

**ТЕРМИЧЕСКИЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СИСТЕМАХ Ga-MoO<sub>3</sub>****Л.Н. Бугерко, С.В. Бин, Э.П. Суrowой, В.Э. Суrowая**

Лидия Николаевна Бугерко, Сергей Викторович Бин, Эдуард Павлович Суrowой

Кафедра аналитической и неорганической химии, Кемеровский государственный университет, ул. Красная, 6, Кемерово, Российская Федерация, 650023

E-mail: lbugerko@mail.ru, peen@ngs.ru, epsur@kemsu.ru

Виктория Эдуардовна Суrowая \*

Кафедра химии, технологии неорганических веществ и наноматериалов, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, ул. Весенняя, 28, Кемерово, Российская Федерация, 650000

E-mail: sur.vik@mail.ru\*

*Методами оптической спектроскопии, микроскопии, гравиметрии исследованы превращения в наноразмерных системах Ga-MoO<sub>3</sub> в зависимости от толщины пленок Ga ( $d = 2-96$  нм) и MoO<sub>3</sub> ( $d = 7-62$  нм), температуры (473 - 773 К) и времени термообработки. Показано, что спектры поглощения систем Ga-MoO<sub>3</sub> в коротковолновой области спектра ( $\lambda = 300-500$  нм) по мере уменьшения толщины пленок галлия определяются поглощением пленок MoO<sub>3</sub>, а в длинноволновой области спектра ( $\lambda = 500-1100$  нм) проявляются полосы поглощения пленок галлия. Рассчитаны, построены и сопоставлены кинетические зависимости степени превращения пленок MoO<sub>3</sub> и галлия. Установлено, что увеличение толщины пленок MoO<sub>3</sub> в системах Ga-MoO<sub>3</sub> при постоянной температуре обработки приводит к уменьшению степени превращения центра  $[e \cdot (V_a)^{++} \cdot e]$  пленок MoO<sub>3</sub>, в то время как увеличение температуры при постоянной толщине пленок MoO<sub>3</sub> способствует ее возрастанию. Показано, что скорость превращения центра  $[e \cdot (V_a)^{++} \cdot e]$  пленок MoO<sub>3</sub> в системах Ga-MoO<sub>3</sub> больше, чем в индивидуальных пленках MoO<sub>3</sub>. Измерена контактная разность потенциалов для пленок Ga, MoO<sub>3</sub> и фото-ЭДС системы Ga-MoO<sub>3</sub>, которая соответствует положительному знаку со стороны слоя MoO<sub>3</sub>. Построена диаграмма энергетических зон систем Ga-MoO<sub>3</sub>. Предложена модель термического превращения пленок MoO<sub>3</sub> в системах Ga-MoO<sub>3</sub>, включающая перераспределение на контакте равновесных носителей заряда, формирование в процессе приготовления пленки MoO<sub>3</sub> центра  $[(V_a)^{++} \cdot e]$ , преобразование его при создании систем Ga-MoO<sub>3</sub> в центр  $[e \cdot (V_a)^{++} \cdot e]$ , термический переход электрона на уровень центра  $[(V_a)^{++} \cdot e]$  с образованием центра  $[e \cdot (V_a)^{++} \cdot e]$ .*

**Ключевые слова:** наноразмерные пленки, галлий, оксид молибдена, системы галлий – оксид молибдена, термические превращения, энергетические зоны

**THERMAL TRANSFORMATIONS OF Ga-MoO<sub>3</sub> SYSTEM****L.N. Bugerko, S.V. Bin, E.P. Surovoi, V.E. Surovaya**

Lydiya N. Bugerko, Sergey V. Bin, Eduard P. Surovoi

Department of Analytical and Inorganic Chemistry, Kemerovo State University, Krasnaya st., 6, Kemerovo, 650023, Russia.

