

Получение оксида и пероксида цинка электроискровым диспергированием цинковых гранул

А. И. Галанов, Г. Л. Лобанова, С. П. Журавков, Ф. Е. Сапрыкин,
Я. И. Корнев, Н. А. Яворовский

Установлено, что при электроискровом диспергировании цинковых гранул в жидких средах образование наноразмерных ZnO_2 и ZnO происходит через формирование первичной пористой структуры композиционных частиц Zn/ZnO . В водной среде образуются агрегаты наностержней оксида цинка. Для водо-воздушной среды диспергирования характерно формирование индивидуальных наностержней оксида цинка. Установлено, что при использовании раствора пероксида водорода образуются стабильные агрегаты наночастиц ZnO_2 , при их прогреве происходит формирование оксида цинка с сохранением морфологического строения исходного пероксида цинка.

Ключевые слова: оксид цинка, пероксид цинка, пероксид водорода, электроискровая эрозия, наночастицы.

It has been found that during electric spark erosion of zinc pellets in liquid media, formation of nanosized ZnO_2 and ZnO occurs through the formation of primary porous structure of composite Zn/ZnO particles. In aqueous phase aggregates of zinc oxide nanorods are formed. In water-air dispersion medium individual nanorods of zinc oxide are formed. It has been found that the use of hydrogen peroxide results in the formation of stable aggregates of ZnO_2 nanoparticles. Heating of ZnO_2 nanoparticle aggregates results in the formation of zinc oxide, the morphological structure of initial zinc peroxide is preserved.

Keywords: zinc oxide, zinc peroxide, hydrogen peroxide, electric spark erosion, nanoparticle.

Введение

Получение пероксида и оксида цинка — одно из важнейших направлений современной технологии материалов. Это обусловлено их востребованностью химической и электронной промышленностями. Пероксид цинка широко применяется в процессах производства резины [1, 2], высокотехнологичных процессах синтеза пластмасс [3, 4], в качестве окисляющего агента в различных пиротехнических составах [5]. Кроме того, в [6 – 8] пероксид цинка использовали в качестве прекурсора при синтезе наноразмерных частиц оксида цинка. Наноразмерный оксид цинка в силу своих свойств широко используется в полупроводниковых, оптических и фотокаталитических приборах и устройствах [6, 7].

Для получения ZnO_2 используют методы синтеза, основанные на взаимодействии соединений цинка (соли, оксиды и гидроксиды) с растворами пероксида

водорода [9]. Кроме того, в ряде работ предложены методы получения ZnO_2 на основе гидротермального синтеза [10], лазерной абляции металлического цинка в растворах пероксида водорода [8], фотохимического синтеза [11]. Для синтеза наноразмерных структур оксида цинка также используются методы золь-гель технологии, а также различных физико-химические процессы [6, 7, 11]. В [12 – 14] была показана возможность получения наноразмерных частиц оксида цинка с использованием электроимпульсного диспергирования металлического цинка в водных и газовых средах.

В целом, использование электроразрядных технологий представляется перспективным, так как позволяет получать наноразмерные частицы с высокой производительностью, низкими энергозатратами, значительно упрощает технологию производства и управления свойствами целевого продукта. Однако систематических исследований по исполь-

зованию электроискрового диспергирования металлического цинка для получения оксида и пероксида цинка в различных средах не проводилось.

Цель данной работы — получение ZnO и ZnO₂ с использованием электроискрового диспергирования металлических гранул в воде, водо-воздушной среде, а также в водных растворах пероксида водорода.

Объекты и методы исследований

Методы получения образцов пероксида и оксида цинка

Данная работа является продолжением цикла исследований по использованию электроимпульсного диспергирования проводящих гранул в жидких средах для получения функциональных неорганических материалов [15–17]. При получении образцов ZnO и ZnO₂ была использована лабораторная установка, конструкция и электрофизические параметры которой подробно описаны в [15, 16]. В качестве проводящей загрузки использовали сферические гранулы цинка марки х.ч. диаметром 6–8 мм. Исходная масса цинковых гранул составляла 200 г. Электроискровое диспергирование цинка проводили при одинаковых электрофизических характеристиках: длительность импульса — 15 мкс, амплитуда напряжения импульсов — 500–600 В, частота следования импульсов — 400 с⁻¹, энергия импульса — 0,5–0,6 Дж. Объем дисперсионной жидкости — 0,5 л. Продукт диспергирования — суспензия твердой фазы в дисперсионной жидкости. При получении образцов оксида цинка и пероксида цинка были использованы 4 метода получения суспензии.

