

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ****TECHNICAL SCIENCES**

УДК 666.9-127+537.533.35

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-348-355>

Поступило в редакцию 19.02.2022

Received 19.02.2022

**М. Ф. С. Х. Аль-Камали<sup>1</sup>, А. А. Бойко<sup>1</sup>, Х. А. С. Аль-Шаамири<sup>2,3</sup>**<sup>1</sup>*Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого,  
Гомель, Республика Беларусь*<sup>2</sup>*Университет Биша, Биша, Саудовская Аравия*<sup>3</sup>*Таузский университет, Тауз, Йемен***МИШЕНИ SiO<sub>2</sub> : CuO (Cu<sup>0</sup>) ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК  
ИОННО-ЛУЧЕВЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ, ПОЛУЧЕННЫЕ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДОМ***(Представлено академиком Н. К. Мышкиным)*

**Аннотация.** Проведены исследования особенностей структурообразования композиционных неорганических материалов, формируемых на основе диоксида кремния, а именно – пирогенного кремнезема марки А-380 (техническое название – аэросил). Изучена возможность улучшения однородности распределения вводимых веществ-допантов по поверхности SiO<sub>2</sub>-глобул, образующих каркас ксерогеля. Указанная цель достигалась за счет однородности распределения легирующих солей (на примере нитрата меди) еще на стадии формирования золя, который переводился в состояние ксерогеля в результате последовательной термообработки в контролируемой газовой среде (на воздухе или осушенном водороде). Полученные материалы затем размалывали до состояния высокодисперсных микропорошков. Из порошков формовали мишени в виде таблеток требуемого размера методом одноосного пресования. Конечная форма образцов представляла собой или микропорошки, или таблетированные заготовки, полученные на их основе – диаметром порядка 12,5; 2,50; 30; 40 и 80 мм и фазового состава SiO<sub>2</sub>:CuO и SiO<sub>2</sub>:Cu<sup>0</sup>.

**Ключевые слова:** ксерогель, микропорошки, термообработка, газовая среда, восстановление, морфология поверхности

**Для цитирования.** Аль-Камали, М. Ф. С. Х. Мишени SiO<sub>2</sub> : CuO (Cu<sup>0</sup>) для нанесения тонких пленок ионно-лучевым распылением, полученные золь-гель методом / М. Ф. С. Х. Аль-Камали, А. А. Бойко, Х. А. С. Аль-Шаамири // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 3. – С. 348–355. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-348-355>

**Marwan F. S. H. Al-Kamali<sup>1</sup>, Andrei A. Boika<sup>1</sup>, Hamdan A. S. Al-Shamiri<sup>2,3</sup>**<sup>1</sup>*Sukhoi State Technical University of Gomel, Gomel, Republic of Belarus*<sup>2</sup>*University of Bisha, Bisha, Saudi Arabia*<sup>3</sup>*Taiz University, Taiz, Yemen***SiO<sub>2</sub> : CuO (Cu<sup>0</sup>) TARGETS FOR DEPOSITING THIN FILMS  
OF ION-BEAM SPRAYING OBTAINED BY SOL-GEL METHOD***(Communicated by Academician Nikolay K. Myshkin)*

**Abstract.** Studies of the structure formation features of composite inorganic materials formed on the basis of silicon dioxide, namely, pyrogenic silica of the A-380 brand (technical name – aerosil). The main purpose of the research was to study the possibility of improving the uniformity of the distribution of injected dopants on the surface of SiO<sub>2</sub> globules forming the xerogel framework. This goal was achieved due to the uniformity of the distribution of alloying salts (for example, copper nitrate) at the stage of sol formation, which was converted to the state of xerogel as a result of sequential heat treatment in a controlled gas environment (air or dried hydrogen). The final shape of the samples was either micro-powders or tablet-shaped blanks obtained on their basis – with a diameter of about 12.5; 2.50; 30; 40 and 80 mm and a phase composition of SiO<sub>2</sub> : CuO and SiO<sub>2</sub> : Cu<sup>0</sup>.

**Keywords:** xerogel, micro-powders, heat treatment, gas medium, restoration, surface morphology

**For citation.** Al-Kamali M. F. S. H., Boika A. A., Al-Shamiri H. A. S.  $\text{SiO}_2 : \text{CuO}$  ( $\text{Cu}^0$ ) targets for depositing thin films of ion-beam spraying obtained by sol-gel method. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2022, vol. 66, no. 3, pp. 348–355 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-348-355>

**Введение.** Одним из основных требований получения методами напыления в вакууме покрытий с оптимальной однородностью является высокая степень гомогенности гранулометрического и химического состава исходной мишени. Как было показано в [1], покрытия оптического качества и однородной стехиометрии получают только в режиме сильного «отравления» материала мишени при малой скорости распыления (т. е. когда на поверхности мишени находится тонкий слой диэлектрика). В нашем случае, используя для ее создания компоненты химической чистоты не ниже марки «осч», а также аэросил (в качестве матрицы-носителя веществ-допантов), становится возможным распределять легирующие добавки с однородностью на молекулярном уровне, сорбируя их на поверхность глобулы аэросила (пирогенного кремнезема) в виде тонкого слоя нанометровой толщины.

