

УДК 51-73

Мультисенсорная микросистема для измерения концентрации газов CO, H₂, C₃H₈, CO₂

Реутская О.Г.¹, Таратын И.А.², Плескачевский Ю.М.^{1,3}

¹Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь

²Минский НИИ радиоматериалов,
ул. Кижеватова, 86, 220024, г. Минск, Беларусь

³Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси,
ул. Кирова, 32А, 246050, г. Гомель, Беларусь

Поступила 17.06.2016

Принята к печати 10.11.2016

Изготовление модуля химических сенсоров на одном кристалле является одним из перспективных направлений в развитии газовой сенсорики. Целью данной работы являлась разработка мультисенсорной микросистемы для уменьшения времени измерения концентрации газов CO, H₂, C₃H₈, CO₂, а также снижение потребляемой мощности микросистемы в целом.

Мультисенсорная микросистема включает четыре одиночных сенсора, размещенных на одной подложке из наноструктурированного оксида алюминия. Использование в топологии микросистемы сквозных отверстий и диэлектрической подложки снизило потребляемую мощность газовой микросистемы. Нами предложен способ измерения чувствительности четырехсенсорной микросистемы к концентрации газов CO, H₂, C₃H₈, CO₂. Полный цикл измерения концентрации газов состоял из времени предварительного прогрева всех сенсоров микросистемы (5 с), времени разогрева каждого из сенсоров последовательно (5 с) и времени измерения сопротивления каждого сенсора (80 с).

Результаты измерений показали, что время реакции мультисенсорной микросистемы при воздействии газов: H₂ с концентрацией 0,001 %, CO₂ – 1 %, CO – 0,02 %, C₃H₈ – 0,01 % не превышает установленного для полного цикла измерения 90 с. Значение чувствительности при потребляемой мощности < 150 мВт составило для H₂ – 48–64 %, для CO₂ – 32–36 %, для CO – 20–29 %, для C₃H₈ – 68–78 %.

Предложен способ контроля чувствительности мультисенсорной микросистемы к концентрации газов CO, H₂, CO₂, C₃H₈, который позволяет проводить измерения за 90 с. В то время как цикл измерения одиночным сенсором в среднем составляет, в режиме импульсного нагрева – 2 мин, в режиме постоянного нагрева – 5 мин. Максимальное значение потребляемой мощности микросистемы составило не более 150 мВт. С помощью микросистем можно проводить измерения более низких концентраций детектируемых газов.

Ключевые слова: мультисенсорная газовая микросистема, способ измерения, чувствительность.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-271-278

Адрес для переписки:

Реутская О.Г.
Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь
e-mail: oreutskaya@gmail.com

Address for correspondence:

Reutskaya O.G.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus
e-mail: oreutskaya@gmail.com

Для цитирования:

Реутская О.Г., Таратын И.А., Плескачевский Ю.М.
Мультисенсорная микросистема для измерения концентрации газов
CO, H₂, C₃H₈, CO₂.
Приборы и методы измерений.
2016. – Т. 7, № 3. – С. 271–278.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-271-278

For citation:

Reutskaya O.G., Taratyn I.A., Pleskachevsky Y.M.
[Multisensor microsystem for measuring the concentration of gases CO,
H₂, C₃H₈, CO₂].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 3, pp. 271–278.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-271-278

Multisensor microsystem for measuring the concentration of gases CO, H₂, C₃H₈, CO₂

Reutskaya O.G.¹, Taratyn I.A.², Pleskachevsky Y.M.^{1,3}

¹Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus

²Minsk Research Institute of Radiomaterials,
Kizhevatov str., 86, 220024, Minsk, Belarus

³V.A. Belyi Metal Polymer Research Institute of National Academy of Science of Belarus,
Kirov str., 32A, 246050, Gomel, Belarus

Received 17.06.2016

Accepted for publication 10.11.2016

Abstract

Manufacture of module of chemical sensors on a single chip is one of the promising directions in the development of gas sensory. The aim of this work was development of construction of multisensor microsystem enabled to retain the characteristics of a single sensor and its dimensions and, at the same time, to reduce power consumption and cycle time of measuring concentration of gases CO, H₂, C₃H₈, CO₂ in the environment.

