

УДК 535.343.2, 539.213.27

## ФОРМИРОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ ПЛЕНКИ CuO НА ПОВЕРХНОСТИ ФТОРОФOSФАТНЫХ СТЕКОЛ

Е.В. Колобкова<sup>a</sup>, Ба Минь Динь<sup>a</sup>, А.С. Кочеткова<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

<sup>b</sup> Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, 190013, Российская Федерация

Адрес для переписки: [dinhbaminh@mail.ru](mailto:dinhbaminh@mail.ru)

### Информация о статье

Поступила в редакцию 31.10.16, принята к печати 21.11.16

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-1-46-51

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Колобкова Е.В., Ба Минь Динь, Кочеткова А.С. Формирование наноструктурированной пленки CuO на поверхности фторофосфатных стекол // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 1. С. 46–51. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-1-46-51

### Аннотация

Сформированы и исследованы пленки CuO на поверхности фторофосфатных стекол состава  $25\text{Na}_2\text{O}-50\text{P}_2\text{O}_5-10\text{Ga}_2\text{O}_3-10\text{AlF}_3-5\text{ZnO}$ , активированных 2, 4 и 5 мол.% CuCl сверх 100%. Обнаружено, что рост пленки происходит по механизму обратной диффузии при вторичной термообработке образцов. Изучено влияние концентрации меди, окислительно-восстановительных условий синтеза и температурно-временных параметров термообработки. На основании данных рентгенофазового анализа показано, что в интервале температуры термообработки  $T=380-420^\circ\text{C}$  в атмосфере воздуха пленка состоит из нанокристаллов CuO со средним размером 16–18 нм, а увеличение температуры и времени термообработки приводит к росту толщины пленки. Показано, что пленка состоит из кристаллитов неправильной формы, латеральный размер которых лежит в интервале 100–350 нм, а высота видимой части составляет 15–25 нм. Средняя шероховатость поверхности, измеренная на участке сканирования  $1\times 1$  мкм, равна 3,1 нм. Обнаружено, что при термообработке в восстановительных условиях в зависимости от длительности процесса формируются нанокристаллы  $\text{Cu}_2\text{O}$  или металлической меди.

### Ключевые слова

фторофосфатные стекла, медь, нанокристаллы, тонкие пленки, спектры поглощения

### Благодарности

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке Российского научного фонда (Соглашение № 14-23-00136).

## FORMATION OF NANOSTRUCTURED CuO FILM ON FLUOROPHOSPHATE GLASS SURFACE

E.V. Kolobkova<sup>a</sup>, Ba Minh Dinh<sup>a</sup>, A.S. Kochetkova<sup>b</sup>

<sup>a</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

<sup>b</sup> St. Petersburg State Technological Institute (technical university), Saint Petersburg, 190013, Russian Federation

Corresponding author: [dinhbaminh@mail.ru](mailto:dinhbaminh@mail.ru)

### Article info

Received 31.10.16, accepted 21.11.16

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-1-46-51

Article in Russian

**For citation:** Kolobkova E.V., Ba Minh Dinh, Kochetkova A.S. Formation of nanostructured CuO film on fluorophosphate glass surface. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 1, pp. 46–51. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-1-46-51

### Abstract

The paper deals with CuO films on the fluorophosphate glass surface composed of  $25\text{Na}_2\text{O}-50\text{P}_2\text{O}_5-10\text{Ga}_2\text{O}_3-10\text{AlF}_3-5\text{ZnO}$  doped with 2, 4, 5 mol. %. CuCl over 100%. The films are obtained by the out-diffusion mechanism within the heat retreatment of the samples. We have studied the influence of copper concentration, redox conditions of the synthesis and the temperature - time parameters of heat treatment. X-ray phase analysis has shown that in the heat treatment temperature range of  $T = 380 - 420^\circ\text{C}$  in the air the CuO film is formed by nanocrystals with an average size of 16 – 18 nm, and the increasing of heat treatment temperature and time leads only to the film thickness growth. It is shown that the film surface consists of crystallites with irregular shape; the lateral size is in the range of 100–350 nm, and the visible part level is equal to 15–25 nm.

