

нических материалов электроники. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://old.tusur.ru/filearchive/reports-magazine/2015-38-4/9.pdf> (дата обращения: 17.09.2016).

Научный руководитель: В.И. Туев, д.т.н., зав. кафедрой радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга ТУСУР.

ПОЛУЧЕНИЕ ГЕКСАГОНАЛЬНОГО УЛЬТРАДИСПЕРСНОГО ОКСИДА ЦИНКА В ГИПЕРСКОРОСТНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУЕ

¹А.И. Циммерман, ²Ю.Л. Шаненкова, ¹М.И. Гуков
^{1,2}Томский политехнический университет
ЭНИН, ЭПП, ¹группа 5А4Д

Перспективы использования различных функциональных материалов связаны с их уникальными особенностями в ультрадисперсном состоянии. К таким материалам можно отнести, например, оксид цинка, одной из важнейших характеристик которого должно являться монокристаллическое строение частиц и наноразмеры [1-5]. Высокодисперсное монокристаллическое состояние может быть получено при кристаллизации из жидкой фазы с высокой скоростью закалки материала в условиях сверхзвукового распыления в газообразной атмосфере [6, 7]. Такие условия можно получить при реализации плазмодинамического метода на основе импульсного коаксиального магнитоплазменного ускорителя эрозионного типа (КМПУ) [8]. Плазмодинамический метод, в отличие от сложных химических методов, обеспечивает в одном кратковременном цикле работы КМПУ (до 10^{-3} с) наработку основного прекурсора – цинка, прямой синтез оксида цинка при взаимодействии с ионизированным кислородом, сверхзвуковое распыление жидкой фазы ZnO и его сверхбыструю кристаллизацию в газообразной кислородной среде. В результате плазмохимической реакции синтезируется нанопорошок, сбор которого осуществляется через некоторое время после окончания рабочего цикла. Цель данной работы – показать принципиальную возможность реализации процесса плазмодинамического синтеза ультрадисперсного оксида цинка. Для этого была проведена серия экспериментов, в ходе которой были получены образцы продукта. Анализ синтезированного таким образом порошка осуществлялся с помощью современных аналитических методик, включающих рентгеновскую дифрактометрию, сканирующую и просвечивающую электронную микроскопию.

На рисунке 1 (а) представлена типичная рентгеновская дифрактограмма порошка, синтезированного при истечении плазменной струи в камеру-реактор, заполненную на 100% кислородом. Представленные данные были получены с использованием рентгеновского дифрактометра Shimadzu XRD 7000S с Cu- α излучением. XRD-картина практически идентична, как по интенсивности рефлексов, так и по угловому положению максимумов на оси 2θ , эталонной дифракционной картине, взятой из базы данных PDF-2. Это позволяет утверждать, что полученный дисперсный продукт наиболее близок к структурной

модели оксида цинка ZnO с номером карточки 36-1451 (б), гексагональной сингонии, пространственной группы SG P63mc.

Результаты сканирующей электронной микроскопии были получены с использованием сканирующего микроскопа Hitachi TM-3000. По снимкам сканирующей электронной микроскопии (SEM-снимки), приведенным на рисунке 2, видно, что исходный продукт плазмодинамического синтеза сильно агломерирован, что характерно для высокодисперсных порошков.

