

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ НАНОРАЗМЕРНОГО ОКСИДА МЕДИ (II), СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ПОЛИЭТИЛЕНГЛИКОЛЕМ

А.В. Блинов¹

blinov.a@mail.ru

А.А. Гвозденко¹

gvozdenko.1999a@gmail.com

М.А. Ясная¹

jasnaja.marija@mail.ru

А.А. Блинова¹

nastya_bogdanova_88@mail.ru

А.А. Кравцов^{1,2}

sanya-kravtsov@yandex.ru

С.О. Крандиевский¹

krandik2007@gmail.com

В.Н. Крамаренко¹

cramarenkovasy@mail.ru

¹ ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»,
Ставрополь, Российская Федерация

² ЮНЦ РАН, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Аннотация

Разработана методика синтеза наночастиц оксида меди золь-гель методом, стабилизированных полиэтиленгликолем, получены образцы, исследованы их структура, морфология и свойства. Методом фотонно-корреляционной спектроскопии установлено, что наночастицы оксида меди имеют мономодальное распределение со средним гидродинамическим радиусом частиц порядка 50 нм вне зависимости от молярной массы стабилизатора. Обнаружено, что все образцы имеют полосу поглощения при 290 нм. Установлено, что образцы оксида меди состоят из агрегатов, сформированы из сферических наночастиц диаметром от 10 до 30 нм. Анализ фазового состава образцов оксида меди выявил, что образцы состоят из частиц, имеющих моноклинную структуру. Проведено моделирование процесса взаимодействия полиэтиленгликоля с оксидом меди. Показано, что наиболее энергетически выгодная модель взаимодействия включает в себя образование связей между внутримолекулярными соседними эфирными атомами кислорода и атомом меди

Ключевые слова

Оксид меди (II), полиэтиленгликоль, гидродинамический радиус, рентгенофазовый анализ, микроструктура, квантово-химическое моделирование

Поступила 27.09.2019

Принята 17.02.2020

© Автор(ы), 2020

Исследование выполнено при финансовой поддержке Совета по грантам при Президенте Российской Федерации (проект СП-1191.2019.4)

Введение. Развитие науки привело к созданию новых материалов с уникальными свойствами, которые нашли широкое применение в различных отраслях науки и техники. К таким материалам относятся различные оксиды переходных металлов, сфера применения которых включает в себя преобразование солнечной энергии, оптоэлектронику, производство газовых датчиков, катализаторов, тонкопленочных транзисторов [1–6].

Особое место среди оксидов переходных металлов занимает оксид меди (II) CuO , обладающий несколькими потенциально полезными физическими, физико-химическими и медико-биологическими свойствами. Совокупность этих и других факторов позволяет применять оксид меди как высокотемпературный сверхпроводник [7, 8], а также в производстве транзисторов [9], газовых сенсоров [10, 11], антибактериальных композитов [12–14], биосенсоров [15], он способен выступать в качестве источника эссенциального микроэлемента меди [16] и обладает противораковой активностью [17].

В настоящее время разработано большое число методов синтеза наночастиц оксида меди: электрохимическое восстановление, гидротермальное разложение в сверхкритических условиях, с помощью микроволнового излучения, термического разложения, золь-гель методом [18–24]. Среди перечисленных золь-гель метод является более экономичным и простым в реализации [21].

Материалы и методы решения задач, принятые допущения. Наночастицы оксида меди получены золь-гель методом. Прекурсором выбран $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Cu}\cdot\text{H}_2\text{O}$ (ЧДА, Михайловский завод химических реактивов, Барнаул), а в качестве стабилизатора использован полиэтиленгликоль (ПЭГ) с разной молекулярной массой 200, 1500, 4000, 6000 Da (ООО «Завод синтанолов», Дзержинск), осадитель — NaOH (ЧДА, ООО «Поволжье», Дзержинск).

Суть методики получения наноразмерного оксида меди состоит в следующем: на первом этапе смешивали $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Cu}\cdot\text{H}_2\text{O}$ и ПЭГ в водной среде для формирования комплекса ПЭГ– Cu^{2+} , затем в смесь по каплям добавляли гидроксид натрия NaOH для получения наночастиц оксида меди, далее полученный золь перемешивали в течение 30 мин, центрифугировали и высушивали при $t = 60^\circ\text{C}$.

Определение среднего гидродинамического радиуса наночастиц оксида меди (II) проведено методом динамического рассеяния света на установке *Photocor-Complex* (ООО «Антек-97», Российская Федерация). Компьютерную обработку результатов исследования осуществляли с использованием компьютерного программного обеспечения *DynaLS*.

Для определения спектров поглощения зольей наноразмерного оксида меди (II) использована оптическая спектроскопия. Все измерения выполнены на спектрофотометре *UNICO 2802 (United Products & Instruments, Ins., США)*.

Фазовый состав идентифицирован с помощью метода порошковой дифрактометрии на рентгеновском дифрактометре *PANalytical Empyrean (PANalytical B.V., Нидерланды)*.

Исследование микроструктуры и морфологии наноразмерного оксида меди, стабилизированного ПЭГ, проведено на сканирующем электронном микроскопе *MIRA-LMH* с системой определения элементного состава *AZtecEnergy Standart / X-max 20 (standard) (Tescan, Чехия)*.

