

Кондратьева Татьяна Николаевна – Донской государственный технический университет; e-mail: ktn618@yandex.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: 88632738628; кафедра математики и информатики; к.т.н.; доцент.

Развеева Ирина Федоровна – e-mail: razveevai@mail.ru; тел.: 88632738628; кафедра математики и информатики; старший преподаватель.

Оноре Глеб Станиславович – e-mail: onoreg@mail.ru; тел.: 89613213583; студент.

Мунтян Евгения Ростиславна – Южный федеральный университет; e-mail: ermuntyan@sfnedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371608; кафедра вычислительной техники; к.т.н.; доцент.

Kondratieva Tatyana Nikolaevna – Don State Technical University; e-mail: ktn618@yandex.ru; Rostov-on-Don, Russia; phone: +78632738628; the department of mathematics and informatics; cand. of eng. sc.; associate professor.

Razveeva Irina Fedorovna – e-mail: razveevai@mail.ru; phone: +78632738628; the department of mathematics and informatics; senior lecturer.

Onore Gleb Stanislavovich – e-mail: onoreg@mail.ru; phone: +78632738628; the department of mathematics and informatics; student.

Muntyan Evgenia Rostislavna – Southern Federal University; e-mail: ermuntyan@sfnedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371608; the department of computer science; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 621.35.035

DOI 10.18522/2311-3103-2022-5-75-85

С.П. Новиков

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СЕНСОРОВ ПО ДИНАМИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ ОТКЛИКА

Обнаружение опасных газов и паров, актуально как на производстве, так и в повседневной жизни. Сенсорные элементы на основе полупроводниковых структур обладают высокой чувствительностью к газам самой различной природы. Для повышения точности измерений, калибровки и скорости определения концентрации требуются специальные методы, такие, например, как обработка сигналов различными способами. В исследовании используются газовые сенсоры на основе кремний-углеродных пленок, чувствительные к целому набору газов. В первой части статьи рассматриваются общие проблемы и метод их решения позволяющий повысить селективность полупроводниковых сенсоров газа. Проведен анализ динамических параметров, таких как первая и вторая производная кривых отклика, а также анализ уравнения Еловица. Такие калибровочные зависимости, построенные по экстремумам производных и коэффициентам наклона уравнения Еловица, показывают высокую линейность. В качестве перспективного решения предлагается использование набора калибровочных прямых, для определения концентрации искомого газа. Разработанный метод позволяет, используя динамические параметры отклика определить газ и его концентрацию, используя единственный сенсор, также повысить точность измерений, наряду, с сокращением времени детектирования. Представлены экспериментально полученные результаты обработки данных с определением искомого газа и его концентрации, используя описанный метод. Для сенсора на основе кремний-углеродных материалов разработанный метод и алгоритмы позволили провести измерения с использованием единичного сенсорного элемента для набора газов (NO_2 , CO , SO_2) с различной концентрацией. При этом наименьшая относительная погрешность, не превысила 3.6% для SO_2 , 2.7% для NO_2 , 2% для CO . Отличительными особенностями разработанного метода является использование нескольких калибровочных прямых в многомерном пространстве, а не одной, а также оригинальный алгоритмический аппарат обработки сигналов.

Газоанализатор; сенсор; отклик; обработка данных; метод измерений; калибровочные зависимости; распознавание.

S.P. Novikov

METHOD FOR MEASURING THE GAS-SENSITIVE CHARACTERISTICS OF SEMICONDUCTOR SENSORS BY DYNAMIC RESPONSE PARAMETERS

Detection of dangerous gases and vapors is relevant both at work and in everyday life. Sensor elements based on semiconductor structures are highly sensitive to gases of a very different nature. To increase the accuracy of measurements, calibration and the speed of concentration determination, special methods are required, such as signal processing in various ways. The study uses gas sensors based on silicon-carbon films that are sensitive to a whole set of gases. In the first part of the article, general problems and a method for solving them are considered, which makes it possible to increase the selectivity of semiconductor gas sensors. The analysis of dynamic parameters, such as the first and second derivatives of the response curves, as well as the analysis of the Elovich equation is carried out. Such calibration dependences, constructed from the extremes of the derivatives and the slope coefficients of the Elovich equation, show high linearity. As a promising solution, it is proposed to use a set of calibration lines to determine the concentration of the target gas. The developed method allows, using dynamic response parameters, to determine the gas type and its concentration using a single sensor, also to increase the accuracy of measurements, along with a reduction in detection time. The experimental results of data processing with the determination of the gas type and its concentration using the described method are presented. For a sensor based on silicon-carbon materials, the developed method and algorithms made it possible to carry out measurements using a single sensor element for a set of gases (NO_2 , CO , SO_2) with different concentrations. At the same time, the smallest relative error did not exceed 3.6% for SO_2 , 2.7% for NO_2 , 2% for CO . The distinctive features of the developed method are the use of several calibration lines in a multidimensional space, rather than one, as well as an original algorithmic signal processing methods.

