

## **ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПРОВОДИМОСТИ ПЛЕНКИ Cu:SnO<sub>2</sub> НА ВОЗДУХЕ**

Н.А. Клычков, В.В. Симаков, И.В. Синёв

*ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный  
университет им. Н.Г. Чернышевского»,  
410012, Россия, Саратов, ул. Астраханская, 83  
nklychkov@mail.ru*

DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.119

**Аннотация:** Проведены исследования температурной зависимости проводимости пленок на основе *Cu:SnO<sub>2</sub>*, изготовленных с помощью магнетронного распыления смешанной мишени *CuO/SnO<sub>2</sub>*. Температурные зависимости проводимости носили существенно нелинейный характер. Обнаружено, что на температурной зависимости наблюдается локальный минимум проводимости вблизи температуры 330°C. Для объяснения полученных результатов предложена математическая модель адсорбции частиц кислорода на поверхности широкозонных полупроводников в различных формах. Предполагалось, что адсорбция частиц кислорода приводит к возникновению примесных уровней акцепторного типа, локализованных вблизи поверхности полупроводника. Выполненное моделирование в рамках предложенной модели показало качественную и количественную согласованность результатов расчета и экспериментальных данных температурной зависимости проводимости сформированных газочувствительных слоев *Cu:SnO<sub>2</sub>* в кислородсодержащей атмосфере. Анализ экспериментальной температурной зависимости показал, что локальный минимум проводимости обусловлен термоактивационным процессом диссоциации частиц кислорода, адсорбированных в молекулярной форме. Оценены энергии десорбции каждой формы адсорбированного кислорода и глубина залегания их поверхностного акцепторного уровня.

*Ключевые слова:* температурная зависимость проводимости, диссоциация кислорода, диоксид олова, модель газовой чувствительности.

### **1. Введение**

Одними из наиболее перспективных материалов для использования в качестве сенсоров газа является диоксид олова и композиты на его основе [1, 2]. С прикладной точки зрения, одной из важнейших характеристик датчика газа является температурная зависимость проводимости его активного слоя. Температурная зависимость отражает физику процессов, происходящих на поверхности полупроводника [3-5]. Так, например, известно, что поверхность (110) *SnO<sub>2</sub>* выступает в роли катализатора процесса диссоциации молекулярного кислорода [6, 7]. Температурный режим, при котором достигаются наибольшие значения отклика датчика газа, индивидуален для каждого анализируемого вещества, поэтому, температурная зависимость также может быть использована для распознавания сорта примесных веществ в воздухе [8].

Разработка модели, описывающей взаимосвязь между адсорбционными процессами и транспортными свойствами

полупроводниковых слоёв, имеет научное значение для разработки и совершенствования газочувствительных структур с контролируемыми параметрами [9-11].

## **2. Методика эксперимента и образцы**

Пленки  $SnO_2$  были синтезированы методом реактивного магнетронного распыления. Смешанная мишень  $CuO/SnO_2$  распылялась в системе вакуумного осаждения ORION-40T (Korea Vac-Тес Co., Ltd.) в режиме радиочастотного распыления. Газочувствительные слои осаждались на подложки  $Al_2O_3$  размером  $5 \times 10$  мм в аргонокислородной смеси с суммарным расходом 100 мл/мин. Осажденные слои  $Cu:SnO_2$  подвергали перекристаллизационному отжигу при  $500^\circ C$  в течение часа в атмосфере, содержащей кислород. Отжиг производился в трубчатой электропечи SNOЛ 0.2/1250 при атмосферном давлении. Методом термического испарения на образцы через маску наносилась контактная система, представляющая собой систему двух параллельных хромовых электродов. Методика измерения температурной проводимости состояла в последовательном увеличении температуры нагревателя в диапазоне температур  $20-400^\circ C$  с шагом  $25^\circ C$ . Поддержание  $T$  в рабочей камере осуществлялось с помощью термостата, оснащенного пропорционально-интегрально-дифференциальным регулятором. Датчик газа нагревался со скоростью  $1^\circ C$  в секунду. Чистый осушенный воздух непрерывно подавался в рабочую камеру с расходом 100 мл/мин на протяжении всего эксперимента. Проводимость активного слоя датчика при каждой  $T$  измерялась в течение часа после достижения стационарного уровня.