Для определения наиболее энергетически выгодного типа взаимодействия молекул ПЭГ с поверхностью наночастиц оксида меди (II) выполнено моделирование в программе *QChem* с использованием молекулярного редактора *IQmol*. Все расчеты осуществлены на оборудовании центра обработки данных ФГАОУ ВО «Северо-Кавказского федерального университета» (*Schneider Electric*). Параметры моделирования: *Energy*, метод: *HF* (Хартри — Фока), базис: *6-31G*, *convergence 5*, силовое поле *Ghemical*, моделирование проводили в вакууме.

Результаты исследований и обсуждение. На первом этапе образцы наноразмерного оксида меди, стабилизированного ПЭГ с разной молекулярной массой, исследовали методом динамического рассеяния света. Одна из полученных гистограмм представлена на рис. 1.

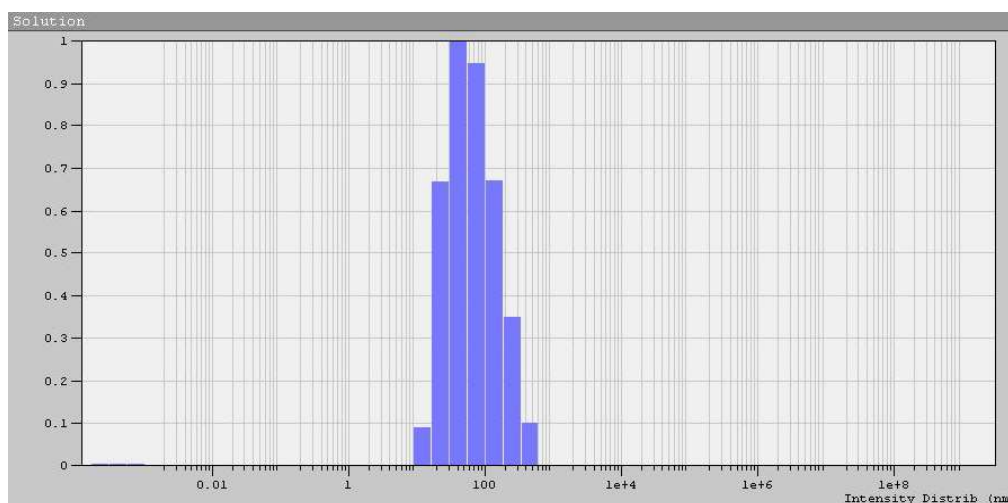


Рис. 1. Гистограмма распределения гидродинамических радиусов частиц наноразмерного оксида меди, стабилизированного ПЭГ-6000

Результаты анализа гистограмм образцов наноразмерного оксида меди показали, что частицы имеют унимодалное распределение со средним гидродинамическим радиусом порядка 50 нм в независимости от молекулярной массы стабилизатора.

На втором этапе исследованы оптические свойства зольей наноразмерного оксида меди, стабилизированного ПЭГ с различной молекулярной массой. Полученные спектры поглощения в УФ- и видимой области спектра приведены на рис. 2.

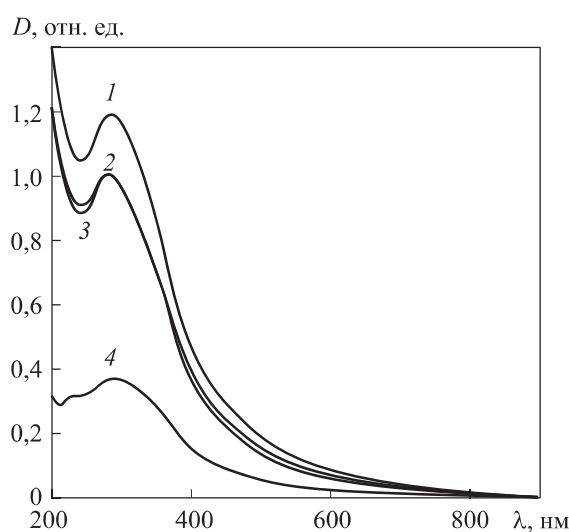


Рис. 2. Спектры поглощения зольей наноразмерного оксида меди, стабилизированного ПЭГ-6000 (1), ПЭГ-4000 (2), ПЭГ-1500 (3) и ПЭГ-200 (4)

Результаты анализа полученных данных показали наличие квантово-размерной полосы при 290 нм во всех спектрах, положение этой полосы не коррелирует с молекулярной массой стабилизатора. Однако наблюдается зависимость интенсивности указанной полосы от молярной массы ПЭГ. Наибольшей интенсивностью обладает полоса в спектре поглощения золя наночастиц оксида меди, стабилизированного ПЭГ с молярной массой 6000 Da, а наименьшей — с 200 Da. Следует отметить, что при возрастании молярной массы стабилизатора наблюдается уменьшение полуширины квантово-размерной полосы. Все перечисленные факты свидетельствуют о том, что при увеличении молярной массы ПЭГ размер кристаллитов оксида меди и их полидисперсность уменьшаются.

Результаты исследования микроструктуры образцов наноразмерного оксида меди, стабилизированного ПЭГ с различной молярной массой, представлены на рис. 3.

