

ТЕРМИЧЕСКИЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СИСТЕМАХ Ga-MoO₃

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-MoO₃ в зависимости от толщины пленок Ga ($d = 2-96$ нм) и MoO₃ ($d = 7-62$ нм), температуры (473 - 773 К) и времени термообработки. Показано, что спектры поглощения систем Ga-MoO₃ в коротковолновой области спектра ($\lambda = 300-500$ нм) по мере уменьшения толщины пленок галлия определяются поглощением пленок MoO₃, а в длинноволновой области спектра ($\lambda = 500-1100$ нм) проявляются полосы поглощения пленок галлия. Рассчитаны, построены и сопоставлены кинетические зависимости степени превращения пленок MoO₃ и галлия. Установлено, что увеличение толщины пленок MoO₃ в системах Ga-MoO₃ при постоянной температуре обработки приводит к уменьшению степени превращения центра $[e \cdot (V_a)^{++} \cdot e]$ пленок MoO₃, в то время как увеличение температуры при постоянной толщине пленок MoO₃ способствует ее возрастанию. Показано, что скорость превращения центра $[e \cdot (V_a)^{++} \cdot e]$ пленок MoO₃ в системах Ga-MoO₃ больше, чем в индивидуальных пленках MoO₃. Измерена контактная разность потенциалов для пленок Ga, MoO₃ и фото-ЭДС системы Ga-MoO₃, которая соответствует положительному знаку со стороны слоя MoO₃. Построена диаграмма энергетических зон систем Ga-MoO₃. Предложена модель термического превращения пленок MoO₃ в системах Ga-MoO₃, включающая перераспределение на контакте равновесных носителей заряда, формирование в процессе приготовления пленки MoO₃ центра $[(V_a)^{++} \cdot e]$, преобразование его при создании систем Ga-MoO₃ 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-MoO₃ 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–MoO₃ systems are studied with methods of optical spectroscopy, microscopy, gravimetry, depending on the thickness of Ga (d = 2–96 nm) and MoO₃ (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–MoO₃ 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 MoO₃ 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 MoO₃ and gallium films have been calculated, constructed and compared. It has been established that an increase in the thickness of MoO₃ films in Ga–MoO₃ systems at a constant processing temperature leads to a decrease in the degree of transformation of the center of $[e \cdot (V_a)^{++}] \cdot e$ MoO₃ films, while an increase in temperature at a constant thickness of MoO₃ films contributes to its increase. It is shown that the rate of transformation of the center of $[e \cdot (V_a)^{++}] \cdot e$ MoO₃ films in Ga–MoO₃ systems is higher than in individual MoO₃ films. The contact potential difference for Ga, MoO₃, and photo-emf of Ga–MoO₃ is measured, which corresponds to a positive sign from the MoO₃ layer. A diagram of the energy bands of Ga–MoO₃ systems is constructed. A model is proposed for the thermal transformation of MoO₃ films in Ga–MoO₃ 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 MoO₃ film, its transformation in the creation of Ga–MoO₃ 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–MoO₃. *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–MoO₃ 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 MoO₃ (7–62 нм) на подложки из стекла, используя вакуумный универсальный пост «ВУП-5М». Двухслойные системы Ga–MoO₃ готовили путем последовательного нанесения слоев MoO₃ 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_{ϕ}) 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 MoO₃, Ga и двухслойных систем Ga–MoO₃ было установлено, что по мере увеличения толщины пленок галлия наблюдается увеличение оптической плотности систем Ga–MoO₃ в диапазоне $\lambda = 300–1100$ нм. При увеличении толщины пленок MoO₃ оптическая плотность систем Ga–MoO₃ 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 MoO₃ в процессе приготовления систем Ga-MoO₃ были сопоставлены экспериментальные спектры поглощения с рассчитанными, полученными суммированием при каждой длине волны значений оптической плотности индивидуальных пленок MoO₃ и Ga аналогичной толщины. Рассчитанные и экспериментальные спектры поглощения всех систем не совпадают.