## **3. Экспериментальные результаты и их обсуждение**

Для описания электрических свойств поликристаллического слоя необходимо рассмотреть процесс переноса заряда в соседних зернах  $SnO_2$ , приведенных в контакт. Предположительно, на поверхности зерен существуют центры адсорбции  $N_s$ , плотность которых постоянна, является свойством материала, и зависит лишь от предварительной обработки поверхности. Для частиц газа каждого сорта существуют собственные, не взаимодействующие между собой центры адсорбции.

Известно, что хемосорбированный кислород создает в запрещенной зоне полупроводника поверхностные состояния акцепторного типа [12]. Адсорбция происходит только на свободные центры, а адсорбированные частицы не взаимодействуют. Десорбция поддерживается за счет нейтральной формы и зависит от теплоты десорбции, степени заполнения поверхности и количества попыток десорбции. Уравнение баланса

адсорбирующихся частиц газа-окислителя может быть выражено как [13]:

$$\alpha_a P_a \cdot (N_s - N_a) = \nu \cdot N_a (1 - f_a) \exp(-Q_a / k_b T), \quad (1)$$

где  $\alpha_a = \kappa s / \sqrt{2\pi m k_b T_g}$  – кинетический коэффициент изотермы Ленгмюра,  $T_g$  – температура газа,  $k_b$  – постоянная Больцмана,  $s$  – эффективная площадь сечения захвата,  $m$  – масса молекулы газа,  $\nu = k_b T / h$  – характеристическая частота фонона,  $N_a$  – поверхностная плотность адсорбированных частиц,  $f_a = n_s / (n_s + n_a)$  – вероятность ионизации акцепторного уровня, индуцированного газом-окислителем,  $n_s$  – концентрация электронов в зоне проводимости на поверхности зерна,  $n_a = g_a N_c \exp(-(E_c - E_a) / k_b T)$  – концентрация электронов в зоне проводимости, когда уровень Ферми совпадает с поверхностным акцепторным уровнем,  $g_a$  – фактор спинового вырождения,  $N_c$  – плотность состояний в зоне проводимости,  $E_a$  – положение акцепторного уровня относительно дна зоны проводимости,  $T$  – температура зерна,  $Q_a$  – теплота десорбции.

На поверхности  $SnO_2$  существует несколько типов адсорбционных центров кислорода, к тому же, кислород может находиться в молекулярной и атомарной формах [14]. Ограничимся рассмотрением двух случаев, когда молекулы кислорода могут занимать один или два центра адсорбции соответственно. Адсорбцию частиц на два центра адсорбции можно рассматривать как появление двух независимых событий, а именно – наличие двух близких друг другу незанятых центра адсорбции. Степень заполнения поверхности каждой конфигурацией кислорода можно выразить в явном виде, исходя из уравнения баланса (1):

$$\theta_1 = (1 - \theta_1 - \theta_2 - \theta_a) \frac{\psi_1}{(1 - f_{a_1})}, \quad (2)$$

$$\theta_2 = (1 - \theta_1 - \theta_2 - \theta_a) \frac{\psi_2}{(1 - f_{a_2})^2}, \quad (3)$$

где  $\psi_i = \alpha_a P_a / \nu \exp(-Q_i / k_b T)$  – безразмерный нормировочный параметр модели,  $\theta_i = N_{a_i} / N_s$  – степень заполнения поверхности молекулярным кислородом в  $i$ -той конфигурации,  $\theta_a$  – степень заполнения атомарным кислородом.