Gas analyzer; sensor; response; data processing; measurement method; calibration dependences; recognition.

Введение. Развитие газовых сенсоров показало, что одними из перспективных для применения в газоаналитической аппаратуре являются полупроводниковые газовые сенсоры, отличающиеся высокой надежностью, простотой в эксплуатации и относительно низкой стоимостью [1]. Такие сенсоры часто используются для определения в воздухе загрязнителей, таких как диоксид азота, оксид углерода и диоксид серы [1–3].

Принцип действия полупроводниковых сенсоров резистивного типа основан на изменении проводимости газочувствительного слоя при хемосорбции на его поверхности анализируемых газов [1, 4]. Малогабаритные резистивные полупроводниковые датчики газа, которые наряду с множеством положительных свойств, обладают малой селективностью и сравнительно невысоким быстродействием.

При этом необходимо улучшать данные потребительские свойства. Еще одной задачей является снижение энергопотребления, особенно при работе в автономном режиме, при питании от батарей или аккумуляторов [5].

Для преодоления этого недостатка существуют различные методы, в том числе связанные с обработкой отклика сенсора, что позволит обеспечить большую избирательность газового датчика, а также повышение быстродействия. При этом ключевые параметры сигнала могут быть просмотрены и проанализированы для идентификации или количественной оценки обнаруженных газов с использованием этих методов. Для этого применяется частотно-временной и переходный анализ для динамической обработки сигналов [6, 7].

Применение новых методов и алгоритмов обработки откликов системы, а также определение функциональных характеристик сенсоров позволит получать более полную картину о составе газовой смеси [8, 9].

Данный подход позволит различать реакцию на исследуемый газ по характеру отклика сенсора, при этом не только определять концентрацию, но и различать семейства газов. Это позволит получать более полную картину о составе газовой смеси, в том числе на единичном сенсоре.

Одна из задач, стоящих в настоящее время при разработке и эксплуатации сенсоров, повышение чувствительности и скорости детектирования применительно к задачам газового анализа [10, 11]. При проведении измерений малых концентраций газов существует проблема погрешности измерений из-за того, что реакция резистивного сенсора по амплитуде, может быть сопоставима с возникающим шумом.

Для решения проблем детектирования при наличии шума используется предварительная фильтрация получаемых данных одним из выбранных фильтров.

Другой подход заключается в использовании информации из переходной части кривой отклика, когда датчики подвергаются ступенчатому изменению состава газа. Таким образом, используя больше параметров, чем просто максимальное изменение отклика при воздействии газа, характеризующий измерение и чувствительность сенсора, могут быть улучшены параметры чувствительности [11].

Так же используются оценки отклика датчика на основе производной по времени первого порядка для описания его стабильности во времени по сравнению со стандартным откликом сенсора [12].

Анализ данных отклика сенсора позволяет решить проблему дрейфа сигнала, который возникает из-за длительной работы или внешнего воздействия [13] и может быть использован для уменьшения погрешности измерения и повышения стабильности и селективности сенсора [14–16].

Ранее в работе [17] было показано, что в качестве калибровочных зависимостей можно использовать не только полное значение сопротивления, но также и другие параметры, такие как первая ($S'(t)$) и вторая производная ($S''(t)$) сигнала, коэффициент наклона аппроксимирующей прямой из уравнения Еловича, начальная скорость изменения сигнала (S_0'). Такие данные могут быть получены по динамическим параметрам отклика.

Целью исследования является разработка метода измерения газочувствительных характеристик полупроводниковых сенсоров, который позволит определить газ и его концентрацию единичным сенсорным элементом за меньшее время и с большей точностью, чем стандартным методом. При этом необходимо решить следующие задачи: получение и обработка динамических параметров отклика сенсорного элемента, построения набора калибровочных зависимостей в многомерном пространстве, разработку и реализацию алгоритмов определения целевых газов и их концентрации.

Описание метода. Предлагается метод, который без использования сложных алгоритмов и построения нейронных сетей, позволяет с высокой точностью определять газ из известного перечня и его концентрацию, используя одиночный неселективный полупроводниковый сенсор.

