

УДК 621.382

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.3-2/38>**Осадчук О.В.**

Вінницький національний технічний університет

**Осадчук В.С.**

Вінницький національний технічний університет

**Осадчук Я.О.**

Вінницький національний технічний університет

## ВПЛИВ ГАЗОРЕАКТИВНОГО ЕФЕКТУ ПЕРВИННИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СЕНСОРІВ ГАЗУ НА ВИХІДНУ ЧАСТОТУ АВТОГЕНЕРАТОРНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

У роботі розглянуто механізм утворення повного опору напівпровідникових сенсорів газу, у якому активна складова визначається приповерхневим опором, а реактивна складова – приповерхневою ємністю. Залежність величини повного опору від зміни концентрації діючих газів характеризує суть газореактивного ефекту сенсорів, що однозначно змінює вихідну частоту автогенераторних перетворювачів газу. Визначено функцію перетворення і рівняння чутливості автогенераторного перетворювача газу, причому чутливість пристрою в діапазоні від 300 ррт до 1000 ррт складає 260 Гц/ррт, а в діапазоні від 1000 ррт до 5000 ррт – 115 Гц/ррт.

**Ключові слова:** автогенераторний перетворювач газу, газореактивний ефект, реактивні властивості напівпровідників, повний опір.

**Постановка проблеми.** Під газореактивним ефектом розуміють залежність повного опору напівпровідникових первинних аналогових газочутливих сенсорів від зміни вимірюваних газів. Зміна активної складової повного опору приводить до зміни від'ємного диференційного опору, а зміна реактивної складової змінює ємність коливального контуру автогенераторних перетворювачів газу, що в підсумку приводить до однозначної залежності вихідної частоти автогенераторних приладів від зміни концентрації вимірюваних газів. Напівпровідникові аналогові сенсори газу мають ряд недоліків, таких як низький вихідний сигнал, низька точність і чутливість, необхідність підсилювальних пристроїв і аналого-цифрових перетворювачів при подальшій обробці сигналів, паразитний вплив одного каналу вимірювання на інший канал, які можна усунути при використанні методу перетворення фізичної величини у частоту [1–3]. При використанні частотного методу перетворення необхідно знати залежність повного опору первинних аналогових напівпровідникових сенсорів газу від дії вимірюваних газів і вплив цього ефекту на вихідну частоту автогенераторних перетворювачів газу. Дослідженню цих процесів присвячено дану роботу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У монографії [5] подано феноменологічні основи

теорії електронних процесів на поверхні напівпровідників, на основі якої визначено приповерхневі ємність і активний опір напівпровідників, що складають основу аналогових сенсорів газу. Для усунення недоліків аналогових сенсорів газу було запропоновано сенсори газу з частотним вихідним сигналом, який однозначно залежить від зміни концентрації вимірюваних газів. В опублікованих роботах [6, 7] вважається, що основний внесок в залежність вихідної частоти сенсора газу від зміни концентрації вимірюваних газів вносить активний приповерхневий опір первинного сенсора газу, проте як показують експериментальні дослідження, реактивна складова, тобто приповерхнева ємність, також впливають на вихідну частоту автогенераторних сенсорів, особливо при роботі на високих частотах. Таким чином, залежність повного приповерхневого опору від зміни концентрації вимірюваного газу, що визначає суть газореактивного ефекту, необхідно враховувати при визначенні функції перетворення і рівняння чутливості автогенераторних сенсорів газу.

**Постановка завдання.** Метою роботи є дослідження математичної моделі газореактивного ефекту і його вплив на вихідну частоту автогенераторних перетворювачів газу. Для досягнення поставленої мети у роботі потрібно вирішити такі задачі: 1) провести аналіз фізичних про-

цесів на поверхні напівпровідникових сенсорів газу; 2) розробити елементи теорії газореактивного ефекту напівпровідникових сенсорів газу на основі паралельного з'єднання ємності приповерхневого шару просторового заряду і приповерхневого опору; 3) визначити функцію перетворення і рівняння чутливості автогенераторного перетворювача газу; 4) зробити висновки по проведеному дослідженню.