Пирогенный кремнезем является химически нейтральным материалом и может быть достаточно успешно применен при получении инертных матриц-носителей ряда веществ (в нашем случае в качестве исходного вещества-допанта выступал нитрат меди). Последующая термическая обработка таких материалов (ксерогелей, содержащих нитрат меди  $\text{Cu(II)}$ ) в контролируемой газовой среде позволяла проводить реакции химической трансформации соли меди в ее оксид или восстановленную до металла, без реакции взаимодействия с  $\text{SiO}_2$ -матрицей [2]. Подобные методы прямого восстановления в водороде солей металлов до состояния наночастиц описаны в [3]. Фактически, в структуре системы открытых и закрытых пор ксерогеля, как в нанореакторах, осуществляются реакции по получению оксида или металлической меди с последующей локализацией формирующейся фазы в виде агломератов микро- и наночастиц соответствующих соединений металла. В частности, достаточно эффективно на основе мезопористого материала типа кремнезем SBA-15, имеющий гексагонально-упорядоченный массив цилиндрических пор ( $d = 6\text{--}27$  нм). В порах SBA-15 был реализован синтез наночастиц железа путем трансформации хлорида железа (III) в его оксид и восстановления до металла в токе водорода при  $600$  °C [4].

Целью проведенных научных исследований являлось изучение технологического процесса получения пористых  $\text{SiO}_2$ -матриц, сформированных золь-гель методом на основе водной дисперсии аэросила марки А-380 и допированных ионами меди.

**Материалы и методы исследования.** Для получения мишеней использовался высокодисперсный кремнезем марки А-380, синтезированный в процессе гидролиза тетраоксида кремния в токе кислородно-водородного пламени при  $T > 1000$  °C. Порошок аэросила содержат в себе примеси воды, хлористого водорода, некоторых оксидов и твердые крупные частицы двуоксида кремния (грит) [5]. На поверхности частиц диоксида кремния обычно находятся силанольные группы, тогда как связи  $\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{Si}\equiv$  локализованы внутри частиц. Ионы меди вводились в виде водорастворимой соли – нитрата меди  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ .

На первом этапе технологического процесса проводилось формирование золя, потом геля на его основе и, соответственно, ксерогеля. Вещества-допанты вводились в жидкий золь в виде водорастворимых солей заданной концентрации (в нашем случае использовался нитрат меди). Гелирование золя (чистого и содержащего медь) осуществлялось в открытых пластиковых формах на воздухе. Сушка сформировавшихся гелей проводилась в вентилируемом термошкафу при  $T = 80$  °C. Для гомогенизации распределения веществ-допантов по объему конечных изделий было предложено проводить размалывание ксерогельных заготовок до порошков микронного и субмикронного размеров. Предполагалось, что в общем случае на их основе возможно получить композиционные заготовки различного геометрического профиля – путем компактирования с применением метода одноосного прессования. В процессе проведения синтеза соединений меди заданного стехиометрического состава, сформированные ксерогели подвергали поэтапной термообработке на воздухе (формировался композиционный материал  $\text{SiO}_2 : \text{CuO}$ ), а затем в среде осушенного водорода (степень чистоты газа соответствовала марке «осч») осуществлялся

синтез композиционных материалов состава  $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^0$ . Окончательные фазовые превращения в формируемых композиционных материалах проводились или на воздухе, или в среде водорода при  $T = 800^\circ\text{C}$  (время выдержки синтезируемых микропорошков при указанной температуре составляло 1 ч). Полученные материалы затем размалывали до состояния высокодисперсных микропорошков. Из порошков формовали мишени в виде таблеток требуемого размера методом одноосного прессования. В качестве временной связки применялся водный раствор поливинилового спирта концентрацией 3–6 мас. % (концентрация зависела от типа конечного изделия и режима прессования). Давление в гидравлической системе пресса при получении образцов мишеней составляло порядка 120–125 кг/см<sup>2</sup>. Таким образом были сформированы двойные металлооксидные системы состава  $\text{SiO}_2 : \text{CuO}$  и  $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^0$ , содержащие медь в атомном отношении  $\text{Si} : \text{Cu} = 1 : 0,05; 1 : 0,1; 1 : 0,15; 1 : 0,5$  и предназначенные для получения таблетированных мишеней, применяемых при магнетронном распылении в вакууме [1; 6; 7]. На рис. 1 приводится принципиальная схема получения тонкодисперсных микропорошков состава  $\text{SiO}_2 : \text{CuO}$  и  $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^0$ .