E-mail: lbugerko@mail.ru, peen@ngs.ru, epsur@kemsu.ru

Victoriya E. Surovaya\*

Department of Chemistry, Technology of Inorganic Substances and Nanomaterials, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Vesennyya st., 28, Kemerovo, 650000, Russia

E-mail: sur.vik@mail.ru\*

*Transformations in nanoscale Ga–MoO<sub>3</sub> systems are studied with methods of optical spectroscopy, microscopy, gravimetry, depending on the thickness of Ga (d = 2–96 nm) and MoO<sub>3</sub> (d = 7–62 nm) films, the temperature (473–773 K) and the heat treatment time. It was shown that the absorption spectra of the Ga–MoO<sub>3</sub> systems in the short-wavelength region of the spectrum ( $\lambda = 300–500$  nm) as the thickness of gallium films decreases are determined by the absorption of MoO<sub>3</sub> films, and in the long-wavelength region of the spectrum ( $\lambda = 500–1100$  nm), the absorption bands of gallium films appear. The kinetic dependences of the degree of conversion of MoO<sub>3</sub> and gallium films have been calculated, constructed and compared. It has been established that an increase in the thickness of MoO<sub>3</sub> films in Ga–MoO<sub>3</sub> systems at a constant processing temperature leads to a decrease in the degree of transformation of the center of  $[e \cdot (V_a)^{++}] \cdot e$  MoO<sub>3</sub> films, while an increase in temperature at a constant thickness of MoO<sub>3</sub> films contributes to its increase. It is shown that the rate of transformation of the center of  $[e \cdot (V_a)^{++}] \cdot e$  MoO<sub>3</sub> films in Ga–MoO<sub>3</sub> systems is higher than in individual MoO<sub>3</sub> films. The contact potential difference for Ga, MoO<sub>3</sub>, and photo-emf of Ga–MoO<sub>3</sub> is measured, which corresponds to a positive sign from the MoO<sub>3</sub> layer. A diagram of the energy bands of Ga–MoO<sub>3</sub> systems is constructed. A model is proposed for the thermal transformation of MoO<sub>3</sub> films in Ga–MoO<sub>3</sub> systems, including the redistribution of equilibrium charge carriers on the contact, the formation of the center  $[(V_a)^{++}] \cdot e$  during the preparation of the MoO<sub>3</sub> film, its transformation in the creation of Ga–MoO<sub>3</sub> systems at the center  $[e \cdot (V_a)^{++}] \cdot e$ , the thermal transition of the electron to the level of the center  $[(V_a)^{++}] \cdot e$  with the formation of the center  $[e \cdot (V_a)^{++}] \cdot e$ .*

**Key words:** nanosized films, gallium, molybdenum oxide, gallium-molybdenum systems, thermal transformations, energy bands

**Для цитирования:**

Бугерко Л.Н., Бин С.В., Суrowой Э.П., Суrowая В.Э. Термические превращения в системах Ga–MoO<sub>3</sub>. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2019. Т. 62. Вып. 5. С. 45–49

**For citation:**

Bugerko L.N., Bin S.V., Surovoi E.P., Surovaya V.E. Thermal transformations of Ga–MoO<sub>3</sub> system. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2019. V. 62. N 5. P. 45–49

## ВВЕДЕНИЕ

Пленочные покрытия широко применяются в качестве конструкционных элементов и функциональных слоев в современных электронных устройствах, деталях авиационной и космической техники, в качестве твердых износостойких покрытий [1]. Изучение закономерностей процессов, протекающих в двухслойных наноразмерных системах «металл – полупроводник (диэлектрик)» под действием энергетических факторов, представляет интерес в связи с разрабатываемой возможностью создания на их основе новых систем функционального назначения [2–17].

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Образцы для исследований готовили методом термического испарения в вакууме ( $2 \cdot 10^{-3}$  Па) путем нанесения тонких слоев Ga (2–96 нм) и MoO<sub>3</sub> (7–62 нм) на подложки из стекла, используя вакуумный универсальный пост «ВУП-5М». Двухслойные системы Ga–MoO<sub>3</sub> готовили путем последовательного нанесения слоев MoO<sub>3</sub> на слой Ga. Подложками служили, предварительно очищенные стекла