Предположим, что адсорбция атомарного кислорода поддерживается за счет диссоциации молекул, занимающих два адсорбционных центра. Атомарный кислород также может ассоциироваться в молекулы при условии близости двух центров, заполненных ионизованными атомами. Уравнение баланса в таком случае примет следующий вид:

$$A \cdot \theta_2^2 = \theta_a^2 + \theta_a \cdot \beta, \quad (4)$$

где  $A = K_a \exp(-E_a/k_bT)$  – коэффициент адсорбции атомарного кислорода,  $\beta = K_d \exp(-Q_d/k_bT)(1-f_a)$  – коэффициент десорбции.  $K_a, K_d$  – константы скорости диссоциации и десорбции соответственно. Заполнение локализованных поверхностных состояний электронами приводит к накоплению электрического заряда на поверхности зерен с концентрацией:

$$Q_s = -qN_s(\theta_1 f_{a_1} + \theta_2 f_{a_2} + \theta_a f_a). \quad (5)$$

Адсорбция кислорода на поверхности оксида олова ограничена вследствие образования изгиба энергетических зон вблизи поверхности. Хемосорбция не может продолжаться, если уровень Ферми совпадает с наивысшим энергетическим уровнем поверхностных состояний. Наличие отрицательного поверхностного заряда приводит к истощению объема зерна электронами, что способствует образованию электрического поля [15]. В рамках одномерной задачи распределение электрического потенциала определялось из решения уравнения Пуассона:

$$\varepsilon\varepsilon_0(dE(x)/dx) = q \cdot (N_D^+ - n + p), \quad (6)$$

где  $E(x) = d\varphi(x)/dx$  – напряженность электрического поля,  $\varphi = (E_c - E_f)/k_bT$  – положение уровня Ферми относительно дна зоны проводимости,  $N_D^+$  – концентрация ионизованных доноров в объеме зерна,  $n, p$  – концентрация электронов и дырок в объеме зерна соответственно,  $\varepsilon_0, \varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость вакуума и средняя диэлектрическая проницаемость материала зерна. Перенос заряда в зерне рассматривался с точки зрения диффузионно-дрейфового приближения:

$$j = q\mu_n nE + qD_n(dn(x)/dx), \quad (7)$$

где  $\mu_n = const$  – подвижность электронов,  $D_n = \mu_n k_bT$  – коэффициент диффузии.

Предполагалось, что напряженность поля, приложенного к системе контактирующих зерен существенно меньше напряженности поля, индуцированного поверхностным зарядом  $Q_s$ . Концентрация электронов в зоне проводимости рассчитывалась при условии отсутствия тока ( $j = 0$ ):

$$n(x) = N_c \exp\left(-\left(q/k_bT\right) \int_0^x E(r) dr\right). \quad (8)$$

Для решения уравнения Пуассона были сформулированы граничные условия в интегральном виде – электронейтральность системы двух одинаковых контактирующих зерен:

$$\left\{ \begin{array}{l} E(0) = E(\Lambda) = 0, \\ \int_0^\Lambda q \cdot (N_D^+ - n + p) d\xi = \frac{N_s}{N_c L_c} \cdot Q_s, \end{array} \right. \quad (9)$$

где  $\Lambda = \sum_{i=2} L_i / L_c$  – нормированная на длину экранирования суммарная длина контактирующих зерен,  $L_i$  – длина  $i$ -го зерна,  $L_c$  – характеристическая длина экранирования:

$$L_c = \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0 \cdot k_b T}{q^2 \cdot N_c}}. \quad (10)$$

Численное решение уравнения Пуассона (6) с граничными условиями (9) получено с помощью метода Ньютона. Система (2)-(4) решалась итерационно методом Гаусса с выбором главного элемента.

Считалось, что для осуществления переноса заряда электронам необходимо преодолеть потенциальные барьеры между зернами, что эквивалентно схеме с последовательным соединением сопротивлений:

$$G_i^{-1} = \int_{L_i} \frac{1}{qn(x)\mu_n} \frac{dx}{S}, \quad (11)$$

где  $G_i$  – проводимость  $i$ -го зерна,  $S$  – площадь поперечного сечения.

На рис. 1 изображена температурная зависимость проводимости сенсора на основе диоксида олова в атмосфере сухого воздуха.