Схема метода приведена на рис. 1.

Данные с сенсора представляют из себя массив значений сопротивления от времени, снимаемых с частотой, одна секунда.

На рис. 2 представлен алгоритм, позволяющий решить проблемы дрейфа, построить калибровочные зависимости по сигналу с сенсора, а также повышать скорость детектирования: проводится серия измерений, выбор данных по размеру скользящего окна и фильтрация данных, затем в каждой серии измерений определяется первая и вторая производная изменения сопротивления сенсора от времени при воздействии на него газом при разных эталонных концентрациях. Строится калибровочная зависимость на основе экстремумов первой производной от концентрации. В этом случае можно посчитать погрешность измерения, как разность

полученного значения с установочным. Также строим калибровочную зависимость на основе экстремумов второй производной, при достижении экстремумов принимается решение о прекращении измерений и вывод результатов.

В работе [17] показано использование коэффициентов наклона из уравнения Еловича, они применяются для извлечения признаков, а также для построения калибровочных зависимостей.

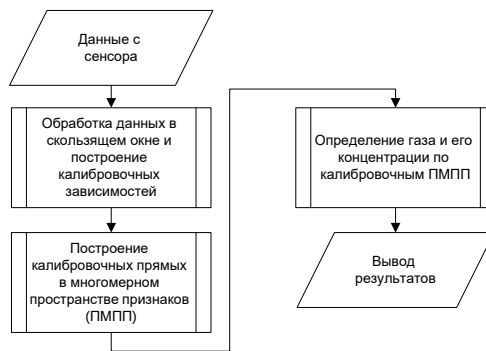


Рис. 1. Схема метода измерения газочувствительных характеристик

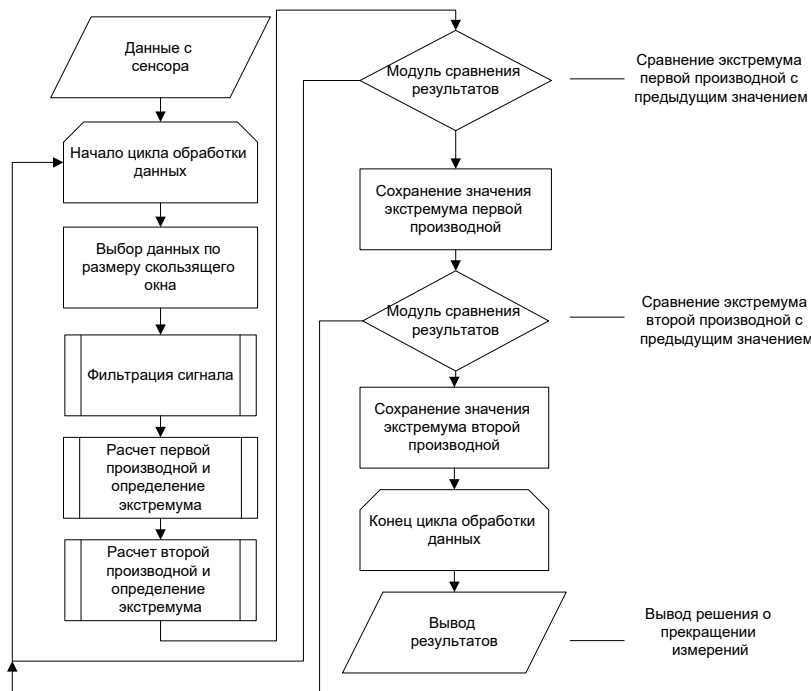


Рис. 2. Схема алгоритма обработки сигнала в скользящем окне

Для определения концентрации с высокой точностью необходимо выбрать калибровочные зависимости, обладающие свойствами линейности. С целью более точного определения концентрации и уменьшения ошибки строятся прямые в многомерном пространстве признаков (ПМПП), где каждая прямая характеризует газ, для этого используется следующий алгоритм (рис. 3).