The average surface roughness measured on a scan area of  $1 \times 1 \mu\text{m}$  is equal to 3.1 nm. It is found out that  $\text{Cu}_2\text{O}$  or metallic copper nanocrystals are formed in reducing conditions depending on the duration of the heat treatment process.

#### Keywords

fluorophosphates glasses, copper, nanocrystals, thin films, absorptions spectra

#### Acknowledgements

The research was funded by the Russian Science Foundation (Project No.14-23-00136)

### Введение

Интерес к системе Cu-O проявился с первых лет развития физики полупроводников. Наиболее изученным из соединений этой системы является  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Эта кубическая модификация оксида представляет собой полупроводник *p*-типа с шириной запрещенной зоны в диапазоне 2,1–2,6 эВ [1]. В последние годы интерес к  $\text{Cu}_2\text{O}$  значительно возрос вследствие перспективности его применения как материала фотоники. Другой модификацией оксида меди, относящейся к системе Cu-O, является узкополосный полупроводник *p*-типа CuO ( $E_g=1,2$  эВ) [1, 2]. Кристаллический CuO имеет моноклинную структуру и является сверхпроводником с высокой температурой Кюри ( $T_c=213$  К). Он также является антиферромагнетиком с температурой Ниля  $T_n=230$  К [3, 4]. Нанокристаллы (НК) CuO демонстрируют уникальные магнитные, электрические и оптические свойства в режиме сильного размерного ограничения [5–7].

Показано, что нанокристаллы CuO могут быть использованы для изготовления электродов литий-ионных аккумуляторов (LIBs) благодаря их высокой емкости и безопасности для окружающей среды [8]. С другой стороны, вследствие того, что НК CuO обладают уникальными электрическими свойствами и высокой концентрацией носителей заряда при относительно низком тепловом излучении, они также могут быть использованы в качестве поглощающего слоя в солнечных батареях [9–11]. Применение НК CuO в газовых сенсорах и биосенсорах предложено в работе [12]. Последние исследования показали, что нанокристаллы CuO являются эффективными катализаторами для реакции окисления углерода и азота [1, 13].

В последние годы были разработаны многочисленные методы синтеза нанокристаллов CuO. К этим методам относятся синтез на основе коллоидных растворов, термическое разложение, термическое окисление, электрохимические методы [14–17]. Каждый метод имеет свои достоинства и недостатки, выбор метода синтеза определяет размеры сформированных НК CuO.

В данной работе предложен новый простой метод для синтеза наноструктурированных CuO. Метод основан на явлении обратной диффузии ионов  $\text{Cu}^+$  из стекла на его поверхность в процессе вторичной термообработки. В результате этого процесса на поверхности стекла образуется пленка, состоящая из нанокристаллов CuO. Ранее процесс обратной диффузии был рассмотрен для получения серебряной пленки на поверхности силикатного стекла при стимуляции электрическим полем [18].

Целью настоящей работы является исследование особенностей формирования тонких пленок CuO на поверхности фторофосфатных стекол  $25\text{Na}_2\text{O}-50\text{P}_2\text{O}_5-10\text{Ga}_2\text{O}_3-10\text{AlF}_3-5\text{ZnO}$ , активированных 2, 4 и 5 мол.%. CuCl сверх 100%.

### Методика эксперимента

В качестве исследуемых объектов были синтезированы фторофосфатные стекла  $25\text{Na}_2\text{O}-50\text{P}_2\text{O}_5-10\text{Ga}_2\text{O}_3-10\text{AlF}_3-5\text{ZnO}$ , активированные медью (2, 4, 5 мол.% CuCl сверх 100%). Синтез стекол проводился в стеклоглеродных тиглях в течение 45 минут при температуре 1000 °C в открытом тигле для стекол с 2 мол.% и 5 мол.% CuCl и в закрытом тигле для стекла с 4 мол.% CuCl. Выработка стекла проводилась на стеклоглеродную пластину. Для снятия термических напряжений стекло отжигалось при  $T=320$  °C. Для измерений были приготовлены плоскопараллельные образцы с полированной поверхностью.