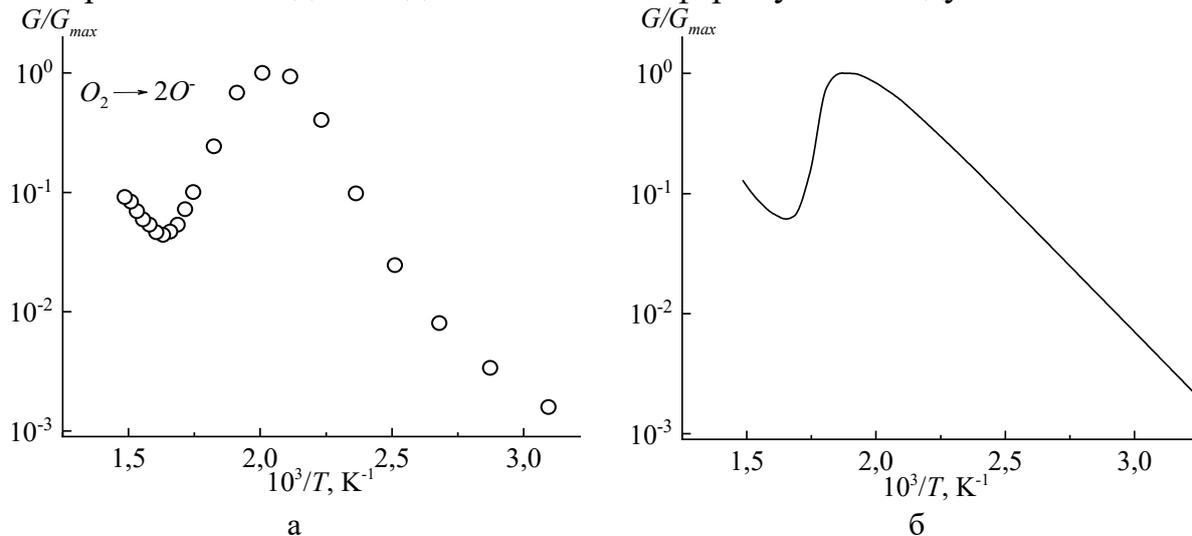


Рис. 1. Экспериментальная (а) и теоретическая (б) температурная зависимость проводимости пленки  $SnO_2$  в атмосфере сухого воздуха.

Согласно произведенным расчетам, при относительно низких температурах ( $T < 200^\circ C$ ) на поверхности, преимущественно, находятся ионы молекулярных форм кислорода. Установлено, что при температуре порядка  $250^\circ C$  и выше степень заполнения поверхности ионами атомарного кислорода существенно возрастает. При этом резко уменьшается концентрация молекулярного кислорода, что указывает на процесс диссоциации. Температурные диапазоны хорошо согласуются с литературными данными [16]. Глубины залегания акцепторных уровней  $E_a$  и теплоты десорбции  $Q_a$  составили 0,5, 0,44, 1,1 эВ и 0,89, 0,83, 1 эВ для

молекулярного (1 центр адсорбции), молекулярного (2 центра адсорбции) и атомарного кислорода соответственно. Таким образом, локальный минимум проводимости связан с переходом молекулярной формы кислорода в атомарную, обладающую большей глубиной залегания. Увеличение проводимости при температурах более 350°C связано с десорбцией атомарного кислорода.

#### **4. Заключение**

Выполнены исследования температурной зависимости проводимости пленок  $Cu:SnO_2$  в кислородсодержащей атмосфере. Сформулирована модель, основанная на рассмотрении одномерного случая двух контактирующих зерен материала в атмосфере кислорода. Взаимодействие поверхности с газовой фазой обсуждается в рамках теории адсорбции Ленгмюра. Предложенная модель учитывает наличие различных форм адсорбированного кислорода. Расчеты, произведенные согласно математической модели, адекватно описывают экспериментальные данные и подтверждают гипотезу о том, что локальный минимум проводимости на температурной зависимости связан с увеличением поверхностной концентрации атомарных ионов кислорода с более глубокими энергетическими уровнями.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-22-00134)*