**Виклад основного матеріалу.** Фізичні процеси, що відбуваються на поверхні напівпровідникових газочутливих сенсорів при їх взаємодії з вимірюваними газами, описуються рівнянням Пуассона. Це рівняння описує розподіл електростатичного потенціалу в шарі просторового заряду в приповерхневому шарі напівпровідника. Зразок напівпровідника газочутливого елемента у нормальних умовах повинен бути електрично нейтральним. Звідки витікає, що поверхневий заряд  $Q_{\text{пов}}$  повинен бути скомпенсованим рівним і протилежним по знаку зарядом в приповерхневому шарі напівпровідника. Цей заряд екранує об'єм напівпровідника від проникнення в нього електричного поля і складається з розташованих в об'ємі напівпровідника іонізованих донорів і акцепторів та рухливих електронів і дірок. Таким чином, приповерхневий шар напівпровідника є шаром просторового заряду, який екранує об'єм напівпровідника від електричного поля поверхневого заряду, причому це екранування здійснюється за рахунок того, що рівноважна концентрація електронів і дірок в шарі відрізняється від об'ємних. Більш повний і точний розв'язок рівняння Пуассона зроблено у роботі Гарретта і Браттейна, переклад якої зроблено в монографії [4]. В роботі розглядається загальний випадок напівпровідника, який знаходиться під дією збуджуючих факторів, таких як освітлення, радіація. Надалі будемо спиратися на найбільш поширений варіант розрахунків, що викладено в монографії А.В. Ржанова [5].

Визначимо повний приповерхневий опір  $Z_S$  напівпровідникового газочутливого сенсора у загальному вигляді, якщо вважати, що він уявляє собою паралельне з'єднання приповерхневої ємності  $C_S$  і активного приповерхневого опору  $R_S$

$$Z_S = \frac{R_S}{1 + (\omega C_S R_S)^2} + \frac{R_S^2 \omega C_S}{1 + (\omega C_S R_S)^2}, \quad (1)$$

де  $\omega$  - кругова частота. Приповерхневий питомий (ом/см<sup>2</sup>) активний опір у загальному випадку має вигляд [5, стор.55]

$$R_S = [q\mu_{ns}n_s(y_s, \gamma, \alpha) + q\mu_{ps}p_s(y_s, \gamma, \alpha)]^{-1}, \quad (2)$$

де  $q$  – заряд електрона,  $\mu_{ns}, \mu_{ps}$  – рухливості електронів і дірок,  $n_s, p_s$  – надлишок електронів і дірок в приповерхневому шарі напівпровідника,  $y_s$  – поверхневий безрозмірний електростатичний потенціал,  $\gamma$  – безрозмірний коефіцієнт, що характеризує об'ємні властивості напівпровідника сенсора газу,  $\alpha$  – безрозмірний коефіцієнт, що характеризує ступінь порушення термодинамічної рівноваги у напівпровіднику. Концентрація надлишкових електронів і дірок описується виразом [5, стор. 53]

$$n_s(y_s, \gamma, \alpha) = \frac{1}{2} n_0 (\gamma^{-1} + \alpha) L_D \int_{y_s}^0 \frac{(e^y - 1)}{f(y, \gamma, \alpha)} dy, \quad (3)$$

$$p_s(y_s, \gamma, \alpha) = \frac{1}{2} p_0 (\gamma + \alpha) L_D \int_{y_s}^0 \frac{(e^{-y} - 1)}{f(y, \gamma, \alpha)} dy, \quad (4)$$

де  $n_0, p_0$  – рівноважна концентрація електронів і дірок в об'ємі напівпровідника,  $y$  – безрозмірний електростатичний потенціал, функція  $f(y, \gamma, \alpha)$  має вигляд [5, стор.27]

$$f(y, \gamma, \alpha) = \mp \left[ (\gamma + \alpha)(e^{-y} - 1) + (\gamma^{-1} + \alpha)(e^y - 1) + (\gamma - \gamma^{-1})y \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

$$L_D = \left( \frac{\varepsilon \varepsilon_0 k T}{2\pi q^2 n_i} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