Метод I. Электроискровое диспергирование проводили в дистиллированной воде. Время наработки суспензии — 5 мин. При этом температуру дисперсионной среды поднимали от 20 до 40°C. Продукт диспергирования — суспензия серого цвета, которую в дальнейшем доокисляли в среде диспергирования при температуре 40°C в течение 3 суток.

Метод II. Получение суспензии осуществляли в дистиллированной воде с одновременной подачей воздуха через слой цинковых гранул. После окончания электроискрового диспергирования проводили дополнительную обработку суспензии аэрацией в течение 10 ч при 40°C.

Метод III. Проводили накопление частиц твердой фазы в суспензии по методу I. После окончания процесса в полученную суспензию добавляли пероксид водорода из расчета 3 % от массы дисперсионной среды. В дальнейшем полученную суспензию, содержащую H₂O₂, термостатировали при 40°C 5 ч.

Метод IV. Диспергирование проводили в 3 % растворе пероксида водорода в течение 5 мин, без какой-либо дополнительной обработки полученной суспензии.

Из полученных суспензий центрифугированием со скоростью 8000 об./мин в течение 30 мин извлекали частицы твердой фазы. Для суспензии, полученной по методу IV, этот процесс проводили непосредственно после наработки, без дополнительного доокисления. Все образцы твердой фазы сушили при 60°C. Методы III и IV были использованы для получения пероксида цинка, методы I и II — оксида цинка. Кроме того, были получены образцы оксида цинка, III(ZnO) и IV(ZnO), при термическом разложении ZnO₂, синтезированного, соответственно, методами III и IV.

Методы исследований

Фазовый состав твердой фазы оценивали методом рентгенофазового анализа (РФА) на дифрактометре Shimadzu XRD-7000 с CuK_α-излучением (Наносервис Томского политехнического университета). Из полученных дифрактограмм определяли качественный и количественный состав (ω, об.%), а также размеры областей когерентного рассеивания (D_{ОКР}), внутренних упругих напряжений (Δd/d) с использованием баз данных PCPDFWIN, а также программы полнопрофильного анализа POWDER CELL 2.4. Морфология и распределение частиц по размерам были изучены методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) с использованием электронного микроскопа JEM-100CXII. По данным термogravиметрических (ТГ) исследований была определена температура разложения ZnO₂ (совмещенный ТГ/ДСК/ДТА (термогравиметрия/дифференциальная сканирующая калориметрия/дифференциальный термический анализ) анализатор SDT Q600, Научно-аналитический центр Томского политехнического университета). Удельные поверхности (S_{уд}) частиц твердой фазы оценивали методом БЭТ по тепловой десорбции азота с использованием прибора «СОРБОМЕТР-М». Общее содержание цинка, а также количество металлического цинка в составе образцов определяли волюмометрическим методом [18].

Результаты и их обсуждение

Состав и морфология образцов

При воздействии импульсных электрических разрядов, независимо от метода получения, в реакторе наблюдалось разделение продуктов диспергирования

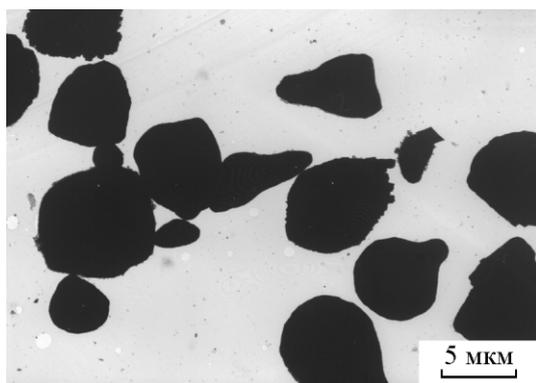


Рис. 1. ПЭМ частиц грубодисперсных частиц.

на две части: устойчивая суспензия частиц и осадка, концентрированного в объеме цинковых гранул. Согласно данным РФА, представленным в таблице, в получаемом осадке содержится только металлический цинк с размерами $D_{\text{ОКР}}$ 217 нм. При исследовании морфологического состава получаемых частиц методом ПЭМ было установлено, что частицы имеют неправильную форму со средним размером 5–7 мкм (рис. 1). Из сопоставления размеров $D_{\text{ОКР}}$, размеров и форм частиц можно сделать вывод, что полученные частицы металлического цинка являются агрегатами более мелких частиц и образуются под воздействием электрических разрядов в объеме цинковых гранул.

