

УДК 681.2.082:53.082.7

Измерения концентрации газов CO и NO₂ мультисенсорной микросистемой в режиме импульсного нагрева

Реутская О.Г.¹, Плескачевский Ю.М.²

¹Минский НИИ радиоматериалов,
ул. Кижеватова, 86, г. Минск 220024, Беларусь

²Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси,
ул. Кирова, 32А, г. Гомель 246050, Беларусь

Поступила 23.02.2017

Принята к печати 03.05.2017

Наиболее перспективными для массового применения в газоаналитической аппаратуре являются полупроводниковые газовые сенсоры, отличающиеся высокой надежностью, простотой в эксплуатации и относительно низкой стоимостью. Потребляемая мощность одиночных сенсоров в режиме постоянного нагрева составляет от 250 до 600 Вт в среднем, а в режиме импульсного нагрева не превышает 20 Вт. Целью данной работы являлось исследование эффективности режима импульсного нагрева для мультисенсорной микросистемы, состоящей из двух сенсоров на подложке из наноструктурированного оксида алюминия, по сравнению с режимом постоянного нагрева.

В качестве чувствительных слоев микросистемы были выбраны SnO₂+Pt+Pd и In₂O₃+Al₂O₃+Pt. Измерения сенсорного отклика в режиме импульсного нагрева проводились следующим образом: устанавливалась мощность на каждом сенсоре микросистемы 1,3 мВт, затем проводился кратковременный отжиг ($t_{\text{отж.}} = 5$ с) при мощности 61 мВт, через 15 мин осуществлялась подача детектируемых газов CO или NO₂ с концентрацией 200 ppm и 4 ppm, соответственно, и фиксировались значения сопротивлений. По полученным результатам определили сенсорный отклик, максимальное значение которого через 60 с для сенсора с чувствительным слоем SnO₂+Pt+Pd при воздействии CO составило 670 %, а с чувствительным слоем In₂O₃+Al₂O₃+Pt – 380 %.

Установлены преимущества использования режима импульсного нагрева с точки зрения потребляемой мощности мультисенсорной микросистемы в милливаттном диапазоне энергопотребления и показана высокая работоспособность сенсоров на подложках из наноструктурированного оксида алюминия.

Ключевые слова: мультисенсорная газовая микросистема, режим импульсного нагрева, концентрация газов CO и NO₂.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-2-160-167

Адрес для переписки:

Реутская О.Г.
Минский НИИ радиоматериалов,
ул. Кижеватова, 86, г. Минск 220024, Беларусь
e-mail: oreutskaya@gmail.com

Address for correspondence:

Reutskaya O.G.
Minsk Research Institute of Radiomaterials,
Kizhevatov str., 86, Minsk 220024, Belarus
e-mail: oreutskaya@gmail.com

Для цитирования:

Реутская О.Г., Плескачевский Ю.М.
Измерения концентрации газов CO и NO₂ мультисенсорной микросистемой в режиме импульсного нагрева.
Приборы и методы измерений.
2017. – Т. 8, № 2. – С. 160–167.
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-2-160-167

For citation:

Reutskaya O.G., Pleskachevsky Y.M.
[Measurement of CO and NO₂ gas concentration's by multisensor microsystem in the mode of pulse heating].
Devices and Methods of Measurements.
2017, vol. 8, no. 2, pp. 160–167 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-2-160-167

Measurement of CO and NO₂ gas concentration's by multisensor microsystem in the mode of pulse heating

Reutskaya O.G.¹, Pleskachevsky Y.M.²

¹Minsk Research Institute of Radiomaterials,
Kizhevatov str., 86, Minsk 220024, Belarus

²V.A. Belyi Metal Polymer Research Institute of National Academy of Science of Belarus,
Kirov str., 32A, Gomel 246050, Belarus

Received 23.02.2017

Accepted for publication 03.05.2017

Abstract

The most promising for mass use in gas analysis equipment are semiconductor gas sensors due to their high reliability, easy operation and relatively low cost. Power consumption in the single-sensor mode, constant heating is from 250 to 600 W average and in pulsed mode heating – ≤ 20 W. The aim of this work was to study the effectiveness of the pulsed heating for multisensor microsystems consisting of two sensors on the substrate of the nanostructured aluminum oxide, compared with the mode of constant heating.