Рис. 1. Основные этапы получения микропорошков составов  $\text{SiO}_2 : \text{CuO}$  и  $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^0$

Fig. 1. Schematic diagram and main stages of obtaining micropowders of the composition  $\text{SiO}_2 : \text{CuO}$  and  $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^0$

**Результаты и их обсуждение.** Методом рентгенофазового анализа изучались фазовые превращения, протекающие в материалах разработанного состава, а методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) – изменение морфологии поверхности внутри синтезированных ксерогельных заготовок. Установлено, что восстановленная медь, фактически, модифицирует внутреннюю структуру ксерогеля, образуя так называемое покрытие по всей поверхности  $\text{SiO}_2$ -глобул. Наблюдаемый эффект, вероятно, связан с высокой концентрацией нитрата меди, вводимого в исходный  $\text{SiO}_2$ -золь (соотношение атомов  $\text{Si} : \text{Cu} = 1 : 1, 2 : 1, 3 : 1, 4 : 1$  и т. д.), а также высокой сорбционной способностью самой ксерогельной матрицы [4–6].

В общем случае, как для оксида меди, так и для восстановленной до металла формы, наблюдалась достаточно однородная картина распределения веществ-допантов по внутренней структуре  $\text{SiO}_2$ -каркаса ксерогеля. Необходимо отметить, что отдельного образования микро- и наночастиц при указанном разрешении исследования морфологии поверхности ксерогелей методом СЭМ не обнаружено, однако восстановленная медь, вероятно, формирует 2D-покрытие по всей внутренней поверхности ксерогеля. Так, авторами работы [8] продемонстрирована возможность управления химическими связями на поверхности наночастиц благородного металла (для  $\text{Ag}^0$ ). Нельзя исключать, что это покрытие может иметь структуру, сформировавшуюся из агломера-

тов частиц металла нанометрового размера, что будет являться целью наших последующих исследований. Гипотезу о формировании системы «ядро–оболочка» подтверждают данные просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), полученные для композиционных материалов состава  $\text{SiO}_2 : \text{CuO}$  (рис. 2). Также интересны конечные функциональные (сенсорные) свойства подобных материалов, проявляемые, например, для пористых стекол, содержащих наночастицы серебра [9].

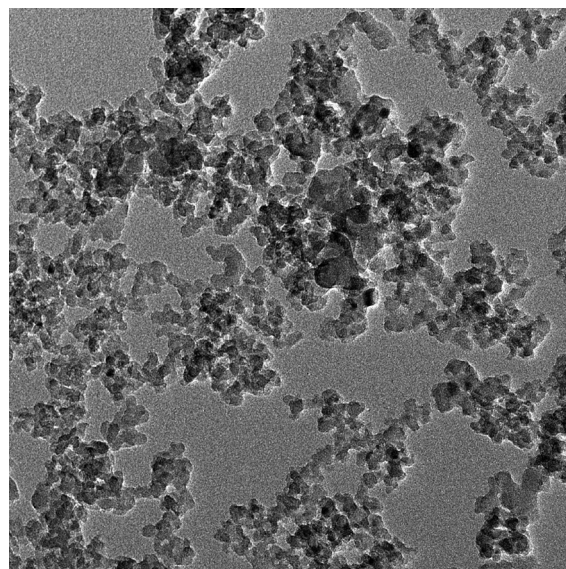
Все исходные микропорошки были получены с достаточно хорошей гомогенностью по составу, но при обработке в водороде наблюдались так называемые поверхностные эффекты, связанные с разницей в процессах восстановления открытой поверхности и поверхности, находящейся в непосредственном контакте со стенкой фарфоровой лодочки, в которую были помещены таблетированные мишени. Визуально это проявлялось в четко видимом цветовом градиенте – присутствовали контрастные зоны окрашивания в красный, ярко красный, пурпурный и т. д. цвета. Решением этой проблемы может стать формовка мишеней из микропорошков, уже прошедших восстановительную обработку в водороде и спеченных далее в нейтральной газовой среде (например, в аргоне).

Изучение морфологии поверхности синтезированных образцов проводилось для центральной части разломанного  $\text{SiO}_2$ -ксерогеля указанного на рисунках состава, на растровом электронном микроскопе модели S-4800 (производства фирмы Hitachi, Япония) с разрешением 1 нм. Исследования проводились сотрудниками НТЦ «Белмикросистемы» филиала «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

С целью изучения характера взаимодействия веществ-допантов с поверхностью глобул  $\text{SiO}_2$ -каркаса ксерогеля были приготовлены три типа образцов, предназначенных для исследования морфологии их поверхности методом СЭМ:  $\text{SiO}_2 : \text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{SiO}_2 : \text{CuO}$  и  $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^0$  (рис. 3).