Фазовый состав и морфология тонких частиц, находящихся в устойчивой суспензии, зависят от использованного метода получения. При осуществлении процесса диспергирования по методу I (ис-

пользование дистиллированной воды) наблюдается образование суспензии серого цвета. По данным волюмометрического анализа частицы твердой фазы суспензии содержат 70–75 % металлического цинка непосредственно после окончания процесса диспергирования. При термостатировании суспензии при 40°C в течение 3 суток происходит постепенное окисление полученного продукта диспергирования, о чем свидетельствовало выделение водорода из водной фазы. По данным РФА частиц, выделенных из суспензии, фазовый состав продукта окисления соответствует оксиду цинка с размерами $D_{\text{ОКР}}$ 12 нм и следовым количествам металлического цинка (таблица). Из приведенных ПЭМ-изображений на рис. 2 видно, что в суспензии происходит образование агрегатов произвольной формы с размерами 0,1–0,3 мкм (рис. 2а), а также наблюдаются отдельные частицы линейной формы (рис. 2а). При детальном исследовании структуры агрегатов видно, что они состоят из наностержней оксида цинка (рис. 2б). При осуществлении метода II (непрерывная подача воздуха), согласно данным РФА (таблица), в суспензии происходит полное окисление частиц твердой фазы с образованием оксида цинка. По данным ПЭМ частицы представляют собой индивидуальные наностержни оксида цинка (рис. 3)

Добавление пероксида водорода к свежеполученной суспензии (метод III) приводит к быстрому окислению металлического цинка и образованию ZnO_2 (таблица). При этом в суспензии существовали крупные частицы с размерами 300–1000 мкм. Исследование морфологического состава показало,

Таблица

Структурные характеристики получаемых продуктов

Метод получения (образцы)	Фазовый состав						Удельная поверхность частиц $S_{\text{уд}}$, м ² /г
	Фаза	Количество фазы ω , %	Тип кристаллической решетки	Параметры кристаллической решетки, Å	Размер ОКР, $D_{\text{ОКР}}$, нм	Внутренние упругие напряжения, $\Delta d/d$, %	
Метод I	ZnO	94,3	Гексагональная	a — 3,2597 c — 5,2212	12	0,43	40
	Zn	5,7	Гексагональная	a — 2,6783 c — 4,9854	57	0,1	
Метод II	ZnO	100	Гексагональная	a — 3,2494 c — 5,2066	17	0,2	34
Метод III III(ZnO)	ZnO ₂	100	Кубическая	a — 4,8694	7,3	0,45	137
	ZnO	100	Гексагональная	a — 3,2534 c — 5,2130	24,6	0,3	35
Метод IV IV(ZnO)	ZnO ₂	100	Кубическая	a — 4,8760	8	0,8	35,5
	ZnO	52	Гексагональная	a — 3,2670 c — 5,2483	8,5	0,14	30,5
	ZnO	48	Гексагональная	a — 3,2418 c — 5,1870	8	0,24	
Zn*	Zn	100	Гексагональная	a — 2,6652 c — 4,9494	218	0,04	0,01

* — состав образца не зависит от метода получения.

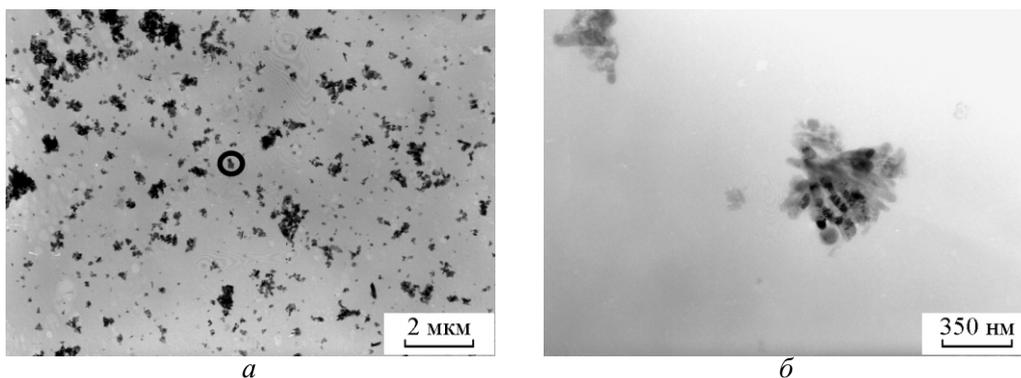


Рис. 2. ПЭМ оксида цинка, полученных электроискровым диспергированием цинка в воде (метод I): *a* – обзорный снимок, *б* – снимок отдельного агрегата (обозначенный на рис. *a*).