от фотопластинок (ГОСТ 9284-59) [5–7]. Образцы подвергали термической обработке в муфельной печи «МИМП-3П» в интервале температур 473–773 К. Регистрацию эффектов до и после обработки осуществляли гравиметрическим, микроскопическим и спектрофотометрическим (в диапазоне длин волн 190–1100 нм, используя спектрофотометр «Shimadzu UV-1700») методами. Измерения фотоЭДС ( $U_{\phi}$ ) проводили в вакууме [17]. Контактную разность потенциалов (КРП) между пленками галлия, оксида молибдена (VI) и электродом сравнения из платины измеряли, используя модифицированный метод Кельвина [18].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При исследовании оптических свойств наноразмерных пленок MoO<sub>3</sub>, Ga и двухслойных систем Ga–MoO<sub>3</sub> было установлено, что по мере увеличения толщины пленок галлия наблюдается увеличение оптической плотности систем Ga–MoO<sub>3</sub> в диапазоне  $\lambda = 300–1100$  нм. При увеличении толщины пленок MoO<sub>3</sub> оптическая плотность систем Ga–MoO<sub>3</sub> также возрастает, однако при этом в большей степени проявляется полоса поглощения в коротковолновой области спектра ( $\lambda = 300–500$  нм).

Для выяснения возможного взаимодействия между пленками Ga и MoO<sub>3</sub> в процессе приготовления систем Ga-MoO<sub>3</sub> были сопоставлены экспериментальные спектры поглощения с рассчитанными, полученными суммированием при каждой длине волны значений оптической плотности индивидуальных пленок MoO<sub>3</sub> и Ga аналогичной толщины. Рассчитанные и экспериментальные спектры поглощения всех систем не совпадают.

На рис. 1 приведены спектры поглощения системы Ga - MoO<sub>3</sub> в процессе термической обработки при T = 573 К.

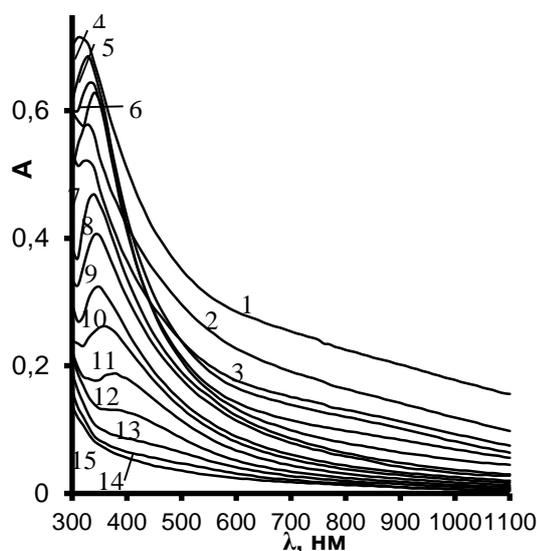


Рис. 1. Спектры поглощения системы Ga-MoO<sub>3</sub> толщиной d(Ga) = 2 нм, d(MoO<sub>3</sub>) = 44 нм до (1) и после теплового воздействия при T = 573 К: 2 – 2; 3 – 6; 4 – 15; 5 – 30; 6 – 60; 7 – 110; 8 – 350; 9 – 470; 10 – 650; 11 – 830; 12 – 1010; 13 – 1500; 14 – 3100; 15 – 4600 мин

Fig. 1. The absorption spectra of a Ga - MoO<sub>3</sub> system with a thickness of d (Ga) = 2 nm, d (MoO<sub>3</sub>) = 44 nm before (1) and after thermal exposure at T = 573 K: 2 – 2; 3 – 6; 4 – 15; 5 – 30; 6 – 60; 7 – 110; 8 – 350; 9 – 470; 10 – 650; 11 – 830; 12 – 1010; 13 – 1500; 14 – 3100; 15 – 4600 min

В процессе термической обработки оптическая плотность пленок MoO<sub>3</sub> (d = 7-62 нм) в коротковолновой области спектра (λ = 300-500 нм с максимумом λ = 350 нм) уменьшается и, как следствие, наблюдается смещение края полосы собственного поглощения в коротковолновую область спектра, а в длинноволновой области спектра (λ = 500-1100 нм с максимумом λ = 870 нм) возрастает [17]. При термической обработке пленок Ga (d = 2-96 нм) наблюдается уменьшение значений оптической плотности образца в интервале λ = 190-1100 нм и формирование спектра поглощения нового вещества – оксида галлия (III) [16].