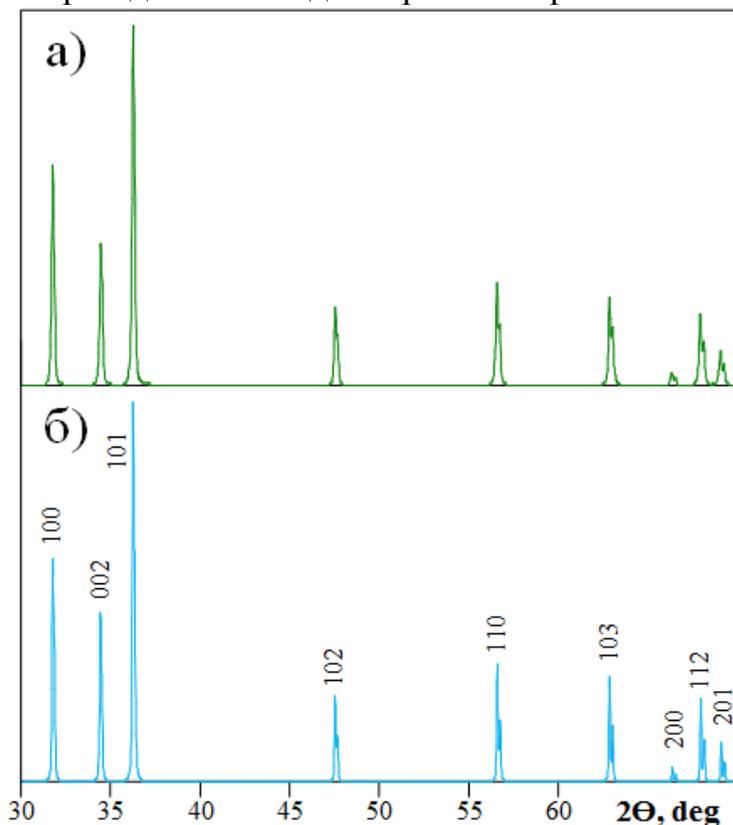


Рис. 1. Типичные рентгеновские дифрактограммы продуктов плазмодинамического синтеза при объемной концентрации кислорода в камере-реакторе 100 % (а) и структурной модели гексагонального оксида цинка (б)

Основную массу агломератов составляют наноразмерные и субмикронные частицы. Морфология наноразмерных частиц на SEM-снимках неразличима, а отдельные частицы субмикронных размеров имеют естественную огранку, вполне соответствующую форме роста монокристаллов SG P63mc.