Multisensor microsystem consists of four detached sensors placed on a single substrate of nanostructured aluminum oxide. The use of through-holes and the dielectric substrate itself in microsystem topology reduced power consumption of gas microsystems. We have devised a method of measuring sensitivity of foursensor microsystem to the concentration of gases CO, H₂, C₃H₈, CO₂. A full cycle of measuring gases concentration consisted of the time required for preliminary heating of all sensors of the microsystem (5 s), the heating time of each of the sensors sequentially (5 s) and time required to measure resistance for each sensor (80 s).

The measured results show that the reaction time of multisensor microsystem when exposed to gases – H₂ at a concentration of 0,001 %, CO₂ - 1 %, CO – 0,02 %, C₃H₈ – 0,01 % does not exceed 90 s for full measurement cycle. Sensitivity value at power consumption of < 150 mW makes up 48–64 % for H₂, 32–36 % for CO₂, 20–29 % for CO, 68–78 % for C₃H₈.

The proposed method to control sensitivity of multisensor microsystem to the concentration of gases CO, H₂, C₃H₈, CO₂ allows performing measurements within 90 s while the measurement cycle by a single sensor in pulse heating mode is 2 min, in continuous heat mode – 5 min. Maximum power consumption of the microsystem does not exceed 150 mW. Microsystems allow measuring lower concentrations of detected gases.

Keywords: multisensor gas microsystem, measurement method, sensitivity.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-271-278

Адрес для переписки:

Реутская О.Г.
Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь
e-mail: oreutskaya@gmail.com

Address for correspondence:

Reutskaya O.G.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus
e-mail: oreutskaya@gmail.com

Для цитирования:

Реутская О.Г., Таратын И.А., Плескачевский Ю.М.
Мультисенсорная микросистема для измерения концентрации газов
CO, H₂, C₃H₈, CO₂.
Приборы и методы измерений.
2016. – Т. 7, № 3. – С. 271–278.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-271-278

For citation:

Reutskaya O.G., Taratyn I.A., Pleskachevsky Y.M.
[Multisensor microsystem for measuring the concentration of gases CO,
H₂, C₃H₈, CO₂].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 3, pp. 271–278.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-271-278

Введение

В основной номенклатуре газовых сенсоров выделяют полупроводниковые сенсоры, которые работают в режимах постоянного и импульсного нагрева. Потребляемая мощность в режиме постоянного нагрева составляет от 280 до 650 мВт в среднем, а в режиме импульсного нагрева – ≤ 55 мВт. Данные значения приведены для одиночных сенсоров [1]. Принцип действия полупроводниковых сенсоров основан на изменении проводимости газочувствительного слоя при хемосорбции на его поверхности анализируемых газов [2]. В качестве чувствительных полупроводниковых слоев используют мелкодисперсные нанокристаллические оксиды металлов (SnO_2 , ZnO , In_2O_3 и др.) с легирующими добавками Pt , Pd и др. [3–5]. Благодаря структурной пористости формируемых материалов, достигаемой с помощью некоторых технологических приемов, их удельная поверхность составляет около $30 \text{ м}^2/\text{г}$. Нагревателем служит резистивный слой, выполненный из инертных материалов (Pt , RuO_2 , Au и др.) и электрически изолированный от полупроводникового слоя [4, 5]. Для обеспечения быстрого действия протекающих на поверхности чувствительного слоя физико-химических процессов на уровне нескольких секунд сенсор периодически разогревается до температуры $450\text{--}500 \text{ }^\circ\text{C}$ [1, 4]. В результате этого сопротивление сенсора восстанавливается до начального значения. При отжиге происходит активное освобождение поверхностных слоев полупроводника от сорбированных «отравляющих» газовых компонент [6, 7]. Время измерения концентрации газов одиночным сенсором составляет приблизительно 5 мин в режиме постоянного нагрева и 2 мин – в режиме импульсного нагрева [1, 5].

Контроль химического состава воздуха, резко изменяющегося из-за термического разложения перегретых или начинающих тлеть горючих материалов, позволяет обнаружить очаг пожара еще до появления пламени [8]. Диапазон концентраций газов, которые выделяются до момента появления пламени, составляет для CO – $0,02\text{--}0,08 \%$, для H_2 – $0,001\text{--}0,01 \%$, для C_3H_8 – $1\text{--}1,5 \%$, для CO_2 – $0,01\text{--}0,02 \%$ [8, 9].