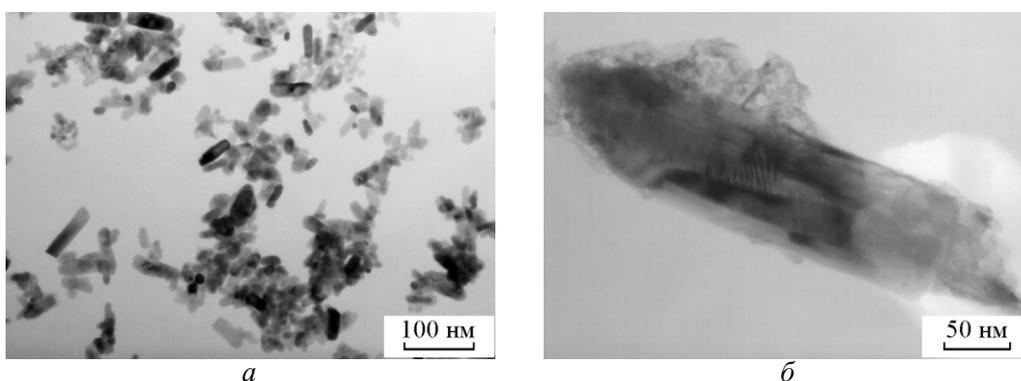


Рис. 3. ПЭМ наностержней оксида цинка, полученных электроискровым диспергированием в водо-воздушной среде (метод II): *a* – обзорный снимок, *б* – отдельный наностержень ZnO.

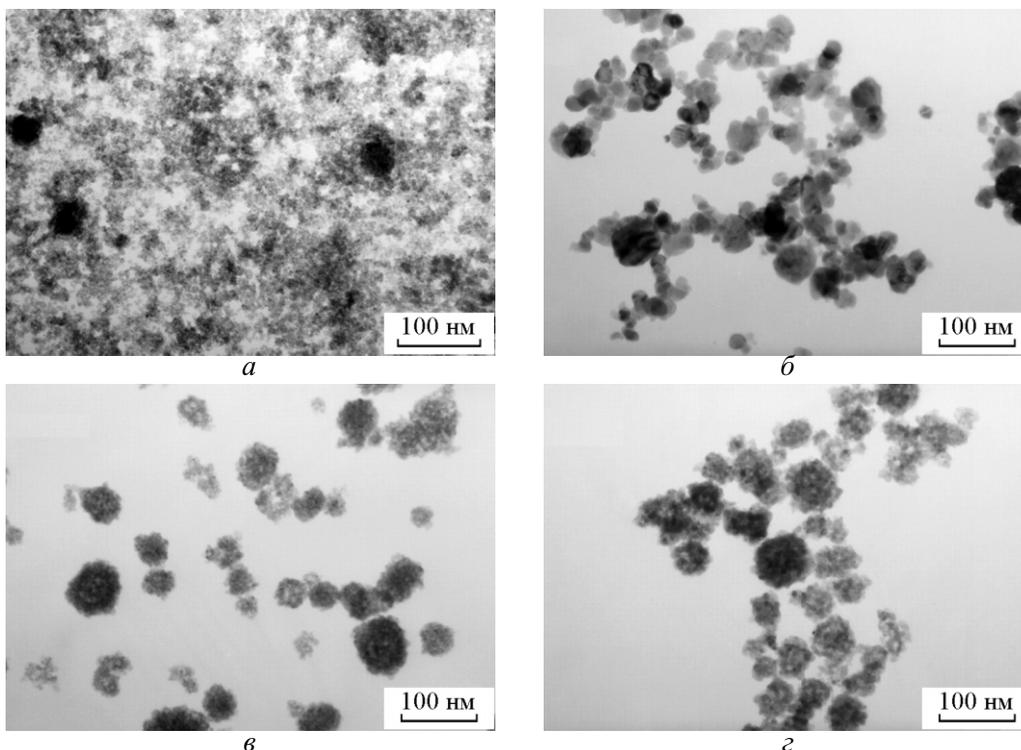


Рис. 4. ПЭМ частиц: *a* – пероксида цинка (метод III), *б* – оксида цинка (III(ZnO)), *в* – пероксида цинка (метод IV), *г* – оксида цинка (IV(ZnO)).