Для формирования медьсодержащих пленок на поверхности стекла была проведена термообработка (ТО) при температурах 380–420 °C в течение 30, 60 и 90 минут. ТО проводилась в муфельной печи «Nabertherm». В результате ТО на поверхности образцов была сформирована тонкая оптически прозрачная пленка, имеющая серый цвет с металлическим блеском.

Определение химического состава и сингонии пленки было проведено с использованием рентгеновского дифрактометра общего назначения «Rigaku Ultima IV» с источником  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda=1,5418$  нм) и детектором D/teX Ultra.

Температура стеклования ( $T_g$ ) была измерена на дифференциальном сканирующем калориметре (ДСК) STA 449F1 Jupiter фирмы Netzsch, скорость нагрева 10 К/мин.

Морфологические особенности поверхности пленки были исследованы методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) с использованием сканирующего зондового микроскопа Solver P47 Pro в полуконтактном (tapping mode) режиме, с использованием кремниевых кантилеверов марки HA\_NC с радиусом кривизны зонда около 10 нм.

Измерения спектров поглощения образцов осуществлялись на спектрофотометре Varian Carry 500 в диапазоне 250–900 нм (оптическая плотность  $D=0-10$ ; спектральный диапазон регистрации 200–3300 нм; разрешение 0,1 нм, время интеграции 0,5 с).

## Результаты и обсуждение

Режим вторичной термообработки для стекол определен по данным дифференциального сканирующего анализа каждого стекла. На рис. 1 представлена кривая ДСК для стекла, активированного 2 мол.% CuCl.

Из данных, полученных при анализе кривой ДСК, следует, что температура стеклования ( $T_g$ ) стекла составляет 410 °С. Следует отметить, что изменение концентрации меди не привело к заметному изменению температуры стеклования. Для определения влияния температуры термообработки (скорости диффузии  $\text{Cu}^+$ ) были выбраны три температуры ТО относительно  $T_g$ :  $T_1=380^\circ\text{C}$  ( $T_1 < T_g$ ),  $T_2=410^\circ\text{C}$  ( $T=T_g$ ) и  $T_3=420^\circ\text{C}$  ( $T > T_g$ ), время ТО стекло изменялось в диапазоне от 30 до 90 мин. Эти режимы позволили получить пленки различной толщины.

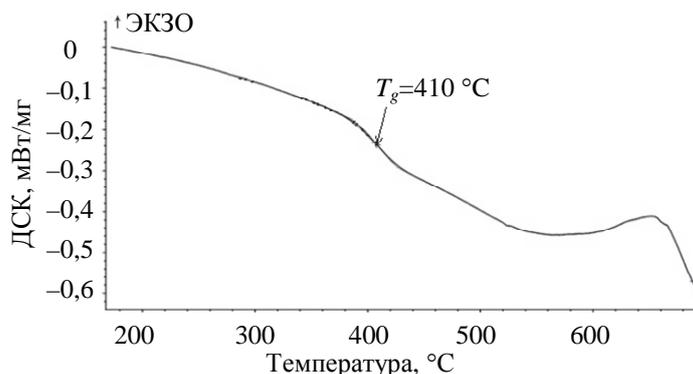


Рис. 1. Кривая дифференциально-сканирующей калориметрии для стекла, активированного 2 мол.% CuCl

Химический состав, сингония и размеры сформированных нанокристаллов были определены на основании данных рентгеновской дифракции. Результаты измерений представлены на рис. 2. Анализ дифрактограмм показал, что для всех трех стекол в широком температурном интервале термообработки формируется одинаковая кристаллическая фаза. Расшифровка рентгенограммы однозначно показывает, что этой фазой является CuO в моноклинной модификации. Результаты обработки данных свидетельствуют о том, что температура ТО не влияет на состав и размер НК. Увеличение температуры и времени термообработки приводит к росту толщины пленки. Размер нанокристаллов определялся по формуле Шеррера (1) и составил 16–18 нм.

$$D = \frac{\lambda}{\beta \cdot \cos(\theta)}, \quad (1)$$

где  $D$  – средний размер исследуемого кристалла в объеме пленки;  $\lambda=1,54$  нм – длина волны рентгеновского излучения, используемого в дифрактометре;  $\beta$  – ширина рефлекса на полувысоте (в радианах);  $\theta$  – угол дифракции (брегговский угол).