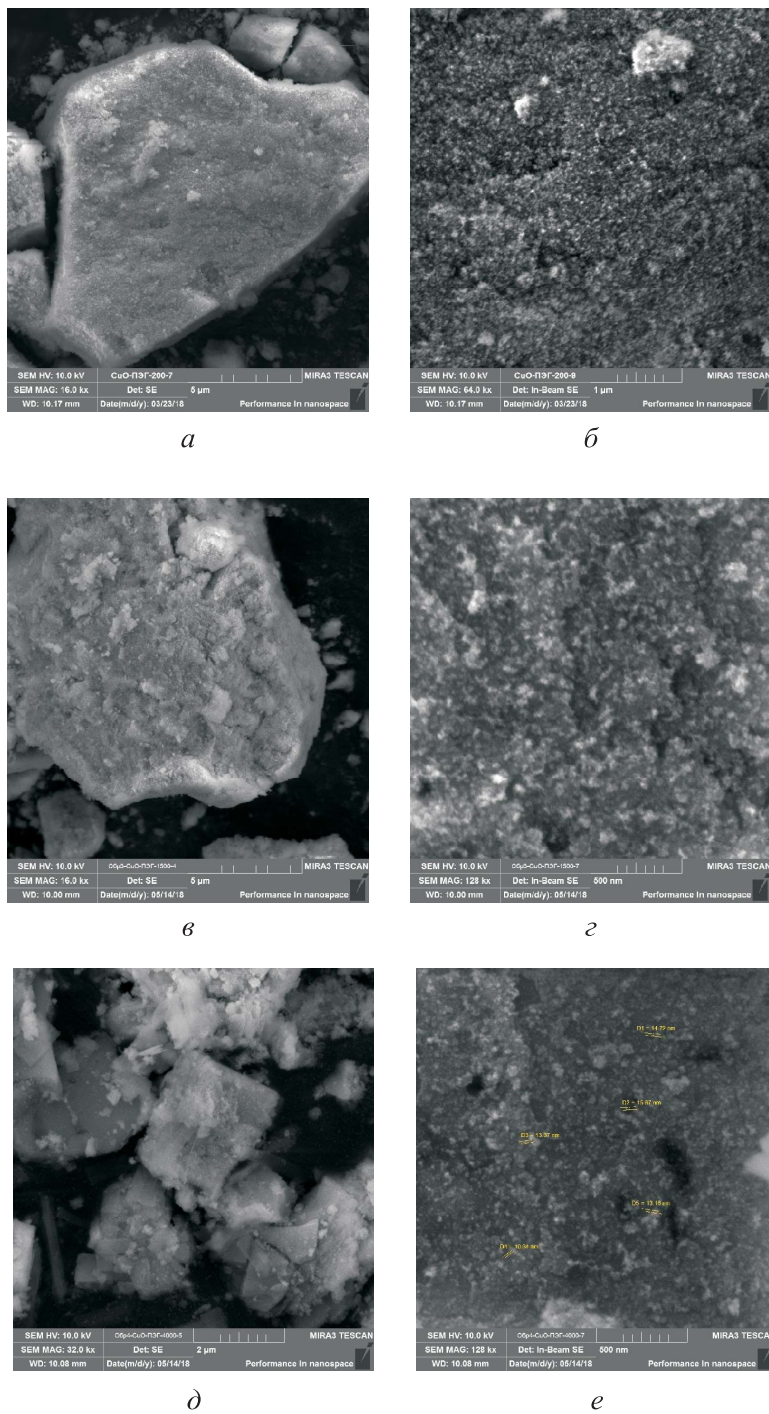


Рис. 3 (начало). Микрофотографии наноразмерного оксида меди, стабилизированного ПЭГ:
a, б — ПЭГ-200 при увеличении в 16 000 (*a*) и 64 000 раз (*б*); *в, г* — ПЭГ-1500 при увеличении в 16 000 (*в*) и 128 000 раз (*г*); *д, е* — ПЭГ-4000 при увеличении в 32 000 (*д*) и 128 000 раз (*е*)

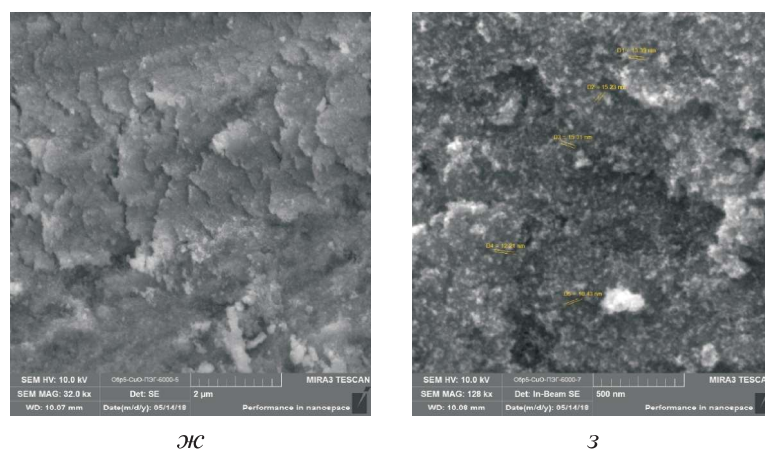


Рис. 3 (окончание). Микрофотографии наноразмерного оксида меди, стабилизированного ПЭГ:

ж, з — ПЭГ-6000 при увеличении в 32 000 (ж) и 128 000 раз (з)

Микроструктура представлена агрегатами различной формы с размерами порядка нескольких микрометров. Следует отметить, что при использовании ПЭГ с молярной массой 4000 и 6000 Да агрегаты имеют слоистую структуру. Более детальное исследование агрегатов оксида меди при увеличении разрешающей способности электронного микроскопа позволило определить следующее: агрегаты наноразмерного оксида меди сформированы из сферических наночастиц размером около 10...30 нм, размер наночастиц не коррелирует с молярной массой стабилизатора.