Видна четко выраженная глобулярная структура ксерогелей и высокая однородность их исходной морфологии, причем крупные глобулярные агрегаты, формирующие каркас ксерогеля, образованы, в свою очередь, первичными частицами аэросила, имеющими гораздо меньший размер (для А-380 – порядка 5–15 нм, согласно имеющимся паспортным данным). Из-за высокой степени гидратации соль нитрата меди буквально «забивает» межглобулярное и межпоровое пространство ксерогеля (рис. 3, *a*). Формирование на основе таких ксерогелей матриц состава  $\text{SiO}_2 : \text{CuO}$  снова возвращает «рельеф» структуре ксерогеля, что говорит о взаимной химической инертности фаз  $\text{SiO}_2$  и  $\text{CuO}$  (рис. 3, *b*). Трансформация оксида меди  $\text{Cu}(\text{II})$  в состояние восстановленного металла «выравнивает» общую структуру ксерогеля (рис. 3, *c*, микрофотография для шкалы увеличения в 0,3 мкм).

Вероятно, что в этом случае происходит сорбция восстановленного металла в структуру  $\text{SiO}_2$ -глобул с проявлением так называемого 2D-нанозффекта – в виде образования оболочки металла на  $\text{SiO}_2$ -поверхности (с градиентом концентрации от внешнего к внутреннему слою). Можно сделать предположение о том, что модифицированные подобным образом ксерогели и микропорошки из этих ксерогелей будут обладать наиболее эффективным распределением веществ-допантов, что позволит создавать на их основе таблетированные материалы, обладающие оптимальной однородностью распределения концентрации восстановленного металла по всей глубине формируемых матриц. Подобные методы получения золь-гель коллоидных систем



1-SiO<sub>2</sub>:CuO  
Print Mag: 478000x @ 7.0 in  
4:12:44 p  
20 nm  
HV=200.0kV  
Direct Mag: 60000x  
USIF-AMU

Рис. 2. ПЭМ-изображение для микропорошка ксерогеля состава  $\text{SiO}_2 : \text{CuO}$ , термообработка на воздухе при  $T = 800^\circ\text{C}$  в течение 1 ч

Fig. 2. TEM image for micro-powder of xerogel composition  $\text{SiO}_2 : \text{CuO}$ , heat treatment in air at  $T = 800^\circ\text{C}$  for 1 h