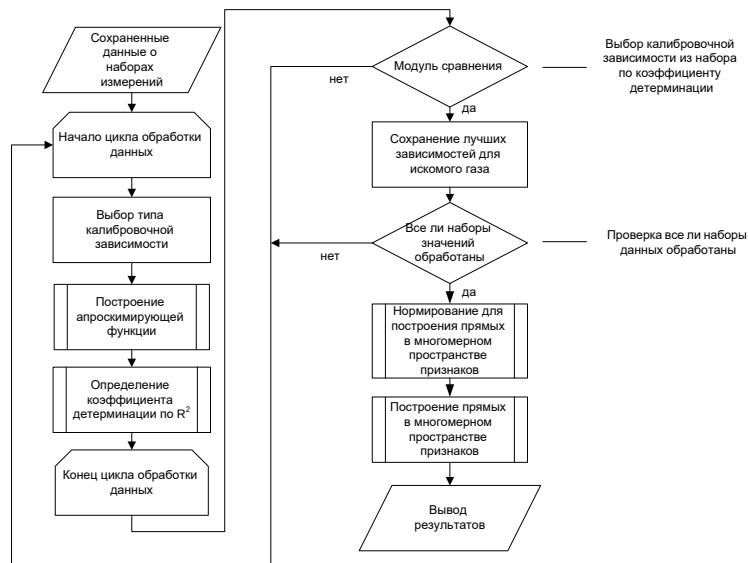


Рис. 3. Схема построения калибровочных прямых в многомерном пространстве признаков

Система построенных прямых в многомерном пространстве признаков (ПМПП) в дальнейшем будет использоваться для идентификации газа и определения его концентрации (рис. 4).

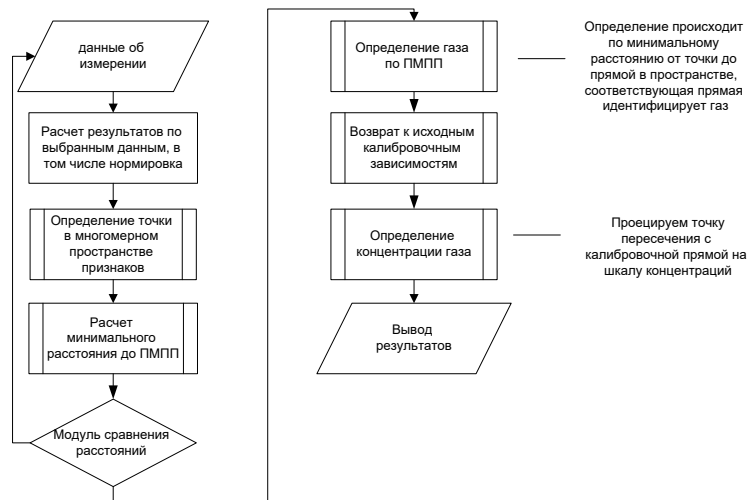


Рис. 4. Схема идентификации газа и определение его концентрации газа по ПМПП

По схеме, приведенной на рис. 4 система построенных прямых в многомерном пространстве признаков (ПМПП) будет использоваться для идентификации искомого газа. Для этого будет использоваться следующий алгоритм:

- ♦ данные об измерении, поступающие с сенсора, проходят предварительную обработку, в том числе нормируются по тем же коэффициентам, что и при построении ПМПП в алгоритме на рис. 3;

- ♦ определение точки в многомерном пространстве, соответствующей измерению;
- ♦ расчет минимального расстояния до всех ПМПП;
- ♦ сравнение минимальных расстояний до ПМПП;
- ♦ определение типа газа по минимальному расстоянию до ПМПП;
- ♦ возврат к исходным калибровочным зависимостям, в соответствии с типом газа;
- ♦ определение концентрации газа по набору калибровочных зависимостей;
- ♦ вывод результатов.

Определения концентрации для искомого газа происходит при переходе из многомерного пространства признаков в пространство калибровочных зависимостей и концентрации, при этом по коэффициенту детерминации R^2 выбираются обладающие лучшей линейностью. От точки в пространстве, соответствующей измерению, находится кратчайшее расстояние до калибровочной прямой и строится проекция на ось концентраций.

Экспериментальная часть. Апробирование метода и алгоритмов представляло собой серию измерений с сенсорными элементами, полученные методом электрохимического осаждения на основе кремний-углеродных пленок, легированных медью [18, 19].

Для обеспечения обработки сигналов, использовано разработанное программное обеспечение (ПО), позволяющее не только получать и сохранять сигнал с сенсоров, но также проводить обработку данных с использованием разработанного метода.

Условия проведения эксперимента описаны в работе [20]. Для получения набора откликов проведена серия экспериментов с концентрациями газов в диапазоне 5-50 ppm, таких как NO_2 , SO_2 , CO . В качестве рабочей температуры выбрана температура 100°C . При таких параметрах наблюдается хорошая реакция сенсора при небольшом уровне шума.

Сигнал с сенсора поступает на вход алгоритма обработки данных в скользящем окне (рис. 2), где проходит предварительную фильтрацию с помощью экспоненциального сглаживания и другие этапы, необходимые для получения соответствующего измерению отклика.