де  $\varepsilon, \varepsilon_0$  – діелектричні сталі напівпровідника і вакууму,  $k$  – стала Больцмана,  $n_i$  - концентрація електронів у власному напівпровіднику,  $L_D$  – відстань проникнення електричного поля у власний напівпровідник,  $T$  – абсолютна температура. Слід зауважити, що у формулі (5) від'ємний знак попереду квадратної дужки відповідає позитивним, а позитивний знак – від'ємним значенням безрозмірного електростатичного потенціалу. Підстановка виразів (3) і (4) у рівняння (2) описує питомий активний опір напівпровідникового сенсора газу

$$R_{S(y_s, \gamma, \alpha)} = \left[ \frac{1}{2} q n_i \mu_m L_D \int_{y_s}^0 \frac{(\gamma + \alpha)(e^{-y} - 1) + b_s (\gamma^{-1} + \alpha)(e^y - 1)}{f(y, \gamma, \alpha)} dy \right]^{-1}, \quad (7)$$

де  $b_s = \mu_{ns} / \mu_{ps}$  – відношення рухливостей електронів і дірок. Інтеграл у виразі (7) не має розв'язку в аналітичному вигляді і повинен розраховуватися чисельно, проте при значній величині поверхневого потенціалу  $y_s$  для електронного напівпровідника інтеграл приймає приблизне значення, при цьому питомий приповерхневий опір має вигляд

$$R_{sn} = \left[ q \mu_{ns} n_0 L_D (\gamma^{-1} + \alpha)^{\frac{1}{2}} e^{\frac{1}{2} y_s(w)} \right]^{-1}, \quad (8)$$

а для діркового напівпровідника при значних від'ємних величинах поверхневого потенціалу  $y_s$  приповерхневий активний питомий опір описується виразом

$$R_{sp} = \left[ q \mu_{ps} p_0 L_D (\gamma + \alpha)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{1}{2} y_s(w)} \right]^{-1}, \quad (9)$$

де  $w$  – концентрація діючих газів на сенсор. Аналіз залежності приповерхневого активного питомого опору від поверхневого потенціалу для електронного напівпровідника показує, що при значних позитивних значеннях  $y_s$ , коли в приповерхневому шарі збагачення існує великий надлишок електронів, то цей надлишок електронів буде визначати приповерхневий опір, який експоненціально залежить від показника, що дорівнює половині величини  $y_s$ . При зменшенні  $y_s$  спочатку спостерігається зростання приповерхневого опору за цим законом. В області малих позитивних значень  $y_s$  зростання активного опору уповільнюється, оскільки в заряді шару просторового заряду все більшу роль починають грати заряд іонізованих донорів.

Перейдемо до визначення питомої ємності ( $\text{пФ}/\text{см}^2$ ) приповерхневого шару просторового заряду напівпровідникового сенсора газу. Зв'язок між зарядом і потенціалом є нелінійним, що обумовлює диференційну ємність шару просторового заряду. З розв'язку рівняння Пуассона і загального визначення ємності отримуємо значення питомої ємності просторового заряду [5, стор.42]

$$C_{\text{пр.зар}} = \frac{q^2 n_i L_D [(\gamma^{-1} + \alpha)e^{y_s(w)} - (\gamma + \alpha)e^{-y_s(w)} + (\gamma - \gamma^{-1})]}{2kTf(y_s(w), \gamma, \alpha)}. \quad (10)$$

Для власного напівпровідника, коли  $\gamma = 1$  і  $\alpha = 0$ , вираз (10) значно спрощується

$$C_{\text{пр.зар}} = \frac{1}{2} \frac{q^2 n_i L_D [e^{y_s(w)} - e^{-y_s(w)}]}{kT [(e^{y_s(w)} - e^{-y_s(w)} + 2)^{\frac{1}{2}}]}. \quad (11)$$

Аналіз формули (11) показує, що диференційна ємність просторового заряду приймає мінімальне значення при  $y_s = 0$ , коли відсутній вигин енергетичних зон. Її величина зростає як при позитивних, так і при від'ємних значеннях поверхневого потенціалу. При значеннях  $y_s \geq 3$  диференційна ємність зростає пропорційно  $\exp(\frac{1}{2}y_s)$ . У випадку домішкових зразків напівпровідника сенсора газу залежність  $C_{\text{пр.зар}}$  від поверхневого потенціалу  $y_s(w)$  має аналогічний характер.