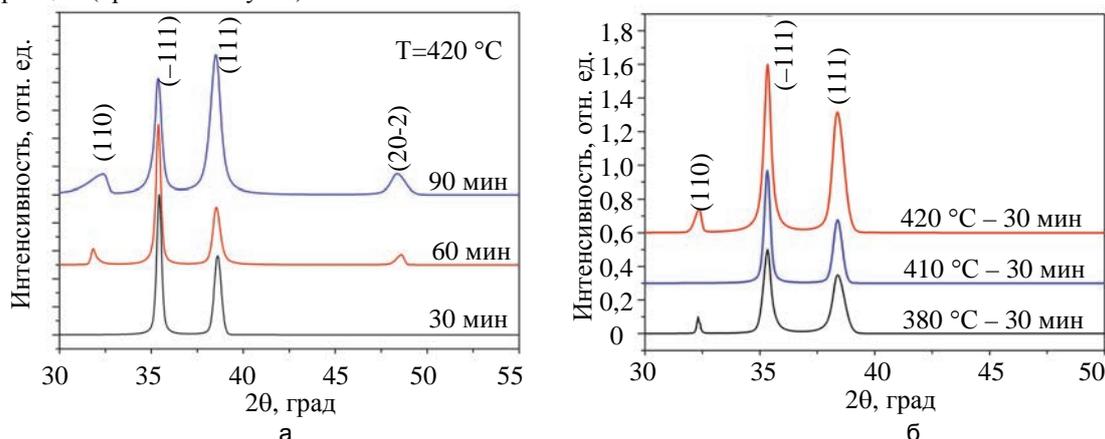


Рис. 2. Рентгенограмма пленок, полученных на стекле 1 в результате термообработки при  $T=410^\circ\text{C}$  в течение 30, 60 и 90 мин (а); рентгенограмма пленок, полученных после термообработки при  $T=380, 410$  и  $420^\circ\text{C}$  в течение 30 мин (б)

Чтобы оценить влияние окислительно-восстановительной атмосферы ТО на образование кристаллической фазы, формирующейся на поверхности стекол, были проведены ТО ( $T=410$  и  $420^\circ\text{C}$ ) образцов в закрытом стеклоуглеродном тигле, заполненном технической сажой. Данные рентгеноструктурного ана-

лиза показали, что после ТО при  $T=410\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 60 мин на поверхности стекла выделяются две кристаллические фазы: оксид меди (I)  $\text{Cu}_2\text{O}$  в кубической модификации и металлическая медь, средние размеры нанокристаллов составили 10 нм и 50 нм соответственно. При увеличении температуры ТО до  $420\text{ }^{\circ}\text{C}$  при тех же условиях на поверхности стекла формируется пленка из наночастиц металлической меди со средним размером НК 80 нм.

