

ware allow you to do this by modifying the grid step parameters in the source model in interactive mode; the grid will be updated automatically. In addition, by modifying the grid, you can immediately analyze the quality of the final elements created by means of a graphical scale in order to make sure that the created final element model meets the quality criteria

To display a tense-deformed state of the detail, the command «View→ Select» prompts the appropriate dialog box «View Select», where in the section «Model Style» the option «Draw Model» is selected, in the section «Deformed Style» – «Deform», in the section «Contour Style» – «Beam Diagram». The button "«Deformed and Contour Data...» initiates the dialog box «Select PostProcessing Data», where in the section «Output Vectors» was selected from the list: «1..Total Translation» corresponding to the total vector displacement, and in the section «Contour» – «60031..Solid Von Mises Stress», corresponding to the equivalent stress on the hypothesis of the energy of molding (Mises) for volume KE. After pressing the button «OK» the created model appears in a deformed state. The right side of the graphical interface of the program is a color diagram that reflects the value of equivalent stresses for the Mises hypothesis for volume KE [5].

FEMAP allows you to view text information about the results of the analysis. To this end, the command «List → Output → Unformatted ...» was executed. In the dialog box «Entity Selection – Select Output Set(s) to List», all items were selected, and in the dialog box «List Unformatted Output», the line «1..Total Translation» was selected for information on the total vector displacement. Below the working plane in the dashboard «Messages» is a list of KE numbers and values of the corresponding values.

The modelling results of the detail's elastic state made it possible to determine the localization loca-

tion and the values of stresses and deformations that arise during the operation of the rocker in the assembly unit. Thus, the method of final elements is a powerful tool for determining the potential deformation caused by the machining process. Using the results of the analysis by the final elements' method, it is possible to project and predict potential deformations and reduce the total cost of production.

Литература

1. Компьютерное моделирование [Электронный ресурс] [https://ru.wikipedia.org/wiki / Компьютерное моделирование](https://ru.wikipedia.org/wiki/Компьютерное_моделирование).
2. Пасічник О.А. Технології комп'ютерного проектування та моделювання напружено-деформованого стану. Вісник Хмельницького національного університету, № 3, 2016 (237) – С. 172-175.
3. Овчаренко В.А., Подлесний С.В., Зінченко С.М. Основи методу кінцевих елементів і його застосування в інженерних розрахунках: Навчальний посібник. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – 380 с.
4. Волошко О.В., Вислоух С.П. Комп'ютерне моделювання параметрів поверхневого шару деталей. // Збірник тез доповідей XVII Міжнародної технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи», ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, 2018. – С. 63–64.
5. Барандич К.С., Вислоух С.П. Створення кінцево-елементної моделі валу та вирішення крайової задачі напружено-деформованого стану матеріалів. // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)/ Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. – Вип. 2 (41). – Полтава : ПолтНТУ, 2014. – С. 228–232.

УДК 546.02+546.05

УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ В ПРОЦЕССЕ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ СИНТЕЗА ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ОКСИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Гайдук Ю.С.¹, Реутская О.Г.², Натаров В.О.¹, Савицкий А.А.¹

¹Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь,

²Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

В последнее время достаточно широко изучаются возможности ультразвукового метода для получения нанодисперсных оксидов металлов. Известно, что в большинстве случаев уменьшение размера частиц и увеличение удельной поверхности приводит к заметному возрастанию газовой чувствительности полупроводниковых оксидов.

Одноэлектродные полупроводниковые резистивные датчики, представляющие собой керамическую капсулу на спирали из тонкой платиновой проволоки (20 ÷ 50 мкм), нашли широкое применение для анализа газов различной хими-

ческой природы, в частности для определения содержания кислорода, метана, пропана, монооксида углерода, хлора и аммиака [1, 2]. В качестве газочувствительного материала в таких сенсорах обычно выступают твёрдые растворы (Ga, In)2O3, получаемые золь-гель методом. С целью повышения газоадсорбционной активности к тем или иным газам в состав указанной композиции могут вводиться различные добавки. В частности, добавка WO₃ позволяет практически на порядок повысить чувствительность одноэлектродных сенсоров к диоксиду азота [3].

В данной работе исследовалось влияние ультразвукового сопровождения при золь-гель-синтезе оксидов индия, галлия и вольфрама с целью получения газочувствительных материалов с более развитой удельной поверхностью (меньшим размером кристаллитов, соответствующим размеру областей когерентного рассеяния рентгеновского излучения, ОКР).

Методика эксперимента. Оксид вольфрама получали из 1,23 М водного раствора вольфрамата натрия $\text{Na}_2\text{WO}_3 \times 2\text{H}_2\text{O}$ путем капельного вливания в 12 М раствор азотной кислоты.

Для получения золя $\text{In}(\text{OH})_3$ к 0,38 М водному раствору нитрата индия $\text{In}(\text{NO}_3)_3 \times 4,5\text{H}_2\text{O}$ капельно добавляли 9,24 М водный раствор аммиака.

