Soc. 1999. Vol. 19. P. 1675–1681.
26. *Бурухин А. А., Чурагулов Б. Р., Олейников Н. Н., Мескин П. Е.* // Журн. неорган. химии. 2001. Т. 46, № 5. С. 2698–2702.
27. *Denkewicz R., Tenhuisen K., Adair J.* // J. Mater. Res. 1990. Vol. 5. P. 2698–2705.
28. *Шарилов Ф. Ю., Шапоров А. С., Иванов В. К.* и др. // Журн. неорган. химии. 2005. Т. 50, № 12. С. 1947–1953.
29. *Шапоров А. С., Иванов В. К., Баранчиков А. Е., Третьяков Ю. Д.* // Журн. неорган. химии. 2006. Т. 51, № 10. С. 1621–1625.
30. *Шапоров А. С., Иванов В. К., Баранчиков А. Е., Третьяков Ю. Д.* // Неорган. материалы. 2007. Т. 43, № 1. С. 38–43.
31. *Шапоров А. С., Иванов В. К., Баранчиков А. Е.* и др. // Журн. неорган. химии. 2007. Т. 52, № 12. С. 1925–1931.

32. Vernardoua D., Kenanakisa G., Courise S. et al. // Journal of Crystal Growth. 2007. Vol. 308. P. 105–109.
33. Liu C., Li H., Jie W. et al. // Materials Letters. 2006. Vol. 60. P. 1394–1398.
34. Kale R. B., Hsu Yung-Jung, Lin Yi-Feng, Lu Shih-Yuan // Solid State Communications. 2007. Vol. 142. P. 302–305.
35. Geetha D., Thilagavathi T. // D. J. of Nanomat. and Biostr. 2010. Vol. 5, N 1. P. 297–301.

A. N. MURASHKEVICH

FORMATION OF HIGHLY DISPERSED ZINC OXIDE POWDERS FROM SOLUTIONS

Summary

A highly dispersed zinc oxide having a zincite structure was synthesized by precipitation from zinc nitrate solutions and the microwave method using hydrothermal treatment (HTT) of zinc hydroxide formed in the first stage. It is shown that the microwave method is the most technologically advanced in the yield of the target product and the duration of the process while maintaining a high dispersion of the product ($S_{sp} = 20\text{--}50 \text{ m}^2/\text{g}$). Using the indicator method for the adsorption of various types of dyes from aqueous solutions, it was found that on the surface of the studied samples prevail acid ($pK = 1.3$), weakly acid ($pK = 4.1$) and basic Bronsted centers ($pK > 7$).