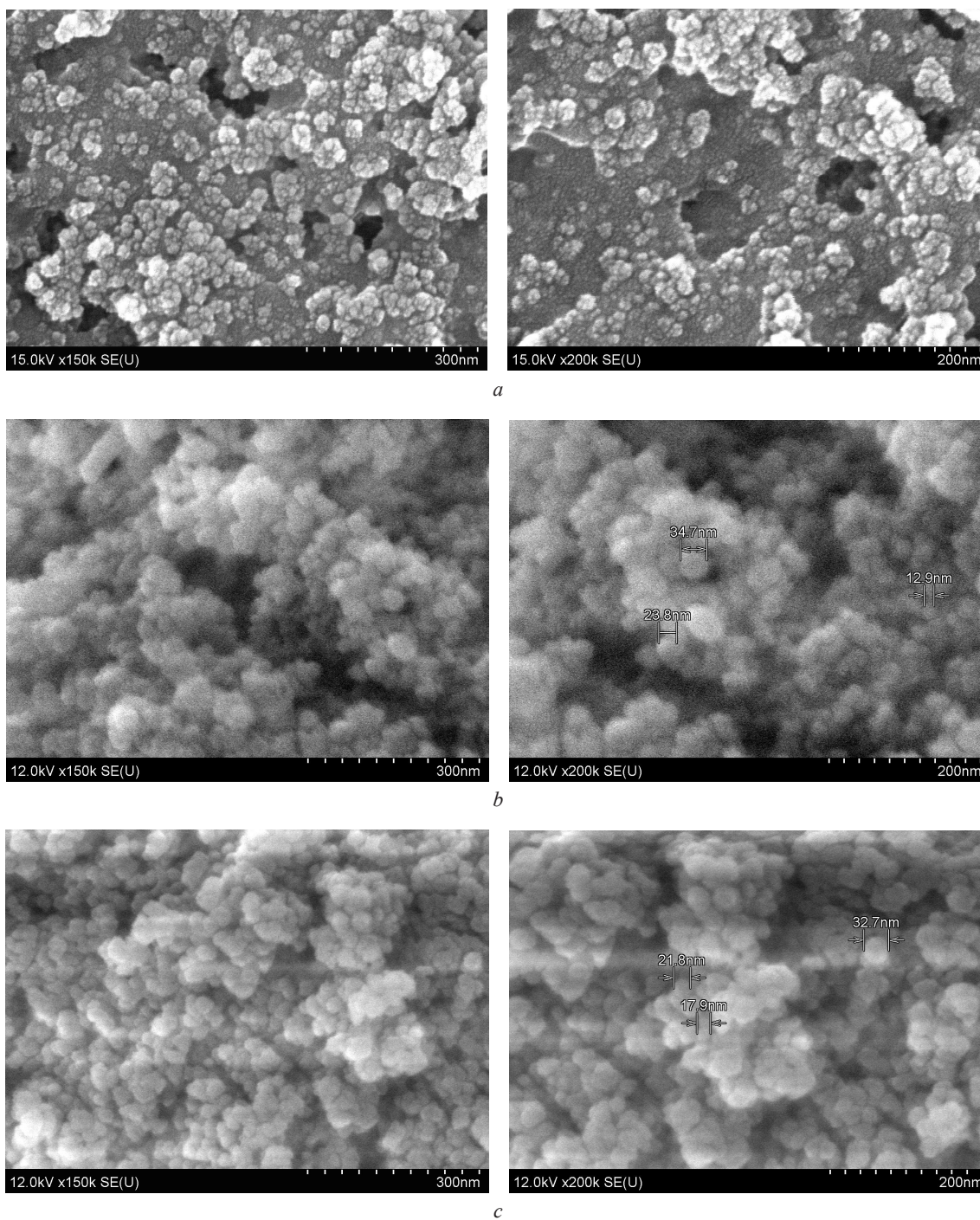


Рис. 3. SEM-изображения поверхности ксерогеля, сформированного на основе водной дисперсии аэросила А-380 и нитрата меди. Концентрация нитрата меди относительно содержания 1 моля  $\text{SiO}_2$  в 79 мл золя 0,40 мол. % нитрат меди: *a* – сушка в течение 7 дней при температуре  $T = 80$  °C. Фазовый состав ксерогеля –  $\text{SiO}_2 : \text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ; *b* – отжиг на воздухе при  $T = 800$  °C в течение 1 ч. Фазовый состав ксерогеля –  $\text{SiO}_2 : \text{CuO}$ ; *c* – отжиг в среде водорода при  $T = 800$  °C в течение 1 ч. Фазовый состав ксерогеля –  $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^\circ$

Fig. 3. SEM-images of the surface of a xerogel formed on the basis of an aqueous dispersion of aerosilaerosil A-380 and copper nitrate. The concentration of copper nitrate relative to the content of 1 mole of  $\text{SiO}_2$  in 79 ml of sol is 0.40 mol. % copper nitrate: *a* – drying for 7 days at a temperature of  $T = 80$  °C. Phase composition of xerogel is  $\text{SiO}_2 : \text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ; *b* – annealing in air at  $T = 800$  °C for 1 h. The phase composition of the xerogel is  $\text{SiO}_2 : \text{CuO}$ ; *c* – annealing in a hydrogen medium at  $T = 800$  °C for 1 h. The phase composition of the xerogel is  $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^\circ$

(с применением аэросилов) в настоящее время достаточно широко используются для создания керамических или оптических материалов [10; 11], причем подчеркивается наличие в используемых твердых наполнителях собственной системы пор [12], что приводит к существенному повышению температуры спекания гелей и ксерогелей до монолитного стеклообразного состояния.

Для исследования фазового состава поверхности синтезированных образцов проводилось для центральной части  $\text{SiO}_2$ -ксерогелей, для синтезированных образцов наноструктурированных микропорошков методами рентгенодифракционного анализа с помощью рентгеновского многофункционального дифрактометра GNR APD 2000 PRO исследования проводились сотрудниками «БелЦЗМ» Института механики металлополимерных систем им. В. А. Белого.

Для определения фазового состава представлены рентгенограммы как исходных веществ, так и композиционных материалов, сформированного на основе водной дисперсии аэросила А-380 и нитрата меди (отожженного на воздухе, а затем в среде водорода при  $T = 800\text{ }^\circ\text{C}$ , 1 ч). На рис. 4 представлены дифрактограммы микропорошков  $\text{SiO}_2$ -ксерогелей, сформированных на основе водной дисперсии аэросила А-380 и нитрата меди (отожженного на воздухе, а также в среде водорода при  $T = 800\text{ }^\circ\text{C}$ , 1 ч). Видно, что в составе микропорошок  $\text{SiO}_2$  сохраняет аморфное состояние, а  $\text{CuO}$  и  $\text{Cu}^0$  сохраняет моноклинную кристаллическую сингонию. Это было отмечено авторами [13].