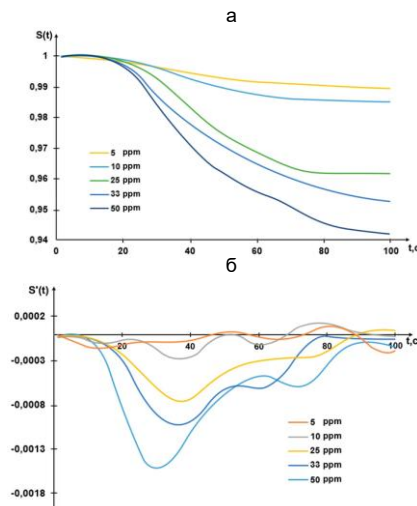


Рис. 6. Типичный отклик для исследуемого сенсорного элемента при концентрациях 5–50 (а) ppm газа CO , первая (б) производная $S(t)$

В результате применения разработанных алгоритмов построены наборы калибровочных зависимостей для исследуемых газов. В качестве примера рассмотрены отклик, его динамические параметры и калибровочные зависимости для оксида углерода (рис. 6–8). Аналогично получены для диоксида серы и диоксида азота.

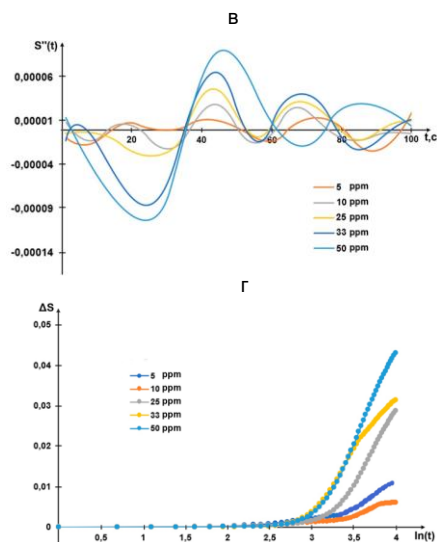


Рис. 7. Типичный отклик для исследуемого сенсорного элемента при концентрациях 5–50 (а) ppm газа CO, вторая (б) производная $S(t)$, график в координатах уравнения Еловича ΔS от $\ln(t)$ (в)

Соответствующие калибровочные прямые представлены на рис. 8.

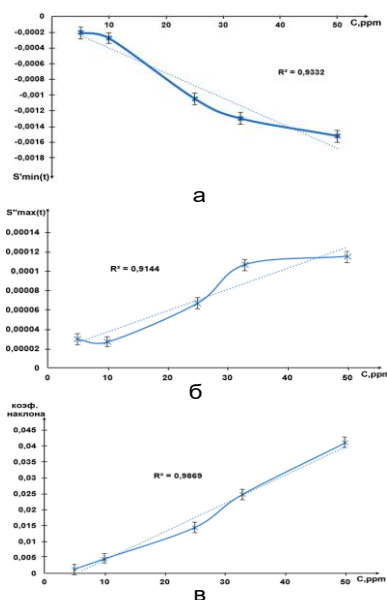


Рис. 8. Калибровочные зависимости по экстремумам первой (а) и второй (б) производной $S(t)$, а также коэффициентам наклона аппроксимирующих прямых уравнения Еловича при концентрациях 5–50ppm газа CO (в)

Построение прямых в многомерном пространстве признаков для CO , NO_2 , SO_2 представлено на рис. 9.

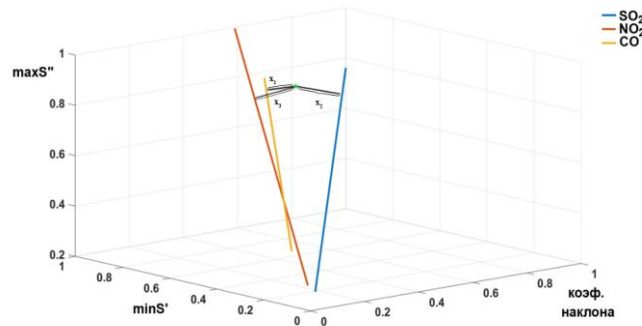


Рис. 9. Построение прямых в многомерном пространстве признаков

Для полученного набора данных применен метод определения концентрации по калибровочным прямым в многомерном пространстве. Графическая интерпретация работы алгоритма приведенного на рис. 4 отображена на рис. 10.

