

## Литература

1. Г.Е. Малашкевич, Е.Н. Подденежный, И.М. Мельниченко, А.В. Семченко. Спектрально-люминесцентные свойства Sm- и Ce-Sm-содержащих кварцевых гель-стекол. ФТТ 40, 3, 458–465 (1998).

2. V.C. Costa, Y. Shen, A.M.M. Santos, K.L. Bray. Luminescence measurements on Sm<sup>2+</sup>-doped sol-gel glasses. J. Non-Cryst. Solids 304 (2002) 238–243.

3. Малашкевич Г.Е., Семченко А.В., Суходола А.А., Ступак А.П., Суходолов А.В., Плющ Б.В., Сидский В.Б., Денисенко Г.А. Влияние серебра на люминесценцию Sm<sup>3+</sup> в «аэросильных» кварцевых стеклах. ФТТ, 2008. – Т. 50. – № 8. – С. 1408–1415.

4. G.E. Malashkevich, V.N. Sigaev, N.V. Golubev, E.Kh. Mamadzhanova, A.A. Sukhodola, A. Paleari,

P.D. Sarkisov, A.N. Shimko. Spectroscopic properties of Sm-containing yttrium-aluminoborate glasses and analogous huntite-like polycrystals // Materials Chemistry and Physics, 2012. – V. 137. – P. 48–54.

5. Малашкевич Г.Е., Шимко А.Н., Ступак А.П., Прусова И.В., Нищев К.Н., Корниенко А.А., Дунина Е.Б., Семченко А.В., Сергеев И.И. Особенности вхождения самария в кварцевые гель-стекла, легированные алюминием и барием. Журнал прикладной спектроскопии. – Т. 86. – № 4 (2019). – С. 524–530.

6. Gueguen, Y., Houizot, P., Célerié, F., Chen, M., Hirata, A., Tan, Y., Allix, M., Chenu, S., Roux-Langlois, C., Rouxel, T. Structure and viscosity of phase-separated BaO–SiO<sub>2</sub> glasses // Journal of the American Ceramic Society Volume 100, Issue 5, 1 May 2017, Pages 1982–1993.

УДК 681.2.082

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СЛОЕВ In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SnO<sub>2</sub> ДЛ Я ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СЕНСОРОВРеутская О.Г.<sup>1</sup>, Денисюк С.В.<sup>2</sup>, Куданович О.Н.<sup>2</sup>, Мухуров Н.И.<sup>2</sup>, Лугин В.Г.<sup>3</sup>, Таратын И.А.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»  
Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>Белорусский государственный технологический университет  
Минск, Республика Беларусь

<sup>4</sup>ОАО «Минский НИИ радиоматериалов»  
Минск, Республика Беларусь

Одним из методов формирования газочувствительных слоев является использование золь-гель материалов, что обусловлено возможностью получения материалов с заданными свойствами, перспективными в качестве основы для полупроводниковых сенсоров и мультисенсорных систем [1, 2]. В настоящей работе представлены результаты исследований морфологии тонких пленок на основе In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SnO<sub>2</sub>, сформированных золь-гель методом на подложках из анодного оксида алюминия с использованием двух различных методов нанесения и термической обработки.

**Методика эксперимента.** Подложки Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> толщиной 40 мкм были изготовлены методом анодного окисления алюминиевой фольги в растворе щавелевой кислоты с последующим удалением металлической основы и отжигом при температуре 860 °С для обеспечения долговременной стабильности при нагреве до 800 °С. Приготовление коллоидного раствора золь-гель пасты в составе (In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (95,0 масс.%) – SnO<sub>2</sub> (5,0 масс.%) осуществлялось по общеизвестной методике.

При изготовлении образцов пленок In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SnO<sub>2</sub> использовались две методики формирования. Согласно первой (образец №1) капля приготовленного коллоидного раствора наносилась на поверхность подложки с последующей сушкой и отжигом в муфельной печи при температуре 700 °С в течение 4 часов. Вторая методика (образец №2) заключается в формировании многослойной пленки In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SnO<sub>2</sub>. Первый слой формировался

путем нанесения капли приготовленного коллоидного раствора на подложку с последующей сушкой и отжигом образца при температуре 600 °С в течение 30 минут. Второй и третий слой наносился аналогичным образом поверх первого. Следующие восемь слоев наносились при отжиге с температурой 100 °С в течение 30 минут. Затем полученная структура отжигалась при температуре 600 °С в течение 30 минут.

Исследование морфологии образцов осуществлялось с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-6510LV, оснащенного блоком энерго-дисперсионной спектроскопии для определения химического состава образцов.

**Результаты и обсуждение.** Микрофотографии образца №1 (рисунок 1) демонстрируют образование неоднородной по толщине несплошной пленки. При этом наблюдаются области с «пятнами», которые обусловлены включением фаз других веществ.