что эти частицы представляют собой пористые структуры, состоящие из первичных частиц пероксида цинка размерами 5 – 10 нм и неоднородным распределением в структуре агрегата. Рассчитанный среднеповерхностный размер (d_s) частиц [19] составил 9 нм. Это значение близко к размерам $D_{\text{ОКР}}$ (таблица) и наблюдаемым размерам структурных элементов агрегата (рис. 4а), и позволят сделать вывод, что полученные структуры являются агломератами первичных частиц ZnO_2 диаметром 8 – 10 нм. По данным ДТА полученный ZnO_2 разлагается при 225°C с потерей массы ($\Delta m - 16,5\%$) с образованием оксида цинка. Образующиеся частицы оксида цинка имеют ограниченную форму с распределением по размерам от 20 до 300 нм (рис. 4б).

При осуществлении процесса диспергирования по методу IV, фазовый состав тонкодисперсных частиц, находящихся в устойчивой суспензии и выделенных сразу после процесса наработки, соответствует пероксиду цинка, кристаллиты имеют размеры 8 нм (таблица). Они объединены в пористые структуры с размерами от 20 до 40 нм по форме близкой к сферической, и состоящие из структурных элементов размерами 5 – 10 нм (рис. 4в). Очевидно, данные структуры соответствуют прочным агрегатам первичных частиц ZnO_2 . Это подтверждается расчетом d_s частиц. Согласно значению $S_{\text{уд}}$ среднеповерхностный размер составляет 35 нм, что согласуется с размерами частиц по данным ПЭМ. При прогреве пероксид цинка разлагается с образованием оксида. Морфология, размеры агрегатов и первичных частиц полностью соответствуют исходному пероксиду цинка (рис. 4з). В отличие от образца III (ZnO) происходит формирование двухфазной системы гексагонального оксида цинка с разными параметрами решетки (таблица).

Механизм формирования наночастиц

Согласно [20], образование высокодисперсных частиц при электроискровом диспергировании металлов в жидких средах происходит за счет термического воздействия искрового разряда на межконтактные области металлических гранул, в результате которого происходит плавление и испарение металла, образование парокapельного облака металла и его отрыв от поверхности гранул. Формирование конечных продуктов происходит за счет последующего химического взаимодействия диспергированной фазы металла со средой при охлаждении “горячих” частиц [15, 16, 20], а также под воздействием термического и радиационно-химического воздействия искрового разряда на среду диспергирования

[15, 16]. Очевидно, что фазовый состав и морфология получаемых продуктов определяется химическим составом дисперсионной среды и размерами исходных частиц диспергированной фазы.

Для исследования продуктов диспергирования, полученных непосредственно под воздействием искрового разряда, на которые оказывалось минимальное влияние дисперсионной среды, были проведены специальные эксперименты. Для этого проводили отбор твердой фазы из суспензии, полученной при прохождении 4000 импульсов. При этом температура реакционной среды изменялась не более 4°C, а концентрация твердой фазы в получаемой суспензии не превышала 0,5 мг/л. Для предотвращения последующей стадии окисления частиц твердой фазы пробу суспензии переносили в ацетон. Анализ морфологического и химического состава проводили из суспензии частиц в ацетоне. С учетом условий эксперимента на получаемые частицы оказывалось минимальное радиационно-химическое и термическое воздействие разряда, а низкая концентрация предполагает отсутствие процессов коагуляции частиц. Продукты диспергирования, полученные в данных условиях, можно рассматривать как исходные частицы, полученные в результате термического воздействия искровых разрядов на гранулы цинка.

Как и в случае получения концентрированных суспензий, наблюдалось бимодальное распределение частиц по размерам: крупные частицы, концентрированные в объеме цинковых гранул и частицы нано- и субмикронного размера, находящиеся в объеме дисперсионной среды. По данным ПЭМ в устойчивой суспензии наблюдалось образование пористых агрегатов сферических частиц размерами 5 – 10 нм (рис. 5). По данным волнометрического анализа, частицы твердой фазы содержат 72 – 75 % металли-