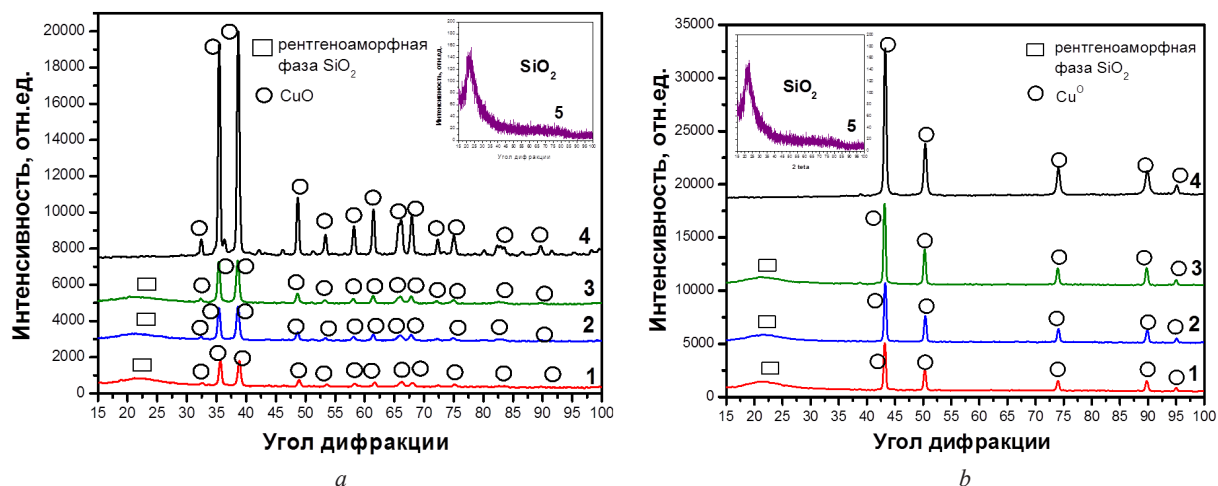


Рис. 4. Дифрактограммы ксерогеля, сформированного на основе водной дисперсии аэросила А-380 и нитрата меди. Концентрация ионов меди относительно содержания 1 моля  $\text{SiO}_2$ : 1 – 0,20 мол. %; 2 – 0,30 мол. %; 3 – 0,40 мол. %; 4 – эталонный спектр оксида меди (а) и металлической меди (б) степени химической чистоты «чда»; 5 – чистый  $\text{SiO}_2$ -ксерогель, отожженный на воздухе: а – отожженного на воздухе при  $T = 800\text{ }^\circ\text{C}$ , 1 ч; б – отожженного на воздухе, а затем в среде водорода при  $T = 800\text{ }^\circ\text{C}$ , 1 ч

Fig. 4. X-ray diffractograms of a xerogel formed on the basis of an aqueous dispersion of aerosil A-380 and copper nitrate. The concentration of copper ions relative to the content of 1 mole of  $\text{SiO}_2$ : 1 is 0.20 mol. %; 2 – 0.30 mol. %; 3 – 0.40 mol. %; 4 – reference spectrum of copper oxide (a) and metallic copper (b) degree of chemical purity «чда»; 5 – pure  $\text{SiO}_2$ -xerogel annealed in air: a – annealed in air at  $T = 800\text{ }^\circ\text{C}$ , 1 h; b – annealed in air, and then in a hydrogen medium at  $T = 800\text{ }^\circ\text{C}$ , 1 h

Общее (и изначально высокое) количество вещества-допанта «размазывается» по их поверхности, не позволяя установить механизм фазообразования в реакциях окисления или восстановления, протекающих для исходной соли меди, взятой в виде ее нитрата и введенной в структуру ксерогеля.

Подтверждением данного предположения служит тот факт, что 1 г аэросила марки А-380, который использовался для приготовления золя, по паспортным данным обладает удельной поверхностью порядка  $380\text{ м}^2/\text{г}$ . Для всех видов  $\text{SiO}_2$ -ксерогелей, полученных на основе таких наполнителей, сохраняется как глобулярная структура, так и наличие системы закрытых и открытых пор [4; 14; 15].

**Заключение.** В результате проведенных исследований получены следующие научно-технические результаты:

показано, что в общем случае, наночастицы металлов в матрице ксерогеля представляют собой наноструктурированные объекты, обладающие высокой химической и «проникающей» активностью относительно протекания термически стимулированных поверхностных реакций;

разработаны технологические приемы синтеза композиционных ксерогельных заготовок состава  $\text{SiO}_2 : \text{CuO}$  и  $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^0$ . Сделаны предположения по оптимизации однородности распределения веществ-допантов по структуре  $\text{SiO}_2$ -матрицы (путем ее размола до состояния микропорошков) и методах формирования на основе веществ разработанного состава композиционных заготовок заданной геометрической формы;

методом СЭМ изучен механизм распределения соединений меди по структуре формируемых ксерогелей. Установлено, что условия сушки и последующей термообработки  $\text{SiO}_2$ -матрицы в контролируемой газовой среде позволяют перераспределять концентрацию вводимой меди по объему ксерогельной заготовки;

показано, что в фазовый состав композита сохраняет  $\text{SiO}_2$ -матрицу в аморфном состоянии, а  $\text{CuO}$  и  $\text{Cu}^0$  сохраняет моноклинную кристаллическую сингонию.

