

Секция 3 «Новые материалы и технологии»
(физика лазеров и лазерные технологии, ионно-лучевые и
плазменные технологии, формирование структуры и свойства покрытий)

Председатели:

Рогачев Александр Владимирович, д-р хим. наук, чл.-корр.
Ярмоленко Максим Анатольевич, д-р техн. наук, профессор

М. Ф. С. Х. Аль-Камали

Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого,
г. Гомель, Республика Беларусь

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ
ЗОЛЬ-ГЕЛЬ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ
SiO₂:CuO(Cu⁰) С ПРИМЕНЕНИЕМ Gwyddion**

Золь-гель метод представляет собой ключевую технологию для получения различных материалов, включая наноматериалы. Этот процесс включает создание золя, который затем трансформируется в гель – коллоидную систему, состоящую из жидкой дисперсионной среды и пространственной сети, сформированной частицами дисперсной фазы. Формирование наночастиц и наноматериалов в жидких средах охватывает несколько направлений, таких как осаждение, синтез в сверхкритических жидкостях и физическое воздействие на реакционную среду. Для достижения качественных покрытий методом вакуумного напыления критически важна высокая однородность гранулометрического и химического состава исходной мишени. Применение компонентов химической чистоты не ниже марки «осч» и аэросила в качестве матрицы-носителя позволяет достигать молекулярно однородного распределения легирующих добавок, сорбируя их на поверхности глобул аэросила в виде тонкого нанометрового слоя. Это создает оптимальные условия для формирования высококачественных покрытий. В связи с вышеизложенным актуальным представляется использование методов компьютерного анализа микроскопических изображений, полученных с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), для композиционных материалов SiO₂:CuO и SiO₂:Cu⁰. Это позволит получить количественную информацию о топографии поверхности золь-гель, размерах наночастиц, межпористом расстоянии и оценить степень упорядоченности пористого массива.

Нанокomпозиты были синтезированы с применением золь-гель метода, в рамках которого сначала был получен золь на основе оксида кремния, а затем в него добавлялись соли нитрата меди в различных концентрациях. Полученная смесь подвергалась термообработке: сушилась в воздухе при 80 °С в течение недели, а затем обжигалась при 800 °С в течение 1 часа. После завершения сушки смесь измельчали для получения нанокomпозитного порошка SiO₂:CuO, который затем обрабатывался в водороде при 800 °С в течение 1 часа для получения порошка SiO₂:Cu⁰ [1–2]. Поверхностные характеристики нанокomпозитного порошка были исследованы с помощью сканирующего электронного микроскопа S-4800 (Hitachi, Япония). Распределение наночастиц и межпористое расстояние рассчитывались на основе сканирующих электронных микрофотографий с использованием программного обеспечения Gwyddion для компьютерной обработки изображений.

Для статистической обработки изображений, полученных методом СЭМ, применялся открытый программный комплекс Gwyddion, разработанный Фондом свободного программного обеспечения (Free Software Foundation, FSF). Этот комплекс является свободным программным обеспечением с открытым исходным кодом и распространяется

под лицензией GNU General Public License (GNU GPL). Адаптация и оценка СЭМ-изображений проводились с использованием модульной программы Gwyddion. В частности, применялся алгоритм, который позволяет рассчитывать общее количество помеченных агломератов, их общую площадь (как в абсолютных значениях, так и в долях от общей площади), длину границ агломератов, а также среднюю площадь и сторону эквивалентного квадрата для каждого агломерата (рисунок 1).