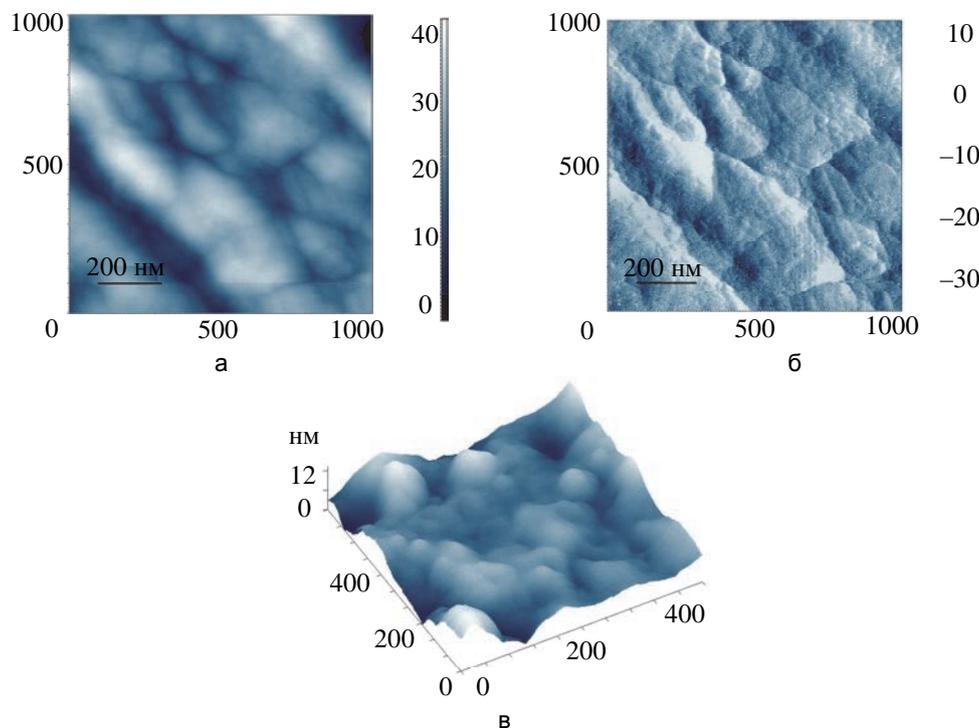


Рис. 3. АСМ-реконструкция поверхности пленки: топография (а); фазовый контраст (б); 3D-представление (в)

Анализ рельефа и толщины пленки  $\text{CuO}$  проводился на основании данных АСМ. На рис. 3 приведена АСМ-реконструкция поверхности образца, обработанного при температуре  $T=420\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 30 мин. Результаты АСМ-исследования показали, что пленка состоит из кристаллитов неправильной формы, латеральный размер которых лежит в интервале 100–350 нм (рис. 3, а), а высота видимой части составляет 15–25 нм. Такие поликристаллы на поверхности пленки образованы частицами размером 20–70 нм (рис. 3, а), выступающими над поверхностью на 3–6 нм. Средняя шероховатость поверхности, измеренная на участке сканирования  $1\times 1\text{ }\mu\text{m}$  равна 3,1 нм. Из этих наблюдений можно сделать предположение, что пленка имеет слоистую структуру, построенную из кристаллитов с высотой порядка 15–25 нм, что совпадает с размерами, полученными на основании рентгенофазового анализа (РФА), а поверхность слоя имеет линейный размер в диапазоне 100–350 нм. Отличие размеров НК, полученных методом РФА и АСМ, обусловлено тем, что АСМ регистрирует только НК, находящиеся на поверхности, в то время как РФА дает усредненные данные по всему объему пленки.

Сканирование данного образца в режиме фазового контраста (рис. 3, б) не показало значительных отличий адгезионных свойств поверхности по всему участку сканирования, из чего можно судить об однородности химической природы поверхности образца. Чтобы определить толщину пленки, сканирование поверхности проводили в месте скола. Построение сечения АСМ-изображения топографии поверхности позволило определить, что толщина пленки составляет 595–600 нм (рис. 3, в).

Спектры поглощения стекол до и после ТО представлены на рис. 4. На рис. 4, а, показаны спектры поглощения пленок, полученных на поверхности исследуемых образцов. По мере увеличения времени термообработки поглощение пленки значительно увеличивается. Ширина запрещенной зоны НК  $\text{CuO}$  определялась с использованием формулы Таука [12]:

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g), \quad (2)$$

где  $h\nu$  – энергия фотона (эВ);  $E_g$  – ширина запрещенной зоны полупроводника;  $A$  – константа;  $\alpha$  – коэффициент поглощения.