Підстановка формул (8) і (11) для напівпровідника з електронним типом провідності газового сенсора у вираз (1) дозволяє отримати залежність його повного опору від поверхневого потенціалу, який, в свою чергу, однозначно залежить від концентрації вимірюваних газів. Теоретичну залежність питомої ємності і питомої провідності від поверхневого потенціалу для різних напівпровідників з різним типом провідності подано в роботі [5, стор. 43, 59]. Теоретичну і експериментальну залежність вихідної частоти від зміни концентрації

газів можливо отримати на основі автогенераторного приладу, схему якого подано на рис. 1 [6–8].

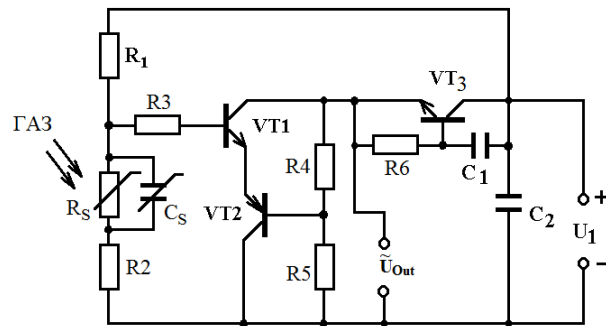


Рис. 1 Електрична схема автогенераторного перетворювача газу на основі двох біполярних транзисторів з активним індуктивним елементом

Створення перетворювача концентрації газу з частотним вихідним сигналом у вигляді інтегральної схеми потребує застосування плівкової технології для виготовлення пасивного індуктивного елемента у вигляді спіралі, проте її добротність має невелике значення і, по друге, її розміри на частотах до  $10^6$  Гц несумісні з розмірами інтегральної схеми перетворювача. Тому для вирішення цієї задачі запропоновано використати індуктивний характер повного опору біполярного транзистора з  $RC$  – колом, яке легко виконується у вигляді інтегральної схеми [9]. Біполярні транзистори  $VT1$ ,  $VT2$  і  $VT3$  реалізують автогенератор електричних коливань, в якому коливальний контур утворений ємнісною складовою повного опору на електродах колектор – колектор біполярних транзисторів  $VT1$  і  $VT2$  та індуктивною складовою повного опору на електродах емітер – колектор біполярного транзистора  $VT3$ . На електродах колектор – колектор транзисторів  $VT1$  і  $VT2$  існує від'ємний диференційний опір, який реалізується на спадаючій ділянці вольт – амперної характеристики перетворювача. Сама вольт – амперна характеристика розраховується на основі еквівалентної схеми пристрою для постійного струму з системи рівнянь Кірхгофа. Спадаюча ділянка лежить в діапазоні від 3В до 16В при зміні струмів від 1мА до 8,5 мА. Від'ємний диференційний опір перетворює енергію постійного електричного поля в енергію змінного електричного поля, що дозволяє компенсувати втрати енергії в коливальному контурі перетворювача.

Функція перетворення, що описує залежність вихідної частоти перетворювача від зміни концентрації газу, визначається на основі нелінійної еквівалентної схеми по змінному струму, вихо-

дючи з електричної схеми (рис. 1). З системи рівнянь Кірхгофа, що складені на основі нелінійної еквівалентної схеми перетворювача по змінному струму, розраховується повний вихідний опір на електродах колектор - колектор транзисторів VT1 і VT2. Систему рівнянь Кірхгофа було розв'язано за допомогою пакету прикладних програм Matlab 9.2 [10], що дозволило отримати значення повного вихідного опору, активна складова якого має від'ємне значення, а реактивна складова – емнісний характер. З рівняння, коли реактивна складова дорівнює нулю, визначаємо залежність вихідної частоти  $F_0(w)$  перетворювача від концентрації газу, яка має вигляд

$$F_0(w) = \frac{1}{(12)^2 \pi R_g(w) C_{ekv}(w)} \left[ \frac{R_g^2(w) C_{ekv}(w)}{L} - 1 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (12)$$

де  $R_g(w)$  – диференційний від'ємний опір коливального контуру,  $C_{ekv}(w)$  – еквівалентна емність коливального контуру,  $L$  – величина активної індуктивності,  $w$  - концентрація вимірюваного газу. На рис. 2 подано залежність вихідної частоти автогенераторного перетворювача від зміни концентрації газу метану  $CH_4$ . Газочутливим елементом був сенсор фірми Figaro ( Японія).