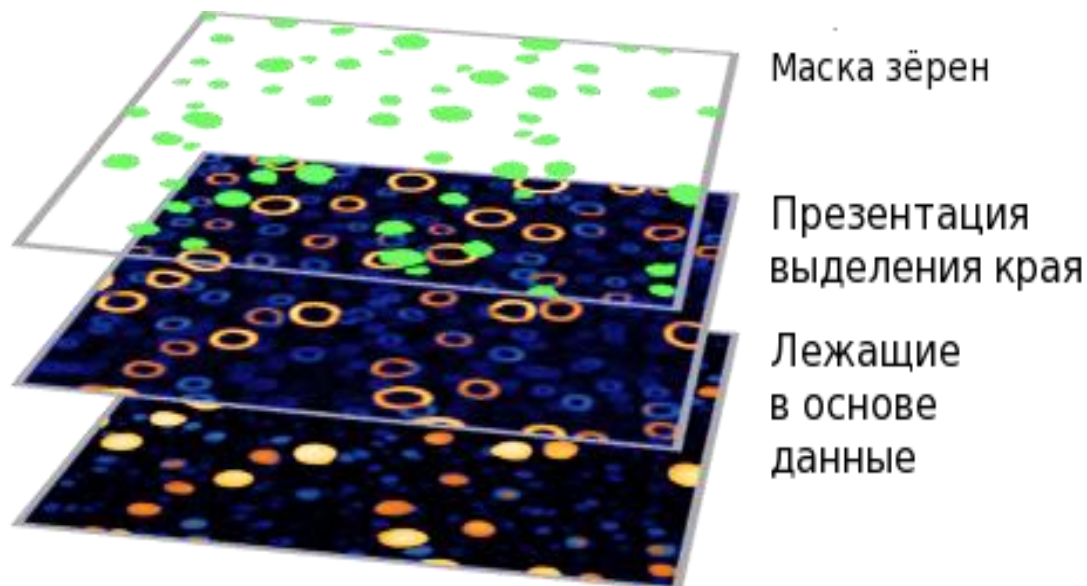


Рисунок 1 – Внешний вид слоёв масок [3]

С использованием функциональных возможностей программы Gwyddion были проведены корректировка и инвертирование маски для СЭМ-изображений. На основе полученных аналитических данных, статистики «зёрен» и дисперсии размеров глобулярных образований, определялись следующие параметры: средняя площадь сферических агломератов ($S_{сф}$), пористость поверхности ($P_{сф}$) и средний размер агломератов ($D_{сф}$). Пористость поверхности рассчитывалась по формуле:

$$P_{сф} = \frac{S_{сф}}{S_{скан}},$$

где $S_{сф}$ – площадь сферических агломератов,

$S_{скан}$ – размер сканируемого изображения.

Средний размер агломератов определялся по формуле:

$$D_{сф} = \sqrt{\frac{4 \times S_{сф}}{\pi}}.$$

На рисунке 2 представлена иллюстрация как рассчитать размер агломерации наночастиц, полученный после обработки на программе Gwyddion.

На рисунках 3, 4 представлены изображения ксерогелей с ионами меди, обработанных на воздухе и в водороде при температуре 800 °С в течение 1 часа. Обработка в водороде приводит к уменьшению «размазанности» меди, что указывает на консолидацию ионов меди при восстановлении.

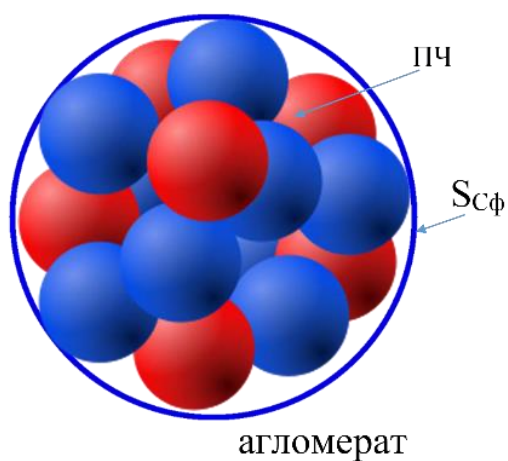


Рисунок 2 – Иллюстрация того, как рассчитать размер агломерации наночастиц, который получили после обработки на программе Gwyddion