Построение графика зависимости величины  $(\alpha h\nu)^2$  от энергии фотона позволяет определить ширину запрещенной зоны НК  $\text{CuO}$  в пленке (рис. 4, б). Согласно формуле (2), абсцисса точки пересечения прямой части графика и оси абсцисс дает ширину запрещенной зоны  $E_g$ . Из графика видно, что  $E_g$  НК

CuO, сформированных после ТО в течение 30 и 90 минут, одинаковы и составили 2,82 эВ, что согласуется с результатом рентгеновской дифракции о постоянстве среднего размера НК в широком температурном интервале и независимости от времени термообработки. Голубой сдвиг границы пропускания от 1,2 эВ (для объемных CuO) до 2,82 эВ для нанокристаллов обусловлен квантовым размерным эффектом.

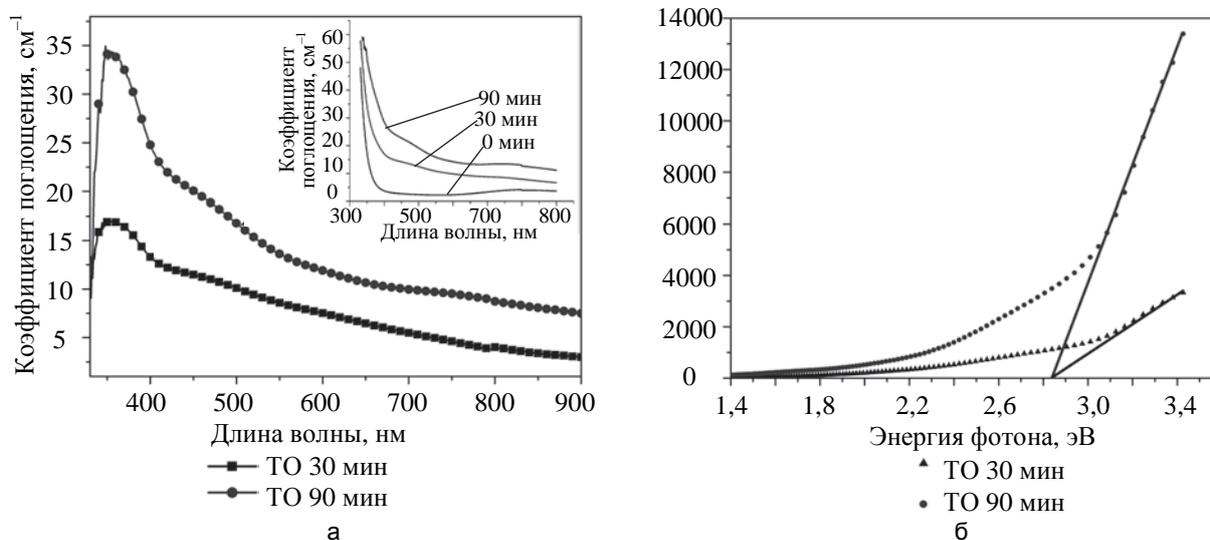


Рис. 4. Разностный спектр поглощения стекол исходного и после термообработки при 410 °С в течение 30 (1) и 90 мин (2). Вставка – спектры поглощения исходного (1) и после термообработки при 410 °С в течение 30 (2) и 90 мин (3) (а). Определение ширины запрещенной зоны тонких пленок CuO, полученных после термообработки при 410 °С в течение 30 и 90 мин, по формуле Таука (б)

### Заключение

В результате термообработки медьсодержащих фторофосфатных стекол формируются пленки, содержащие нанокристаллы CuO размером порядка 16–18 нм с толщиной до 600 нм. Обнаружен голубой сдвиг границы пропускания для наночастиц CuO от 1,2 до 2,82 эВ, который обусловлен квантовым размерным эффектом. Термообработка стекол в восстановительной атмосфере приводит к формированию нанокристаллов металлической меди и оксида меди (I) Cu<sub>2</sub>O в кубической модификации.