По мере увеличения температуры и толщины пленок оксида молибдена (VI) и галлия при термообработке систем Ga-MoO<sub>3</sub> в диапазоне T = 473-773 К наблюдается увеличение эффектов изменения оптической плотности и уменьшение времени достижения их предельных значений.

Были рассчитаны и построены кинетические зависимости степени превращения пленок MoO<sub>3</sub> и галлия в системах Ga-MoO<sub>3</sub>. Выражение для расчета степени термического превращения центра T<sub>1</sub> – [(V<sub>a</sub>)<sup>++</sup> · e] в центр T<sub>2</sub> – [e · (V<sub>a</sub>)<sup>++</sup> · e] пленок MoO<sub>3</sub>:

$$\alpha = (A_{\text{обр}}^1 - A_{T_1}^1) / (A_{T_2}^1 - A_{T_1}^1),$$

где A<sub>T<sub>2</sub></sub><sup>1</sup>, A<sub>T<sub>1</sub></sub><sup>1</sup> – предельные оптические плотности при максимальной и минимальной концентрации центров T<sub>2</sub> при λ = 870 нм; A<sub>обр</sub><sup>1</sup> – значение оптической плотности образца.

Установлено, что при увеличении толщины пленок MoO<sub>3</sub> в системах Ga-MoO<sub>3</sub> при постоянной температуре термообработки степень превращения во всем исследованном интервале температур уменьшается. Показано, что скорость превращения центра T<sub>2</sub> пленок MoO<sub>3</sub> в системах Ga-MoO<sub>3</sub> больше, чем в индивидуальных пленках MoO<sub>3</sub> (рис. 2).

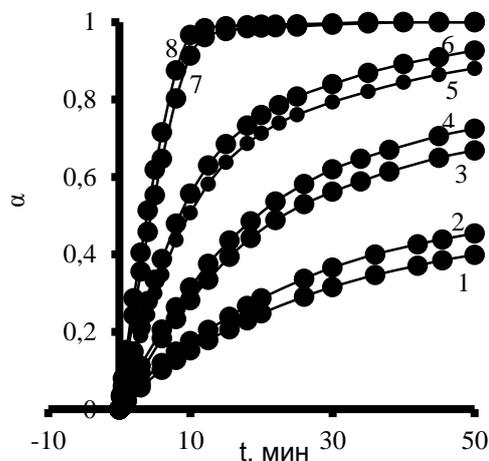


Рис. 2. Зависимость степени превращения центра T<sub>2</sub> пленки MoO<sub>3</sub> в системах Ga-MoO<sub>3</sub> (2, 4, 6) и в пленках MoO<sub>3</sub> (1, 3, 5) (d(Ga) = 6 нм, d(MoO<sub>3</sub>) = 42 нм) при разных температурах: 1, 2 – 473 К, 3, 4 – 573 К, 5, 6 – 673 К, 7, 8 – 773 К

Fig. 2. Dependence of the degree of transformation of the center of the T<sub>2</sub> MoO<sub>3</sub> film in the Ga-MoO<sub>3</sub> (2, 4, 6) and MoO<sub>3</sub> films (1, 3, 5) (d(Ga) = 6 nm, d(MoO<sub>3</sub>) = 42 nm) at different temperatures: 1, 2 – 473 K, 3, 4 – 573 K, 5, 6 – 673 K, 7, 8 – 773 K

Для выяснения причин, вызывающих наблюдаемые изменения металлом оптических свойств MoO<sub>3</sub> в разных спектральных областях были измерены величина и знак U<sub>ф</sub> для систем Ga-MoO<sub>3</sub>, КРП между MoO<sub>3</sub>, Ga и электродом сравнения из пла-