For sensitive layers were chosen compositions: SnO₂+Pt+Pd at the first sensor of the microsystem and In₂O₃+Al₂O₃+Pt on the second. Measuring the sensor response in the pulse heating mode was carried out as follows. Power on each sensor microsystem was installed 1.3 mW. Then the short-term heating ($t_{\text{heat.}} = 5$ s) was performed at the power 61 mW. The detected gases CO and NO₂ with the concentration 200 ppm and 4 ppm, correspondingly, were submitted to the microsystem after 15 minutes. The resistance values for each of the sensor were fixed. According to the results determine the sensitivity (sensor response) the maximum value is after 60 s for the sensor with a sensing layer SnO₂+Pt+Pd when exposed to CO was 670 %, and for the sensor with In₂O₃+Al₂O₃+Pt – 380 %.

Advantages of using pulsed heating from the point of view of a power consumption multisensor microsystem mW-range and high performance sensors on substrates of nanostructured alumina were established.

Keywords: multisensory gas microsystem, mode pulse heating, the concentration of gases CO and NO₂.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-2-160-167

Адрес для переписки:

Реутская О.Г.
Минский НИИ радиоматериалов,
ул. Кижеватова, 86, г. Минск 220024, Беларусь
e-mail: oreutskaya@gmail.com

Address for correspondence:

Reutskaya O.G.
Minsk Research Institute of Radiomaterials,
Kizhevatov str., 86, Minsk 220024, Belarus
e-mail: oreutskaya@gmail.com

Для цитирования:

Реутская О.Г., Плескачевский Ю.М.
Измерения концентрации газов CO и NO₂ мультисенсорной микро-
системой в режиме импульсного нагрева.
Приборы и методы измерений.
2017. – Т. 8, № 2. – С. 160–167.
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-2-160-167

For citation:

Reutskaya O.G., Pleskachevsky Y.M.
[Measurement of CO and NO₂ gas concentration's by multisensor
microsystem in the mode of pulse heating].
Devices and Methods of Measurements.
2017, vol. 8, no. 2, pp. 160–167 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-2-160-167

Введение

Основная доля мирового рынка газовых сенсоров приходится на японские компании. Фирма *Figaro* является лидером в этой области, годовой объем производства сенсоров составляет около 5 млн шт. В основной номенклатуре полупроводниковых сенсоров выделяют сенсоры, которые работают в режимах постоянного и импульсного нагревов чувствительного элемента. Потребляемая мощность в режиме постоянного нагрева составляет от 250 до 600 Вт в среднем, а в режиме импульсного нагрева – не более 20 Вт [1]. Принцип действия полупроводниковых сенсоров резистивного типа 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 [3–5]. Благодаря структурной пористости формируемых материалов, достигаемой с помощью некоторых технологических приемов, их удельная поверхность высокая и 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 того чтобы физико-химические процессы протекали на поверхности чувствительного слоя достаточно быстро, обеспечивая быстрое действие на уровне нескольких секунд, сенсор периодически разогревается до температуры $450\text{--}500 \text{ }^\circ\text{C}$ [1, 4]. В результате этого чувствительность сенсора восстанавливается до исходного состояния. Во время отжига происходит активное освобождение поверхностных слоев полупроводника от сорбированных «отравляющих» газовых компонент [6, 7].

Анализ развития рынка газовых сенсоров показал, что перспективными для массового применения в газоаналитической аппаратуре являются полупроводниковые газовые сенсоры, отличающиеся высокой надежностью, простотой в эксплуатации и относительно низкой стоимостью. Одна из особо важных задач в повышении потребительских характеристик полупроводниковых газовых сенсоров – снижение их энергопотребления, что связано в

первую очередь с условиями работы газоаналитических приборов нового поколения в автономном режиме, т.е. при электропитании от портативных аккумуляторов. Потребляемая мощность этих приборов должна составлять несколько десятков милливатт [8, 9].