Полученные образцы наноразмерного оксида меди (II) исследованы с помощью рентгенофазового анализа. Дифрактограммы всех образцов представлены на рис. 4. Установлено, что наночастицы полученных образцов оксида меди имеют моноклинную структуру; наблюдается уширение полос, характерное для наноразмерного состояния.

На третьем и последнем этапе определен энергетически выгодный тип взаимодействия молекул ПЭГ с поверхностью наночастиц оксида меди (II) путем моделирования в программе *QChem* с использованием молекулярного редактора *IQmol*. Моделирование разбито на несколько стадий.

На первой стадии проведено моделирование участка молекулы ПЭГ, содержащего три звена этиленгликоля. Модель молекулы и распределение электронной плотности представлены на рис. 5.

В соответствии с теоретическими представлениями процесс стабилизации наночастиц оксида меди (II) ПЭГ протекает путем взаимодействия отрицательно заряженных группировок в молекуле ПЭГ с положительными центрами на поверхности наночастиц оксида меди. Наночастицами

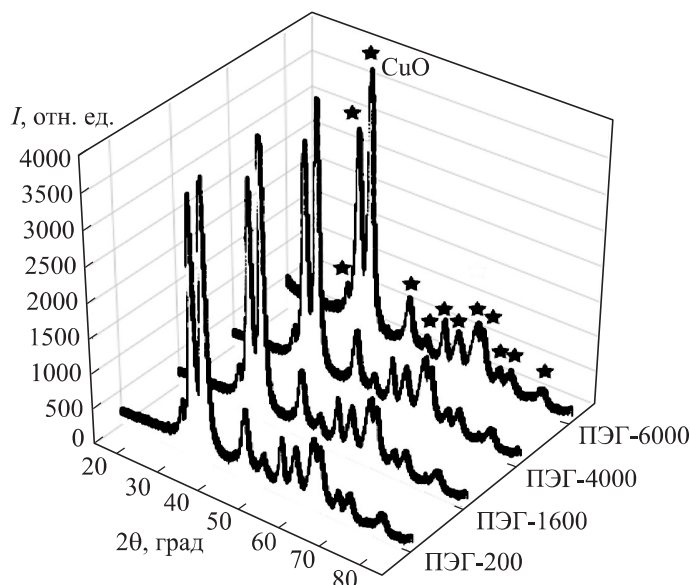


Рис. 4. Дифрактограммы образцов наноразмерного оксида меди, стабилизированного ПЭГ с разной молярной массой

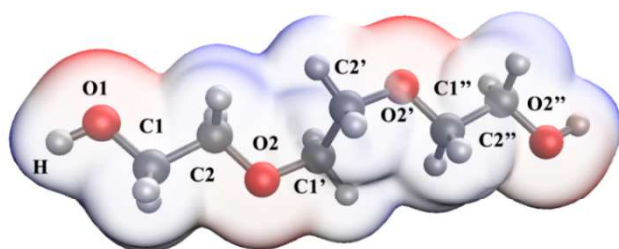


Рис. 5. Модель молекулы ПЭГ с распределением электронной плотности

могут выступать вакансии кислорода, всегда присутствующие на поверхности оксидных частиц, и ионы металла.

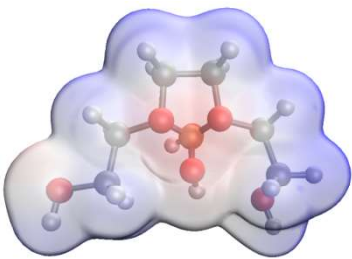
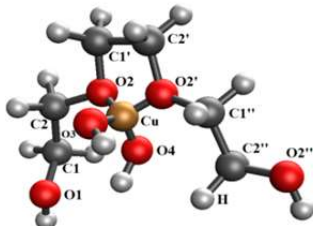
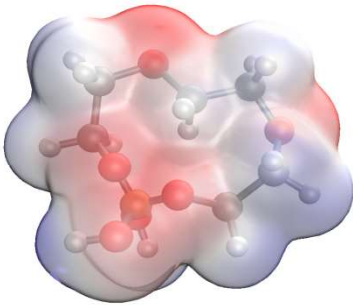
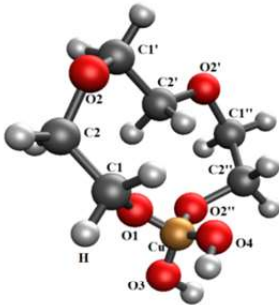
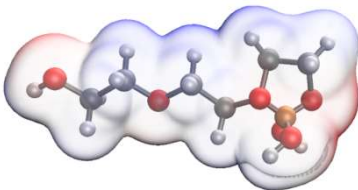
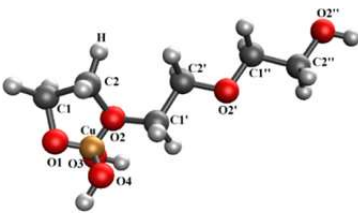
На второй стадии выполнено компьютерное квантово-химическое моделирование молекулярных комплексов ПЭГ с молекулой оксида меди. Для упрощения компьютерного моделирования использован тетраэдр, содержащий четыре связи Cu–O. Для уменьшения заряда системы ПЭГ–CuO два свободных атома кислорода также гидрогенизированы. Затем были выбраны наиболее вероятные варианты взаимодействия молекулы ПЭГ с молекулой оксида меди:

- 1) первый вариант — образование связей между внутримолекулярными соседними эфирными атомами кислорода и атомом меди;
- 2) второй вариант — образование связи между атомами кислорода концевых гидроксильных групп в молекуле ПЭГ и атомом меди;

3) третий вариант — образование связи между одним атомом кислорода концевой гидроксильной группы, соседним эфирным атомом кислорода и атомом меди.

Полученные варианты моделей ПЭГ–CuO с распределениями электронной плотности представлены в таблице.

Варианты моделей ПЭГ–CuO с распределениями электронной плотности

Номер модели	Распределение электронной плотности	Модель
1		
2		
3		
<p><i>Примечание.</i> Атомы кислорода обозначены красным цветом, углерода — темно-серым, водорода — белым, меди — желтым.</p>		

На третьей стадии проведен расчет полной энергии молекулярной системы ПЭГ–CuO в программе *QChem* с использованием молекулярного редактора *IQmol*. В результате для рассмотренных моделей в зависи-

мости от типа координирования молекул ПЭГ атомами меди получены следующие значения полной энергии E системы ПЭГ–CuO:

Номер модели	1	2	3
E , ккал/моль	-2320.15	-2319.10	-2319.72

На основании данных, полученных при моделировании взаимодействия ПЭГ с оксидом меди, установлено: наиболее энергетически выгодным ($E = -2320.15$ ккал/моль) является первый вариант, в котором происходит образование связей между внутримолекулярными соседними эфирными атомами кислорода и атомом меди.

Заключение. Разработана методика синтеза наноразмерного оксида меди, стабилизированного ПЭГ. Получены данные о размере, оптических свойствах, микроструктуре наночастиц оксида меди. Проведено компьютерное моделирование, позволившее определить наиболее энергетически выгодный способ взаимодействия ПЭГ с поверхностью оксида меди.

В настоящее время проводятся исследования по влиянию условий хранения и параметров дисперсионной среды на агрегативную устойчивость разработанного наноразмерного оксида меди.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ahmadi S.J., Outokesh M., Hosseinpour M., et al. A simple granulation technique for preparing high-porosity nano copper oxide (II) catalyst beads. *Particuology*, 2011, vol. 9, iss. 5, pp. 480–485. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.partic.2011.02.010>
- [2] Shalan A.E., Rashad M.M., Yu Y., et al. Controlling the microstructure and properties of titania nanopowders for high efficiency dye sensitized solar cells. *Electrochim. Acta*, 2013, vol. 89, pp. 469–478. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.11.091>
- [3] Yu X., Marks T.J., Facchetti A. Metal oxides for optoelectronic applications. *Nat. Mater.*, 2016, vol. 15, no. 4, pp. 383–396. DOI: <https://doi.org/10.1038/nmat4599>
- [4] Perng D.-C., Hong M.-H., Chen K.-H., et al. Enhancement of short-circuit current density in Cu₂O/ZnO heterojunction solar cells. *J. Alloy. Compd.*, 2017, vol. 695, pp. 549–554. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.11.119>
- [5] Ramgir N., Datta N., Kaur M., et al. Metal oxide nanowires for chemiresistive gas sensors: issues, challenges and prospects. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, 2013, vol. 439, pp. 101–116. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2013.02.029>
- [6] Jang J., Kitsomboonloha R., Swisher S.L., et al. Transparent high-performance thin film transistors from solution-processed SnO₂/ZrO₂ gel-like precursors. *Adv. Mater.*, vol. 25, iss. 7, pp. 1042–1047. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201202997>
- [7] Gupta D., Meher S.R., Illyaskutty N., et al. Facile synthesis of Cu₂O and CuO nanoparticles and study of their structural, optical and electronic properties. *J. Alloy. Compd.*, 2018, vol. 743, pp. 737–745. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.01.181>