тины в условиях атмосферы ( $P = 1 \cdot 10^5$  Па) и высокого вакуума ( $P = 1 \cdot 10^{-5}$  Па). Наблюдаемое отличие в значениях работ выхода Ga и MoO<sub>3</sub> (+1,20 и +0,71 соответственно) свидетельствует о возможности при формировании плотного контакта и установлении в системе Ga-MoO<sub>3</sub> состояния термодинамического равновесия результирующего потока электронов из галлия в оксид молибдена (VI). В результате измерений  $U_{\Phi}$  для систем Ga-MoO<sub>3</sub> в диапазоне  $\lambda = 300-1100$  нм было установлено, что в процессе облучения светом формируется  $U_{\Phi}$  положительного знака со стороны слоя MoO<sub>3</sub>. Из анализа результатов измерений  $U_{\Phi}$  и КРП было установлено, что при создании контакта оксида молибдена (VI) с пленкой галлия в результате электронных переходов со стороны MoO<sub>3</sub> образуется обогащенный электронами антизапорный слой. Диаграмма энергетических зон систем Ga-MoO<sub>3</sub> представлена на рис. 3.

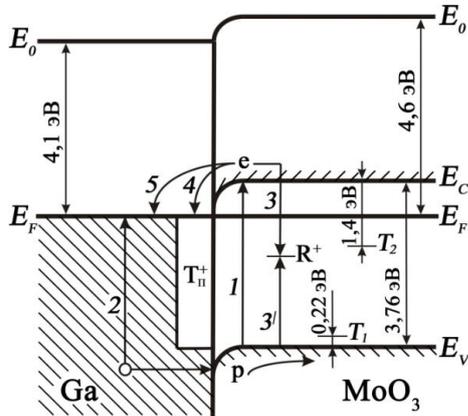


Рис. 3. Диаграмма энергетических зон системы Ga-MoO<sub>3</sub>: Ev – уровень потолка валентной зоны, Ec – уровень дна зоны проводимости, Ef – уровень Ферми, E0 – уровень вакуума, T1, T2, – уровни центров захвата, Tpi+ – уровни поверхностных электронных состояний, R+ – центр рекомбинации  
 Fig. 3. The diagram of the energy bands of the Ga-MoO<sub>3</sub> system: Ev – is the level of the top of the valence band, Ec – is the level of the bottom of the conduction band, Ef – is the Fermi level, E0 – is the vacuum level, T1, T2, – the levels of the trapping centers, Tpi+ – are the levels of surface electronic states, R+ – center of recombination

Известно, что полоса поглощения в диапазоне  $\lambda = 300-400$  нм с максимумом при  $\lambda = 350$  нм (центр T<sub>1</sub>) для монокристаллов MoO<sub>3</sub> связана со стехиометрическим недостатком кислорода и обусловлена вакансиями кислорода с одним захваченным электроном  $[(V_a)^{++} \cdot e]$  (аналог F-центра. Глубина залегания  $[(V_a)^{++} \cdot e]$ -центра составляет  $E_{T1}^1 = 3,54$  эВ. В процессе установления термодинамического равновесия из-за несоответствия работ выхода MoO<sub>3</sub> и Ga электроны из галлия переходят в оксид молибдена (VI) на уровни  $[(V_a)^{++} \cdot e]$ -центров с формированием  $[e \cdot (V_a)^{++} \cdot e]$ -центра, где  $(V_a)^{++}$  – анионная вакансия.

Преобразование  $[(V_a)^{++} \cdot e]$ -центра можно осуществить путем перевода электрона с уровня залегания центра на дно зоны проводимости:  $[(V_a)^{++} \cdot e] \rightarrow e + (V_a)^{++}$ , либо путем перевода электрона с потолка валентной зоны на уровень центра  $[(V_a)^{++} \cdot e]$  с образованием дырок (p).