Изготовление модуля химических сенсоров на одном кристалле представляется одним из перспективных направлений в развитии газовой сенсорики [10]. Использование в качестве чув-

ствительного элемента мультисенсорной микросистемы дает возможность, сохраняя характеристики одиночного сенсора и его габаритные размеры, уменьшить потребляемую мощность и сократить время цикла измерения при воздействии концентрации газов CO , H_2 , CO_2 , C_3H_8 .

На современном этапе развитие газовых полупроводниковых сенсоров существует несколько технологий создания мультисенсорных систем. Одна из них [10] использует матрицу из 38 сенсоров, которые располагаются на поверхности чувствительной полупроводниковой пленки (разработка научно-исследовательского института г. Карлсруэ). Существенным недостатком такой системы является высокое энергопотребление. Еще одна технология [11] обеспечивает формирование на диэлектрической мембране методами объемного травления кремниевой подложки четырех химических сенсоров. Недостатками данной мультисенсорной системы являются сложность в изготовлении, нестабильное воспроизведение параметров поликремниевого нагревателя и низкий уровень рабочих температур сенсоров [11, 12].

Целью данной работы являлась разработка мультисенсорной микросистемы для уменьшения времени измерения концентрации газов CO , H_2 , C_3H_8 , CO_2 , а также снижение потребляемой мощности микросистемы в целом.

В результате разработаны конструкция мультисенсорной газовой микросистем и способ измерения концентрации газов CO , H_2 , C_3H_8 , CO_2 , которые позволили получить потребляемую мощность $< 150 \text{ мВт}$ и время измерения $< 90 \text{ с}$.

Конструкция мультисенсорной микросистемы

Топология мультисенсорной газовой микросистемы на основе наноструктурированного оксида алюминия представлена на рисунке 1. Толщина платинового нагревателя (в форме мандра) составляет $0,5 \text{ мкм}$. Каждый чувствительный слой сформирован на поверхности нагревателя и электродов. Платиновые электроды для снятия сигнала с полупроводникового чувствительного слоя образуют с нагревателем зазор в 7 мкм . Толщина платиновых электродов составляет $0,5 \text{ мкм}$. Вокруг нагревательных элементов выполнена перфорация. Чувствительный элемент микросистемы, изготовленный на подложке

анодного оксида алюминия (пористость приблизительно равна 35 %), имеет размер $3,7 \times 3,7$ мм и толщину 50 мкм.

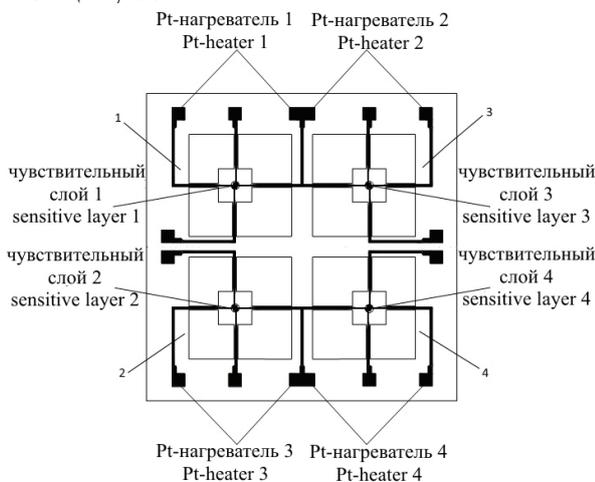


Рисунок 1 – Топология микросистемы на основе наноструктурированного оксида алюминия: 1 – сенсор № 1; 2 – сенсор № 2; 3 – сенсор № 3; 4 – сенсор № 4

Figure 1 – Topology microsystems based on nanostructured alumina oxide: 1 – sensor № 1; 2 – sensor № 2; 3 – sensor № 3; 4 – sensor № 4

Размер площадки для нагревателя в виде меандра позволил увеличить общую площадь чувствительного слоя для каждого из сенсоров микросистемы. Формирование газочувствительных слоев, полученных золь-гель методом на поверхности чувствительных элементов микросистемы, осуществлялось послойным нанесением раствора капельным путем с толщиной слоя приблизительно 100 Å. Использование в топологии микросистемы на основе наноструктурированного оксида алюминия сквозных отверстий, как и использование самой нанопористой диэлектрической подложки, привело к снижению потребляемой мощности газовой микросистемы за счет уменьшения объема, контактирующего с нагревателем материала подложки, и уменьшения коэффициента теплопроводности подложки [13].