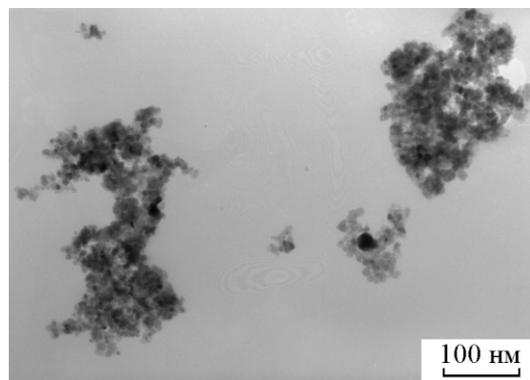
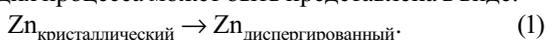


Рис. 5. ПЭМ частиц цинка в устойчивой части суспензии, полученных непосредственно после электроискрового диспергирования.

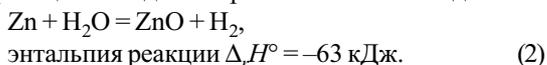
ческого цинка. Размеры и форма крупных частиц полностью соответствуют представленным на рис. 1.

Одновременное получение разных фракций диспергированных частиц обусловлено наличием двух процессов термической активации металлических гранул — плавления материала гранул и испарения. По данным [20] бимодальное распределение частиц обусловлено формированием нано- и субмикронных частиц вследствие процессов конденсации паров металлов, а частицы микронного размера формируются в результате охлаждения расплавленной части диспергированного металла. Очевидно, что при диспергировании цинка происходят аналогичные процессы. В результате первичная стадия процесса может быть представлена в виде:



При прохождении искрового разряда происходит формирование плазменного канала, в котором температура ионной подсистемы может достигать 2500 К [20, 21]. В результате происходят процессы испарения дисперсионной среды и ее атомизация с образованием газового пузыря [20, 21]. Фактически непосредственно в послеразрядный период происходит взаимодействие “горячих” частиц металла с газофазной дисперсионной средой. Это приводит к быстрому окислению поверхностного слоя с формированием оксида цинка, пассивации поверхности и торможению процесса окисления. В результате такого взаимодействия происходит образование металл-металлоксидной композиции — Zn/ZnO.

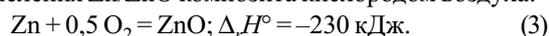
Формирование оксидных и пероксидных структур происходит за счет последующего взаимодействия частиц Zn/ZnO с дисперсионной средой. Очевидно, что для водной и водо-воздушной сред образование оксидных структур обусловлено только стадией послеразрядного окисления дисперсионной средой. Образование оксидных структур протекает по реакции исходных агрегатов Zn/ZnO с водой:



Длительность процесса окисления свидетельствует о наличии стадии диффузионного торможения окисления продуктами реакции [22]. Из представленной на рис. 2б ПЭМ агрегата ZnO видно, что наностержни оксида цинка имеют общий центр сокристаллизации. Диаметр образующихся наностержней сопоставим с размерами исходных частиц в составе композита Zn/ZnO (рис. 2б и 5). Процесс образования такой структуры можно описать как окисление наночастиц металла внутри исходного агрегата. Данный процесс — экзотермический (реакция (2)). За счет малых размеров окисляемых частиц композита и ограниченного реакционного объема выде-

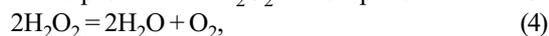
ляющееся тепло в ходе реакции транслируется внутрь агрегата, а также частично рассеивается образующимися продуктами реакции (оксид цинка и водород) в окружающей среде. Разница в температурах внутри агрегата и окружающей среде приводит к “закалке” продуктов окисления и препятствует взаимной сокристаллизации.

Аэрация среды диспергирования приводит к значительному ускорению процесса окисления. Образование оксида цинка происходит за счет окисления Zn/ZnO композита кислородом воздуха:



Из сравнения тепловых эффектов реакций (2) и (3) видно, что при проведении процесса в водо-воздушной среде температура окисляемых агрегатов Zn/ZnO выше и, вследствие этого, процесс окисления металлического цинка и перекристаллизация оксидной фазы протекают более эффективно. В результате происходит формирование более крупных наностержней оксида цинка (рис. 3б).

Добавление пероксида водорода сразу после процесса наработки суспензии приводит к формированию ZnO₂ в результате термического и каталитического разложения H₂O₂ на поверхности Zn/ZnO:



и последующего окисления металлического цинка согласно реакции (3). Образование ZnO₂ происходит вследствие вторичного взаимодействия оксида цинка:



Наличие стадии (4) приводит к тому, что в суспензии происходят постоянные процессы деагломерации отдельных наночастиц пероксида цинка с размерами 5 – 10 нм.