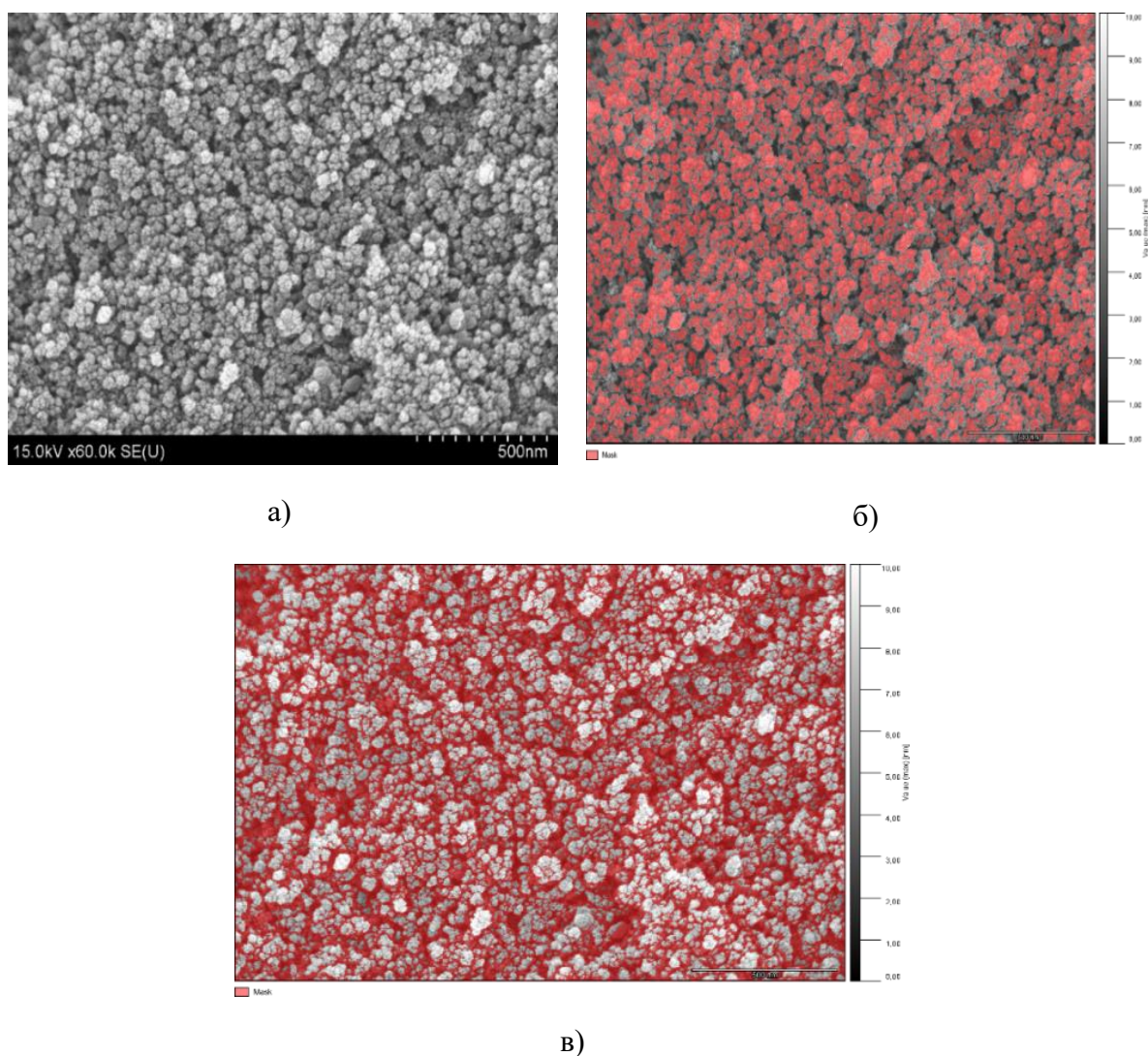
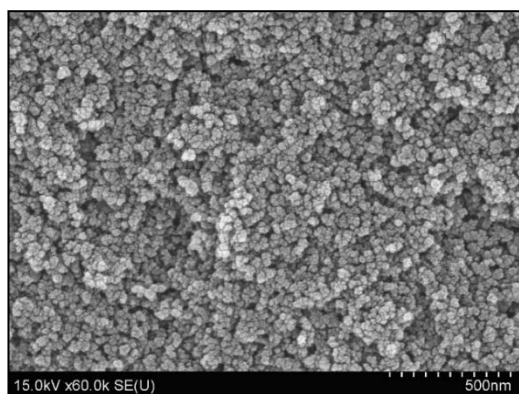
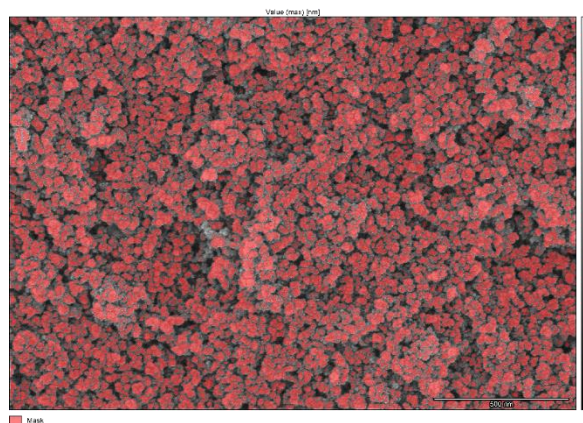


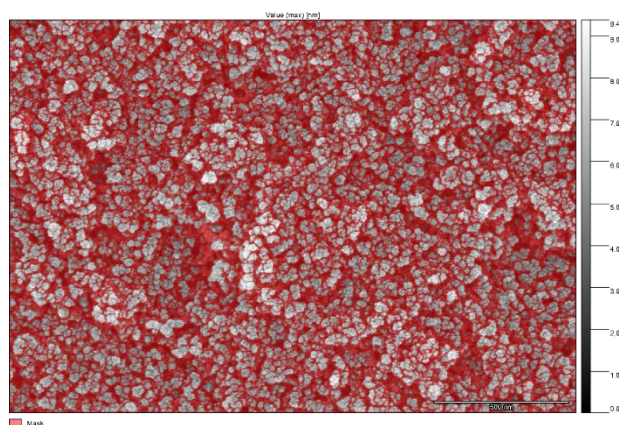
Рисунок 3 – Анализа СЭМ-изображения, обработанного программой Gwyddion ксерогеля (термообработан на воздухе при $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1 час, концентрация меди 0,40 моля на содержания 1 моль SiO_2): (а) – исходное СЭМ изображение; (б) – изображение исследуемого образца с зёрнами, покрытыми «маской»; (в) – изображение инвертированной «маски» для поверхности исследуемого образца