#### **Библиографический список:**

1. **Клычков, Н.А.** Влияние добавок оксидов меди и цинка на электрические и газочувствительные свойства композитных слоёв диоксида олова / Н.А. Клычков, В.В. Симаков, И.В. Синев, Д.А. Шкинунов // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2022. – Вып. 14. – С. 632-638. DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.632.
2. **Клычков, Н.А.** Динамика отклика сенсора на основе наноструктурированного слоя диоксида олова при воздействии паров изопропанола / Н.А. Клычков, В.В. Симаков, И.В. Синев, Д.А. Тимошенко // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2021. – Вып. 13. – С. 708-716. DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.708.
3. **Oberhüttinger, C.** On the temperature dependence of the resistive and surface ionisation response of  $SnO_2$  gas sensing layers / C. Oberhüttinger, A. Hackner, G. Müller, M. Stutzmann // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2011. – V. 156. – I. 2. – P. 563-571. DOI: 10.1016/j.snb.2011.01.069.
4. **Ma, Y.J.** Low-temperature transport properties of individual  $SnO_2$  nanowires / Y.J. Ma, F. Zhou, L. Lu, Z. Zhang // Solid State Communications. – 2004. – V. 130. – I. 5. – P. 313-316. DOI: 10.1016/j.ssc.2004.02.013.
5. **Ramarajan, R.** Substrate temperature dependent physical properties of spray deposited antimony-doped  $SnO_2$  thin films / R. Ramarajan, M. Kovendhan, K. Thangaraju, D.P. Joseph // Thin Solid Films. – 2020. – V. 704. – Art. № 137988. – 10 p. DOI: 10.1016/j.tsf.2020.137988.
6. **Slater, B.** Dissociation of  $O_2$  on the reduced  $SnO_2$  (110) surface / B. Slater, C.R.A. Catlow, D.E. Williams, A.M. Stoneham // Chemical Communications. – 2000. – I. 14. – P. 1235-1236. DOI: 10.1039/b002039g.
7. **Gurlo, A.** Interplay between  $O_2$  and  $SnO_2$ : oxygen ionosorption and spectroscopic evidence for adsorbed oxygen / A. Gurlo // ChemPhysChem. – 2006. – V. 7. – I. 10. – P. 2041-2052. DOI: 10.1002/cphc.200600292.
8. **Tsujita, W.** Gas sensor network for air-pollution monitoring / W. Tsujita, A. Yoshino, H. Ishida, T. Moriizumi // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2005. – V. 110. – I. 2. – P. 304-311. DOI: 10.1016/j.snb.2005.02.008.
9. **Simakov, V.** Gas identification by quantitative analysis of conductivity-vs-concentration dependence for  $SnO_2$

- sensors / V. Simakov, A. Voroshilov, A. Grebennikov et al. // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2009. – V. 137. – I. 2. – P. 456-461. DOI: 10.1016/j.snb.2009.01.005.
10. **Singh, G.** Highly sensitive gas sensor based on Er-doped SnO<sub>2</sub> nanostructures and its temperature dependent selectivity towards hydrogen and ethanol / G. Singh, R.C. Singh // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2019. – V. 282. – P. 373-383. DOI: 10.1016/j.snb.2018.11.086.
11. **Staerz, A.** Current state of knowledge on the metal oxide-based gas sensing mechanism / A. Staerz, U. Weimar, N. Barsan // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2022. – V. 358. – Art. № 131531. – 18 p. DOI: 10.1016/j.snb.2022.131531.
12. **Hübner, M.** Influence of oxygen backgrounds on hydrogen sensing with SnO<sub>2</sub> nanomaterials / M. Hübner, R.G. Pavelko, N. Barsan, U. Weimar // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2011. – V. 154. – I. 2. – P. 264-269. DOI: 10.1016/j.snb.2010.01.049.
13. **Симаков, В.В.** Неаддитивное влияние паров воды и освещения на проводимость пленки диоксида олова при комнатной температуре / В.В. Симаков, И.В. Синёв, С.Б. Вениг // *Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика*. – 2018. – Т. 26. – Вып. 6. – С. 48-58. DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-6-48-58.
14. **Oviedo, J.** First-principles study of the interaction of oxygen with the SnO<sub>2</sub> (110) surface / J. Oviedo, M.J. Gillan // *Surface Science*. – 2001. – V. 490. – I. 3. – P. 221-236. DOI: 10.1016/S0039-6028(01)01372-3.
15. **Кисин, В.В.** Влияние адсорбции кислорода на проводимость тонких пленок оксида олова / В.В. Кисин, В.В. Сысоев, С.А. Ворошилов, В.В. Симаков // *Физика и техника полупроводников*. – 2000. – Т. 34. – Вып. 3. – С. 314-317.
16. **Barsan, N.** Fundamental and practical aspects in the design of nanoscaled SnO<sub>2</sub> gas sensors: a status report / N. Barsan, M. Schweizer-Berberich, W. Göpel // *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*. – 1999. – V. 365. – I. 4. – P. 287-304. DOI: 10.1007/s002160051490.