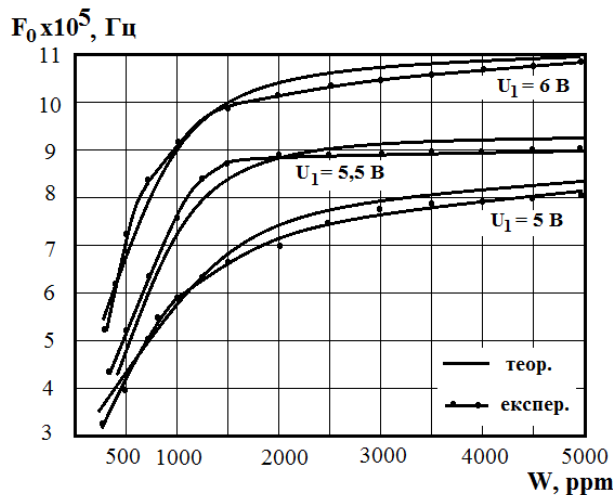


Рис. 2. Теоретична і експериментальна залежності вихідної частоти автогенераторного перетворювача від концентрації метану

Чутливість перетворювача визначається на основі виразу (12) шляхом диференціювання його по аргументу  $w$  і описується формулою

$$S_{F_0}^w = \frac{R_g(w) C_{ekv}(w) \frac{dR_g(w)}{dw} + R_g^2(w) \frac{dC_{ekv}(w)}{dw}}{4\pi R_g(w) C_{ekv}(w) L \left[ \frac{R_g^2(w) C_{ekv}(w)}{L} - 1 \right]^{\frac{1}{2}}} - \frac{\left[ \frac{R_g^2(w) C_{ekv}(w)}{L} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \frac{dR_g(w)}{dw}}{2\pi R_g^2(w) C_{ekv}(w)} - \frac{\left[ \frac{R_g^2(w) C_{ekv}(w)}{L} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \frac{dC_{ekv}(w)}{dw}}{2\pi R_g(w) C_{ekv}^2(w)}. \quad (13)$$

Як показали розрахунки, згідно формули (13), чутливість пристрою складала в діапазоні від 300 ppm до 1000 ppm 260 Гц/ppm, а в діапазоні від 1000 ppm до 5000 ppm – 115 Гц/ppm. Необхідні значення параметрів для теоретичних розрахунків було отримано з робіт [11-14].

### Висновки.

Аналіз фізичних процесів на поверхні напівпровідникових сенсорів газу показав, що у формуванні приповерхневого шару просторового заряду відіграють надлишкові рухомі носії заряду – електрони та дірки, тому питомий поверхневий опір визначається їх концентрацією, яка помножена на відповідні рухливості та елементарний заряд. З другого боку, зміна заряду в шарі просторового заряду при зміні поверхневого електростатичного потенціалу характеризується введенням поняття диференціальної емності шару просторового заряду. Таким чином, повний опір напівпровідникових сенсорів газу складається з паралельного з'єднання емності приповерхневого шару просторового заряду і приповерхневого опору.

Зміна повного опору первинних напівпровідникових сенсорів газу від зміни концентрації вимірюваних газів характеризує газореактивний ефект сенсорів, який однозначно змінює вихідну частоту автогенераторних перетворювачів газу. Визначено функцію перетворення і рівняння чутливості пристрою, причому чутливість складала 260 Гц/ppm в діапазоні від 300 ppm до 1000 ppm, а в діапазоні від 1000 ppm до 5000 ppm – 115 Гц/ppm.