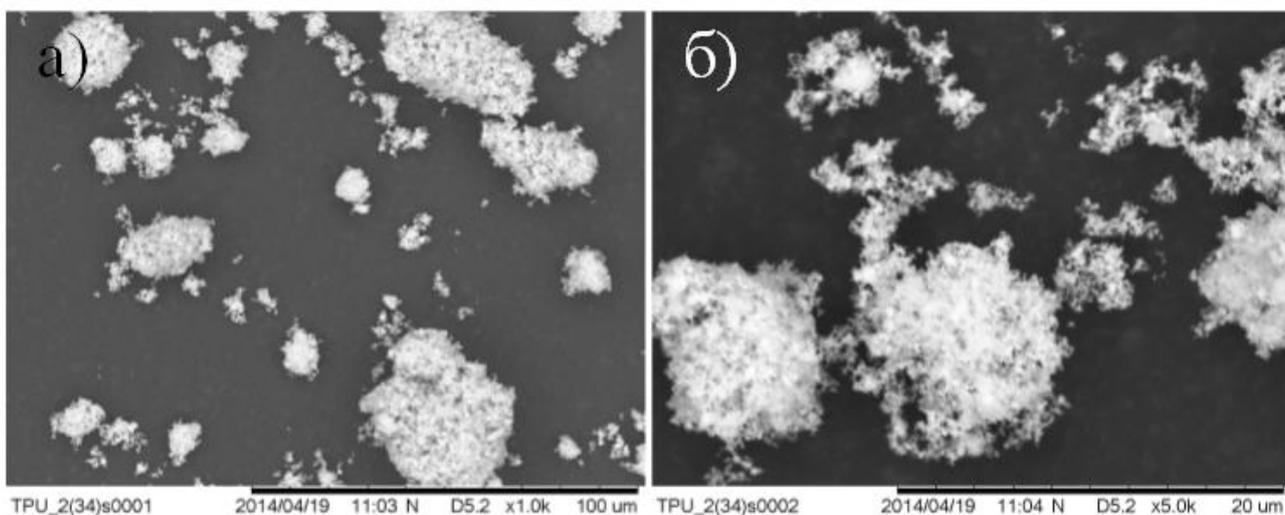


Рис. 2. SEM-снимки исходного продукта плазмодинамического синтеза

При расшифровке данных просвечивающей электронной микроскопии (ТЕМ), приведенных на рисунке 3, монокристаллическое строение частиц становится очевидным. Высокая плотность частиц ZnO ($\rho=5,61 \text{ г/см}^3$) позволила получить светлопольные и темнопольные ТЕМ-снимки хорошего качества на микроскопе Philips CM-12 с ускоряющим напряжением до 100 кВ. На рисунках видно, что размер частиц варьируется в пределах от 10 нм до 500 нм. Одной из причин этого является импульсный характер плазмодинамического процесса, в течение которого некоторые параметры системы изменяются в очень широких пределах, например, ток электропитания ускорителя, параметры электроразрядной плазмы и ее истечения из ускорительного канала. Идеальная естественная огранка практически всех частиц является характерной особенностью. Электронные изображения большей части из них представляют собой правильные прямоугольники и шестигранники. Электронная дифракция с выделенной области (SAED) имеет точно-кольцевой характер. Идентифицированные межплоскостные расстояния совпадают по своим значениям с эталонными величинами, взятыми из карточки. Темнопольные изображения получены в свете дифрагированных пучков путем смещения апертурной диафрагмы в области соответствующих рефлексов. Анализ темнопольных изображений позволяет с уверенностью говорить о монокристаллическом строении получаемых частиц оксида цинка.

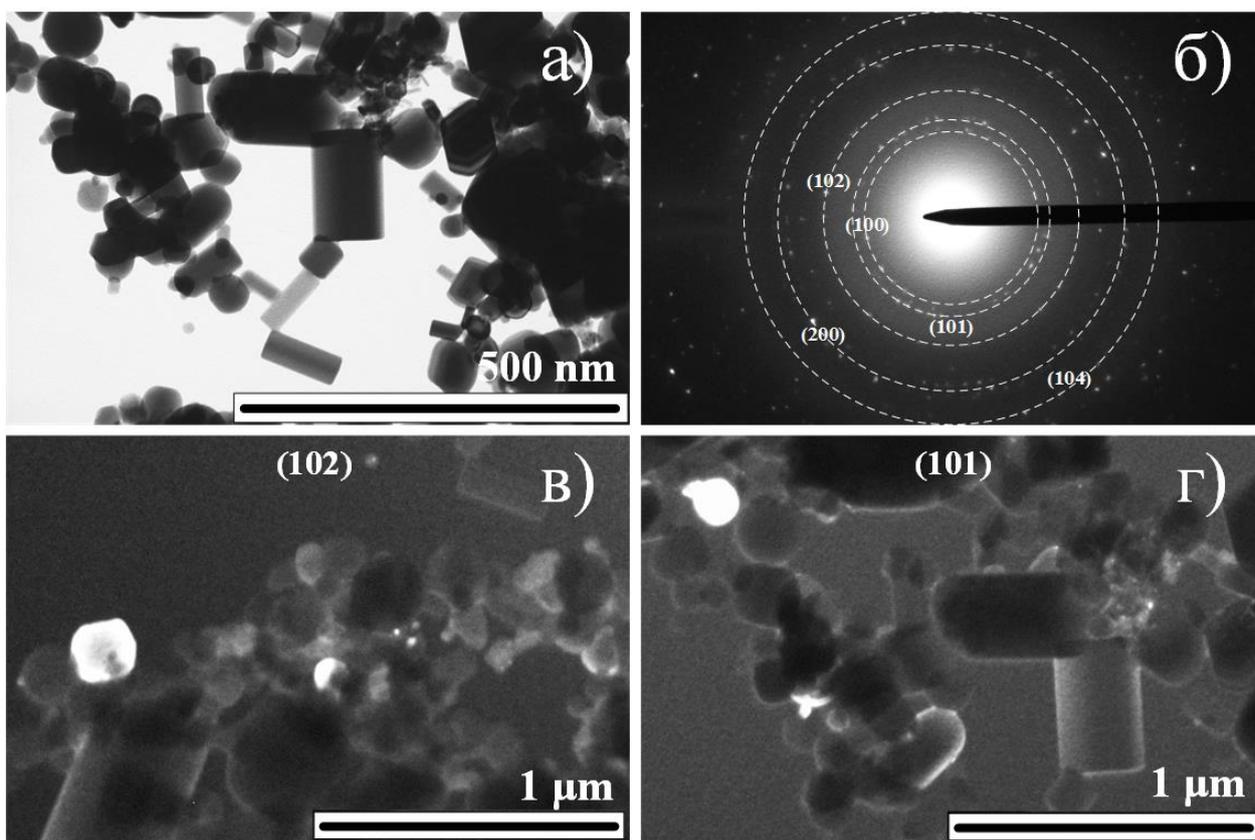


Рис. 3. Данные просвечивающей электронной микроскопии (ТЕМ) исходного продукта плазгодинамического синтеза, состоящего в основном из монокристаллитов оксида цинка ZnO: а) светлопольный снимок, б) электронная дифракция, в-г) темнопольные снимки