#### References:

1. Klychkov N.A., Simakov V.V., Sinev I.V., Shikunov D.A. Vliyanie dobavok oksidov medi i tsinka na elektricheskie i gazochuvstvitel'nye svoystva kompozitnykh sloyov dioksida olova [The effect of copper and zinc oxide additives on the electrical and gas-sensitive properties of tin dioxide composite layers], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2022, issue 14, pp. 632-638. DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.632. (In Russian).
2. Klychkov N.A., Simakov V.V., Sinev I.V., Timoshenko D.A. Dinamika otklika sensora na osnove nanostrukturirovannogo sloya dioksida olova pri vozdejstvii parov izopropanola [Dynamics of response of a sensor based on a nanostructured tin dioxide layer exposed to the isopropanol vapors], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2021, issue 13, pp. 708-716. DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.708. (In Russian).
3. Oberhüttinger C., Hackner A., Müller G., Stutzmann M. On the temperature dependence of the resistive and surface ionisation response of SnO<sub>2</sub> gas sensing layers, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011, vol. 156, issue 2, pp. 563-571. DOI: 10.1016/j.snb.2011.01.069.
4. Ma Y.J., Zhou F., Lu L., Zhang Z. Low-temperature transport properties of individual SnO<sub>2</sub> nanowires, *Solid State Communications*, 2004, vol. 130, issue 5, pp. 313-316. DOI: 10.1016/j.ssc.2004.02.013.
5. Ramarajan R., Kovendhan M., Thangaraju K., Joseph D.P. Substrate temperature dependent physical properties of spray deposited antimony-doped SnO<sub>2</sub> thin films, *Thin Solid Films*, 2020, vol. 704, art. no 137988, 10 p. DOI: 10.1016/j.tsf.2020.137988.
6. Slater B., Catlow C.R.A., Williams D.E., Stoneham A.M. Dissociation of O<sub>2</sub> on the reduced SnO<sub>2</sub> (110) surface, *Chemical Communications*, 2000, issue 14, pp. 1235-1236. DOI: 10.1039/b002039g.
7. Gurlo A. Interplay between O<sub>2</sub> and SnO<sub>2</sub>: oxygen ionosorption and spectroscopic evidence for adsorbed oxygen, *ChemPhysChem*, 2006, vol. 7, issue 10. 2041-2052. DOI: 10.1002/cphc.200600292.
8. Tsujita W., Yoshino A., Ishida H., Moriizumi T. Gas sensor network for air-pollution monitoring, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2005, vol. 110, issue 2, pp. 304-311. DOI: 10.1016/j.snb.2005.02.008.
9. Simakov V., Voroshilov A., Grebennikov A. et al. Gas identification by quantitative analysis of conductivity-vs-concentration dependence for SnO<sub>2</sub> sensors, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2009, vol. 137, issue 2, pp. 456-461. DOI: 10.1016/j.snb.2009.01.005.
10. Singh G., Singh R.C. Highly sensitive gas sensor based on Er-doped SnO<sub>2</sub> nanostructures and its temperature dependent selectivity towards hydrogen and ethanol, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, vol. 282, pp. 373-383. DOI: 10.1016/j.snb.2018.11.086.