Методами электронной микроскопии и рентгеновской дифракции продуктов последовательного восстановления оксида молибдена (VI) MoO<sub>3-γ</sub> установлено, что область нестехиометрии, в которой сохраняется неизменная структура MoO<sub>3</sub>, очень мала и соответствует значению  $\gamma < 0,001$  [13, 17]. Если оценить концентрацию  $[(V_a)^{++} \cdot e]$ -центров  $\approx 10^{18}$  см<sup>-3</sup> (и считать, что все анионные вакансии в MoO<sub>3</sub> заняты по одному электрону в каждой), то в идеальном случае (когда все электроны достигнут предназначенного для них места и не примут участия в других процессах) скорости процессов термического возбуждения электрона с уровней  $[(V_a)^{++} \cdot e]$ -центра на дно зоны проводимости и термического возбуждения электрона с потолка валентной зоны на уровни  $[(V_a)^{++} \cdot e]$ -центра составят  $W_1 \approx 1 \cdot 10^2$  см<sup>-3</sup>·с<sup>-1</sup> и  $W_2 \approx 5 \cdot 10^{31}$  см<sup>-3</sup>·с<sup>-1</sup> соответственно. В результате за 1 с переходит  $\approx 10^2$  электронов – малое количество. Широкая полоса поглощения с максимумом при  $\lambda = 870$  нм, связана с формированием  $[e \cdot (V_a)^{++} \cdot e]$ -центров. Дырки могут захватываться собственными и примесными дефектами с выделением кислорода и освобождением анионных вакансий. Анионные вакансии будут взаимодействовать с электронами переходящими из галлия с формированием центров T<sub>1</sub> и T<sub>2</sub>:  $e + (V_a)^{++} \rightarrow e + [(V_a)^{++} \cdot e] \rightarrow [e \cdot (V_a)^{++} \cdot e]$ .

Увеличение концентрации электронов со стороны MoO<sub>3</sub> в состоянии термодинамического равновесия системы Ga-MoO<sub>3</sub> во-первых обеспечивает превращение части центров T<sub>1</sub> в центры T<sub>2</sub> в пленке MoO<sub>3</sub>, и во вторых должно привести к увеличению скорости термостимулированного процесса превращения оставшихся центров  $[(V_a)^{++} \cdot e]$  в центры  $[e \cdot (V_a)^{++} \cdot e]$ .

#### ВЫВОДЫ

Полученные в настоящей работе результаты исследований свидетельствуют о контактной природе эффектов изменения пленками Ga скорости термического превращения пленок MoO<sub>3</sub>. При создании систем Ga - MoO<sub>3</sub> происходит преобразование центра  $[(V_a)^{++} \cdot e]$  в слоях MoO<sub>3</sub> в центр  $[e \cdot (V_a)^{++} \cdot e]$ . В результате теплового воздействия систем Ga - MoO<sub>3</sub> электроны переходящие из галлия в слой MoO<sub>3</sub> способствуют более быстрому формированию центров T<sub>1</sub> и T<sub>2</sub>.