- [8] Keimer B., Kivelson S.A., Norman M.R., et al. From quantum matter to high-temperature superconductivity in copper oxides. *Nature*, 2015, vol. 518, no. 7538, pp. 179–186. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature14165>
- [9] Jang J., Chung S., Kang H., et al. P-type CuO and Cu₂O transistors derived from a sol-gel copper (II) acetate monohydrate precursor. *Thin Solid Films*, 2016, vol. 600, pp. 157–161. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2016.01.036>
- [10] Моисеева Т.А., Мясоедова Т.Н., Петров В.В. и др. Разработка газочувствительного элемента на основе пленок оксидов меди для датчика аммиака. *Инженерный вестник Дона*, 2012, № 4-2.
URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1347>
- [11] Breedon M., Zhuiykov S., Miura N. The synthesis and gas sensitivity of CuO micro-dimensional structures featuring a stepped morphology. *Mater. Lett.*, 2012, vol. 82, pp. 51–53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.05.024>
- [12] Гульченко С.И., Гусев А.А., Захаров О.В. Перспективы создания антибактериальных препаратов на основе наночастиц меди. *Вестник Тамбовского университета. Сер. Естественные и технические науки*, 2014, т. 19, № 5, с. 1397–1399.
- [13] Javed R., Ahmed M., Haq I. ul, et al. PVP and PEG doped CuO nanoparticles are more biologically active: antibacterial, antioxidant, antidiabetic and cytotoxic perspective. *Mater. Sci. Eng. C*, 2017, vol. 79, pp. 108–115.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.05.006>
- [14] Jadhav S., Gaikwad S., Nimse M., et al. Copper oxide nanoparticles: synthesis, characterization and their antibacterial activity. *J. Clust. Sci.*, 2011, vol. 22, iss. 2, pp. 121–129. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10876-011-0349-7>
- [15] Etefagh R., Azhir E., Shahtahmasebi N. Synthesis of CuO nanoparticles and fabrication of nanostructural layer biosensors for detecting *Aspergillus niger fungi*. *Scientia Iranica*, 2013, vol. 20, no. 3, pp. 1055–1058.
- [16] Арсентьева И.П., Зотова Е.С., Фолманис Г.Э. и др. Аттестация и применения наночастиц металлов в качестве биологических активных препаратов. *Нанотехника*, 2007, спец. вып. Нанотехнологии в медицине, с. 72–77.
- [17] Sankar R., Maheswari R., Karthik S., et al. Anticancer activity of *Ficus religiosa* engineered copper oxide nanoparticles. *Mater. Sci. Eng. C*, 2014, vol. 44, pp. 234–239.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2014.08.030>
- [18] Wang H., Xu J.-Z., Zhu J.-J., et al. Preparation of CuO nanoparticles by microwave irradiation. *J. Cryst. Growth*, 2002, vol. 244, iss. 1, pp. 88–94.
DOI: [https://doi.org/10.1016/s0022-0248\(02\)01571-3](https://doi.org/10.1016/s0022-0248(02)01571-3)
- [19] Hosny N.M., Zoromba M.S. Polymethacrylic acid as a new precursor of CuO nanoparticles. *J. Mol. Struct.*, 2012, vol. 1027, pp. 128–132.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2012.05.081>
- [20] Agarwal R., Verma K., Agrawal N.K., et al. Synthesis, characterization, thermal conductivity and sensitivity of CuO nanofluids. *Appl. Therm. Eng.*, 2016, vol. 102, pp. 1024–1036. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.04.051>

[21] Kayani Z.N., Ali Y., Kiran F., et al. Fabrication of copper oxide nanoparticles by sol-gel route. *Mater. Today Proc.*, 2015, vol. 2, iss. 10, part B, pp. 5446–5449.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.11.067>

[22] Padil V.V., Černík M. Green synthesis of copper oxide nanoparticles using gum karaya as a biotemplate and their antibacterial application. *Int. J. Nanomedicine*, 2013, vol. 8, iss. 1, pp. 889–898. DOI: <https://doi.org/10.2147/ijn.s40599>

[23] Salavati-Niasari M., Davar F. Synthesis of copper and copper (I) oxide nanoparticles by thermal decomposition of a new precursor. *Mater. Lett.*, 2009, vol. 63, iss. 3-4, pp. 441–443. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2008.11.023>

[24] Авчинникова Е.А., Воробьева С.А. Синтез и свойства наночастиц меди, стабилизированных полиэтиленгликолем. *Вестник БГУ. Серия 2: Химия. Биология. География*, 2013, № 3, с. 12–16.

Блинов Андрей Владимирович — старший преподаватель кафедры электроники и нанотехнологий Инженерного института ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» (Российская Федерация, 355017, Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1).

Гвозденко Алексей Алексеевич — студент кафедры электроники и нанотехнологий Инженерного института ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» (Российская Федерация, 355017, Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1).

Ясная Мария Анатольевна — канд. хим. наук, доцент кафедры электроники и нанотехнологий Инженерного института ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» (Российская Федерация, 355017, Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1).

Блинова Анастасия Александровна — канд. техн. наук, доцент кафедры электроники и нанотехнологий Инженерного института ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» (Российская Федерация, 355017, Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1).

Кравцов Александр Александрович — канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории физики и технологии полупроводниковых наногетероструктур для СВЧ-электроники и фотоники, научная группа технологии гетероструктур ЮНЦ РАН (Российская Федерация, 344006, Ростов-на-Дону, ул. Чехова, д. 41); научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории керамики и теххимии научно-лабораторного комплекса чистых зон Инженерного института ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» (Российская Федерация, 355017, Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1).

Крандиевский Святослав Олегович — ведущий инженер лаборатории технологии тонких пленок и наногетероструктур научно-лабораторного комплекса чистых зон Инженерного института ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» (Российская Федерация, 355017, Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1).

Крамаренко Василий Николаевич — студент кафедры электроники и нанотехнологий Инженерного института ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» (Российская Федерация, 355017, Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Блинов А.В., Гвозденко А.А., Ясная М.А. и др. Синтез и исследование структуры наноразмерного оксида меди (II), стабилизированного полиэтиленгликолем. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2020, № 3 (90), с. 56–70.

