

Алгоритм обработки данных резистивного полупроводникового газового сенсора при его работе в режиме термомодуляции

© С.А. Казаков, М.А. Гревцев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия
E-mail: kazakov59@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 5 мая 2026 г.
В окончательной редакции 24 июня 2026 г.
Принята к публикации 25 июня 2026 г.

Показано, что температурный отклик полупроводникового сенсора резистивного принципа действия в газовой смеси можно аппроксимировать суммой концентрационных откликов на отдельные компоненты исследуемой смеси с учетом их перекрестной чувствительности. Это позволяет построить модель температурной зависимости электропроводности сенсора в сложной многокомпонентной газовой смеси на основе отдельных „чистых“ сигналов, получаемых в ходе предварительной калибровки сенсора по каждому индивидуальному компоненту газовой смеси с учетом перекрестной чувствительности к другим измеряемым компонентам газовой смеси.

Ключевые слова: электропроводность, адсорбция, газовый сенсор, полупроводник, селективность, регрессионная функция аппроксимации.

DOI: 10.61011/FTP.2026.05.63873.9556

Настоящая работа посвящена развитию предложенной в работе [1] модели обработки данных для селективного определения концентраций летучих органических соединений (ЛОС), содержащихся в атмосферном воздухе. Основная цель состояла в том, чтобы на примере метрологически достоверных газовых смесей показать, что температурный отклик полупроводникового резистивного сенсора (изготовленного из диоксида олова или материалов на его основе) на концентрационное воздействие исследуемой газовой смеси можно аппроксимировать суммой концентрационных откликов на ее отдельные компоненты. Отклик полупроводникового газового сенсора, работающего в режиме термоцикла, на концентрационное воздействие газовой смеси $U_{\text{mix}}(T)$ представим в виде суммы отдельных вкладов $U_j(T)$ в общий детектируемый сигнал от каждого компонент j газовой смеси (такое предположение об аддитивном вкладе в суммарный сигнал проводимости сенсора каждого измеряемого компонента газовой смеси подтверждается данными работы [2]):

$$U_{\text{mix}}(T) \approx \sum_{j=1}^N U_j(T), \quad (1)$$

где $U_j(T)$ — температурная зависимость сигнала сенсора при наличии в анализируемой среде j -го газа, N — количество определяемых компонентов в газовой смеси.

При линейном режиме температурной модуляции часть отклика сенсора при наличии в среде j -го газа соответствует его отклику при некоторой концентрации компонента в „чистом“ газе. Такое предположение об аддитивном отклике компонентов газовой смеси в терминах проводимости сенсора оправдано экспериментально: в целевых диапазонах концентраций резистивные

металл–оксид–полупроводник (МОП)-сенсоры обычно демонстрируют линейную зависимость отклика от концентрации индивидуального газа [3]. Это позволяет построить модель отклика сенсора при подаче смеси, имея данные калибровок отдельных компонентов.

За основу разрабатываемого алгоритма селекции взята математическая модель, описывающая динамический отклик сенсора при взаимодействии с многокомпонентной газовой смесью, а именно суммарный сигнал X_n рассматривается как сумма откликов от отдельных компонентов газовой смеси при заданной температуре [2]:

$$X_n = a_{n1}s_1 + a_{n2}s_2 + \dots + a_{nM}s_{mM}, \quad (2)$$

где X_n — наблюдаемые (смесевые) сигналы, $s_1, s_2, \dots, s_M$ — независимые источники (величины сигналов компонентов газовой смеси), a_{nM} — коэффициенты перекрестной чувствительности, отражающие вклад каждого газа в общий отклик.

Для получения метрологически достоверных концентраций водорода использовалась газосмесительная установка „Микрогаз-ФМ12“, концентрации задавались методом экспоненциального разбавления поверочной газовой смеси (ПГС) [4].