Добавление пероксида водорода в дисперсионную среду непосредственно в момент разряда приводит к дополнительной активации раствора за счет радиационно-химического и термического воздействия разряда с образованием радикальных форм кислорода:



В результате происходит окисление Zn/ZnO с образованием оксида цинка:



а формирование пероксида цинка — согласно реакции (5) и дополнительным стадиям:



Разница в условиях получения частиц ZnO₂ и их исходная морфология приводит к получению разных по составу образцов оксида цинка. Так для образца III(ZnO) характерно образование однородных по фазовому составу частиц, но со значительным

диапазоном размеров. Это связано с формированием оксидных структур из агломератов в областях с различной концентрацией исходных первичных частиц ZnO_2 (рис. 4) в результате разложения и одновременного перекристаллизации при прокаливании образца ZnO_2 . При прогреве исходных частиц полученных по методу IV образование оксида цинка связано с быстрым разложением исходных агрегатов ZnO_2 с сохранением их морфологии, но с изменением химического состава. В результате происходит образование двухфазной композиции оксида цинка, и практически одинаковых по размерам частиц.

Заключение

Электроискровое диспергирование цинка в жидких средах может быть удобным методом синтеза наноразмерных структур. В зависимости от среды диспергирования и послеразрядной обработки полученной в электрическом разряде суспензии, возможно получение продуктов различного морфологического и химического состава. При осуществлении разряда в воде происходит формирование агрегатов наностержней оксида цинка, а при использовании водо-воздушной среды происходит образование деагломерированных линейных структур оксида цинка. При осуществлении процесса с участием пероксида водорода возможно получение пероксида цинка либо в виде агломератов первичных частиц ZnO_2 (окисление суспензии H_2O_2 в послеразрядный период), либо пористых агрегатов при электроискровой обработке в 3% растворе H_2O_2 . Полученные образцы ZnO_2 могут быть использованы в качестве прекурсора при синтезе разных по фазовому и морфологическому составу продуктов.

Достоинством предложенного метода получения материалов является чистота получаемых наночастиц оксида и пероксида цинка, так как образование продуктов происходит при термическом воздействии электрического разряда на поверхность цинковых гранул с участием «чистых» окислителей — воды, кислорода воздуха и пероксида водорода. Данный метод можно рассматривать как безотходный, так как получаемые частицы металлического цинка могут быть возвращены в технологический процесс.

Литература

1. Ibarra L., Alzoriz M. Ionic elastomers based on carboxylated nitrile rubber (XNBR) and zinc peroxide: influence of carboxylic group content on properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 2002, v. 84, no. 3, p. 605 – 615.