Целью данной работы являлось исследование эффективности режима импульсного нагрева для мультисенсорной микросистемы по сравнению с режимом постоянного нагрева с точки зрения повышенной чувствительности к низким концентрациям опасных газов CO и NO_2 и обеспечение его заданной работоспособности, не превышая при этом значений мощности одиночных сенсорных аналогов.

Эксперимент

Изготовленная мультисенсорная микросистема для определения CO и NO_2 представляет собой металлический восьмивыводной корпус с газопроницаемым колпачком, в котором закреплена золотой проволокой подложка размером $1,25 \times 1,25 \text{ мкм}$ из наноструктурированного пористого оксида алюминия фирмы *Sincera* с пористостью 25–30 % и толщиной 55 мкм. На одной стороне подложки размещены две пары информационных электродов с расстоянием между ними 10 мкм, а на второй – два нагревательных элемента в форме меандров шириной 30 мкм и толщиной 0,5 мкм. В области расположения нагревательных элементов выполнена перфорация. Информационные электроды и нагревательные элементы изготовлены из платины. Формирование газочувствительных слоев ($\text{SnO}_2+\text{Pt}+\text{Pd}$ на одном сенсоре и $\text{In}_2\text{O}_3+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Pt}$ на втором), полученных золь-гель методом на поверхности информационных электродов микросистемы, осуществлялось послойным нанесением капельным путем с толщиной одного слоя порядка 10 нм на поверхность информационных электродов. Внешний вид схем микросистемы в корпусе представлен на рисунке 1.

Применение в топологии микросистемы сквозных отверстий и самой пористой подложки позволяет снизить потребляемую мощность за счет уменьшения объема контактирующего с нагревателем материала подложки и снижения коэффициента теплопроводности алюмооксидной подложки [9].

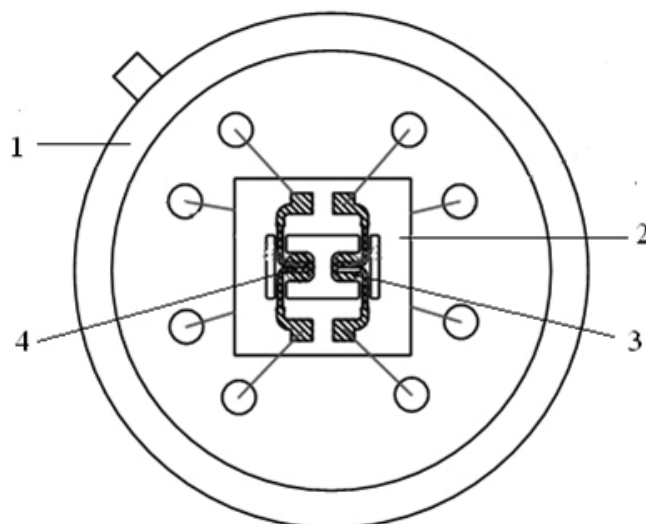


Рисунок 1 – Схема мультисенсорной микросистемы в корпусе: 1 – корпус; 2 – кристалл микросистемы; 3 – чувствительный слой $\text{SnO}_2+\text{Pt}+\text{Pd}$; 4 – чувствительный слой $\text{In}_2\text{O}_3+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Pt}$

Figure 1 – Multisensor microsystem in the housing: 1 – housing; 2 – substrate of multisensor microsystem; 3 – sensitive layer $\text{SnO}_2+\text{Pt}+\text{Pd}$; 4 – sensitive layer $\text{In}_2\text{O}_3+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Pt}$

Время предварительного отжига микросистем для формирования чувствительных слоев при мощности 60 мВт на каждом из сенсоров составило 360 ч. Зависимость сопротивления от приложенной мощности на каждом из сенсоров микросистемы после предварительного отжига представлена на рисунке 2.