Для получения золя $\text{Ga}(\text{OH})_3$ к 0,66 М водному раствору $\text{Ga}(\text{NO}_3)_3 \times 8\text{H}_2\text{O}$ капельно добавляли 9,24 М водный раствор аммиака. Полученные осадки тщательно промывали декантацией от примесей электролитов. Золи стабилизировали добавкой 150 мкл конц. HNO_3 .

Для формирования чувствительного элемента сенсора золь по каплям наносили на разогретую постоянным током спираль из платиновой микропровода, после чего полученную керамическую капсулу отжигали 2 ч током 140 мА. Сенсорный отклик (S , мВ) определяли по формуле $S = U_0 - U_g$, где: U_0 – напряжение на выводах сенсора при нагреве спирали постоянным током 11 – 140 мА на воздухе; U_g – при воздействии анализируемой газовой смесью. Потребляемая мощность рассчитывалась по формуле $P = U_0 \times I_0$. Рентгенографические исследования проводились при помощи дифрактометра ДРОН-3 (Co-K α_1 -излучение).

Средние размеры кристаллитов (области когерентного рассеяния, ОКР) определяли по формуле Дебая–Шеррера (1):

$$D = 0,9\lambda / \beta \cos \alpha \quad (1)$$

Параметры кристаллической решётки определяли при помощи компьютерной программы UnitCell по методу Холланда–Редфрена.

Сравнивались эксплуатационные характеристики сенсоров, для получения которых использовались приготовленные разными способами золи: по выше описанной методике, и с дополнительным применением ультразвукового воздействия (29 кГц) при проведении смешения реагентов (раствор солей металлов по каплям добавляли к раствору аммиака). Величина S рассчитывалась как среднее значение для трёх сенсоров в каждой серии. Относительная погрешность измерений S не превышала 5 %.

Результаты исследования. Отжиг при 200 – 800 °С ксерогеля вольфрамовой кислоты [PDF 18–1420] приводил к формированию моноклинной структуры WO_3 [PDF 87–2404]. После отжига при 200 – 850 °С (2 ч) образцы имели ОКР от 60 до 200 нм. При ультразвуковом сопровождении синтеза ксерогель H_2WO_4 уже со-

держал в значительном количестве частицы WO_3 [PDF 87–2404], а материал, отожжённый при 200 – 850 °С, характеризуется более низкими значениями ОКР. Так, отжиг ксерогеля приводил к образованию оксида вольфрама с ОКР 90–100 нм (300 °С, 2 ч) и 160 – 170 нм (600 °С, 2 ч) при стандартном проведении золь-гель процесса. В то же время для материала, полученного с ультразвуковым сопровождением, эти значения составили 50 и 140 – 150 нм, соответственно.

Материал, полученной высушиванием гидроксида индия, представлял собой аморфный ксерогель. Последующий отжиг приводил к разложению $\text{In}(\text{OH})_3$ (PDF 16–161) и образованию In_2O_3 [PDF 6–416]. По мере увеличения температуры отжига степень кристаллизации оксида индия увеличивалась, ширина пиков и ОКР возрастала, что также указывает на протекание процесса спекания. Отжиг (2 ч) ксерогеля гидроксида индия при 200, 300, 600 и 850 °С приводил к формированию нанокристаллических порошков с размерами ОКР 10 – 12, 20, 35 и 50 нм, соответственно. Размер ОКР порошка ксерогеля, полученного с ультразвуковым сопровождением (29 кГц), и отожжённого при 300 °С, составил 8–10 нм.

На рисунке 1 представлена зависимость выходного сигнала S одноэлектродных датчиков к 0,3 % об. СО в азоте от тока нагрева и потребляемой мощности сенсоров.

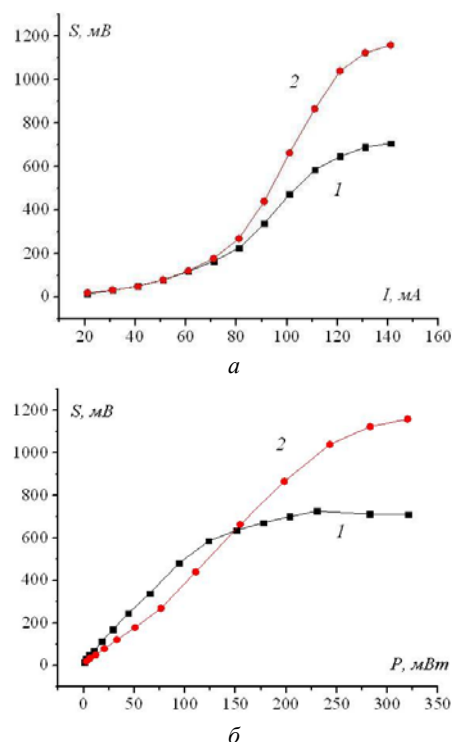


Рисунок 1 – Зависимость выходного сигнала S одноэлектродных датчиков к 0,3 % об. СО в азоте от: а) тока нагрева I_0 , мА б) потребляемой мощности, P , мВт: 1 – без воздействия ультразвука; 2 – с ультразвуковым воздействием на этапе синтеза оксидной композиции

В области значений потребляемой мощности 150–200 мВт наблюдаются более высокие выходные сигналы для сенсоров, у которых чувствительный элемент изготовлен из оксидной композиции, полученной с ультразвуковым воздействием. При этом при потребляемой мощности 200 мВт увеличение выходного сигнала превысило 20 %.