2. Ibarra L., Alzoriz M. Effect of temperature on the crosslink densities of nitrile rubber and carboxylated nitrile rubber with zinc peroxide. *Journal of Applied Polymer Science*, 2002, v. 86, no. 2, p. 335 – 340.
3. Ohno S., Aburatani N., Ueda N. Foam products from a high-melting synthetic resin, DE Patent №2914058, 1980.
4. Ohno S., Aburatani N., Ueda N. Blowing composition, US Patent № 4,247,412, 1981.
5. Hagel R., Redecker K. Use of zinc peroxide as an oxidizing agent for explosives and pyrotechnical mixtures, DE Patent № 2952069, 1981.
6. Uekawa N., Kajiwara J., Mochizuki N., Kakegawa K., Sasaki Y. Synthesis of ZnO nanoparticles by decomposition of zinc peroxide. *Chemistry Letters*, 2001, v. 30, no. 7, p. 606 – 607.
7. Uekawa N., Mochizuki N., Kajiwara J., Mori F., Wu Y. J., Kakegawa K. Nonstoichiometric properties of zinc oxide nanoparticles prepared by decomposition of zinc peroxide. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2003, v. 5, no. 5, p. 929 – 934.
8. Gondal M.A., Drmosh Q.A., Yamani Z.H., Saleh T.A. Synthesis of ZnO_2 nanoparticles by laser ablation in liquid and their annealing transformation into ZnO nanoparticles. *Applied Surface Science*. 2009, v.256, no. 1, p. 298 – 304.
9. Rosenthal-Toib L., Zohar K., Alagem M., Tsur Y. Synthesis of stabilized nanoparticles of zinc peroxide. *Chemical Engineering Journal*. 2008, v. 136, no. 2 – 3, p. 425 – 429.
10. Uchida F., Umamoto Y., Yazaki T., Preparation of zinc peroxide, JP Patent № 01290509, 1989.
11. Sun M., Hao W., Wang C., Wang T. A simple and green approach for preparation of ZnO_2 and ZnO under sunlight irradiation, *Chemical Physics Letters*. 2007, v. 443, no. 4 – 6, p. 342 – 346.
12. Бураков В.С., Невар Е.А., Неделько М.И., Тарасенко Н.В. Образование наночастиц оксида цинка при электрических разрядах в воде. *Письма в Журнал технической физики*. 2008, т. 34, вып. 16, с. 1 – 8.
13. Бураков В.С., Тарасенко Н.В., Невар Е.А., Неделько М.И. Морфология и оптические свойства наноструктур оксида цинка, синтезированных методами термического и электроразрядного распыления. *Журнал технической физики*. 2011, т. 81, вып. 2, с. 89 – 97.
14. Прокопивный В.В., Косумов М.М. Получение и механизм роста наноструктур из оксида цинка в дуговом разряде. *Письма в Журнал технической физики*. 2007, т. 33, вып. 1, с. 88 – 94.
15. Даниленко Н.Б., Галанов А.И., Корнев Я.И. и др. Применение импульсных электрических разрядов в водных растворах для получения наноматериалов и их использование для очистки воды. *Нанотехника*. 2006, № 4(8), с. 81 – 91.
16. Даниленко Н.Б., Савельев Г.Г., Яворовский Н.А., Юрмазова Т.А., Галанов А.И., Балухтин П.В. Изучение состава и кинетики образования продуктов эрозии металлической загрузки электроразрядного реактора. *Журнал прикладной химии*. 2005, т. 75, № 9, с. 1463 – 1468.
17. Галанов А.И., Юрмазова Т.А., Митькина В.А., Савельев Г.Г., Яворовский Н.А., Лобанова Г.Л. Маг-

- нитные наночастицы, получаемые электроимпульсным методом, их физико-химические свойства и взаимодействие с доксорубицином и плазмой крови. Перспективные материалы, 2010, № 4, с. 49 – 55.
18. Васильева З.Г., Грановская А.А., Таперова А.А. Лабораторные работы по общей и неорганической химии. Ленинград: Химия, 1986, 287 с.
19. Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость. М.: Мир, 1984, 306 с.
20. Berkowitz A. E., Walter J. L. Spark erosion: A method for producing rapidly quenched fine powders. Journal of Materials Research. 1987, v. 2, no. 2, p. 277 – 288.
21. Descoeurdes A., Hollenstein C., Walder G., Perez R. Time-resolved imaging and spatially-resolved spectroscopy of electrical discharge machining plasma. Journal of Physics D: Applied Physics. 2005, v. 38, no. 22, p. 4066 – 4073.
22. Дельмон Б. Кинетика гетерогенных реакций. М.: Мир, 1972, 556 с.

Статья поступила в редакцию 21.05.2012. г.

Галанов Андрей Иванович — Институт физики высоких технологий Томского политехнического университета, кандидат химических наук, доцент, старший научный сотрудник. Специалист с области физической химии, химии твердого тела, наноматериалов. E-mail: and-galanov@yandex.ru.

Лобанова Галина Леонидовна — Института физики высоких технологий Томского политехнического университета, кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Специалист в области физической химии, химии твердого тела, наноматериалов. E-mail: jahivolt@mail.tomsknet.ru.

Журавков Сергей Петрович — Институт физики высоких технологий Томского политехнического университета, кандидат химических наук, старший научный сотрудник. Специалист в области физической химии, химии твердого тела, наноматериалов. E-mail: jahivolt@mail.tomsknet.

Сапрыкин Филипп Евгеньевич — Институт физики высоких технологий Томского политехнического университета, инженер. Специалист в области электрофизики, техники высоких напряжений, наноматериалов. E-mail: jahivolt@mail.tomsknet.

Корнев Яков Иванович — Институт физики высоких технологий Томского политехнического университета, кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Специалист в области электрофизики, техники высоких напряжений, наноматериалов. E-mail: jahivolt@mail.tomsknet.ru.

Яворовский Николай Александрович — Институт физики высоких технологий Томского политехнического университета, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией. Специалист в области электрофизики, техники высоких напряжений, наноматериалов.