В результате проведенных исследований было установлено, что оксид цинка с монокристаллической структурой частиц может быть синтезирован с помощью плазмохимического метода с использованием системы на основе коаксиального магнитоплазменного ускорителя. Эта система позволяет получать ультрадисперсный порошок ZnO в течение одного короткого цикла с длительностью до 1 мс. С использованием данных рентгенофазового анализа, было установлено, что продукт имеет структуру гексагонального оксида цинка. Это подтверждается также данным просвечивающей электронной микроскопии, на которой четко видны кристаллы в форме прямоугольников и шестигранников. Размер частиц достигает 350 нм, но большинство из них (85%) имеют размер менее 150 нм. Таким образом, предложенный метод может быть использован в качестве альтернативного для получения чистого гексагонального оксида цинка, причем преимуществами в данном случае будут являться: простота (один рабочий цикл), быстродействие (менее 1 мс) и высокая чистота получаемого продукта.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Wiesenthal A., Hunter L., Wang S., Wickliffe J., Wilkerson M. Nanoparticles: small and mighty // *International Journal of Dermatology*. – 2011. – Vol. 50. – pp. 247-254.
2. Arya S.K., Saha S., Ramirez-Vick J.E., Gupta V., Bhansali S., Singh S.P. Recent advances in ZnO nanostructures and thin films for biosensor applications: Review // *Analytica Chimica Acta*. – 2012. – Vol. 737. – pp. 1-21.
3. Kim J., Kwon S., Park J.K., Park I. Quantum dot-based immunoassay enhanced by high-density vertical ZnO nanowire array // *Biosensors and Bioelectronics*. – 2014. – Vol. 55. – pp. 209-215.
4. Cao Y., Galoppini E., Ivanoff Reyes P., Duan Z., Lu Y. Morphology effects on the biofunctionalization of nanostructured ZnO // *Langmuir*. – 2012. – Vol. 28. – pp. 7947-7951.
5. Zhang Y., Chan H.F., Leong K.W. Advanced materials and processing for drug delivery: The past and the future // *Advanced Drug Delivery Reviews*. – 2013. – Vol. 65. – pp. 104–120.
6. Shanenkov I.I., Sivkov A.A., Pak A., Kolganova Y.L. effect of gaseous medium pressure on plasmadynamic synthesis product in the c-n system with melamine // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 1040. pp. 813-818.
7. Shanenkov I.I., Pak A.Ya., Sivkov A.A., Shanenkova Yu.L. Energy efficiency of electric pulse installation based on a high-current plasma accelerator // *MATEC Web of Conferences*. – 2014. – Vol. 19. – art. no. 01030
8. Пат. 137443 РФ. МПК7 H05H 11/00. Коаксиальный магнитоплазменный ускоритель / А.А Сивков, А.С. Сайгаш, Ю.Л. Колганова. Заявлено 24.09.2013; Опубл. 10.02.2014, Бюл. № 4. – 6 с.

Научный руководитель: А.А. Сивков, д.т.н., профессор каф. ЭПП ЭНИН ТПУ.

НАНЕСЕНИЕ МЕДНОГО ПОКРЫТИЯ НА АЛЮМИНИЕВЫЕ ПОВЕРХНОСТИ С ВЫСОКОЙ ПРОЧНОСТЬЮ СЦЕПЛЕНИЯ

¹Ю.Н. Половинкина, ²Ю.Л. Шаненкова
^{1,2}Томский политехнический университет
ЭНИН, ЭПП, ¹5АМ64

Известный факт, что медь и алюминий являются главными материалами в электроэнергетике ввиду низкой величины удельного сопротивления – отсюда их повсеместное использование. Величина удельного контактного сопротивления существенно увеличивается при непосредственном соединении данных материалов, таким образом, происходит ухудшение качества контакта и увеличение потерь электрической энергии [1]. В работе предлагается уникальный метод совмещения контактной пары медь-алюминий посредством нанесения мед-