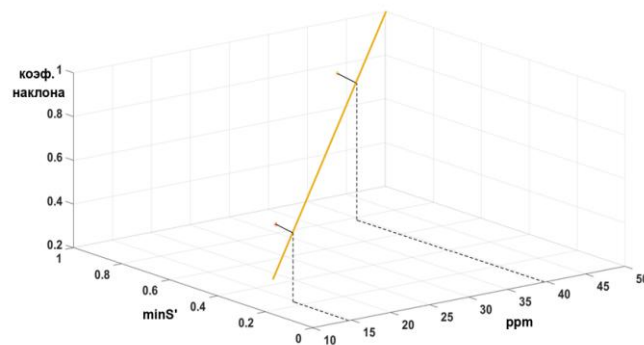


Рис. 10. Определение концентрации по калибровочным прямым в пространстве

Для проверки работоспособности алгоритма по идентификации и определения концентрации газа был проведен эксперимент. Датчик подвергался воздействию оксида углерода, диоксида серы и диоксида азота с концентрацией 15 и 40 ppm. Результаты эксперимента с использованием разработанного метода измерения и стандартной методики, а также полученные погрешности приведены в табл. 1. В случае приведенного примера для оксида углерода и диоксида азота выбраны калибровочные зависимости, построенные по экстремумам первой производной и коэффициентам наклона аппроксимирующей прямой из уравнения Еловича. В случае с диоксидом серы лучшие результаты у зависимостей построенным по экстремумам второй производной и коэффициентам наклона аппроксимирующей прямой из уравнения Еловича.

Таблица 1

**Результаты измерения характеристик сенсора с использованием
разработанного метода и стандартного метода определения
концентрации газа**

Эталонная концентра- ция, ppm	Газ	Разработанный метод		Стандартный метод	
		Измеренная концентра- ция, ppm	Относительная погрешность, %	Измеренная концентра- ция, ppm	Относительная погрешность, %
15	CO	14.7	2.0	13.2	12
40	CO	39.6	1.0	43	7.5
15	SO ₂	14.5	3.6	12.9	14
40	SO ₂	39.2	2.0	38	5
15	NO ₂	14.6	2.7	12.7	15.3
40	NO ₂	40.3	0.75	37.2	7

Относительная погрешность при оценке концентрации газа по калибровочной ПМПП, не превысила 3.6 процента.

Заключение. Применение нескольких калибровочных зависимостей концентрации газа от динамических параметров отклика сенсора позволит существенно уменьшить влияние случайной составляющей погрешности, так как используемые параметры характеризуют различные временные интервалы процесса адсорбции на поверхность чувствительного элемента.

Разработанный метод измерения газочувствительных характеристик полупроводниковых сенсоров позволяет не дожидаться полного времени насыщения при подаче газа для оценки концентрации, сократить время детектирования в 4–7 раз, погрешность уменьшается на 6–12 процентов в зависимости от целевого газа, также решить проблему дрейфа характеристик. При применении разработанного метода на единичном сенсоре определяется целевой газ, а также его концентрация.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Khan Md A.H., Thomson B., Debnath R., Motayed A., Rao M.V. Nanowire-based sensor array for detection of cross-sensitive gases using PCA and machine learning algorithms // IEEE Sensors Journal. – 2020. – Vol. 20 (11). – P. 6020-6028.
2. Баркалин В.В., Белогуров Е.А., Таратын И.А., Хатько В.В., Шукевич Я.И. Конечное-элементное моделирование термомеханических свойств нанопористых материалов // Нано- и микросистемная техника. – 2012. – № 1. – С. 18-24.
3. Cat V.V., Dinh N.X., Phan V.N., Tuan L.A., Nam M.H., Lam V.D., Dang T.V., Quy N.V. Realization of graphene oxide nanosheets as a potential mass-type gas sensor for detecting NO₂, SO₂, CO, and NH₃ // Mater. Today Commun. – 2020. – Vol. 25. – 101682.
4. Morrison S.R. Selectivity in semiconductor gas sensors // Sensor & Actuator. – 1997. – No. 12. – P. 425-440.
5. Myasoedova T.N., Mikhailova T.S., Plugotarenko N.K. A Study on A NO₂ Sensor Based on SiO₂-ZrO₂ Composite Film // Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE – 2018): 14-th International scientific-technical conference: in 8 vol. Novosibirsk, 02–06 октября 2018 г. Vol. 1, Part 1. – Novosibirsk: Новосибирский государственный технический университет, 2018. – P. 105-108.
6. Wei G., An W., Gao F., Tang Z., Yu J. The Hilbert-Huang transform and its application in processing dynamic signals of gas sensors // 2009 International Conference on Information Engineering and Computer Science, IEEE, Wuhan, China, 19-20 Dec. 2009.
7. An W., Yang C.-Y., Wei G. Dynamic signal processing for gas sensors based on Hilbert-Huang Transform // 2010 3rd International Conference on Computer Science and Information Technology, IEEE, Chengdu, China, 9-11 July 2010.