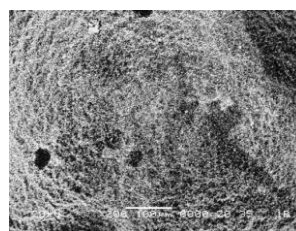


Рисунок 1 – СЭМ-изображение образца № 1

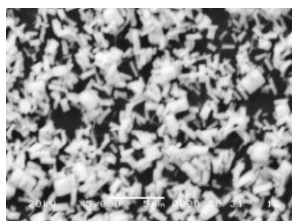


Рисунок 2 – Изображение участка поверхности образца № 1

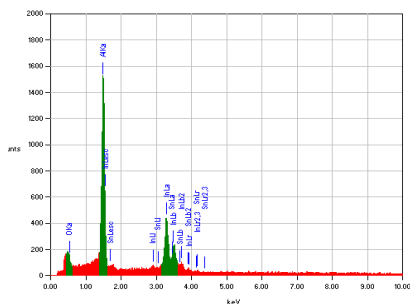


Рисунок 3 – Энерго-дисперсионный спектр образца № 1

Снимки с большим увеличением (рисунок 2) свидетельствуют об образовании агломератов кубической и/или призматической формы с четко очерченными гранями и характерными размерами 1–1,5 мкм. Исследование пленки методом энерго-дисперсионного анализа (рисунок 3) показало содержание в ее составе  $\text{SnO}_2$  (2,57 масс.%) (таблица 1) по сравнению с составом исходного коллоидного раствора (5 %). Что свидетельствует о влиянии водного раствора при осаждении пленки на поверхность подложки. Высокая интенсивность пика алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) на спектре также указывает на малую толщину и несплошность полученной пленки.

Таблица 1 – Соотношение элементов в составе пленок образцов № 1 и 2

Элемент	Масс.%	Ат.%	Соединение	Масс.%
Образец №1				
O	17,39	-	-	-
In	80,58	95,36	$\text{In}_2\text{O}_3$	97,43
Sn	2,03	4,64	$\text{SnO}_2$	2,57
Образец №2				
O	17,48	-	-	-
In	78,95	95,80	$\text{In}_2\text{O}_3$	95,05
Sn	3,57	4,20	$\text{SnO}_2$	4,55

Образец № 2 представляет собой сплошную мелкозернистую пленку в центре с большим количеством дефектов в виде трещин по периферии (рисунок 4).

Такая структура образца может быть объяснена механикой процесса растекания капли коллоидного раствора по поверхности подложки и его высыхания. Изображение поверхности образца № 2 с большим увеличением (рисунок 5) показывает, что пленка состоит из конгломератов с размытыми границами без четкой огранки. Результаты энерго-дисперсионного анализа указы-

вают на то, что состав пленки близок к составу исходного коллоидного раствора  $\text{In}_2\text{O}_3$  (95,05 масс.%) -  $\text{SnO}_2$  (4,55 масс.%) (рисунок 6).

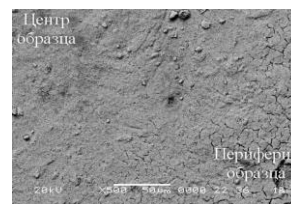


Рисунок 4 – СЭМ-изображение образца № 2

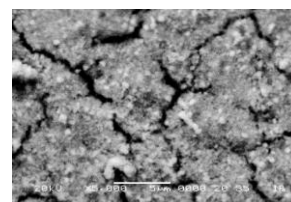


Рисунок 5 – Изображение участка поверхности образца № 2

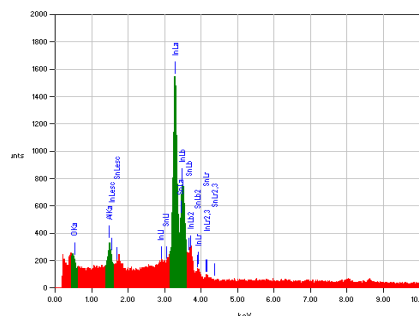


Рисунок 6 – Энерго-дисперсионный спектр образца № 2

Пленки  $\text{In}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$  полученные золь-гель методом по обеим методикам обладают удовлетворительной адгезией по отношению к подложке из  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

На основании результатов исследования установлены отличия морфологии и состава пленок  $\text{In}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$  в зависимости от методики их формирования. Послойное их формирование с последующим отжигом при 600 °С позволяет получать сплошные пленки, состоящие из агломератов без четких границ с составом близким к соотношению компонентов исходного коллоидного раствора. После высыхания и спекания слоя образуется пористый керамический газочувствительный слой с хорошей адгезией к наноструктурированному основанию, который обеспечивает высокий сенсорный сигнал полупроводникового сенсора или микросистемы.

#### Литература

1. Мультисенсорная микросистема для измерения концентрации газов  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$ ,  $\text{CO}_2$  / О.Г. Реутская, И.А. Таратын, Ю.М. Плещачевский // Приборы и методы измерений. 2016. – Т. 7, № 3. – С. 271–278.