## ЛИТЕРАТУРА

## REFERENCES

1. **Раков Э.Г.** Неорганические наноматериалы. М.: Бином. 2013. 477 с.
2. **Surovoi E.P., Borisova N.V.** Regularities of Photostimulated Conversions in Nanometer Aluminum Layers. *J. Phys. Chem.* 2009. V. 83. N 13. P. 2302–2307. DOI: 10.1134/S0036024409130202.
3. **Суrowой Э.П., Борисова Н.В.** Закономерности формирования наноразмерных систем медь–оксид меди (I). *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2009. Т. 52. Вып. 4. С. 54–57.
4. **Суrowой Э.П., Бугерко Л.Н., Суrowая В.Э., Бин С.В.** Кинетические закономерности термических превращений в наноразмерных пленках висмута. *Журн. физ. химии.* 2012. Т. 86. № 4. С. 702–709. DOI: 10.1134/S0036024412040231.
5. **Борисова Н.В., Бугерко Л.Н., Говорина С.П., Суrowой Э.П.** Изучение процесса взаимодействия наноразмерных систем медь–оксид меди (I) с аммиаком. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2010. Т. 53. Вып. 1. С. 60–63.
6. **Суrowой Э.П., Еремеева Г.О.** Термостимулированные превращения наноразмерных систем In - MoO<sub>3</sub>. *Неорган. материалы.* 2013. Т. 49. № 4. С. 404–409. DOI: 10.1134/S0020168513030205.
7. **Еремеева Г.О., Суrowой Э.П.** Термостимулированные превращения в наноразмерных пленках индия. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2012. Т. 55. Вып. 12. С. 63–67.
8. **Суrowой Э.П., Бугерко Л.Н., Суrowая В.Э.** Кинетика фотостимулированных превращений в наноразмерных пленках висмута. *Журн. физ. химии.* 2013. Т. 87. № 9. С. 1565–1571. DOI: 10.1134/S0036024413090239.
9. **Суrowой Э.П., Сухорукова А.А., Бин С.В.** Закономерности формирования наноразмерных систем кобальт–оксид кобальта. *Неорган. материалы.* 2014. Т. 50. № 4. С. 436–441.
10. **Суrowой Э.П., Бугерко Л.Н., Суrowая В.Э., Бин С.В.** Кинетические закономерности термических превращений в наноразмерных пленках никеля. *Журн. физ. химии.* 2014. Т. 88. № 12. С. 1970–1976. DOI: 10.1134/S0036024414120358.
11. **Суrowой Э.П., Бин С.В., Бугерко Л.Н., Суrowая В.Э.** Кинетические закономерности термических превращений в наноразмерных пленках свинца. *Журн. физ. химии.* 2015. Т. 89. № 1. С. 85–91. DOI: 10.1134/S0036024415010276.
12. **Суrowой Э.П., Бугерко Л.Н., Суrowая В.Э., Заиконникова Т.М.** Кинетические закономерности формирования наноразмерной системы марганец – оксид марганца. *Журн. физ. химии.* 2016. Т. 90. № 3. С. 411–416. DOI: 10.1134/S0036024416030298.
13. **Суrowой Э.П., Бин С.В.** Кинетические закономерности термических превращений в наноразмерных системах Ni – MoO<sub>3</sub>. *Журн. физ. химии.* 2017. Т. 91. № 2. С. 361–367. DOI: 10.1134/S0036024417020315.
14. **Калыгина В.М., Зарубин А.Н., Найден Е.П.** Анодные пленки Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Влияние термического отжига на свойства пленок. *ФТП.* 2012. Т. 46. № 2. С. 278–284.
15. **Калыгина В.М., Зарубин А.Н., Новиков В.А., Петрова Ю.С.** Пленки оксида галлия, полученные методом термического напыления. *ФТП.* 2013. Т. 47. № 5. С. 598–603.
16. **Суrowой Э.П., Сухорукова А.А., Бин С.В.** Закономерности формирования наноразмерных систем галлий–оксид галлия. *Неорган. материалы.* 2014. Т. 50. № 12. С. 1287–1292.
17. **Суrowой Э.П., Борисова Н.В.** Термические превращения в наноразмерных слоях MoO<sub>3</sub>. *Журн. физ. химии.* 2008. Т. 82. № 11. С. 2120–2125.
18. **Суrowая В.Э., Бугерко Л.Н., Суrowой Э.П.** Определение работы выхода наноразмерных пленок висмута и оксида висмута (III). *Изв. вузов. Физика.* 2014. Т. 57. № 7/2. С. 173–178.
19. **Панков Ж.** Оптические процессы в полупроводниках. М.: Мир. 1973. 456 с.
1. **Rakov E.G.** Inorganic nanomaterials. M: Binom. 2013. 477 p. (in Russian).