11. Staerz A., Weimar U., Barsan N. Current state of knowledge on the metal oxide-based gas sensing mechanism, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022, vol. 358, art. no 131531, 18 p. DOI: 10.1016/j.snb.2022.131531.
12. Hübner M., Pavelko R.G., Barsan N., Weimar U. Influence of oxygen backgrounds on hydrogen sensing with SnO<sub>2</sub> nanomaterials, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011, vol. 154, issue 2, pp. 264-269. DOI: 10.1016/j.snb.2010.01.049.
13. Simakov V.V., Sinev I.V., Venig S.B. Neadditivnoe vliyanie parov vody i osveshcheniya na provodimost' plenki dioksida olova pri komnatnoj temperature [Non-additive influence of water vapor and lighting on the conductivity of tin dioxide film at room temperature], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Prikladnaya nelinejnaya dinamika [Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics]*, 2018, vol. 26, issue 6, pp. 48-58. DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-6-48-58. (In Russian).
14. Oviedo J., Gillan M.J. First-principles study of the interaction of oxygen with the SnO<sub>2</sub> (110) surface, *Surface Science*, 2001, vol. 490, issue 3, pp. 221-236. DOI: 10.1016/S0039-6028(01)01372-3.
15. Kissine V.V., Sysoev V.V., Voroshilov S.A., Simakov V.V. Effect of oxygen adsorption on the conductivity of thin SnO<sub>2</sub> films, *Semiconductors*, 2000, vol. 34, issue 3, pp. 308-311. DOI: 10.1134/1.1187977.
16. Barsan N., Schweizer-Berberich M., Göpel W. Fundamental and practical aspects in the design of nanoscaled SnO<sub>2</sub> gas sensors: a status report, *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 1999, vol. 365, issue 4, pp. 287-304. DOI: 10.1007/s002160051490.

*Original paper*

### TEMPERATURE DEPENDENCE OF Cu:SnO<sub>2</sub> FILM CONDUCTIVITY IN AIR MEDIUM

N.A. Klychkov, V.V. Simakov, I.V. Sinev  
*Saratov State University, Saratov, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.119

**Abstract:** Temperature conductivity studies of films based on Cu:SnO<sub>2</sub> made by magnetron sputtering of the mixed target CuO/SnO<sub>2</sub> have been carried out. Temperature conductivity dependencies were substantially nonlinear. It was found that the local conductivity minimum was observed near the temperature of 330°C. To explain the results, a mathematical model is proposed of oxygen adsorption in various forms on the surface of wide-bandgap semiconductors. It was assumed that oxygen particle adsorption resulted in energy levels of the acceptor type localized near the surface of the semiconductor. The simulation carried out within the proposed model showed qualitative and quantitative consistency of the calculation results and experimental data of the temperature dependence of conductivity of the formed gas-sensitive Cu:SnO<sub>2</sub> layers in oxygen-containing atmosphere. An analysis of experimental temperature dependence showed that the local conductivity minimum is due to the process of dissociation of oxygen particles adsorbed in molecular form. The desorption energies of each form of adsorbed oxygen and the depth of their surface acceptor level are assessed.

*Keywords: temperature dependence of conductivity, oxygen dissociation, tin dioxide, gas sensitivity model.*

*Клычков Никита Александрович – аспирант 1-го года обучения, Институт физики ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского»*

*Симаков Вячеслав Владимирович – д.т.н., профессор кафедры материаловедения, технологии и управления качеством, ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского»*

*Синёв Илья Владимирович – к.ф.-м.н., доцент кафедры материаловедения, технологии и управления качеством, ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского»*

*Nikita A. Klychkov – 1<sup>st</sup> year postgraduate student, Physics Institute, Saratov State University, Saratov State University*

*Viacheslav V. Simakov – Dr.Sc., Professor, Material Sciences, Technologies and Quality Management Department, Saratov State University*

*Ilya V. Sinev – Ph.D., Docent, Material Sciences, Technologies and Quality Management Department, Saratov State University*

Поступила в редакцию/received: 01.09.2023; после рецензирования/reviced: 06.10.2023; принята/accepted: 10.10.2023.