На рис. 1 приведены спектры поглощения системы Ga - MoO₃ в процессе термической обработки при T = 573 К.

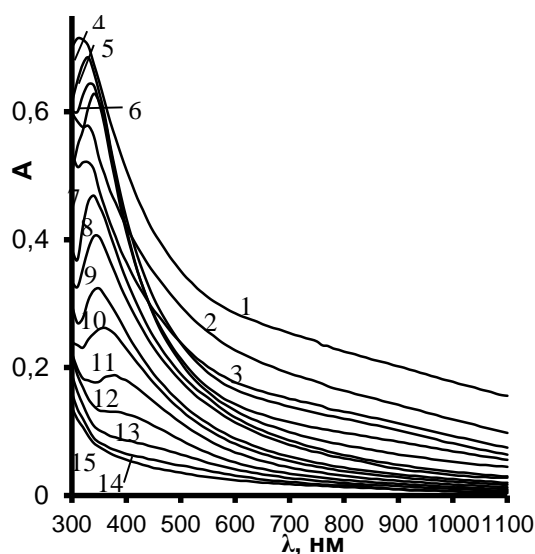


Рис. 1. Спектры поглощения системы Ga-MoO₃ толщиной d(Ga) = 2 нм, d(MoO₃) = 44 нм до (1) и после теплового воздействия при T = 573 К: 2 – 2; 3 – 6; 4 – 15; 5 – 30; 6 – 60; 7 – 110; 8 – 350; 9 – 470; 10 – 650; 11 – 830; 12 – 1010; 13 – 1500; 14 – 3100; 15 – 4600 мин

Fig. 1. The absorption spectra of a Ga - MoO₃ system with a thickness of d (Ga) = 2 nm, d (MoO₃) = 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 MoO₃ (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-MoO₃ 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 MoO₃ и галлия в системах Ga-MoO₃. Выражение для расчета степени термического превращения центра T₁ – [(V_a)⁺⁺ · e] в центр T₂ – [e · (V_a)⁺⁺ · e] пленок MoO₃:

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

где A_{T₂}¹, A_{T₁}¹ – предельные оптические плотности при максимальной и минимальной концентрации центров T₂ при λ = 870 нм; A_{обр}¹ – значение оптической плотности образца.

Установлено, что при увеличении толщины пленок MoO₃ в системах Ga-MoO₃ при постоянной температуре термообработки степень превращения во всем исследованном интервале температур уменьшается. Показано, что скорость превращения центра T₂ пленок MoO₃ в системах Ga-MoO₃ больше, чем в индивидуальных пленках MoO₃ (рис. 2).

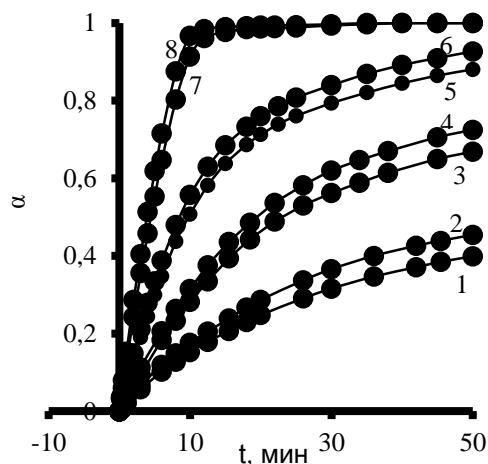


Рис. 2. Зависимость степени превращения центра T₂ пленки MoO₃ в системах Ga-MoO₃ (2, 4, 6) и в пленках MoO₃ (1, 3, 5) (d(Ga) = 6 нм, d(MoO₃) = 42 нм) при разных температурах: 1, 2 – 473 К, 3, 4 – 573 К, 5, 6 – 673 К, 7, 8 – 773 К