Измерения чувствительности микросистемы к концентрации газов CO , H_2 , CO_2 , C_3H_8

Время наработки микросистемы перед началом измерений при мощности потребления 60 мВт на каждом из сенсоров в режиме постоянного нагрева, составило 240 ч.

Экспериментально было установлено, что при использовании постоянного нагрева на оди-

ночном сенсоре наблюдается «дрейф» сопротивления. Например, при токе 41 мА и мощности 67 мВт при постоянном нагреве в течение 5 ч изменение сопротивления составило 0,8 кОм (рисунок 2).

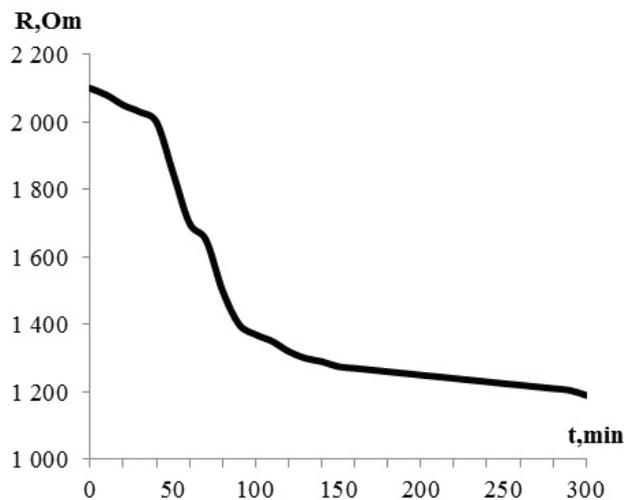


Рисунок 2 – Зависимость сопротивления одиночного сенсора на подложке из наноструктурированного оксида алюминия при постоянной подаче питания в течение 5 ч (режим постоянного нагрева)

Figure 2 – The dependence of the resistance of a single sensor on the nanoporous aluminum oxide wafer at constant power up for 5 h (mode continuous heating)

Для уменьшения величины дрейфа сопротивления сенсора был использован импульсный нагрев. Сенсор периодически разогревали до температуры 450–500 °С [12]. На рисунке 3 приведены результаты измерения одиночных сенсоров на подложке из наноструктурированного оксида алюминия с разными чувствительными слоями: $\text{SnO}_2+\text{Pt}+\text{Pd}$ – для первого сенсора, $\text{In}_2\text{O}_3+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Pt}$ – для второго.

Из экспериментальных данных установлено, что чувствительность сенсоров с предварительным отжигом выше, чем без него. Время измерения сигнала сенсора и время релаксации одиночного сенсора в режиме постоянного нагрева составляет около 5 мин, в режиме импульсного нагрева – 2 мин.

Нами предложен способ измерения чувствительности четырехсенсорной микросистемы к концентрации газов CO , H_2 , C_3H_8 , CO_2 . Для управления микросистемой разработана плата управления с микроконтроллером и разъемом для подключения интерфейсного кабеля RS 485 – RS 232 к персональному компьютеру.

