



## АНАЛИЗ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДОМ, С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММНОГО GWYDDION

Аль-Камали М.Ф.С.Х.

Научно-исследовательская лаборатория «Техническая керамика и наноматериалы»

УО «ГГТУ им. П.О. Сухого», Гомель, Республика Беларусь

marwan\_ye2@gstu.by

Исследованы морфология и распределение наночастиц с использованием СЭМ и программы Gwyddion нанокомпозитов  $\text{SiO}_2:\text{Cu}^\circ$  синтезированных золь-гель методом с последующей термообработкой в среде водорода. Установлена высокая однородность структуры и эффективная интеграция меди в матрицу. Полученные материалы перспективны для применения в области функциональных покрытий и водоочистки.

Золь-гель метод представляет собой эффективную технологию синтеза широкого спектра материалов, включая нанокомпозиты. Он основан на переходе золя в гель – коллоидную систему, состоящую из жидкой фазы и трёхмерной сети частиц. Формирование наночастиц в таких системах осуществляется с применением методов осаждения, сверхкритической флюидной обработки и физического воздействия. Для получения качественных покрытий методом вакуумного напыления критически важна высокая однородность гранулометрического и химического состава исходного сырья. Использование высокочистых реагентов и аэросила в качестве исходных компонентов, обеспечивает равномерное распределение легирующих компонентов на его поверхности, что способствует улучшению характеристик конечного материала. В этой связи актуально применение цифровой обработки изображений, полученных методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), для количественного анализа морфологии, размеров наночастиц и степени упорядоченности пористой структуры. Настоящее исследование направлено на изучение свойств нанокомпозитов, синтезированных золь-гель методом, с акцентом на структурную оптимизацию с использованием компьютерных методов анализа.

Нанокомпозиты  $\text{SiO}_2:\text{Cu}^\circ$  были получены методом золь-гель с использованием оксида кремния и солей нитрата меди в различных концентрациях. После сушки при 80 °C и термообработки при 800 °C смесь измельчали до нанопорошка. Морфология поверхности изучалась с помощью СЭМ (S-4800, Hitachi, Япония). Анализ распределения наночастиц и пористой структуры проводился на основе микрофотографий с применением программного обеспечения Gwyddion [1-3].

Для обработки изображений, полученных методом СЭМ, использовалось программное обеспечение Gwyddion, обеспечивающее визуализацию и количественный анализ агломератов. Вычислялись параметры: число агломератов, их площадь, длина границ и средний размер. С применением масок уточнялись характеристики агломератов, включая пористость поверхности, рассчитанную по специализированной формуле. Результаты позволили определить среднюю площадь и размер сферических агломератов.

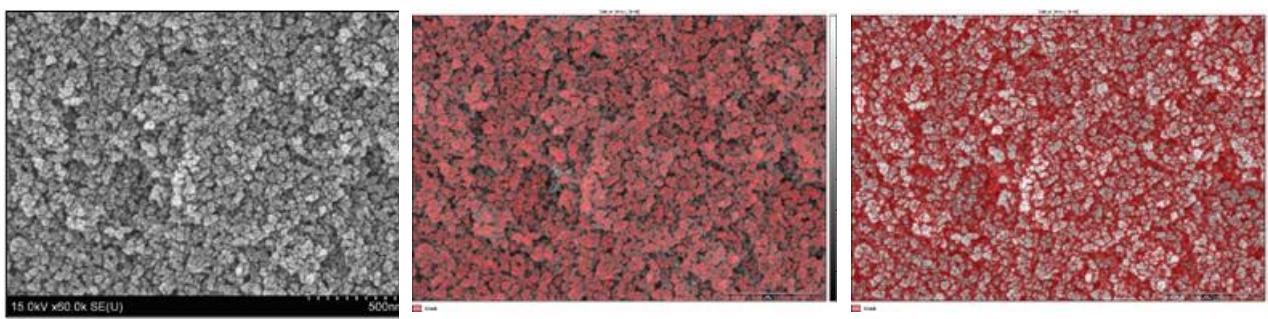


Рис. 1. Анализ СЭМ-изображения ксерогеля, обработанного программой Gwyddion (термообработан в среде водорода при T=800 °C, 1 час, концентрация меди 0,40 моля на содержания 1 моль  $\text{SiO}_2$ ).  
а – исходное СЭМ изображение; б – изображение исследуемого образца с зёрнами, покрытыми «маской»; в – изображение инвертированной «маски» для поверхности исследуемого образца



Изображения ксерогелей, содержащих ионы меди, полученных при термообработке в среде водорода при 800 °C, демонстрируют выраженные структурные изменения. Визуальный анализ (см. рисунок) подтверждает трансформацию морфологии образцов под воздействием высокой температуры.