Fig. 2. Dependence of the degree of transformation of the center of the T₂ MoO₃ film in the Ga-MoO₃ (2, 4, 6) and MoO₃ films (1, 3, 5) (d(Ga) = 6 nm, d(MoO₃) = 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 MoO₃ в разных спектральных областях были измерены величина и знак U_ф для систем Ga-MoO₃, КРП между MoO₃, 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 MoO₃ (+1,20 и +0,71 соответственно) свидетельствует о возможности при формировании плотного контакта и установлении в системе Ga-MoO₃ состояния термодинамического равновесия результирующего потока электронов из галлия в оксид молибдена (VI). В результате измерений U_{Φ} для систем Ga-MoO₃ в диапазоне $\lambda = 300-1100$ нм было установлено, что в процессе облучения светом формируется U_{Φ} положительного знака со стороны слоя MoO₃. Из анализа результатов измерений U_{Φ} и КРП было установлено, что при создании контакта оксида молибдена (VI) с пленкой галлия в результате электронных переходов со стороны MoO₃ образуется обогащенный электронами антизапорный слой. Диаграмма энергетических зон систем Ga-MoO₃ представлена на рис. 3.

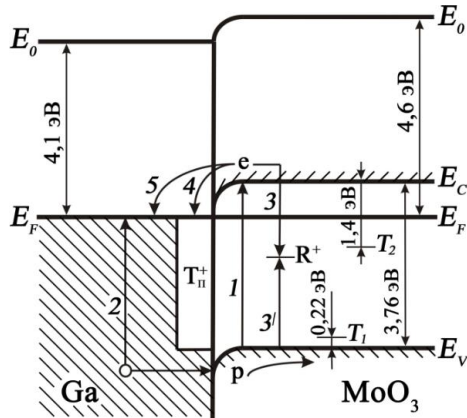


Рис. 3. Диаграмма энергетических зон системы Ga-MoO₃: Ev – уровень потолка валентной зоны, Ec – уровень дна зоны проводимости, Ef – уровень Ферми, E₀ – уровень вакуума, T₁, T₂, – уровни центров захвата, T_π⁺ – уровни поверхностных электронных состояний, R⁺ – центр рекомбинации
 Fig. 3. The diagram of the energy bands of the Ga-MoO₃ 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, T_π⁺ – 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 T₁) для монокристаллов MoO₃ 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 $E_{T_1}^1 = 3,54$ эВ. В процессе установления термодинамического равновесия из-за несоответствия работ выхода MoO₃ 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_{3-γ} установлено, что область нестехиометрии, в которой сохраняется неизменная структура MoO₃, очень мала и соответствует значению $\gamma < 0,001$ [13, 17]. Если оценить концентрацию $[(V_a)^{++} \cdot e]$ -центров $\approx 10^{18}$ см⁻³ (и считать, что все анионные вакансии в MoO₃ 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⁻³·с⁻¹ и $W_2 \approx 5 \cdot 10^{31}$ см⁻³·с⁻¹ 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 T₁ и T₂: $e + (V_a)^{++} \rightarrow e + [(V_a)^{++} \cdot e] \rightarrow [e \cdot (V_a)^{++} \cdot e]$.

Увеличение концентрации электронов со стороны MoO₃ в состоянии термодинамического равновесия системы Ga-MoO₃ во-первых обеспечивает превращение части центров T₁ в центры T₂ в пленке MoO₃, 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 MoO₃. При создании систем Ga - MoO₃ происходит преобразование центра $[(V_a)^{++} \cdot e]$ в слоях MoO₃ в центр $[e \cdot (V_a)^{++} \cdot e]$. В результате теплового воздействия систем Ga - MoO₃ электроны переходящие из галлия в слой MoO₃ способствуют более быстрому формированию центров T₁ и T₂.

ЛИТЕРАТУРА

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 - MoO₃. *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 – MoO₃. *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 Ga₂O₃. 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 MoO₃. *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.

REFERENCES

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-MoO₃ 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 - MoO₃ 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 Ga₂O₃. 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 MoO₃ 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