а)



б)



в)

Рисунок 4 – Анализа СЭМ-изображения, обработанного программой Gwyddion ксерогеля (термообработан в среде водорода при $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1 час, концентрация меди 0,40 моля на содержания 1 моль SiO_2): (а) – исходное СЭМ изображение; (б) – изображение исследуемого образца с зёрнами, покрытыми «маской»; (в) – изображение инвертированной «маски» для поверхности исследуемого образца

Полученные результаты свидетельствуют о том, что восстановленный металл сорбируется в структуру SiO_2 -глобул, образуя металлическую оболочку с градиентом концентрации. Модифицированные ксерогели и микропорошки демонстрируют эффективное распределение веществ-допантов и высокую однородность концентрации восстановленного металла. Методы золь-гель синтеза, включая применение аэросилов, находят широкое применение в производстве керамических и оптических материалов, что способствует повышению температуры спекания и достижению монолитного стеклообразного состояния.

Результаты компьютерной обработки изображений показали, что средний размер наночастиц в порошке $\text{SiO}_2\text{:CuO}$ составляет 17–35 нм, что соответствует данным из литературы. На основе этих данных можно предположить, что происходит сорбция восстановленного металла в структуру SiO_2 -глобул с проявлением 2D-наноэффекта, выражающегося в образовании оболочки металла на поверхности SiO_2 .

Модифицированные ксерогели и микропорошки, полученные таким образом, обеспечивают эффективное распределение веществ-допантов и высокую однородность концентрации восстановленного металла по всей глубине формируемых матриц. Методы

получения золь-гель коллоидных систем с использованием аэросилов активно применяются для создания керамических и оптических материалов, что приводит к значительному повышению температуры спекания до монолитного стеклообразного состояния.

Для определения фазового состава были проанализированы рентгенограммы исходных веществ и композиционных материалов, созданных на основе водной дисперсии аэросила А-380 и нитрата меди, отожжённого на воздухе и в среде водорода при 800 °С в течение 1 часа. Дифрактограммы микропорошков SiO₂-ксерогелей подтверждают, что SiO₂ сохраняет аморфное состояние, в то время как CuO и Cu⁰ обладают моноклинной кристаллической сингонией.

Литература

1. Structural properties of micropowders composition SiO₂ : CuO & SiO₂ : Cu⁰ prepared by sol-gel method / M. F. S. H. AL-Kamali [et al.] // Al-Andalus Journal of Applied Sciences. – 2021. – Vol. 8, № 13 (Jan.–Jun.). – P. 99–117.
2. Аль-Камали, М. Ф. С. Х. Структурообразование SiO₂-ксерогелей, содержащих соединения меди различного фазового состава / М. Ф. С. Х. Аль-Камали, А. А. Алексеенко, О. А. Титенков // 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]. – Режим доступа: <http://gwyddion.net/documentation/user-guide-ru/presentations-masks.html>. – Дата доступа: 27.08.2021.
4. An, V. Optical and AFM studies on p-SnS thin films deposited by magnetron sputtering / V. An, M. Dronova, A. Zakharov // Chalcogenide Letters – 2015. – Vol. 12, № 9. – P. 483–487.

Г. А. Баевич, Е. А. Ковалев, Ю. В. Никитюк, А. В. Максименко, П. П. Усов
Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины,
г. Гомель, Республика Беларусь

УСТРОЙСТВО ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКОЙ

В настоящее время особое внимание привлекает 3D-печать металлических изделий с использованием метода лазерной наплавки. Эта технология предоставляет уникальные возможности для создания сложных геометрических форм и деталей с высокими эксплуатационными характеристиками, которые трудно получить традиционными методами. Такие отрасли, как авиация, автомобилестроение и медицина, проявляют все больший интерес к применению 3D-печати для решения задач, связанных с разработкой новых компонентов, ремонтом и модификацией существующих изделий. Для широкого внедрения данной технологии в промышленность остается ряд актуальных вопросов, связанных с созданием и совершенствованием оборудования для лазерной наплавки, а также с обеспечением стабильности и качества печати. Разработка устройств для 3D-печати, способных обеспечить высокую точность и повторяемость результатов, становится ключевым направлением исследований в области аддитивных технологий [1–5].

В этой связи актуальность создания эффективных, надежных и доступных устройств для лазерной наплавки металлических изделий представляется крайне высокой. Разработанное авторами [6] устройство для 3D-печати металлических изделий лазерной наплавкой (рисунки 1, 2) содержит несущую часть 1, технологический стол 2,