Выходной сигнал сенсоров может увеличиваться за счет усиления структурного разупорядочения оксидной композиции при ультразвуковом воздействии, а также за счет возрастания удельной поверхности в результате снижения размеров кристаллитов и изменения морфологии частиц. По данным рентгенофазового анализа, при термической обработке ксерогеля, полученного из совмещённых золь гидроксидов индия и галлия, в интервале 300–600 °С (2 ч) образуется твёрдый раствор $(\text{Ga},\text{In})_2\text{O}_3$ на основе кубической структуры оксида индия $\text{C-In}_2\text{O}_3$. Образцы композиции $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (отжиг 300 °С, 2 ч), полученные в сопровождении ультразвукового воздействия, имели размеры областей когерентного рассеяния, значения которых принято отождествлять с физическими размерами кристаллитов, ОКР = 12 нм, а в отсутствие ультразвукового воздействия – ОКР = 20 нм (параметр кристаллической решётки составил в обоих случаях $a=10,12 \text{ \AA} \pm 0,04$).

Ультразвуковой синтез оксидов вольфрама (WO_3) и индия (In_2O_3), а также твёрдого раствора $(\text{Ga},\text{In})_2\text{O}_3$, является эффективным способом получения нанодисперсных поликристаллических материалов.

Ультразвуковое сопровождение в процессе золь-гель синтеза позволяет получить материалы с большей удельной поверхностью и меньшим эквивалентным диаметром частиц, что изменяет ширину запрещённой зоны и энергию активации проводимости. Такие изменения приводят к росту газовой чувствительности и снижению рабочей температуры датчиков.

Литература

1. Malchenko, S.N. One-electrode semiconductor sensors for detection of toxic and explosive gases in air / S.N. Malchenko, I.N. Lychkovsky, M.V. Baykov // Sens. and Actuators B. Chem. – 1992. – Vol. 7. – Issue 1–3. – P. 505–506.
2. Korotchenkov, G. Practical aspects in design of one-electrode semiconductor gas sensors: Status report / G. Korotchenkov // Sens. and Actuators B. Chem. – 2007. – Vol. 121. – P. 664–678.
3. Гайдук, Ю.С. Полупроводниковые датчики диоксида азота на основе композиции $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$ / Ю.С. Гайдук, А.А. Савицкий, В.А. Ломоносов // Известия НАНБ. Серия хим. наук, 2018. – Т. 54, № 2. – С. 146–153.

УДК 535.317

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА ПРОЦЕСС СИНТЕЗА ОРТОФЕРРИТА ВИСМУТА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ЕГО ОСНОВЕ

Головач Р.В.¹, Дятлова Е.М.¹, Сергиевич О.А.¹, Шеченок А.А.², Шамкалович В.И.³

¹ Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет»

² Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»

³ Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Потребность в нанокompозитных материалах обусловлена необходимостью разработки новых методов получения интеллектуальных функциональных наноматериалов для приборов автоматики, сенсоров и других устройств микроэлектроники. Важнейшими требованиями к подобным материалам являются высокие эксплуатационные характеристики, простота и надежность синтеза и использования, универсальность, позволяющая как сочетать данные материалы с различными видами подложек, так и возможность использовать их как индивидуальное изделие, а также экономичность и низкое энергопотребление. В этой связи большое внимание уделяется разработке новых видов керамических наноматериалов, а именно макропористых композитов, отвечающих всем заявленным требованиям [1].

На основании вышеизложенного сформировалось основное направление исследований и цель работы, заключающаяся в разработке состава

и технологических параметров синтеза сегнетокерамических наноматериалов и получение функциональных покрытий, в т. ч. нанокompозитов для интегрированных исполнительных элементов приборов и устройств автоматики.

Синтез модифицированного ортоферрита висмута проводился двумя методами: высокотемпературным спеканием порошков и химическим, обеспечивающим экзотермическую реакцию в растворах компонентов. В качестве исходных материалов для синтеза ортоферрита висмута традиционным методом спекания использовались оксиды Bi_2O_3 , Fe_2O_3 , в качестве модифицирующих добавок – La_2O_3 , Ce_2O_3 и Co_3O_4 , которые вводились в количестве 0,1–0,2 мол. долей. В зависимости от вида добавки образцы обжигались при температурах 800–925 °С.

По второму способу получение мультиферроиков проводилось с использованием энер-