2. **Surovoi E.P., Borisova N.V.** Regularities of Photostimulated Conversions in Nanometer Aluminum Layers. *J. Phys. Chem.* 2009. V. 83. N 13. P. 2302–2307. DOI: 10.1134/S0036024409130202.
3. **Surovoi E.P., Borisova N.V.** Regularities in the formation of nanoscale copper-copper oxide (I) systems. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2009. V. 52. N 4. P. 54–57 (in Russian).
4. **Surovoi E.P., Bugerko L.N., Surovaya V.E., Bin S.V.** Kinetic regularities of thermal transformations in nanosized bismuth films. *Russ. J. Phys. Chem.* 2012. V. 86. N 4. P. 702–709 (in Russian). DOI: 10.1134/S0036024412040231.
5. **Borisova N.V., Bugerko L.N., Govorina S.P., Surovoi E.P.** Study of the interaction of nanoscale copper-oxide copper (I) systems with ammonia. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2010. V. 53. N 1. P. 60–63 (in Russian).
6. **Surovoi E.P., Eremeeva G.O.** Thermally stimulated transformations of nanosized In-MoO<sub>3</sub> systems. *Neorg. Mater.* 2013. V. 49. N 4. P. 404–409 (in Russian). DOI: 10.1134/S0020168513030205.
7. **Eremeeva G.O., Surovoi E.P.** Thermally stimulated transformations in nanosized indium films. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2012. V. 55. N 12. P. 63–67 (in Russian).
8. **Surovoi E.P., Bugerko L.N., Surovaya V.E.** Kinetics of photostimulated transformations in nanosized bismuth films. *Zhurn. Fizich. Khim.* 2013. V. 87. N 9. P. 1565–1571 (in Russian). DOI: 10.1134/S0036024413090239.
9. **Surovoi E.P., Sukhorukova A.A., Bin S.V.** Regularities in the formation of nanoscale systems of cobalt-cobalt oxide. *INEorg. Mater.* 2014. V. 50. N 4. P. 436–441 (in Russian).
10. **Surovoi E.P., Bugerko L.N., Surovaya V.E., Bin S.V.** Kinetic regularities of thermal transformations in nanosized nickel films. *Russ. J. Phys. Chem.* 2014. V. 88. N 12. P. 1970–1976 (in Russian). DOI: 10.1134/S0036024414120358.
11. **Surovoi E.P., Bin S.V., Surovaya V.E., Bugerko L.N.** Kinetic regularities of thermal transformations in nanosized lead films. *Zhurn. Fizich. Khim.* 2015. V. 89. N 1. P. 85–91 (in Russian). DOI: 10.1134/S0036024415010276.
12. **Surovoi E.P., Bugerko L.N., Surovaya V.E., Zaikonnikova T.M.** Kinetic regularities in the formation of a nanoscale system of manganese-manganese oxide. *Zhurn. Fizich. Khim.* 2016. V. 90. N 3. P. 411–416 (in Russian). DOI: 10.1134/S0036024416030298.
13. **Surovoi E.P., Bin S.V.** Kinetic regularities of thermal transformations in nanosized Ni - MoO<sub>3</sub> systems. *Zhurn. Fizich. Khim.* 2017. V. 91. N 2. P. 361–367 (in Russian). DOI: 10.1134/S0036024417020315.
14. **Kalygina V.M., Zarubin A.N., Naiden E.P.** Anode films of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Influence of thermal annealing on the properties of films. *FTP.* 2012. V. 46. N 2. P. 278–284 (in Russian).
15. **Kalygina V.M., Zarubin A.N., Novikov V.A., Petrova Yu.S.** Gallium oxide films obtained by the thermal deposition method. *FTP.* 2013. V. 47. N 5. P. 598–603 (in Russian).
16. **Surovoi E.P., Sukhorukova A.A., Bin S.V.** Regularities in the formation of nanoscale systems of gallium-gallium oxide. *Neorg. Mater.* 2014. V. 50. N 12. P. 1287–1292 (in Russian).
17. **Surovoi E.P., Borisova N.V.** Thermal transformations in nanosized MoO<sub>3</sub> layers. *Zhurn. Fizich. Khim.* 2008. V. 82. N 11. P. 2120–2125 (in Russian).
18. **Surovaya V.E., Bugerko L.N., Surovoi E.P.** Determination of the work function of nanosized bismuth films and bismuth (III) oxide. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Fizika.* 2014. V. 57. N 7/2. P. 173–178 (in Russian).
19. **Pankov Zh.** Optical processes in semiconductors. M.: Mir. 1973. 456 p. (in Russian).

Поступила в редакцию (Received) 03.05.2018

Принята к опубликованию (Accepted) 22.04.2019