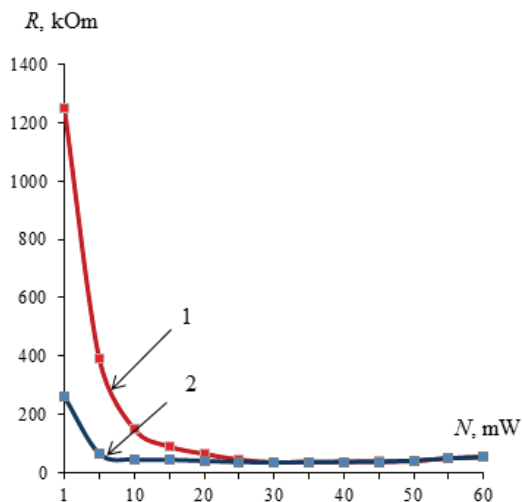


Рисунок 2 – Зависимость сопротивления микросистемы от мощности нагревателя после отжига в течение 360 ч при мощности: 60 мВт: 1 – для сенсора с чувствительным слоем $\text{SnO}_2+\text{Pt}+\text{Pd}$; 2 – для сенсора с чувствительным слоем $\text{In}_2\text{O}_3+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Pt}$

Figure 2 – Dependence of the resistance of the microsystem on the power of the heater after annealing for 360 hours: 1 – for the sensor with the sensitive layer of $\text{SnO}_2+\text{Pt}+\text{Pd}$; 2 – for the sensor with the sensitive layer $\text{In}_2\text{O}_3+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Pt}$

Первый и второй сенсоры микросистемы после измерения зависимости сопротивления от мощности были переключены в режимы $I = 11$ мА, $U = 0,118$ В, $N = 1,3$ мВт и $I = 11$ мА, $U = 0,102$ В, $N = 1,1$ мВт, соответственно, и выдерживались до начала измерений сенсорного отклика 15 мин. После стабилизации начального значения сопротивления (R_0) на оба сенсора был подан газ СО с концентрацией 200 ppm, и в режиме постоянного нагрева проведена серия измерений сопротивления микросистемы (рисунок 3а).

Данные измерений показали, что чувствительность для первого сенсора с чувствительным слоем $\text{SnO}_2+\text{Pt}+\text{Pd}$ составила приблизительно 400 % и приблизительно 37 % для второго с $\text{In}_2\text{O}_3+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Pt}$ (рисунок 4а).

Чувствительность S , % определяли по формуле:

$$S = (R_g - R_0) / R_0 \times 100 \% \quad (1)$$

при воздействии газовой смеси, содержащей СО, и по формуле:

$$S = (R_g - R_0) / R_0 \times 100 \% \quad (2)$$

при воздействии газовой смеси, содержащей NO_2 .

В обеих формулах R_0 и R_g – электрическое сопротивление чувствительного слоя на воздухе и при воздействии газовой смеси соответственно [10, 11].