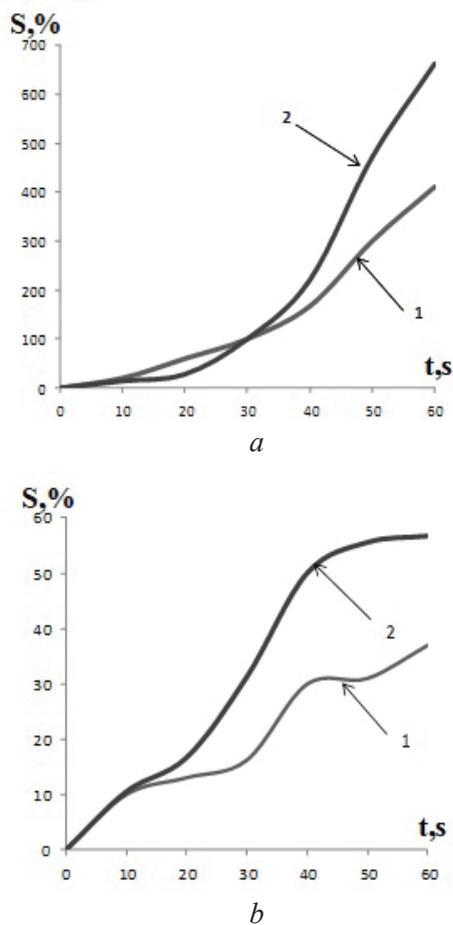


Рисунок 3 – Сенсорный отклик при воздействии CO с концентрацией 0,02 %: а – для сенсора с чувствительным слоем SnO₂+Pt+Pd; б – для сенсора с чувствительным слоем In₂O₃+Al₂O₃+Pt. 1 – режим постоянного нагрева; 2 – режим импульсного нагрева

Figure 3 – Touch microsystems response (sensitivity) at influence of CO with a concentration 0,02%: а – for the sensor with a sensing layer SnO₂+Pt+Pd; б – for the sensor with a sensing layer of In₂O₃+Al₂O₃+Pt. 1 – mode continuous heating; 2 – mode pulse heating

На рисунке 4 представлен цикл измерения концентрации газов, где t_n – время прогрева всех сенсоров микросистемы при первом подключении ее к источнику питания (время предпрогрева); t_{pN} – время разогрева каждого из элементов микросистемы до рабочей температуры (время разогрева); t_{mN} – время измерения сопротивления N -го сенсора микросистемы.

Номинальное значение тока, подаваемого на микросистему, соответствует 70 мА. Измерение сопротивления осуществлялось при следующих условиях:

– начальное значение тока, подаваемого на все сенсоры микросистемы одновременно – 14 мА;

– ток, подаваемый на каждый из сенсоров последовательно – 55 мА;

– время нагрева всех сенсоров микросистемы, при первом подключении ее к источнику питания (время предпрогрева) – 5 с;

– время нагрева каждого из элементов микросистемы, до рабочей температуры (время разогрева) – 5 с;

– время измерения сопротивления для каждого из сенсоров микросистемы $t_{mN} = 20$ с.

Таким образом, полный период измерения для четырех сенсоров микросистемы составляет 90 с.

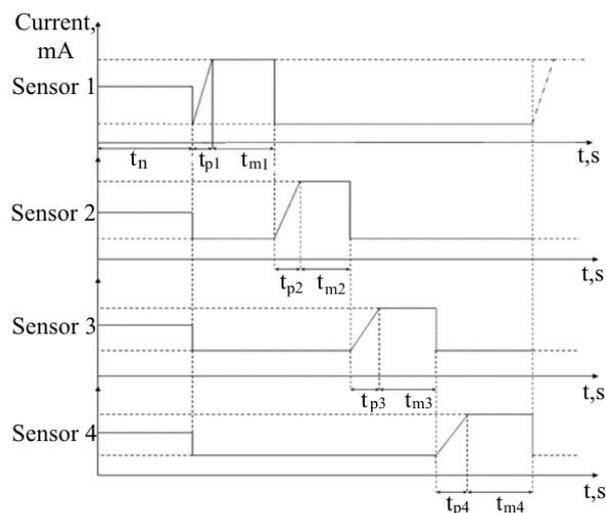


Рисунок 4 – Диаграмма измерения концентрации газов CO, H₂, CO₂, C₃H₈: t_n – время предпрогрева; t_{pN} – время разогрева; t_{mN} – время измерения сопротивления N -го, где N – номер сенсора

Figure 4 – Diagram of measurement concentration of gas CO, H₂, CO₂, C₃H₈: t_n – time before heating; t_{pN} – heating time; t_{mN} – time measurement of the N -sensor, where N – number of sensor