### Список літератури:

1. Мікроелектронні сенсори фізичних величин / В. Вуйцик, З.Ю. Готра, О.З. Готра та ін.; за ред. З. Ю. Готри. Львів: Ліга-прес, 2002. Т.2. 475 с.
2. Арутюнян В.М. Микроэлектронные технологии – магистральный путь для создания химических твердотельных сенсоров. *Микроэлектроника*. 1991. № 4. С. 337–355.
3. Новицкий П.В., Кноринг В.Г., Гутников В.С. Цифровые приборы с частотными датчиками. Ленинград: Энергия, 1970. 424 с.
4. Проблемы физики полупроводников. Сборник статей (перевод с английского) / под ред. В.Л. Бонч-Бруевича. Москва: Изд. Иностранная литература, 1957. 628 с.
5. Ржанов А.В. Электронные процессы на поверхности полупроводников. Москва: Изд. Наука, 1971. 480 с.

6. Осадчук В. С., Осадчук О.В., Прокопова М.О. Математична модель мікроелектронного частотного газового перетворювача. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2003. № 4. С. 94–98.
7. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S. Radiomeasuring Microelectronic Transducers of Physical Quantities. Proceedings of the International Siberian Conference on Control and Communications. (Omsk, 21–23 May 2015). Omsk, 2015. 978-1-4799-7103-9/15. DOI: 10.1109/SIBCON. 2015.7147167
8. Osadchuk A., Osadchuk V., Seletska O., Krylik L. Microelectronic Transducer of Gas Concentration based on MOSFET with an Active Inductive Element. *PRZEGLAD ELEKTROTECHNICZNY*. 2019. № 4. P. 237–241.
9. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем. Вінниця: Універсум–Вінниця, 1999. 276 с.
10. Дьяконов В. П. MATLAB. Полный самоучитель. Москва: ДМК Пресс, 2012. 768 с.
11. Хайнеман Р. Визуальное моделирование электронных схем в PSPICE: учеб. пособие. Москва: ДМК–Пресс, 2008. 336 с.
12. User's Guide includes PSPICE A/D, PSPICE A/D Basics and PSPICE Cadence Design Systems. Inc. All rights reserved, 2016. 898 p.
13. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Москва: Мир, 1984. Т. 2. 486 с.
14. Росадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника / под ред. В. А. Терехова. Москва: Высшая школа, 1991. 351 с.

### **ВЛИЯНИЕ ГАЗОРЕАКТИВНОГО ЭФФЕКТА ПЕРВИЧНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СЕНСОРОВ ГАЗА НА ВЫХОДНУЮ ЧАСТОТУ АВТОГЕНЕРАТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

*В работе рассмотрен механизм образования полного сопротивления полупроводниковых сенсоров газа, в которых активная составляющая определяется приповерхностным удельным сопротивлением, а реактивная составляющая – приповерхностной удельной емкостью. Зависимость величины полного сопротивления от изменения концентрации измеряемых газов характеризует суть газореактивного эффекта сенсоров, что однозначно изменяет выходную частоту автогенераторных преобразователей газа. Определены функции преобразования и уравнения чувствительности автогенераторного преобразователя газа, причем чувствительность устройства в диапазоне от 300 ppm до 1000 ppm составляет 260 Гц/ppm, а в диапазоне от 1000 ppm до 5000 ppm – 115 Гц/ppm.*

**Ключевые слова:** автогенераторный преобразователь газа, газореактивный эффект, реактивные свойства полупроводников, полное сопротивление.

### **INFLUENCE OF THE GAS-REACTIVE EFFECT OF PRIMARY SEMICONDUCTOR GAS SENSORS ON THE OUTPUT FREQUENCY OF AUTOGENERATOR TRANSDUCERS**

*The paper considers the mechanism of formation of the impedance of semiconductor gas sensors, in which the active component is determined by the surface resistance, and the reactive component is determined by the surface capacitance. The dependence of the magnitude of the impedance on changes in the concentration of active gases characterizes the essence of the gas-reactive effect of the sensors, which unambiguously changes the output frequency of autogenerating gas transducers. The conversion functions and the sensitivity equations of an autogenerating gas transducer have been determined, with the device sensitivity ranging from 300 ppm to 1000 ppm being 260 Hz/ppm, and ranging from 1000 ppm to 5000 ppm – 115 Hz/ppm.*

**Key words:** autogenerating gas transducer, gas-reactive effect, reactive properties of semiconductors, impedance.