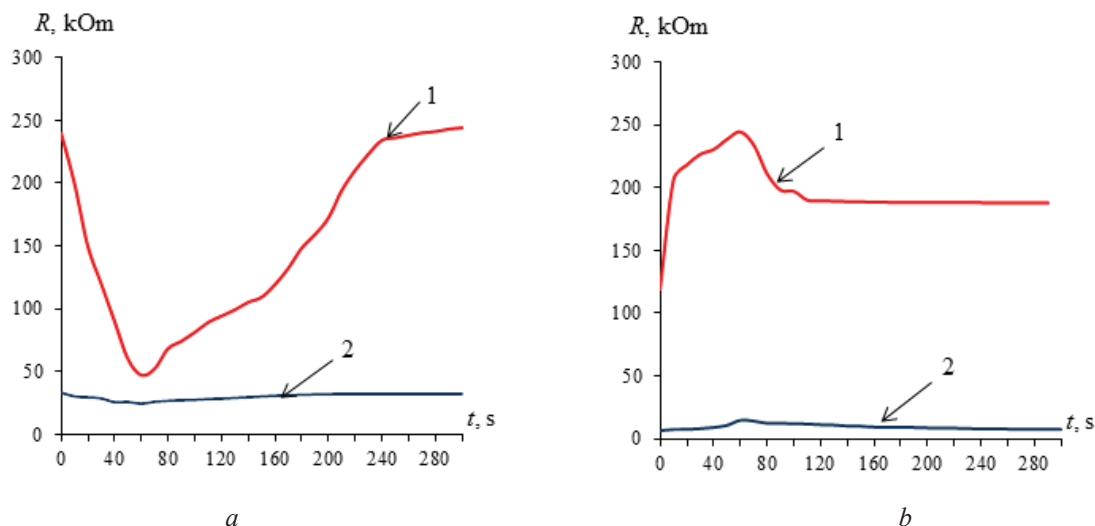


Рисунок 3 – Зависимость сопротивления микросистемы от времени в режиме постоянного нагрева: *a* – при воздействии CO с концентрацией 200 ppm; *b* – при воздействии NO_2 с концентрацией 4 ppm; 1 – чувствительный слой $SnO_2+Pt+Pd$; 2 – чувствительный слой $In_2O_3+Al_2O_3+Pt$

Figure 3 – Dependence of the resistance of the microsystem on the time in the mode of continuous heating: *a* – when exposed to a CO concentration of 200 ppm; *b* – when exposed to NO_2 with a concentration of 4 ppm; 1 – sensitive layer $SnO_2+Pt+Pd$; 2 – sensitive layer $In_2O_3+Al_2O_3+Pt$

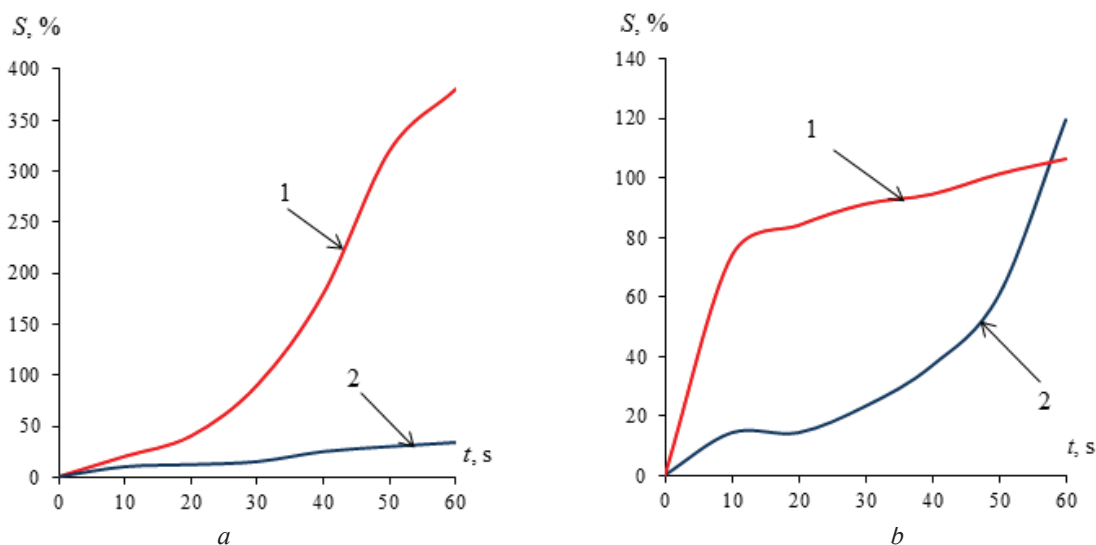


Рисунок 4 – Чувствительность микросистемы в режиме постоянного нагрева: *a* – при воздействии CO с концентрацией 200 ppm; *b* – при воздействии NO_2 с концентрацией 4 ppm; 1 – чувствительный слой $SnO_2+Pt+Pd$; 2 – чувствительный слой $In_2O_3+Al_2O_3+Pt$