Во время предварительного прогрева микросистемы значение тока задавалось на уровне 35 мА. Предварительный прогрев происходил только один раз, непосредственно после подключения микросистемы к источнику питания. По истечении времени предварительного прогрева первый сенсор переходил в режим разогрева – его ток плавно увеличивался от значения тока холостого хода до заданного значения тока. После разогрева одного из сенсоров ток устанавливался в заданное значение. Через 5 с происходил вывод значения сопротивления сенсора на экран (период измерения сопротивления одного сенсора равен 20 с; за это время выдавались четыре значения сопротивления, последнее из которых R_p), значение среднего расчетного сопротивления сенсора за предыдущий

цикл измерения (сопротивление до подачи газа, R_0); разница между ними в процентах также выводилась на экран (чувствительность S). Затем ток данного сенсора падал до значения тока холостого хода, и программа повторяла вышеперечисленные действия со следующим сенсором. Моделирование процесса измерения проводилось в специализированной терминальной программе *Hercules*.

Во время первого цикла измерения R_0 принималось равным нулю. Сравнение значений сопротивлений сенсоров микросистемы, расчет и вывод на экран значения чувствительности происходило со второго цикла измерений. Если чувствительность превышает 15 %, то можно говорить о наличии детектируемого газа в окружающей среде [5].

Значение выходного параметра (чувствительность S) при воздействии газа рассчитывалось по формуле [5]:

$$S = \frac{|R^{80} - R_0|}{R_0} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где R_0 – сопротивление сенсора микросистемы без воздействия газа; R^{80} – сопротивление сенсора микросистемы при воздействии газа, через 80 с.

Полный цикл измерения концентрации газов состоял из времени предпрогрева (5 с), времени разогрева (5 с) и времени измерения сопротивления для четырех сенсоров (80 с).

Результаты измерений чувствительности микросистемы к концентрации газов

Проведены исследования трех экспериментальных образцов мультисенсорных газовых микросистем. Измерения проводились на специализированном стенде, блок-схема которого приведена на рисунке 5. Результаты измерений одного из образцов представлены в таблице.

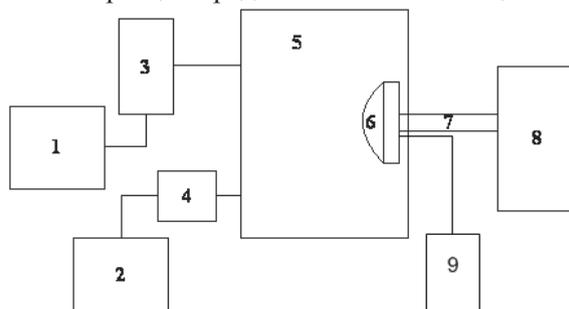


Рисунок 5 – Блок-схема стенда для измерения характеристик мультисенсорной микросистемы: 1 – баллон с одним из газов CO , H_2 , CO_2 , C_3H_8 ; 2 – баллон с искусственным воздухом; 3, 4 – ротаметр; 5 – рабочий объем с исследуемым газом; 6 – мультисенсорная микросистема; 7 – интерфейсный кабель RS 485 – RS 232; 8 – персональный компьютер; 9 – источник питания

Figure 5 – Flowchart of the bench for measuring characteristics of multi-sensor microsystem: 1 – gasbag with one of the gases CO , H_2 , CO_2 , C_3H_8 ; 2 – gasbag with synthetic air; 3, 4 – rotameter; 5 – working volume with the test gas; 6 – multisensor microsystem; 7 – interface cable RS 485 – RS 232; 8 – PC; 9 – power supply

Таблица

Результаты измерений мультисенсорной микросистемы The results of measurements multisensor microsystem

Параметры Characteristic	№ сенсора № sensor	Газы Gas			
		H_2	CO	CO_2	C_3H_8
		концентрации, % concentration, %			
		0,001	0,02	1	0,01
Время реакции, $\tau_{\text{сп}}$, с Reaction time, s	1	14	20	35	25
	2	14	29	32	24
	3	15	20	34	28
	4	14	22	35	25
Чувствительность N-сенсора (номер сенсора) через 80 с измерения, S^{80} при воздействии газа, % Sensitivity of the N-sensor (number of the sensor) after 80 s of measurement, when exposed to gas, %	1	60	230	36	75
	2	52	180	32	78
	3	48	240	34	68
	4	64	160	36	72