8. Mittova I.Y., Kostryukov V.F., Ilyasova N.A. [et al.]. Modification of nanoscale thermal oxide films formed on indium phosphide under the influence of tin dioxide // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. – 2020. – Vol. 11, No. 1. – P. 110-116.
9. Xie T., Xie G., Du H., Su Y., Ye Z., Chen Y., Jiang Y. Two novel methods for evaluating the performance of OTFT gas sensors // *Sensors and Actuators: B. Chem.* – 2016. – Vol. 230. – P. 176-183.
10. Обвинцева Л.А., Губанова Д.П. Быстрая идентификация хлора и диоксида хлора в воздухе полупроводниковыми сенсорами // *Журнал аналитической химии*. – 2004. – Т. 59, № 8. – С. 876-878.
11. Marius Rodner, Jens Eriksson First-order time-derivative readout of epitaxial graphene-based gas sensors for fast analyte determination // *Sensors and Actuators Reports*. – 2020. – No. 2. – 100012.
12. Magna G., Di Natale C., Martinelli E. Self-Repairing classification algorithms for chemical sensor array // *Sensors & Actuators B: Chemical*. – 2019. – Vol. 297. – 126721.
13. Sorocki J., Rydosz A. A prototype of a portable gas analyzer for exhaled acetone detection // *Appl. Sci.* – 2019. – No. 9 (13). – 2605.
14. Isaenko O., Maksymovych N., Yatsimirsky V. Determination of the sensitive layer temperature of the adsorption semiconductor gas sensor // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2005. – Vol. 108, No 1–2. – P. 134-142.
15. Satterthwaite P.F., Eberle S., Nedelcu S., Roman C., Hierold C. Transient and steady-state readout of nanowire gas sensors in the presence of low-frequency noise // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2019. – Vol. 297. – 126674.
16. Gomri S., Seguin J.-L., Guerin J., Aguir K. A mobility and free carriers density fluctuations based model of adsorption-desorption noise in gas sensor // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2008. – Vol. 41, No 6. – 065501.
17. Plugotarenko N.K., Myasoedova T.N., Novikov S.P. and Mikhailova T.S. Comparative Analysis of Derivative Parameters of Chemoresistive Sensor Signals for Gas Concentration Estimation // *Chemosensors*. – 2022. – No. 10 (4). – 126.
18. Obvintseva L.A., Sharova T.B., Avetisov A.K., Sukhareva I.P. Semiconductor sensors for studying the heterogeneous destruction of ozone at low concentrations // *Russ. J. of Phys. Chem. A*. – 2018. – Vol. 92, No. 6. – P. 1099-1106.
19. Myasoedova T.N., Plugotarenko N.K., Moiseeva T.A. Copper-containing films obtained by the simple citrate sol-gel route for NO₂ detection: Adsorption and kinetic study // *Chemosensors*. – 2020. – No. 8. – P. 79.
20. Новиков С., Плуготаренко Н. Метод обработки данных откликов резистивных сенсоров газа для сокращения времени определения концентрации // *Электроника: Наука, технология, бизнес*. – 2022. – № 6 (217). – С. 102-106.

REFERENCES

1. Khan Md A.H., Thomson B., Debnath R., Motayed A., Rao M.V. Nanowire-based sensor array for detection of cross-sensitive gases using PCA and machine learning algorithms, *IEEE Sensors Journal*, 2020, Vol. 20 (11), pp. 6020-6028.
2. Barkalin V.V., Belogurov E.A., Taratyn I.A., Khat'ko V.V., Shukevich Ya.I. Konechno-elementnoe modelirovanie termomekhanicheskikh svoystv nanoporistyykh materialov [Finite element modeling of thermomechanical properties of nanoporous materials], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and microsystem engineering], 2012, No. 1, pp. 18-24.
3. Cat V.V., Dinh N.X., Phan V.N., Tuan L.A., Nam M.H., Lam V.D., Dang T.V., Quy N.V. Realization of graphene oxide nanosheets as a potential mass-type gas sensor for detecting NO₂, SO₂, CO, and NH₃, *Mater. Today Commun.*, 2020, Vol. 25, 101682.
4. Morrison S.R. Selectivity in semiconductor gas sensors, *Sensor & Actuator*, 1997, No. 12, pp. 425-440.
5. Myasoedova T.N., Mikhailova T.S., Plugotarenko N.K. A Study on A NO₂ Sensor Based on SiO₂-ZrO₂ Composite Film, *Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE – 2018): 14-th International scientific-technical conference: in 8 vol. Novosibirsk, 02–06 октября 2018 г.* Vol. 1, Part 1. Novosibirsk: Новосибирский государственный технический университет, 2018, pp. 105-108.