С использованием метода независимых компонент была составлена система линейных алгебраических уравнений (3), решениями которой являются значения сигналов от каждого отдельного компонента j , влияющих на общую температурную зависимость отклика сенсора

на основе диоксида олова (SnO_2):

$$\begin{cases} U_{\text{mix}}(T_1) = \sum_{j=1}^N U_j(T_1), \\ \dots \\ U_{\text{mix}}(T_N) = \sum_{j=1}^N U_j(T_N). \end{cases} \quad (3)$$

Для каждого компонента j измеряется температурная зависимость величины полезного сигнала сенсора $U_j(T)$ при нескольких известных концентрациях C_i (необходимо и достаточно до 5 различных концентраций из заданного диапазона измерений). Эти экспериментальные кривые, как правило, имеют колоколообразный характер (с максимумом по проводимости при некоторой оптимальной температуре детектирования). Для дальнейшего расчета полученные в „бинарных“ „чистых“ калибровках данные аппроксимируются их аналитической функцией, представимой в виде

$$U_j(T) = \frac{P_{m_i}}{\left[1 + \left(\frac{K_{a_i}}{T}\right)^{H_{a_i}}\right] \left[1 + \left(\frac{T}{K_{i_i}}\right)^{H_{i_i}}\right]}, \quad (4)$$

где P_{m_i} , K_{a_i} , H_{a_i} , K_{i_i} , H_{i_i} — коэффициенты аппроксимационной функции для концентраций C_i ($i = 5$) рассматриваемого j -го компонента смеси.

Калибровка сенсора в заданном концентрационном диапазоне производилась как по температурным точкам экстремума по электропроводности сенсора, так и по площадям под кривыми изменения электропроводности для заданного температурного интервала модуляции. После этого по известным калибровочным концентрациям отдельного компонента составлялась система уравнений, решение которой представляло собой набор из пяти параметров функции (4), являющейся аппроксимацией температурной зависимости проводимости для определяемой концентрации компонента газовой смеси. Температура, для которой определяется перекрестная чувствительность к другому присутствующему компоненту газовой смеси, соответствует его температурному максимуму чувствительности. Например, для метана в качестве сопутствующего компонента это температура $\sim 500^\circ\text{C}$.

Каждое уравнение системы (5) представляет собой набор условий, связывающих параметры функции аппроксимации с измеренными значениями проводимости, при известной концентрации компонента газовой смеси:

$$\frac{U_j(T)}{\int_{T_1}^{T_2} \frac{P_{m_A}}{\left[1 + \left(\frac{K_{a_A}}{T}\right)^{H_{a_A}}\right] \left[1 + \left(\frac{T}{K_{i_A}}\right)^{H_{i_A}}\right]} dT} - \frac{k(C_i)^n}{aC_A^2 + bC_A + c} = 0, \quad (5)$$

где C_A — известная концентрация, для которой строится сигнал; k и n — коэффициенты, полученные по

температурным максимумам; a , b и c — коэффициенты, полученные по площадям под калибровочными кривыми. В качестве проверки работоспособности алгоритма селекции был произведен численный расчет смесового сигнала $U_{\text{mix}}(T)$ в модельном эксперименте по формулам и таблицам расчета погрешностей измерений из работ [1,5].

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] S.A. Kazakov, A.A. Dugin, T.S. Gagiev, M.A. Grevtsev, A.V. Sokolov, O.A. Arefieva, A.Yu. Shishkin, V.N. Khvorov. *Semiconductors*, **59** (5), 237 (2025). <https://doi.org/10.61011/SC.2025.05.61986.7885>
- [2] A. Hyvärinen, E. Oja. *Neural Netw.*, **13**, 411 (2000). doi: 10.1016/s0893-6080(00)00026-5.
- [3] И.А. Мясников, В.Я. Сухарев, Л.Ю. Куприянов, С.А. Завьялов. *Полупроводниковые сенсоры в физико-химических исследованиях* (М., Наука, 1991) с. 113.
- [4] S.A. Kazakov, M.A. Grevtsev, G.D. Havrov. *IOP Conf. Ser.: J. Phys.: Conf. Ser.*, **1135**, 012107 (2018). DOI: 10.1088/1742-6596/1135/1/012107
- [5] V.V. Chistyakov, S.A. Kazakov, M.A. Grevtsev, S.M. Soloviev. *Techn. Phys. Lett.*, **47** (3), 266 (2021). <http://dx.doi.org/10.1134/S1063785021030184>

Редактор Г.А. Оганесян

Data processing algorithm for a resistive semiconductor gas sensor operating in thermomodulation mode

S.A. Kazakov, M.A. Grevtsev

Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract It is shown that the temperature response of the semiconductor sensor of the resistive principle of action in the gas mixture can be approximated by the sum of concentration responses to individual components of the analyzed gas mixture taking into account their cross sensitivity. This allows us to build a model of the temperature dependence of the conductivity of the sensor in a complex multicomponent gas mixture based on individual „clean“ signals obtained from the results of preliminary calibration of the sensor for each individual component of the gas mixture, taking into account cross sensitivity to other measured components of the gas mixture.