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2020-3-56-70>

SYNTHESING AND STUDYING THE STRUCTURE OF NANOSCALE COPPER (II) OXIDE STABILIZED BY POLYETHYLENE GLYCOL

A.V. Blinov¹

blinov.a@mail.ru

A.A. Gvozdenko¹

gvozdenko.1999a@gmail.com

M.A. Yasnaya¹

jasnaja.marija@mail.ru

A.A. Blinova¹

nastya_bogdanova_88@mail.ru

A.A. Kravtsov^{1,2}

sanya-kravtsov@yandex.ru

S.O. Krandievsky¹

krandik2007@gmail.com

V.N. Kramarenko¹

cramarenkovasy@mail.ru

¹North Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation

²Federal Research Center the Southern Scientific Centre,
Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract

We developed a method for synthesising polyethylene glycol-stabilized copper oxide nanoparticles via a sol-gel process, obtained samples and investigated their structure, morphology and properties. We used photon correlation spectroscopy to establish that the copper oxide nanoparticles feature a monomodal size distribution with the average hydrodynamic radius of a particle being approximately 50 nm irrespective of the stabiliser molar mass. We detected an optical absorption band at 290 nm in all samples. We established that copper oxide samples consist of aggregates formed out of spherical nanoparticles whose diameters lie in the range of 10 to 30 nm. Phase composition analysis of the copper oxide samples revealed that the samples consist of particles featuring a monoclinic structure. We simulated the process of polyethylene glycol interacting

Keywords

Copper (II) oxide, polyethylene glycol, hydrodynamic radius, X-ray diffraction analysis, microstructure, quantum chemical simulation

with the copper oxide. We show that the most energetically favourable interaction model includes bond formation between the neighbouring intramolecular etheric oxygen atoms and the copper atom

Received 27.09.2019

Accepted 17.02.2020

© Author(s), 2020

The study was supported by the Grant Council under the President of the Russian Federation (project SP-1191.2019.4)

REFERENCES

- [1] Ahmadi S.J., Outokesh M., Hosseinpour M., et al. A simple granulation technique for preparing high-porosity nano copper oxide (II) catalyst beads. *Particuology*, 2011, vol. 9, iss. 5, pp. 480–485. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.partic.2011.02.010>
- [2] Shalan A.E., Rashad M.M., Yu Y., et al. Controlling the microstructure and properties of titania nanopowders for high efficiency dye sensitized solar cells. *Electrochim. Acta*, 2013, vol. 89, pp. 469–478. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.11.091>
- [3] Yu X., Marks T.J., Facchetti A. Metal oxides for optoelectronic applications. *Nat. Mater.*, 2016, vol. 15, no. 4, pp. 383–396. DOI: <https://doi.org/10.1038/nmat4599>
- [4] Perng D.-C., Hong M.-H., Chen K.-H., et al. Enhancement of short-circuit current density in Cu₂O/ZnO heterojunction solar cells. *J. Alloy. Compd.*, 2017, vol. 695, pp. 549–554. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.11.119>
- [5] Ramgir N., Datta N., Kaur M., et al. Metal oxide nanowires for chemiresistive gas sensors: issues, challenges and prospects. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, 2013, vol. 439, pp. 101–116. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2013.02.029>
- [6] Jang J., Kitsomboonloha R., Swisher S.L., et al. Transparent high-performance thin film transistors from solution-processed SnO₂/ZrO₂ gel-like precursors. *Adv. Mater.*, vol. 25, iss. 7, pp. 1042–1047. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201202997>
- [7] Gupta D., Meher S.R., Illyaskutty N., et al. Facile synthesis of Cu₂O and CuO nanoparticles and study of their structural, optical and electronic properties. *J Alloy. Compd.*, 2018, vol. 743, pp. 737–745. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.01.181>
- [8] Keimer B., Kivelson S.A., Norman M.R., et al. From quantum matter to high-temperature superconductivity in copper oxides. *Nature*, 2015, vol. 518, no. 7538, pp. 179–186. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature14165>
- [9] Jang J., Chung S., Kang H., et al. P-type CuO and Cu₂O transistors derived from a sol-gel copper (II) acetate monohydrate precursor. *Thin Solid Films*, 2016, vol. 600, pp. 157–161. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2016.01.036>
- [10] Moiseeva T.A., Myasoedova T.N., Petrov V.V., et al. Development of gas sensitive element based on copper oxides films for ammonia detection. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2012, no. 4-2 (in Russ.). Available at: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1347>
- [11] Breedon M., Zhuiykov S., Miura N. The synthesis and gas sensitivity of CuO micro-dimensional structures featuring a stepped morphology. *Mater. Lett.*, 2012, vol. 82, pp. 51–53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.05.024>