Измерения проводились при температуре окружающего воздуха (20 ± 5) °, относительной влажности воздуха от 10 до 90 %, атмосферном давлении от 84 до 106,7 кПа. Потребляемая мощность

микросистемы составила 120 мВт. Исследуемые экспериментальные образцы показали время срабатывания 14–15 с при воздействии H_2 с концентрацией 0,001 %, 32–35 с – при воз-

действию CO_2 с концентрацией 1 %, 20–29 с при воздействии CO с концентрацией 0,02 %, 24–28 с при воздействии C_3H_8 с концентрацией 0,01 % (таблица). Значение чувствительности составило для H_2 – 48–64 %, для CO_2 – 32–36 %, для CO – 20–29 %, для C_3H_8 – 68–78 %.

Результаты измерений показали, что время реакции мультисенсорной микросистемы при воздействии концентрации газов CO , H_2 , CO_2 , C_3H_8 не превышает установленных для полного цикла измерения 90 с. Значение чувствительности для данных газов более 15 % при потребляемой мощности менее 150 мВт. Следовательно, с помощью микросистем можно проводить измерения более низких концентраций детектируемых газов.

Заключение

Разработана конструкция мультисенсорной микросистемы и предложен способ контроля чувствительности к концентрации газов CO , H_2 , CO_2 , C_3H_8 , который позволяет проводить измерения за 90 с. В то время как цикл измерения одиночным сенсором в среднем составляет: в режиме импульсного нагрева – 2 мин, в режиме постоянного нагрева – 5 мин. Потребляемая мощность микросистемы при работе четырех сенсоров не превышает 150 мВт при чувствительности более 15 %.

Благодарности

Работа финансировалась в рамках задания 1.40 «Разработка типовой архитектуры системы противопожарной безопасности на основе газового пожарного извещателя с матричным сенсором» программы Союзного государства «Микросистемотехника».

Список использованных источников

1. Романова, И. Высокочувствительные датчики газа. Новинки от Figaro Engineering / И. Романова // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. – 2011. – № 1. – С. 64–70.
2. Morrison, S.R. Selectivity in semiconductor gas sensors / S.R. Morrison // Sensor & Actuator. – 1997. – No. 12. – P. 425–440.
3. Yamazoe, N. Toward innovations of gas sensor technology / N. Yamazoe // Sensors and Actuators B. – 2005. – Vol. 108. – P. 2–14.
4. Szychowska, A. Investigation of CO oxidation by NO with application of semiconductor gas sensors /

A. Szychowska [et al.] // Polish J. of Environ. Stud. – 2008. – Vol. 17, no. 3. – P. 421–425.

5. Румянцева, М.Н. Влияние микроструктуры полупроводниковых сенсорных материалов на хемосорбцию кислорода на их поверхности / М.Н. Румянцева, Е.А. Макеева, А.М. Гаськов // Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева. – 2008. – Т. LI, № 2. – С. 122–129.

6. Васильев, А. Газовые сенсоры для пожарных извещателей / А. Васильев, И. Олихов, А. Соколов // Электроника: НТБ. – 2005. – № 2. – С. 24–27.

7. Покаташкин, В.И. Применение тонкопленочных полупроводниковых газовых NiO-сенсоров в озонметрии / В.И. Покаташкин [и др.] // Вестник БГУ. – Сер. 1. – 2008. – № 2. – С. 38–42.

8. Фёдоров, А.В. Системы и технические средства раннего обнаружения пожара / А.В. Фёдоров [и др.] : монография. – М. : Академия ГПС МЧС России. – 2009. – 158 с.

9. Елисеев, М.А. Бизнес и безопасность. Системы сверхраннего обнаружения пожара / М.А. Елисеев // Системы безопасности. – 2003. – № 2 (50). – С. 145–148.

10. Кнеллер, В.Ю. Датчики для контроля окружающей среды: потребности, технологии, рынок / В.Ю. Кнеллер // Датчики и системы. – № 8. – 2005. – С. 54–69.

11. Stankova, M. Sensitivity and selectivity improvement of rf sputtered WO_3 microhotplate gas sensors / M. Stankova [et al.] // Sens. Actuators B, Chem. – 2006. – Vol. 113. – P. 241–248.