6. Wei G., An W., Gao F., Tang Z., Yu J. The Hilbert-Huang transform and its application in processing dynamic signals of gas sensors, *2009 International Conference on Information Engineering and Computer Science, IEEE, Wuhan, China, 19-20 Dec. 2009*.
7. An W., Yang C.-Y., Wei G. Dynamic signal processing for gas sensors based on Hilbert-Huang Transform, *2010 3rd International Conference on Computer Science and Information Technology, IEEE, Chengdu, China, 9-11 July 2010*.
8. Mittova I.Y., Kostyukov V.F., Ilyasova N.A. [et al.]. Modification of nanoscale thermal oxide films formed on indium phosphide under the influence of tin dioxide, *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*, 2020, Vol. 11, No. 1, pp. 110-116.
9. Xie T., Xie G., Du H., Su Y., Ye Z., Chen Y., Jiang Y. Two novel methods for evaluating the performance of OTFT gas sensors, *Sensors and Actuators: B. Chem.*, 2016, Vol. 230, pp. 176-183.
10. Obvintseva L.A., Gubanova D.P. Bystraya identifikatsiya khloro i dioksida khloro v vozdukh poluprovodnikovymi sensorami [Rapid identification of chlorine and chlorine dioxide in the air by semiconductor sensors], *Zhurnal analiticheskoy khimii* [Journal of Analytical Chemistry], 2004, Vol. 59, No. 8, pp. 876-878.
11. Marius Rodner. Jens Eriksson First-order time-derivative readout of epitaxial graphene-based gas sensors for fast analyte determination, *Sensors and Actuators Reports*, 2020, No. 2, 100012.
12. Magna G., Di Natale C., Martinelli E. Self-Repairing classification algorithms for chemical sensor array, *Sensors & Actuators B: Chemical*, 2019, Vol. 297, 126721.
13. Sorocki J., Rydosz A. A prototype of a portable gas analyzer for exhaled acetone detection, *Appl. Sci.*, 2019, No. 9 (13), 2605.
14. Isaienko O., Maksymovych N., Yatsimirsky V. Determination of the sensitive layer temperature of the adsorption semiconductor gas sensor, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2005, Vol. 108, No 1–2, pp. 134-142.
15. Satterthwaite P.F., Eberle S., Nedelcu S., Roman C., Hierold C. Transient and steady-state readout of nanowire gas sensors in the presence of low-frequency noise, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, Vol. 297, 126674.
16. Gomri S., Seguin J.-L., Guerin J., Aguir K. A mobility and free carriers density fluctuations based model of adsorption-desorption noise in gas sensor, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2008, Vol. 41, No 6, 065501.
17. Plugotarenko N.K., Myasoedova T.N., Novikov S.P. and Mikhailova T.S. Comparative Analysis of Derivative Parameters of Chemoresistive Sensor Signals for Gas Concentration Estimation, *Chemosensors*, 2022, No. 10 (4), 126.
18. Obvintseva L.A., Sharova T.B., Avetisov A.K., Sukhareva I.P. Semiconductor sensors for studying the heterogeneous destruction of ozone at low concentrations, *Russ. J. of Phys. Chem. A*, 2018, Vol. 92, No. 6, pp. 1099-1106.
19. Myasoedova T.N., Plugotarenko N.K., Moiseeva T.A. Copper-containing films obtained by the simple citrate sol–gel route for NO₂ detection: Adsorption and kinetic study // *Chemosensors*. – 2020. – No. 8. – P. 79.
20. Novikov S., Plugotarenko N. Metod obrabotki dannykh otklikov rezistivnykh sensorov gaza dlya sokrashcheniya vremeni opredeleniya kontsentratsii [A method of processing data of responses of resistive gas sensors to reduce the time of concentration determination], *Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: Science, Technology, Business], 2022, No. 6 (217), pp. 102-106.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н. А.И. Сухинов.

Новиков Сергей Петрович – Южный федеральный университет; e-mail: n_serg7@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79185194965; аспирант.

Novikov Sergey Petrovich – Southern Federal University; e-mail: n_serg7@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79185194965; graduate student.