### Литература

1. Tiwari J.N., Tiwari R.N., Kim K.S. Zero-dimensional, one-dimensional, two-dimensional and three-dimensional nanostructured materials for advanced electrochemical energy devices // *Progress in Materials Science*. 2012. V. 57. N 4. P. 724–803. doi: 10.1016/j.pmatsci.2011.08.003
2. Xia Y., Yang P., Sun Y., Wu Y., Mayers B., Gates B., Yin Y., Kim F., Yan H. One-dimensional nanostructures: synthesis, characterization, and applications // *Advanced Materials*. 2003. V. 15. N 5. P. 353–389. doi: 10.1002/adma.200390087
3. Bourne L.C., Yu P.Y., Zettl A., Cohen M.L. High-pressure electrical conductivity measurements in the copper oxides // *Physical Review B*. 1989. V. 40. N 16. P. 10973–10976. doi: 10.1103/physrevb.40.10973
4. Azam A., Ahmed A.S., Oves M., Khan M.S., Memic A. Size-dependent antimicrobial properties of CuO nanoparticles against Gram-positive and -negative bacterial strains // *International Journal Nanomedicine*. 2012. V. 7. P. 3527–3535. doi: 10.2147/ijn.s29020
5. Siemons W., Koster G., Blank D.H., Hammond R.H., Geballe T.H., Beasley M.R. Tetragonal CuO: end member of the 3d transition metal monoxides // *Physical Review B*. 2009. V. 79. N 19. Art. 195122. doi: 10.1103/physrevb.79.195122
6. Wu D., Zhang Q., Tao M. LSDA+U study of cupric oxide: electronic structure and native point defects // *Physical Review B*. 2006. V. 73. N 23. Art. 235206. doi: 10.1103/physrevb.73.235206
7. Anisimov V., Aryasetiawan F., Lichtenstein A. First-principles calculations of the electronic structure and spectra of strongly correlated systems: the LDA+ U method // *Journal of Physics Condensed Matter*. 1997. V. 9. N 4. P. 767–808. doi:

### References

1. Tiwari J.N., Tiwari R.N., Kim K.S. Zero-dimensional, one-dimensional, two-dimensional and three-dimensional nanostructured materials for advanced electrochemical energy devices. *Progress in Materials Science*, 2012, vol. 57, no. 4, pp. 724–803. doi: 10.1016/j.pmatsci.2011.08.003
2. Xia Y., Yang P., Sun Y., Wu Y., Mayers B., Gates B., Yin Y., Kim F., Yan H. One-dimensional nanostructures: synthesis, characterization, and applications. *Advanced Materials*, 2003, vol. 15, no. 5, pp. 353–389. doi: 10.1002/adma.200390087
3. Bourne L.C., Yu P.Y., Zettl A., Cohen M.L. High-pressure electrical conductivity measurements in the copper oxides. *Physical Review B*, 1989, vol. 40, no. 16, pp. 10973–10976. doi: 10.1103/physrevb.40.10973
4. Azam A., Ahmed A.S., Oves M., Khan M.S., Memic A. Size-dependent antimicrobial properties of CuO nanoparticles against Gram-positive and -negative bacterial strains. *International Journal Nanomedicine*, 2012, vol. 7, pp. 3527–3535. doi: 10.2147/ijn.s29020
5. Siemons W., Koster G., Blank D.H., Hammond R.H., Geballe T.H., Beasley M.R. Tetragonal CuO: end member of the 3d transition metal monoxides. *Physical Review B*, 2009, vol. 79, no. 19, art. 195122. doi: 10.1103/physrevb.79.195122
6. Wu D., Zhang Q., Tao M. LSDA+U study of cupric oxide: electronic structure and native point defects. *Physical Review B*, 2006, vol. 73, no. 23, art. 235206. doi: 10.1103/physrevb.73.235206
7. Anisimov V., Aryasetiawan F., Lichtenstein A. First-principles calculations of the electronic structure and spectra of strongly correlated systems: the LDA+ U method. *Journal of Physics Condensed Matter*, 1997, vol. 9, no. 4, pp. 767–808. doi:

- 10.1088/0953-8984/9/4/002
8. Asbrink S., Norrby L. J. A refinement of the crystal structure of copper (II) oxide with a discussion of some exceptional e.s.d.'s. // *Acta Crystallographica Section A*. 1970. V. 26. N 1. P. 8–15. doi: 10.1107/s0567740870001838
  9. Zhuang Z., Peng Q., Li Y. Controlled synthesis of semiconductor nanostructures in the liquid phase // *Chemical Society Reviews*. 2011. V. 40. N 11. P. 5492–5513. doi: 10.1039/c1cs15095b
  10. Jia W., Reitz E., Sun H., Li B., Zhang H., Lei Y. From Cu<sub>2</sub>(OH)<sub>3</sub>Cl to nanostructured sisal-like Cu(OH)<sub>2</sub> and CuO: synthesis and characterization // *Journal of Applied Physics*. 2009. V. 105. N 6. Art. 064917. doi: 10.1063/1.3097286
  11. Ruhle S., Shalom M., Zaban A. Quantum-dot-sensitized solar cells // *ChemPhysChem*. 2010. V. 11. N 11. P. 2290–2304. doi: 10.1002/cphc.201000069
  12. Li Y., Yang X.Y., Feng Y., Yuan Z.Y., Su B.L. One-dimensional metal oxide nanotubes, nanowires, nanoribbons, and nanorods: synthesis, characterizations, properties and applications // *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. 2012. V. 37. N 1. P. 1–74. doi: 10.1080/10408436.2011.606512
  13. Meyer B., Polity A., Reppin D., Becker M., Hering P., Klar P. et al. Binary copper oxide semiconductors: from materials towards devices // *Physica Status Solidi (B) Basic Research*. 2012. V. 249. N 8. P. 1487–1509. doi: 10.1002/pssb.201248128
  14. Punnoose A., Magnone H., Seehra M.S., Bonevich J. Bulk to nanoscale magnetism and exchange bias in CuO nanoparticles // *Physical Review B*. 2001. V. 64. N 17. Art. 174420. doi: 10.1103/physrevb.64.174420
  15. Chen X.Y., Cui H., Liu P., Yang G.W. Shape-induced ultraviolet absorption of CuO shuttlelike nanoparticles // *Applied Physics Letters*. 2007. V. 90. N 18. Art. 183118. doi: 10.1063/1.2736285
  16. Singh D.P., Ali N. Synthesis of TiO<sub>2</sub> and CuO nanotubes and nanowires // *Science of Advanced Materials*. 2010. V. 2. N 3. P. 295–335. doi: 10.1166/sam.2010.1095
  17. Filipic G., Cvelbar U. Copper oxide nanowires: a review of growth // *Nanotechnology*. 2012. V. 23. N 19. Art. 194001. doi: 10.1088/0957-4484/23/19/194001
  18. Reduto I.V., Chervinskii S.D., Kamenskii A.N., Karpov D.V., Lipovskii A.A. Self-organized growth of small arrays of metal nanoislands on the surface of poled ion-exchange glasses // *Technical Physics Letters*. 2016. V. 42. N 1. P. 93–95. doi: 10.1134/s1063785016010302

#### Авторы

**Колобкова Елена Вячеславовна** – доктор химических наук, доцент, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, kolobok106@rambler.ru  
**Ба Минь Динь** – студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, dinhbaminh@mail.ru  
**Кочеткова Анна Сергеевна** – аспирант, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, 190013, Российская Федерация, annywka\_08@list.ru

#### Authors

**Elena V. Kolobkova** – D.Sc., Associate professor, Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, kolobok106@rambler.ru  
**Ba Minh Dinh** – student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, dinhbaminh@mail.ru  
**Anna S. Kochetkova** – postgraduate, St. Petersburg State Technological Institute (technical university), Saint Petersburg, 190013, Russian Federation, annywka\_08@list.ru