- [12] Gul'chenko S.I., Gusev A.A., Zakharov O.V. Prospects for creation antibacterial preparations based on copper nanoparticles. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Ser. Estestvennyye i tekhnicheskie nauki* [Tambov University Reports. Series Natural and Technical Sciences], 2014, vol. 19, no. 5, pp. 1397–1399 (in Russ.).
- [13] Javed R., Ahmed M., Haq I. ul, et al. PVP and PEG doped CuO nanoparticles are more biologically active: antibacterial, antioxidant, antidiabetic and cytotoxic perspective. *Mater. Sci. Eng. C*, 2017, vol. 79, pp. 108–115.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.05.006>
- [14] Jadhav S., Gaikwad S., Nimse M., et al. Copper oxide nanoparticles: synthesis, characterization and their antibacterial activity. *J. Clust. Sci.*, 2011, vol. 22, iss. 2, pp. 121–129.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10876-011-0349-7>
- [15] Etefagh R., Azhir E., Shahtahmasebi N. Synthesis of CuO nanoparticles and fabrication of nanostructural layer biosensors for detecting *Aspergillus niger* fungi. *Scientia Iranica*, 2013, vol. 20, no. 3, pp. 1055–1058.
- [16] Arsent'yeva I.P., Zotova E.S., Folmanis G.E., et al. Certification and use of metal nanoparticles as biological active preparations. *Nanotekhnika, spec. iss. Nanotekhnologii v meditsine*, 2007, pp. 72–77 (in Russ.).
- [17] Sankar R., Maheswari R., Karthik S., et al. Anticancer activity of *Ficus religiosa* engineered copper oxide nanoparticles. *Mater. Sci. Eng. C*, 2014, vol. 44, pp. 234–239.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2014.08.030>
- [18] Wang H., Xu J.-Z., Zhu J.-J., et al. Preparation of CuO nanoparticles by microwave irradiation. *J. Cryst. Growth*, 2002, vol. 244, iss. 1, pp. 88–94.
DOI: [https://doi.org/10.1016/s0022-0248\(02\)01571-3](https://doi.org/10.1016/s0022-0248(02)01571-3)
- [19] Hosny N.M., Zoromba M.S. Polymethacrylic acid as a new precursor of CuO nanoparticles. *J. Mol. Struct.*, 2012, vol. 1027, pp. 128–132.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2012.05.081>
- [20] Agarwal R., Verma K., Agrawal N.K., et al. Synthesis, characterization, thermal conductivity and sensitivity of CuO nanofluids. *Appl. Therm. Eng.*, 2016, vol. 102, pp. 1024–1036. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.04.051>
- [21] Kayani Z.N., Ali Y., Kiran F., et al. Fabrication of copper oxide nanoparticles by sol-gel route. *Mater. Today Proc.*, 2015, vol. 2, iss. 10, part B, pp. 5446–5449.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.11.067>
- [22] Padil V.V., Černík M., Green synthesis of copper oxide nanoparticles using gum karaya as a biotemplate and their antibacterial application. *Int. J. Nanomedicine*, 2013, vol. 8, iss. 1, pp. 889–898. DOI: <https://doi.org/10.2147/ijn.s40599>
- [23] Salavati-Niasari M., Davar F. Synthesis of copper and copper (I) oxide nanoparticles by thermal decomposition of a new precursor. *Mater. Lett.*, 2009, vol. 63, iss. 3-4, pp. 441–443. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2008.11.023>
- [24] Avchinnikova E.A., Vorobyeva S.A. Synthesis and properties of copper nanoparticles stabilized by polyethylene glycol. *Vestnik BGU. Seriya 2: Khimiya. Biologiya. Geografiya* [Vestnik BSU. Series 2: Chemistry. Biology. Geography], 2013, no. 3, pp. 12–16 (in Russ.).

Blinov A.V. — Senior Lecturer, Department of Electronics and Nanotechnology, Institute of Engineering, North Caucasus Federal University (Pushkina ul. 1, Stavropol, 355017 Russian Federation).

Gvozdenco A.A. — Student, Department of Electronics and Nanotechnology, Institute of Engineering, North Caucasus Federal University (Pushkina ul. 1, Stavropol, 355017 Russian Federation).

Yasnaya M.A. — Cand. Sc. (Chem.), Assist. Professor, Department of Electronics and Nanotechnology, Institute of Engineering, North Caucasus Federal University (Pushkina ul. 1, Stavropol, 355017 Russian Federation).

Blinova A.A. — Cand. Sc. (Eng.), Assist. Professor, Department of Electronics and Nanotechnology, Institute of Engineering, North Caucasus Federal University (Pushkina ul. 1, Stavropol, 355017 Russian Federation).

Kravtsov A.A. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Researcher, Federal Research Center the Southern Scientific Centre, Russian Academy of Sciences (Chehova ul. 41, Rostov-on-Don, 344006 Russian Federation); Researcher Assistant, Scientific-Research Laboratory of Ceramics and Technochemistry, Scientific-Laboratory Complex of Clean Rooms, Institute of Engineering, North Caucasus Federal University (Pushkina ul. 1, Stavropol, 355017 Russian Federation).

Krandievsky S.O. — Lead Engineer, Laboratory of Technology for Thin Films and Nanoheterostructures, Scientific and Laboratory Complex of Clean Zones, Institute of Engineering, North Caucasus Federal University (Pushkina ul. 1, Stavropol, 355017 Russian Federation).

Kramarenko V.N. — Student, Department of Electronics and Nanotechnology, Institute of Engineering, North Caucasus Federal University (Pushkina ul. 1, Stavropol, 355017 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Blinov A.V., Gvozdenco A.A., Yasnaya M.A., et al. Synthesing and studying the structure of nanoscale copper (II) oxide stabilized by polyethylene glycol. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2020, no. 3 (90), pp. 56–70 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2020-3-56-70>