В таблице приведены результаты статистического анализа размеров агломератов, выполненного с использованием программного обеспечения Gwyddion, СЭМ и РФА. Средний размер сферических агломератов остаётся стабильным и составляет несколько нанометров. Данные подтверждают однородность распределения частиц в исследуемых образцах.

**Табл. 1. Результаты статистического анализа размеров агломератов, выполненного с использованием программного обеспечения Gwyddion, СЭМ и РФА**

Состав	Параметры				
	Количество агломератов	Общая площадь $\mu\text{м}^2$	Средняя площадь сферических агломератов $S_{\text{сф}}, \text{нм}^2$	средний размер сфераобразных агломератов, нм	
				Gwyddion	СЭМ
SiO <sub>2</sub> :Cu°	900	1,76	480,87	24,7	24,1
					22,49

На основе проведённого анализа установлено, что программа Gwyddion демонстрирует высокую степень согласованности с результатами СЭМ и рентгенографических исследований, обеспечивая комплексную оценку поверхности образцов. Несмотря на отдельные погрешности, связанные с точностью выделения областей, полученные данные подтверждают надёжность метода. Восстановленный металл равномерно распределяется в структуре SiO<sub>2</sub>-глобул, формируя оболочку с концентрационным градиентом. Модифицированные ксерогели и микропорошки характеризуются высокой однородностью и эффективным распределением легирующих компонентов. Применение золь-гель технологии с использованием аэросила способствует улучшению параметров спекания и формированию монолитной стеклообразной структуры. Средний размер наночастиц в порошке SiO<sub>2</sub>:Cu° составляет 17–35 нм, что соответствует данным литературы.

1. AL-Kamali M.F.S.H. et al. Structural properties of micropowders composition SiO<sub>2</sub>:CuO & SiO<sub>2</sub>:Cu° prepared by sol-gel method // Al-Andalus Journal of Applied Sciences. 2021. Vol. 8. № 13. P. 99–117.

2. Аль-Камали М.Ф.С.Х. и др. Структурообразование SiO<sub>2</sub>-ксерогелей, содержащих соединения меди различного фазового состава // Проблемы физики, математики и техники. 2020. № 3(44). С. 7–12.

3. Manual pages. Gwyddion – Free SPM (AFM, SNOM/NSOM, STM, MFM) data analysis software [Электронный ресурс] // Название сайта: [gwyddion.net]. URL: <http://gwyddion.net/documentation/user-guide-ru/presentations-masks.html> (дата обращения: 27.08.2021)

4. An V. et al. Optical and AFM studies on p-SnS thin films deposited by magnetron sputtering // Chalcogenide Letters. 2015. Vol. 12. No. 9. P. 483 – 487.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТЕКЛООБРАЗОВАНИЯ В СИСТЕМЕ TeO<sub>2</sub>–MoO<sub>3</sub>–WO<sub>3</sub>–ZnO

Аляева В.М., Федотова И.Г.

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,

Нижний Новгород, Россия

irina.goreva89@mail.ru

Теллуритные стёкла представляют собой перспективный класс неорганических материалов, используемых в оптоэлектронике, волоконной оптике, лазерной технике, нелинейной оптике и фотонике [1]. Свойства теллуритных стекол определяются их макросоставом. Одним из направлений исследования в данной области является поиск новых стеклообразующих систем на основе диоксида теллура и исследование свойств полученных стекол. При исследовании новых стеклообразующих систем актуальной задачей является установление границ области стеклования и подбор оптимальных составов для получения устойчивых к кристаллизации стекол.

Для установления границ области стеклования используются теоретические [2] и экспериментальные методы [3]. Теоретические методы не требуют проведения предварительных экспериментов и заключаются в расчетах критериев стеклообразования на