Таким образом, наиболее значимой областью практического применения высокопористых  $\text{SiO}_2$ -порошков, допированных отдельно локализованными микро- и наночастицами восстановленных металлов, это мишени для нанесения покрытий методами электронно-лучевого или магнетронного напыления.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках задания 2.2.6 ГПНИ «Конвергенция-2025» (подпрограмма «Микромир, плазма и Вселенная»), финансируемого из средств республиканского бюджета по государственным программам научных исследований на 2021–2025 гг. в Республике Беларусь.

**Acknowledgements.** The work was carried out within the framework of task 2.2.6 of the state research program “Convergence-2025” (subprogram “Microcosm, plasma and the Universe”), funded from the republican budget for state research programs for 2021–2025 in the Republic of Belarus.

### Список использованных источников

1. Вольпян, О. Д. Магнетронное нанесение оптических покрытий при питании магнетронов переменным напряжением средней частоты / О. Д. Вольпян, А. И. Кузьмичев // Прикладная физика. – 2008. – № 3. – С. 34–52.
2. Investigation of sol-gel processed  $\text{CuO}/\text{SiO}_2$  nanocomposite as a potential photoanode material / T. Tenkyong [et al.] // Materials Science-Poland. – 2015. – Vol. 33, N 4. – P. 826–834. <https://doi.org/10.1515/msp-2015-0097>
3. Порозова, С. Е. Получение наночастиц и наноматериалов: учеб. пособие / С. Е. Порозова, В. Б. Кульметьева. – Пермь, 2010. – 135 с.
4. Подденежный, Е. Н. Золь-гель синтез оптического кварцевого стекла / Е. Н. Подденежный, А. А. Бойко. – Гомель, 2002. – 210 с.
5. Арбенин, А. Ю. Синтез наночастиц железа в порах мезопористого кремнезема SBA-15 и анализ химического состава / А. Ю. Арбенин, Е. Г. Земцова, В. М. Смирнов // Вестн. СПбГУ: Физика и химия. – 2012. – Вып. 4. – С. 136–138.
6. Вилья, Н. Формирование пленок оксида титана методом реактивного магнетронного распыления / Н. Вилья, Д. А. Голосов, Т. Д. Нгуен // Доклады БГУИР. – 2019. – № 5(123). – С. 87–93. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2019-123-5-87-93>
7. Андрусишина, И. Н. Наночастицы металлов: способы получения, физико-химические свойства, методы исследования токсикологичности / И. Н. Андрусишина // Современные проблемы токсикологии. – 2011. – № 3. – С. 5–14.
8. Оленин, А. Ю. Химическое модифицирование поверхности наночастиц серебра. Получение частиц-янусов / А. Ю. Оленин, Т. Р. Низамов, Г. В. Лисичкин // Рос. нанотехнологии. – 2014. – Т. 9, № 9–10. – С. 19–24.
9. Porous glasses with silver nanoparticles as the sensitive material for sensors to measure the index of refraction of analytes / A. S. Pshenova [et al.] // Journal of Optical Technology. – 2016. – Vol. 83, N 7. – P. 438–440. <https://doi.org/10.1364/jot.83.000438>
10. Аль-Камали, М. Ф. С. Х. Структурообразование  $\text{SiO}_2$ -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.
11. Алексеенко, А. А. Синтез и свойства ксерогелей состава  $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^0$ , предназначенных для применения в биомедицинских исследованиях / А. А. Алексеенко, М. Ф. С. Х. Аль-Камали, О. А. Титенков // Вестн. ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2020. – № 3–4. – С. 40–47.
12. Preparation of Cu- $\text{SiO}_2$  composite aerogel by ambient drying and the influence of synthesizing conditions on the structure of the aerogel / G. A. Li [et al.] // Chinese Science Bulletin. – 2011. – Vol. 56, N 7. – P. 685–690. <https://doi.org/10.1007/s11434-011-4413-3>
13. Theivasanthi, T. X-Ray Diffraction Studies of Copper Nanopowder / T. Theivasanthi, M. Alagar // Scholars Research Library, Archives of Physics Research. – 2010. – Vol. 1, N 2. – P. 112–117.

14. Малявский, Н. И. Золь-гель синтез ортосиликатов / Н. И. Малявский, Б. В. Покидько // Вестн. МГСУ. – 2012. – № 8. – С. 131–138.

15. Tohidi, S. H. Comparison nanostructure behavior of copper species on the silica matrix xerogels / S. H. Tohidi // IJE Transactions B: Applications. – 2011. – Vol. 24, N 2. – P. 147–153.

## References

1. Volpian O. D., Kuzmichev A. I. Magnetron deposition of optical coatings with magnetron power supply by mid-frequency alternative voltage. *Prikladnaya Fizika = Applied Physics*, 2008, no. 3, pp. 34–52 (in Russian).