Figure 4 – Sensitivity of the microsystem in continuous heating mode: *a* – when exposed to a CO concentration of 200 ppm; *b* – when exposed to NO_2 with a concentration of 4 ppm; 1 – sensitive layer $SnO_2+Pt+Pd$; 2 – sensitive layer $In_2O_3+Al_2O_3+Pt$

Измерения проводились на специализированном стенде, который описан в работе [11]. Было установлено, что при малых мощностях после воздействия детектируемого газа сопротивление сенсора не достигает значения R_0 , и наблюдается постепенное уменьшение сигнала.

Серия измерений для определения сенсорного отклика при постоянном нагреве для выше описан-

ных режимов была проведена и для NO_2 с концентрацией 4 ppm. Результаты представлены на рисунках 3*b* и 4*b*. Чувствительность сенсора с $SnO_2+Pt+Pd$ составила 110 %, с $In_2O_3+Al_2O_3+Pt$ – 120 %.

Измерения сенсорного отклика в режиме импульсного нагрева проводились следующим образом: устанавливалась мощность 1,3 мВт на каждом сенсоре микросистемы, затем проводился кратко-

временный отжиг ($t_{\text{отж.}} = 5$ с) при мощности 61 мВт, через 15 мин осуществлялась подача детектируемых газов CO или NO₂ с концентрацией 200 ppm и 4 ppm соответственно и фиксировались значения сопротивлений для каждого из сенсоров (рисунок 5).

Выбранные газочувствительные слои (SnO₂+Pt+Pd и In₂O₃+Al₂O₃+Pt) показали высокие значения сенсорного отклика к воздействию CO и NO₂ при совместной работе двух сенсоров микросистемы. Чувствительность микросистемы в режи-

ме импульсного нагрева представлена на рисунке 6. Чувствительность сенсора с SnO₂+Pt+Pd при измерении CO составила 630 %, при NO₂ – 150 %. Для слоя In₂O₃+Al₂O₃+Pt при воздействии CO чувствительность составила 68 %, при NO₂ – 370 %. По форме и интенсивности сигнала можно различать вид детектируемого газа. При проведении измерений сенсорного отклика было установлено взаимное влияние мощностей сенсоров микросистемы друг на друга.

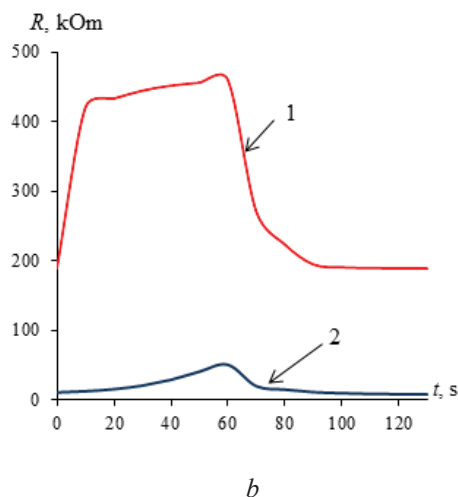
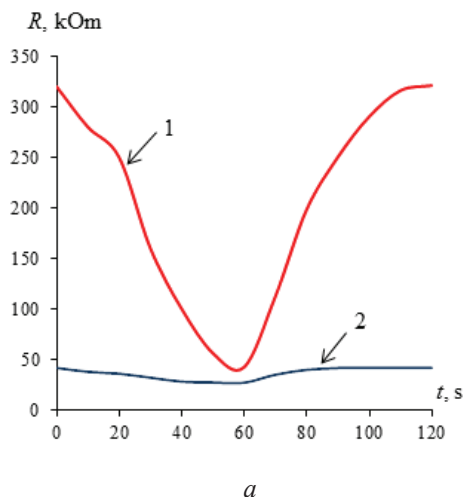