12. Реутская, О.Г. Четырехсенсорная газовая микросистема на подложке из пористого анодного оксида алюминия: конструкция, технология, моделирование / О.Г. Реутская, Е.А. Белогуров, И.А. Таратын, В.В. Хатько // Приборы и методы измерений. – 2013. – Т. 7, № 2. – С. 47–51.

13. Микросенсорная газовая система для определения концентрации газов в окружающей среде / О.Г. Реутская, И.А. Таратын, И.В. Сафрошкина: патент 20011 Респ. Беларусь, МПК (2006.01) G 01N27/00/ № а 20130836; опубл. 30.04.2016 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2016. – № 2. – С. 109.

Acknowledgments

The work was funded in the framework of the task 1.40 «Development of a standard fire safety system architecture based on the gas-fire detector with a matrix sensor» Union State program «Microsystems».

References

1. Romanova I. [Highly sensitive gas sensors. News from Figaro Engineering] *Elektronika. Nauka. Tekhnologiya. Biznes* [Electronics. Science. Technology. Business], 2011, no. 1, pp. 64–70 (in Russian).

2. Morrison S.R. Selectivity in semiconductor gas sensors. *Sensor & Actuator*, 1997, no. 12, pp. 425–440.

doi: 10.5194/jsss-3-213-2014

3. Yamazoe N. Toward innovations of gas sensor technology. *Sensors and Actuators*, 2005, vol. 108, pp. 2–14. **doi:** 10.1016/j.snb.2004.12.075

4. Szychowska A., Wrobel-Jedrzejewska M., Chylak I., Kocemba I., Rynkowski J. Investigation of CO oxidation by NO with application of semiconductor gas sensors. *Polish J. of Environ. Stud.*, 2008, vol. 17, no. 3, pp. 421–425.

5. Rumyantseva M.N., Makeeva E.A., Gaskov A.M. [Influence of microstructure of semiconductor sensor materials on the chemisorption of oxygen on their surface]. *Zhurnal Rossijskogo chimicheskogo obschestva imeni D.I. Mendeleeva* [Journal of Russian D.I. Mendeleev chemical society], 2008, vol. LII, no. 2, pp. 122–129 (in Russian).

6. Vasiliev A., Oligov I., Sokolov A. [Gas sensors for fire detectors]. *ELECTRONICA NTB* [Electronics NTL], 2005, no. 2, pp. 24–27 (in Russian).

7. Pokatashkin V.I. [The use of thin film semiconductor gas of NiO-sensors to ozonometry]. *VestnikBGU* [Messenger BSU], 2008, vol. 1, no. 2, pp. 38–42 (in Russian).

8. Fedorov A.V., Chlenov A. N., Lukjanenko A.A., Bucinskaya T.A., Demexin F.V. *Sistemy i tehnikeskiye*

sredstva rannego obnaruzheniya pozhara [Systems and means of early fire detection]. Moscow, Academy of FMS MOE Russia Puubl., 2009, 158 p.

9. Eliseev M.A. [Business and security. Systems of early detection of fire]. *Sistemy bezopasnosti* [Security Systems], 2003, vol. 2, no. 50, pp. 145–148 (in Russian).

10. Kneller V.U. [Sensors for environmental monitoring: needs, technology, market]. *Sensors and Systems*, 2005, no. 8, pp. 54–69 (in Russian).

11. Stankova M., Vilanova X., Calderer J., Llobet E., Brezmes J. Sensitivity and selectivity improvement of rf sputtered WO₃ microhotplate gas sensors. *Sens. Actuators B, Chem.*, 2006, vol. 113, pp. 241–248.

doi: 10.1016/j.snb.2005.02.056

12. Reutskaya O.G., Belahurau Ya.A., Taratyn I.A., Khatko V.V. [Four sensor gas microsystem based on porous anodic alumina substrate: design, fabrication technology, simulation]. *Pribory i metody izmerenij* [Devices and methods of measurements], 2013, vol. 7, no. 2, pp. 47–51 (in Russian).

13. Reutskaya O.G., Taratyn I.A., Safroshkina I.V. *Microsensornaya gazovaya sistema dlya opredeleniya koncentracii gazov v okruzhayushej srede* [Multisensor gas microsystem for determining the concentration of gases in the environment]. Patent RB, № a20130836, 2016.