2. Денисюк, С.В. Двухзонные газовые сенсоры на подложках  $Al_2O_3$  с тонкопленочными чувствительными элементами из оксида железа / С.В. Денисюк,

Н.И. Мухуров, О.Н. Куданович // Нано- и микросистемная техника. – 2018. – Т. 20, № 11. – С. 676–678.

УДК 519

## СУБЪЕКТИВНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ МЕТОДОМ РЕЙТИНГА Романчак В.М.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

Приводится определение рейтинга и предлагается математическая модель нахождения значений величины с помощью рейтинга. С помощью рейтинга можно с единых позиций рассматривать как объективные, так и субъективные измерения. Предполагается, что некоторая последовательность объектов упорядочена по величине и что величина объектов изменяется равномерно. Для такой последовательности в качестве рейтинга можно выбрать номер объекта в рассматриваемой последовательности объектов. В классической теории измерений множество объектов эмпирической системы  $A_1, A_2, \dots, A_n$  отображается с помощью функции  $q_i = q(A_i)$  на множество значений  $q_1, q_2, \dots, q_n$  числовой системы таким образом, что отношения между числами сохраняют отношения между объектами. При этом тип шкалы определяется видом и свойствами функции  $q$ . В данной работе рассматривается рейтинговая модель измерения [1]. Это означает, что функция отображения  $q$  строится как композиция двух функций,  $q_i = q(r(A_i))$ . Вначале объекты  $A_1, A_2, \dots, A_n$  отображаются на промежуточное множество числовых значений (значения рейтинга) функцией  $r_i = r(A_i)$  с сохранением отношения между самими объектами. Шкала значений рейтинга  $r$  фиксирована. Далее, множество значений рейтинга  $r_1, r_2, \dots, r_n$  отображается на множество числовых значений  $q_1, q_2, \dots, q_n$  функцией  $q_i = q(r_i) = q(r(A_i))$ . При этом вид шкалы числовых значений определяется видом и свойствами функции  $q(r)$ . Введение рейтинга позволяет отделить процесс измерения величины от выбора шкалы измерения.

**Классическое определение рейтинга.** Чтобы подчеркнуть особенность рейтинговой модели обратимся к теории вероятностей. В определении классической вероятности понятие симметрии исходов является аксиоматическим и принимается на основании мнения эксперта. Например, при подбрасывании кубика эксперт может интуитивно считать, что грани кубика достаточно симметричны и будут выпадать с одинаковой вероятностью. Классическое определение вероятности сводит ее вычисление к суммированию одинаковых по вероятности событий. Для того чтобы иметь возможность измерить произвольную величину, введем аксиоматически понятие объектов, величина которых изменяется равномерно. Приведем примеры таких объектов:

1. Положим на левую чашу равноплечных весов груз  $m_1$  и груз с неизвестной массой  $M$  и уравновесим грузом  $m_2$  на правой чаше. Далее груз  $m_2$  положим на левую чашку весов вместо груза  $m_1$  и уравновесим грузом  $m_3$  и т. д. Абсолютное изменение массы объектов  $m_1, m_2, m_3, \dots$  будет равномерным:  $m_2 - m_1 = m_3 - m_2 = \dots$ .

2. С помощью разноплечных весов построим последовательность объектов. Для этого положим на левую чашу разноплечных весов груз  $m_1$  и уравновесим грузом  $m_2$ , далее положим груз  $m_2$  на левую чашку весов вместо груза  $m_1$  и уравновесим грузом  $m_3$  и т. д. Относительное изменение массы объектов  $m_1, m_2, m_3, \dots$  будет равномерным  $(m_2 - m_1)/m_1 = (m_3 - m_2)/m_2 = \dots$ .

3. Подберем объекты  $m_1, m_2, m_3, \dots$ , субъективное изменение веса которых равномерно с точки зрения эксперта

Эти последовательности можно использовать для сравнения значений величины. Первые две последовательности получены с помощью объективных средства измерения, третья последовательность получена субъективным оцениванием.

Предполагается, что можно построить последовательность объектов, величина которых изменяется равномерно, а порядковый номер объекта в такой последовательности будем называть рейтингом. Сравнение размеров опытным путем является единственным способом получения измерительной информации. Основных способов численного сравнения размеров всего два: или разность размеров или отношение размеров величины [1]. Отметим, что здесь речь идет о размере величины как объективной характеристике. Значения величины появляются уже после измерения в результате обработки результатов измерения. Пусть для объектов  $A_1, A_2, \dots, A_n$  величина  $Q$  принимает значения  $q_i, q_i = q(A_i)$ . Можно предположить, что если величина  $Q$  для последовательности объектов изменяется равномерно, то или разности или отношения последовательных значений величины постоянны. Для определенности считаем, что значения величины  $Q$  расположены в порядке возрастания. Это означает, что для первого способа сравнения будет выполняться

$$q_{i+1} - q_i = \lambda, q_i, q_{i+1} \in \mathbb{R}, \lambda > 0,$$

и для второго способа сравнения выполняется