Рисунок 5 – Зависимость сопротивления микросистемы от времени в режиме импульсного нагрева: *a* – при воздействии CO с концентрацией 200 ppm; *b* – при воздействии NO₂ с концентрацией 4 ppm; 1 – чувствительный слой SnO₂+Pt+Pd; 2 – чувствительный слой In₂O₃+Al₂O₃+Pt

Figure 5 – Dependence of the resistance of the microsystem on the time in the pulse heating mode: *a* – when exposed to a CO concentration of 200 ppm; *b* – when exposed to NO₂ with a concentration of 4 ppm; 1 – sensitive layer SnO₂+Pt+Pd; 2 – sensitive layer In₂O₃+Al₂O₃+Pt

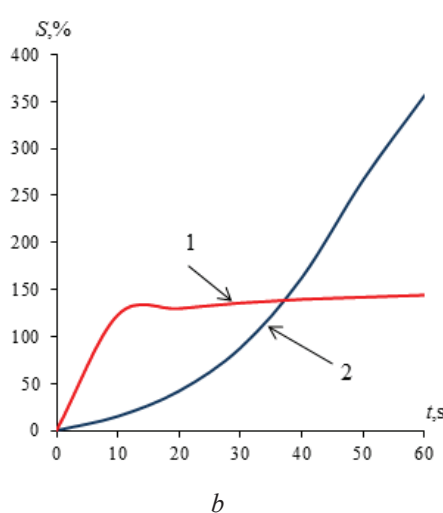
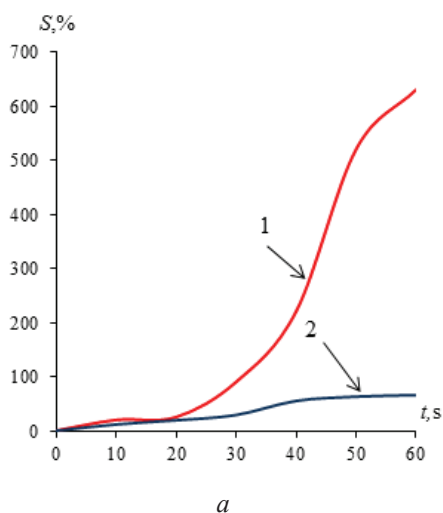


Рисунок 6 – Чувствительность микросистемы в режиме импульсного нагрева: *a* – при воздействии CO с концентрацией 200 ppm; *b* – при воздействии NO₂ с концентрацией 4 ppm; 1 – чувствительный слой SnO₂+Pt+Pd; 2 – чувствительный слой In₂O₃+Al₂O₃+Pt

Figure 6 – Sensitivity of the microsystem in the mode of pulse heating: *a* – when exposed to a CO concentration of 200 ppm; *b* – when exposed to NO₂ with a concentration of 4 ppm; 1 – sensitive layer SnO₂+Pt+Pd; 2 – sensitive layer In₂O₃+Al₂O₃+Pt

Время релаксации микросистемы в режиме постоянного нагрева составило менее 5 мин (рисунок 3), в режиме импульсного нагрева – менее 45 с (рисунок 5).

Методика измерения сенсорного отклика микросистемы в режиме импульсного нагрева заключается в том, что перед началом измерений концентраций газов при малых мощностях нагрева эффективно проводить кратковременный отжиг сенсора. Такой способ измерения позволяет получить более высокий сенсорный отклик и снизить потребляемую мощность системы в целом по сравнению с режимом постоянного нагрева. При длительных испытаниях кратковременные отжиги не показали нарушения долговременности использования сенсоров, что свидетельствует об их оптимальности при работе с газовыми полупроводниковыми сенсорами и системами. При дальнейшем подборе режима импульсного нагрева можно получить потребляемую мощность микросистемы, не превышающую 10 мВт, сохраняя при этом ее газочувствительные характеристики.