2. Tenkyong T., Bachan N., Raja J., Kumar P. N., Shyla J. M. Investigation of sol-gel processed CuO/SiO<sub>2</sub> nanocomposite as a potential photoanode material. *Materials Science-Poland*, 2015, vol. 33, no. 4, pp. 826–834. <https://doi.org/10.1515/msp-2015-0097>

3. Porozova S. E., Kulmets'eva V. B. *Production of nanoparticles and nanomaterials: study guide*. Perm, 2010. 135 p. (in Russian).

4. Poddenezhny E. N., Boiko A. A.. *Sol-gel synthesis of optical quartz glass*. Gomel, 2002. 210 p. (in Russian).

5. Arbenin A. Yu., Zemtsova E. G., Smirnov V. M. Synthesis of iron nanoparticles in mesoporous silica sba-15 and chemical composition analysis. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Fizika i khimiya = Vestnik of Saint Petersburg University. Physics and Chemistry*, 2012, vol. 4, pp. 136–138 (in Russian).

6. Villa N., Golosov D. A., Nguyen T. D. Formation of titanium oxide thin films by reactive magnetron sputtering. *Doklady BGUIR*, 2019, no. 5 (123), pp. 87–93 (in Russian). <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2019-123-5-87-93>

7. Andrusishina I. N. Metal nanoparticles: methods of production, physico-chemical properties, methods of toxicology research. *Sovremenyye problemy toksikologii [Modern Problems of Toxicology]*, 2011, no. 3, pp. 5–14 (in Russian).

8. Olenin A. Y., Nizamov T. R., Lisichkin G. V. Chemical modification of the surfaces of silver nanoparticles: synthesis of janus particles. *Nanotechnologies in Russia*, 2014, vol. 9, no. 9–10, pp. 467–473. <https://doi.org/10.1134/s1995078014050103>

9. Pshenova A. S., Klyukin D. A., Sidorov A. I., Andreeva O. V. Porous glasses with silver nanoparticles as the sensitive material for sensors to measure the index of refraction of analytes. *Journal of Optical Technology*, 2016, vol. 83, no. 7, pp. 438–440. <https://doi.org/10.1364/jot.83.000438>

10. Al-Kamali M. F. S. H., Alexeenko A. A., Titenkov O. A. Structure formation of SiO<sub>2</sub>-xerogels containing copper compounds of different phase composition. *Problemy fiziki, matematiki i tehniki = Problems of Physics, Mathematics and Technics*, 2020, no. 3(44), pp. 7–12 (in Russian).

11. Alekseenko A. A., Al-Kamali M. F. S. H., Titenkov O. A. Synthesis and properties of xerogels of composition SiO<sub>2</sub> : Cu<sup>o</sup>, intended for application in biomedical research. *Vestnik GGTU im. P. O. Sukhogo [Bulletin of GSTU im. P. O. Sukhoi]*, 2020, no. 3–4, pp. 40–47 (in Russian).

12. Li G. A., Zhu T. L., Deng Z. X., Zhang Y. J., Jiao F., Zheng H. R. Preparation of Cu–SiO<sub>2</sub> composite aerogel by ambient drying and the influence of synthesizing conditions on the structure of the aerogel. *Chinese Science Bulletin*, 2011, vol. 56, no. 7, pp. 685–690. <https://doi.org/10.1007/s11434-011-4413-3>

13. Theivasanthi T., Alagar M. X-Ray Diffraction Studies of Copper Nanopowder. *Scholars Research Library, Archives of Physics Research*, 2010, vol. 1, no. 2, pp. 112–117.

14. Malyavskiy N. I., Pokidko B. V. Sol-gel synthesis of orthosilicates. *Vestnik MGSU*, 2012, no. 8, pp. 131–138 (in Russian).

15. Tohidi S. H. Comparison nanostructure behavior of copper species on the silicamatrix xerogels. *IJE Transactions B: Applications*, 2011, vol. 24, no. 2, pp. 147–153.

## Информация об авторах

Аль-Камали Марван Ф. С. Х. – соискатель мл. науч. сотрудника. Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого (ул. Пр-т Октября, 48, 246029, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: marwan.ye2@gmail.com.

Бойко Андрей Андреевич – д-р техн. наук, доцент, проректор. Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого (ул. Пр-т Октября, 48, 246029, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: boiko@gstu.by.

Аль-Шамири Хамдан А. С. – д-р наук (физика), доцент. Университет Биша (Саудовская Аравия); Университет Таиз (Республика Йемен).

## Information about the authors

Al-Kamali Marwan F. S. H. – External doctorate student Junior Researcher. Sukhoi State Technical University of Gomel (48, Pr. Octiabria Str., 246029, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: marwan.ye2@gmail.com.

Boika Andrei A. – D. Sc. (Engineering), Assistant Professor, Vice Rector. Sukhoi State Technical University of Gomel (48, Pr. Octiabria Str., 246029, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: boiko@gstu.by.

Al-Shamiri Hamdan A. S. – D. Sc. (Physics), Associate Professor. Bisha University (Saudi Arabia); Taiz University (Republic of Yemen).