Заключение

Установлено, что отношение значений сенсорного отклика в режимах импульсного и постоянного нагревов микросистемы увеличивается для сенсора с чувствительным слоем $\text{SnO}_2+\text{Pt}+\text{Pd}$ в 1,7 и 1,5 раза, а с чувствительным слоем $\text{In}_2\text{O}_3+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Pt}$ – в 1,5 и 3,8 раза при воздействии CO и NO_2 , соответственно. Причем за 60 с при импульсном нагреве сенсор $\text{SnO}_2+\text{Pt}+\text{Pd}$ показал сенсорный отклик приблизительно 670 % к определению CO с концентрацией 200 ppm, а сенсор $\text{In}_2\text{O}_3+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Pt}$ – приблизительно 380 % при воздействии NO_2 с концентрацией 4 ppm. Средняя потребляемая мощность микросистемы составила < 25 мВт.

Время релаксации в режиме постоянного нагрева не превышает 5 мин, в режиме импульсного нагрева – менее 45 с. При применении режима импульсного нагрева время релаксации сокращается в 5 раз по сравнению с режимом постоянного нагрева.

Полученные результаты подтвердили высокую работоспособности и возможность снижения энергопотребления полупроводниковых сенсоров и сенсорных микросистем до десятка милливатт.

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. Shimizu, Y. Basic Aspects and Challenges of Semiconductor Gas Sensors / Y. Shimizu, M. Egashira // Cambridge University Press, MRS Bulletin. – 2013. – P. 18–24.
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. LII, № 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. Бубнов, Ю.З. Анализ тепловых режимов полупроводниковых сенсоров / Ю.З. Бубнов // Изв. вузов. Приборостроение. – 2010. – Т. 53, № 4. – С. 38–41.
9. Баркалин, В.В. Конечно-элементное моделирование термомеханических свойств нанопористых материалов / В.В. Баркалин, Е.А. Белогуров, И.А. Таратын, В.В. Хатько, Я.И. Шукевич // Нано- и микросистемная техника. – 2012. – №1. – С. 18–24.
10. Реутская, О.Г. Мультисенсорная микросистема для измерения концентрации газов CO , H_2 , C_3H_8 , CO_2 / О.Г. Реутская, И.А. Таратын, Ю.М. Плескачевский // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7, № 3. – С.272–278.
11. Kotsikau, D. Metal oxide semiconductor sensors for detection of toxic and explosive gases / D. Kotsikau, M. Ivanovskaya // Kluwer Academic Publishers. – 2004. – Ch.7. – P. 93–115.

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. Shimizu Y., Egashira M. [Basic Aspects and Challenges of Semiconductor Gas Sensors] *Cambridge University Press, MRS Bulletin*, 2013, pp. 18–24. **doi:** 10.1557/S0883769400052465
5. Rummyantseva M.N., Makeeva E.A., Gaskov A.M. [Influence of microstructure of semiconductor sensor materials on the chemisorption of oxygen on their surface] *Zhurnal Rossiiskogo khimicheskogo obshchestva im. 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] *Vestnik BGU* [Messenger BSU], 2008, vol. 1, no. 2, pp. 38–42 (in Russian).
8. Bubnov Yu.Z. [Analysis of thermal regimes of semiconductor sensors] *Izv. vuzov. Priborostroenie* [Messenger HEE. Instrument making], 2010, vol. 53, no. 4, pp. 38–41 (in Russian).
9. Barkalin V.V., Belahurau E.A., Taratyn I.A., Khatko V.V., Shukevich Ya.I. [FE – modeling of thermo-mechanical properties of nanoporous materials] *Nano- and Microsystem technique*, 2012, no. 1, pp. 18–24 (in Russian).
10. Reutskaya O.G., Taratyn I.A., Pleskachevsky Y.M. [Multisensor microsystem to measure the concentration of gases CO, H₂, C₃H₈, CO₂] *Devices and Methods of Measurements*, 2016, vol. 7, no. 3, pp. 272–278 (in Russian). **doi:** 10.21122/2220-9506-2016-7-3-279-285
11. Kotsikau D., Ivanovskaya M. [Metal oxide semiconductor sensors for detection of toxic and explosive gases] *Kluwer Academic Publishers*, 2004, Ch.7, pp. 93–115.